تأثیر تلقیح میکوریزا و کود فسفر بر مقاومت گیاه شنبلیله به آرسنیک

محمدرضا اصغری‌پور[1*] و مدینه بیژنی[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۷/۲۵ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۴/۱۱)

چکیده

هدف از این مطالعه، ارزیابی تأثیر میکوریزا و فسفر بر سمیت و قابلیت جذب آرسنیک توسط شنبلیله، پس از افزودن آرسنیک به خاک، بود. در این مطالعه گلخانه‌ای، گیاهانی که با سه گونه میکوریزا در خاک‌هایی با سطوح مختلف آرسنیک و فسفر کاشته شده بودند مقایسه شدند. سمیت آرسنیک برای گیاهان بررسی و تجمع آرسنیک در بافت‌ها، همچنین جذب عناصر پرمصرف و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی تعیین گردید. بر اساس نتایج، افزودن آرسنیک به طور معنی‌داری رشد، جذب عناصر غذایی و رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه را کاهش داد. مقادیر زیادی آرسنیک در بافت‌های گیاهان تجمع یافت. بیشترین آرسنیک جذب شده در ریشه حفظ شد و ریشه‌ها غلظت آرسنیک بیشتری نسبت به شاخساره داشتند. فسفر و میکوریزا نیز بجز بر غلظت سدیم، بر سایر صفات تأثیر معنی‌داری داشتند. در این بررسی، اثر متقابل بین آرسنیک و فسفر و بین آرسنیک و میکوریزا بر غلظت کاروتنوئیدها، پتاسیم و آرسنیک شاخساره معنی‌دار بود. فسفر و میکوریزا نقش تعدیل کننده و کاهنده اثر منفی سمیت آرسنیک را بر این خصوصیات دارا بودند. نتایج این آزمایش نشان داد که کود فسفر و همزیستی میکوریزایی در شنبلیله می‌تواند از طریق افزایش جذب عناصر و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در کاهش اثرهای منفی تنش آرسنیک مؤثر باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش فلزات سنگین، عناصر غذایی، کلروفیل، کود زیستی

مقدمه

در سال‌های اخیر آلودگی منابع آب و خاک با آرسنیک (As) تبدیل به یک نگرانی جهانی شده است (۴ و ۱۸). آلودگی خاک با آرسنیک به علت فعالیت‌های استخراج معادن، ذوب سنگ معدن سولفید، استفاده از علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و نگهدارنده‌های چوب دارای ترکیبات آرسنیک و آبیاری با آب زیرزمینی آلوده به آرسنیک رخ داده است (۳۰). وجود آرسنیک در خاک یا آب آبیاری سبب ایجاد اختلال در رشد و نمو گیاهان شده و عملکرد محصولات را کاهش می‌دهد. کاهش عملکرد و کیفیت مواد غذایی، همراه با کاهش اعتماد مصرف کنندگان به محصولات کشاورزی، منجر به بروز خسارت‌های اقتصادی می‌شود (۳۱). لذا، اصلاح خاک و آب برای حفظ سلامتی بشر و تولیدات کشاورزی ضروری است.

آرسنیک برای گیاهان سمی است ولی در غالب گونه‌ها به میزان اندکی تجمع پیدا می‌کند. به عنوان مثال، گیاهان علفی، آرسنیک را به میزان ۰/۰۲ تا ۰/۱۶ میلی‌گرم در کیلوگرم تجمع می‌دهند (۱۸). گونه‌های مختلف دارای حساسیت‌های مختلفی به آرسنیک می‌باشند و در این بین، لگوم‌ها به عنوان گونه‌های بسیار حساس شناخته می‌شوند (۴). آرسنیک و فسفر دارای شباهت‌های شیمیایی می‌باشند و برای جذب توسط ناقل‌ها و حامل‌های غشایی با هم رقابت می‌کنند (۴ و ۳۶). در بسیاری از گونه‌ها، جذب آرسنیک به سیتوپلاسم سلول‌های ریشه از طریق

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m_asgharipour@yahoo.com

حامل‌های فسفات روی غشای پلاسمالمایی انجام می‌شود (۲۱). همچنین، فسفر، به علت تشابهات فیزیکوشیمیایی با آرسنیک، نقش برجسته‌ای در اثرهای متقابل آرسنیک در منطقه ریشه دارد (۴). در خاک‌های آلوده با آرسنیک افزودن فسفر به خاک می‌تواند آرسنیک را از مکان‌های جذب خارج کند و آبشویی آن را از خاک سطحی افزایش دهد (۲۳). آرسنیک می‌تواند تا اندازه‌ای از کلوئیدهای خاک توسط فسفات حذف شود. با این حال، حتی مقادیر زیاد فسفات نیز نمی‌تواند تمام آرسنیک جذب شده را دفع کند (۳۰ و ۳۶).

قارچ‌های آربوسکولار مایکوریزا (AMF) به علت توانایی بهبود وضعیت سلامتی و رشد گیاه تحت شرایط تنش به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۱۶). مطالعات نشان می‌دهد که AMF علاوه بر بهبود وضعیت فسفر و جذب برخی عناصر ضروری، غالباً از گیاهان در مقابل فلزات غیر ضروری حفاظت می‌کند (۳۱). به علت تشابه زیاد رفتار شیمیایی آرسنات و فسفات، به نظر می‌رسد که AMF می‌تواند پویایی آرسنیک در خاک را نیز تحت تأثیر قرار دهد.

در گیاهان تلقیح شده با مایکوریزا، ناقلین فسفات مایکوریزایی فعال شده (۱۷ و ۲۶) و سبب انسداد مسیرهای جذب مستقیم در ریشه‌های گیاه می‌شوند (۳۰). سرکوب فعالیت ناقلین فسفات در ریشه‌های گیاه می‌تواند تحمل به افزایش آرسنیک را در گیاه افزایش دهد (۱۴). افزون بر این، با بهبود وضعیت فسفر در گیاه میزبان، AMF رشد گیاه را بهبود می‌دهد، که سبب رقیق شدن غلظت آرسنیک در بافت‌های گیاه می‌شود (۷، ۱۰ و ۱۴). با این حال، سویه‌های مختلف AMF مناطق مختلف، پاسخ متفاوتی در برابر آرسنیک نشان می‌دهند.

گرچه مطالعات بسیاری نشان می‌دهند که AMF می‌تواند غلظت آرسنیک در گیاهان را کاهش داده و خسارت آن را کم کند، با این حال اطلاعات اندکی در خصوص نقش AMF در تعاملات As/P در سطوح مختلف فراهمی P، در خاک‌های آلوده شده با آرسنیک به طور طبیعی روابط خاک- گیاه وجود دارد. در سال‌های اخیر کاربرد AMF با هدف بهبود بهره‌وری گیاه در حال رشد است. مطالعه ترکیب عملیات کشاورزی نظیر کاربرد کود با تلقیح مایکوریزا برای تولید موفقیت‌آمیز محصولات غذایی، سلامتی بشر و احیای مؤثر مکان‌های آلوده سودمند است. بنابراین، این مطالعه با استفاده از گونه خوراکی شنبلیله در خاک‌های آلوده شده به طور مصنوعی با هدف مقایسه اثرهای کاربرد کود فسفر و تلقیح AMF بر رشد گیاه و جذب As و P اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در زمستان ۱۳۹۱ و بهار ۱۳۹۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زابل اجرا شد. اقلیم محل اجرای آزمایش، گرم و خشک می‌باشد.

این آزمایش به صورت فاکتوریل سه فاکتوره (تلقیح با قارچ میکوریزا، آرسنیک و فسفر) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به اجرا در آمد. تلقیح با میکوریزا در چهار سطح (تلقیح با گونه‌های *Glomus mosseae*، *G. intraradices* و *versiform* .*G* و شاهد بدون تلقیح)، عامل آرسنیک در سه سطح (افزودن آرسنیک به مقدار صفر، ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و عامل فسفر در دو سطح (افزودن فسفر به مقدار صفر و ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به شکل کود سوپر فسفات تریپل) بود. نمونه خاک مورد استفاده در این مطالعه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک مزرعه پژوهشکده کشاورزی دانشگاه زابل تهیه شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور تعیین خصوصیات شیمیایی خاک، نمونه خاک پس از هواخشک شدن از الک عبور داده شد. pH با کمک دستگاه pH سنج و هدایت الکتریکی توسط دستگاه EC متر در عصاره گل اشباع اندازه‌گیری شد. کربن آلی به روش والکلی و بلک (۵)، نیتروژن کل به روش کلدال (۶)، فسفر قابل جذب به روش اولسون (۲۰) و پتاسیم قابل جذب از روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و به کمک دستگاه فلیم فتومتر (مدل Jenway-PFP۷) تعیین شد. عناصر آهن، روی و منگنز خاک به وسیله

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

EC	pH	N کل	کربن آلی	P قابل دسترس	K قابل دسترس	Fe کل	Zn کل	Mn کل	بافت خاک
(dS/m)		(٪)		(mg/kg)					
۲/۲	۷/۸	۰/۰۳	۰/۲۹	۱۲	۲۵۰	۸	۴	۳	لوم رسی

محلول حاوی کلر و کلسیم استخراج گردیده و با دستگاه طیف سنج جذب اتمی مدل Shimadzu (AA-670) در طیف خاص هر عنصر اندازه‌گیری شدند (۱۹).

جهت تهیه غلظت‌های مختلف آرسنیک از نمک دی سدیم آرسنات ($AsHNa_2O_4$) استفاده شد. خاک در گلدان‌های پلاستیکی به مدت حدود ۵ ماه در دوره‌های خشک- مرطوب متوالی در دمای اتاق خوابانده شدند. در هر دوره خشک- مرطوب شدن، خاک گلدان‌ها اشباع و بعد اجازه داده شد تا هواخشک گردد، به طوری که رطوبت خاک به حد نسبتاً ثابتی برسد. هر دوره خشک- مرطوب ۴۰ روز طول کشید و بعد از هر دوره، خاک گلدان‌ها به منظور ایجاد یکنواختی در غلظت آرسنیک کاملاً مخلوط می‌گردید. پس از انجام واکنش‌ها، خاک‌های آلوده به آرسنیک دو بار (با یک هفته فاصله) با دستگاه اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس و فشار ۱/۵ اتمسفر به مدت ۲ ساعت در داخل کیسه‌های کنفی ضدعفونی شدند.

آزمایش گلدانی در ۲۰ بهمن ماه ۱۳۸۹ آغاز و در ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۰ پایان یافت. دمای حداقل و حداکثر گلخانه ۱۵ و ۳۰ درجه سلسیوس بود. جهت جلوگیری از آلودگی‌های احتمالی قارچی، بذرهای شنبلیله (توده بومی زابل) به مدت دو دقیقه در محلول هیپوکلریت سدیم ۱٪ قرار گرفتند. سپس به ترتیب توسط آب معمولی و آب مقطر شستشو داده شدند. برای انجام این آزمایش، از گلدان‌هایی با قطر دهانه ۲۶ و ارتفاع ۲۸ سانتی‌متر استفاده گردید. به منظور جلوگیری از آبشویی آرسنیک، از گلدان‌های بدون زهکش استفاده شد. در هر گلدان، مقدار ۳ کیلوگرم خاک با مشخصات ذکر شده، به همراه سطوح کود فسفر (صفر و ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) به صورت محلول، مخلوط شد. قارچ‌های میکوریزا از شرکت زیست فناوران توران شاهرود تهیه شده و قبل از کاشت، خاک رویی گلدان به اندازه سه تا چهار برابر عمق کاشت بذر کنار زده و مقدار ۵۰ گرم قارچ به خاک گلدان اضافه گردید. تعداد پروپاگول‌های مایه تلقیح مورد استفاده ۱۰۸ عدد در هر گرم ماده حامل بود. میزان رطوبت گلدان‌ها، با آبیاری روزانه، در حدود ۸۵٪ ظرفیت زراعی نگه داشته شد. پس از انجام مراحل اولیه رشدی، تعداد بوته‌های هر گلدان به ۵ عدد رسانیده شد. در طول آزمایش، کنترل علف‌های هرز با دست انجام شد و آفت و بیماری خاصی مشاهده نگردید. در پایان دوره رشد و در آغاز دوره گل‌دهی، بوته‌ها برداشت شدند. خصوصیات مورفولوژیک مانند تعداد برگ در بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، ارتفاع بوته و قطر ساقه اصلی اندازه‌گیری شد. سپس بوته‌های برداشت شده به اندام‌های هوایی و ریشه تقسیم شدند و در ۷۰ درجه سلسیوس خشک شده و توزین گردیدند.

برای اندازه‌گیری رنگدانه‌های فتوسنتزی، ۰/۲ گرم از برگ‌های جوان در ۱۰ میلی‌لیتر استون ۱۰۰٪ قرار داده شد و در سرعت ۱۶۰۰ دور در دقیقه به مدت ده دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس مقدار کلروفیل a در طیف جذبی ۶۶۳/۲ نانومتر، مقدار کلروفیل b در ۶۴۶/۸ نانومتر و مقدار کاروتنوئیدها در ۴۹۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر قرائت و به کمک فرمول لیختن‌تالر و ولبرن، بر اساس میلی‌گرم کلروفیل در گرم برگ تازه، محاسبه شد (۹).

برای اندازه‌گیری عناصر گیاه، نمونه‌ها در آون در دمای ۶۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک و پس از

توزین توسط آسیاب برقی پودر شدند. یک گرم ماده خشک اندام هوایی گیاهی در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شده و خاکستر حاصل در ۵ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۲ نرمال حل شد. پس از صاف نمودن با کاغذ صافی، حجم نهایی محلول با استفاده از آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. غلظت عناصر سدیم و پتاسیم توسط دستگاه فلیم فتومتر، غلظت فسفر به روش وانادات (۱)، غلظت نیتروژن به روش میکروکلدال و غلظت آرسنیک با دستگاه جذب اتمی (Pu9100x-Philips) اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها از طریق نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱، مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح ۵٪ و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام گرفت.

نتایج و بحث

رشد رویشی

نتایج پارامترهای بررسی شده رشد رویشی گیاه (تعداد برگ در بوته، تعداد شاخه فرعی در بوته، سطح برگ، ارتفاع بوته و قطر ساقه) تحت تأثیر کاربرد مایکوریزا، فسفر و سمیت آرسنیک و اثرهای متقابل در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. تمام پارامترهای رشدی گیاه (به استثنای قطر ساقه) تحت تأثیر کاربرد مایکوریزا، فسفر و سمیت آرسنیک قرار گرفت ($p\leq0.01$). با این حال، اثر متقابل دوگانه و اثر متقابل سه‌گانه بر خصوصیات رشدی گیاه معنی‌دار نشد (جدول ۲).

پارامترهای رشدی مورد بررسی بین عدم کاربرد و کاربرد ۲۵۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌داری داشت، و این پارامترها با کاربرد فسفر نسبت به عدم کاربرد افزایش یافت. در بین پارامترهای رشدی، بیشترین افزایش را سطح برگ (۵۶/۰ درصد) داشت و پس از آن ارتفاع ساقه (۱۳/۰ درصد)، تعداد برگ در بوته (۸/۹ درصد)، تعداد شاخه در بوته (۵/۸ درصد) و قطر ساقه (۴/۹ درصد) قرار داشتند. همچنین، پارامترهای رشدی میان گیاهان تلقیح شده با گونه‌های مختلف مایکوریزا به طور معنی‌داری متفاوت بود. گونه مایکوریزا *G. intraradices* بوته‌های بزرگتری (تعداد برگ در بوته ۲۰/۲۷، تعداد شاخه فرعی در بوته ۷/۰۸، سطح برگ در بوته ۳/۸۹ سانتی‌متر مربع و ارتفاع ساقه ۱۷/۵۳ سانتی‌متر) را در مقایسه با سایر گونه‌های مایکوریزا و عدم تلقیح تولید کرد. گیاهان تلقیح شده با این گونه دارای ۲۱/۲ درصد تعداد برگ در بوته، ۶/۵ درصد تعداد شاخه فرعی در بوته، ۱۸/۶ درصد سطح برگ در بوته و ۱۰/۹ درصد ارتفاع بوته بیشتر در مقایسه با گیاهان تلقیح نشده با مایکوریزا بودند.

همزیستی میکوریزا از طریق افزایش جذب عناصر غذایی سبب بهبود رشد و نمو گیاهان میزبان می‌شود (۲۷ و ۳۳). اثر افزایش خصوصیات رشدی در گشنیز و نعناع در شرایط کاربرد میکوریزا توسط دیگر محققین نیز گزارش شده است (۱۲ و ۱۵).

کاهش معنی‌داری در تمام پارامترهای رشدی گیاه با افزایش مقدار آرسنیک مخلوط شده با خاک مشاهده شد، به طوری که در میان تیمارهای اختلاط خاک گلدان با آرسنیک، کمترین رشد در گیاهان کاشته شده در گلدان‌هایی که خاک آنها با مقدار ۳۰ میلی‌گرم آرسنیک در کیلوگرم خاک تیمار شده بودند، مشاهده شد. بر اساس نظر محققین، افزایش تنش آرسنیک ممکن است باعث تحلیل برگ و ساقه شود (۴). علاوه بر این، کاهش ارتفاع بوته و سطح برگ در شرایط تنش آرسنیک ناشی از کاهش تقسیم و گسترش سلولی می‌باشد (۷). بنابراین، کاهش پارامترهای رشدی در اثر تیمار آرسنیک در مطالعه حاضر را می‌توان به بازدارندگی از تقسیم سلولی منطقه مریستمی و رشد سلول‌های منطقه رشد مرتبط دانست. گزارش‌های موجود در خصوص واکنش خصوصیات رشدی گیاهان نسبت به تنش آرسنیک نتایج مشابهی را نشان می‌دهد (۷ و ۳۰). از آثار منفی آرسنیک بر گیاهان، اختلال در جذب آب است که نتیجه آن کاهش فشار تورگر می‌باشد. بنابراین، با کاهش قابلیت ارتجاعی دیواره سلولی، کوچک شدن سلول‌ها و کاهش فضای بین سلولی در گیاهان تحت تنش با آرسنیک محتمل خواهد بود (۳۰).

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس خصوصیات رشدی شنبلیله

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		تعداد برگ در بوته	تعداد شاخه فرعی در بوته	سطح برگ در بوته	ارتفاع ساقه	قطر ساقه
میکوریزا (A)	۳	۹/۵۳ **	۰/٦۷ **	۱/۲۷ *	۹/۹۷ **	۰/۱۵ ns
آرسنیک (B)	۲	۸۰/۸۸ **	۱۳/۱۵ **	۲/۹۵ **	۲۷۰/۰۸ **	۰/۴۴ ns
فسفر (C)	۱	۵۰/۰۰ **	۲/۷٦ **	۱۳۴/۲۸ **	۷٦/۵۰ **	۰/۰۸ ns
A×B	٦	۱/۳۷ ns	۰/۲۰ ns	۰/۰۹ ns	۲/٦۳ ns	۰/۲۱ ns
A×C	۳	۰/۷۴ ns	۰/۰٦ ns	۰/۵۷ ns	۱/۳۹ ns	۰/۲۵ ns
B×C	۲	۳/۱٦ ns	۰/۳۸ ns	۰/۹۰ ns	۴/۸۰ ns	۰/۰٦ ns
A×B×C	٦	۰/۳۵ ns	۰/۰۹ ns	۰/۰۸۸ ns	۰/۸۸ ns	۰/۲۷ ns
E	۴۸	۱/۲۳	۰/۱۴	۰/۳۸	۱/٦۴	۰/۲۱
CV (٪)	–	۵/٦٦	۵/۵۳	۱۷/۰۳	۷/٦۲	۳۱/۹٦

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

جدول ۳. مقایسه میانگین خصوصیات رشدی شنبلیله

تیمار	تعداد برگ در بوته	تعداد شاخه فرعی در بوته	سطح برگ در بوته (سانتی‌متر مربع)	ارتفاع ساقه (سانتی‌متر)	قطر ساقه (میلی‌متر)
		گونه‌های میکوریزا			
شاهد	۱٦/۷۲ b	٦/٦۵ b	۳/۲۸ b	۱۵/۸۰ b	۱/۴۷a
G. mosseae	۱۷/۳۹ b	٦/۸٦ ab	۳/٦۴ ab	۱٦/۷۸ a	۱/۵٦ a
G. intraradices	۲۰/۲۷ a	۷/۰۸ a	۳/۸۹ a	۱۷/۵۳ a	۱/۳۳ a
G. versiform	۲۰/۲۰ a	۷/۰۳ a	۳/۷۹ a	۱۷/۱٦ a	۱/۴۴ a
		آرسنیک			
شاهد	۲۱/۴۱ a	۷/٦۲ a	۴/۰۴ a	۲۰/۱۸ a	۱/۳۱ a
۱۵ mg/kg	۱۹/۷۵ b	٦/۹۵ b	۳/۵۵ b	۱٦/۷۹ b	۱/۵۸ a
۳۰ mg/kg	۱۷/۷۵ c	٦/۱۵ c	۳/۳٦ b	۱۳/۴۷ c	۱/۴٦ a
		فسفر			
شاهد	۱۸/۸۰ b	٦/۷۱ b	۳/۰۹ b	۱۵/۷۹ b	۱/۴۲ a
۲۵۰ mg/kg	۲۰/۴۷ a	۷/۱۰ a	۴/۸۲ a	۱۷/۸۵ a	۱/۴۹ a

در هر ستون، اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند.

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس غلظت کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدهای برگ شنبلیله

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		کلروفیل a	کلروفیل b	کلروفیل کل	کاروتنوئیدها
میکوریزا (A)	۳	۹/۱۰**	۰/۰۲**	۹/۶۲**	۰/۲۵**
آرسنیک (B)	۲	۳۹/۱۵**	۰/۱۱**	۴۳/۵۵**	۱/۲۳**
فسفر (C)	۱	۳۰/۸۱**	۰/۰۳**	۳۲/۱۹**	۰/۴۲**
A×B	٦	۰/۹۳^{ns}	۰/۰۰۳^{ns}	۰/۹۱^{ns}	۰/۰۲۹**
A×C	۳	۰/۱۴^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۱۵ ^{ns}	۰/۰۰۵ ^{ns}
B×C	۲	۲/۸۳ ^{ns}	۰/۰۰۳ ^{ns}	۳/۰۴ ^{ns}	۰/۰۵٦ **
A×B×C	٦	۰/۱۰ ^{ns}	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۹ ^{ns}	۰/۰۰۵ ^{ns}
E	۴۸	۱/۴۰	۰/۰۰۲	۱/۳۸	۰/۰۰٦
CV (٪)	–	۱۱/۳۴	۱/۰۵	۷/۹۳	۴/۴٦

**، * و ns به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

جدول ۵. مقایسه میانگین کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کاروتنوئیدهای برگ شنبلیله

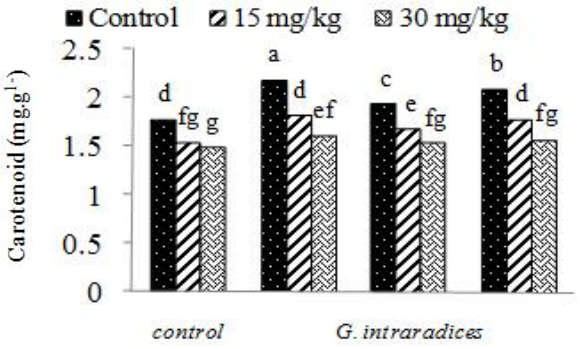
تیمار	کلروفیل a (mg/g)	کلروفیل b (mg/g)	کلروفیل کل (mg/g)	کاروتنوئیدها (mg/g)
		گونه‌های میکوریزا		
شاهد	۹/۴۴ b	۴/۳۰c	۱۳/۷۵b	۱/۶۰d
G. mosseae	۱۰/۵۰a	۴/۳۹a	۱۴/۹۰a	۱/۸۷a
G. intraradices	۱۰/۸۲a	۴/۳۴b	۱۵/۱۷a	۱/۷۱c
G. versiform	۱۱/۰۵a	۴/۳۴b	۱۵/۳۹a	۱/۸۱b
		آرسنیک		
شاهد	۱۱/۸۵a	۴/۲۸a	۱۶/۲۸a	۱/۹۹a
۱۵ mg/kg	۱۰/۱۵b	۴/۳۳b	۱۴/۴۹b	۱/۷۷b
۳۰ mg/kg	۹/۳۵c	۴/۲۲a	۱۳/۶۴c	۱/۵۴c
		فسفر		
شاهد	۹/۸۰b	۴/۳۲b	۱۴/۱۲b	۱/٦۷b
۲۵۰ mg/kg	۱۱/۱۱a	۴/۳۷a	۱۵/۴۸a	۱/۸۲a

در هر ستون، اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند.

غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی

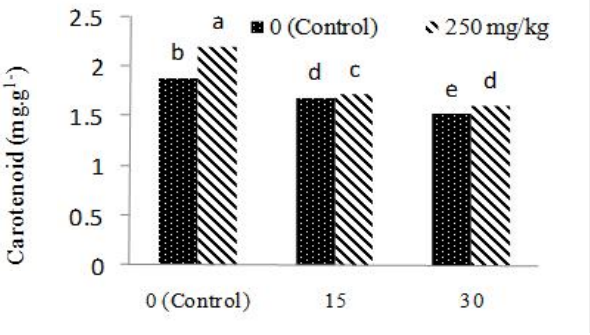
نتایج اندازه‌گیری غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه تحت تأثیر میکوریزا، آرسنیک و فسفر در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر میکوریزا، آرسنیک و فسفر بر غلظت کلروفیل a و b، کلروفیل کل و همچنین غلظت کاروتنوئیدهای برگ معنی‌دار بود ($p\leq0.01$).

تیمارهای میکوریزا و همچنین کاربرد کود فسفر باعث افزایش معنی‌دار تمام رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه شدند. از آنجا که میکوریزا به جذب عناصر غذایی در گیاه کمک می‌کند و فسفر نیز از اجزای اصلی آنزیم‌هاست، افزایش این عنصر در گیاه می‌تواند سنتز کلروفیل را افزایش دهد (۱۳). اگر چه تیمارهای همزیست تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند، هر سه گونه



گونه‌های مایکوریزا

شکل ۱. اثر متقابل قارچ‌های میکوریزا و سطوح فسفر بر غلظت کاروتنوئید شنبلیله



گونه‌های مایکوریزا

شکل ۲. اثر متقابل سطوح آرسنیک و فسفر بر غلظت کاروتنوئید شنبلیله

میکوریزا توانستند غلظت کلروفیل کل را به شکل معنی‌داری نسبت به شاهد غیرمیکوریزایی افزایش دهند. تسانگ و مایون (۳۴) گزارش کردند که گیاه *Strophostyles helvola* تلقیح شده با گونه *G. mosseae* به طور معنی‌داری کلروفیل بیشتری نسبت به گیاهان غیرمیکوریزایی داشت. همچنین، در فلفل (*Piper nigrum*) تلقیح شده با قارچ *G. intraradices* کلروفیل a و b به‌طور معنی‌داری نسبت به گیاهان غیرمیکوریزایی افزایش یافت (۸).

غلظت کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها با افزایش سطح آرسنیک کاهش یافت، به طوری که در سطح سوم آرسنیک (۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) غلظت کلروفیل a، b و کاروتنوئیدها نسبت به شاهد به ترتیب ۲۱/۱، ۱/۴ و ۲۲/۶ درصد کاهش یافت. به نظر می‌رسد که تأثیر فلز سنگین بر میزان کلروفیل با متوقف کردن آنزیم خاصی که مسئول سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی در گیاه می‌باشد در ارتباط است. اندازه‌گیری محتوای کلروفیل a و b نشان داد که گرچه غلظت هر دو تحت تأثیر فلز سنگین کاهش می‌یابد، ولی کلروفیل a حساس‌تر است. با این حال، تنش فلز سنگین باعث کاهش معنی‌دار ۷/۵ و ۱۷/۷ درصدی کلروفیل کل به ترتیب در سطوح ۱۵ و ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک نسبت به شاهد شد.

قرار گرفتن در معرض آرسنیک باعث ایجاد تنش قابل توجهی در گیاهان شامل جلوگیری از رشد، ناهنجاری‌های فیزیولوژیک و در نهایت مرگ آنها می‌شود (۳۰). از سوی دیگر تلقیح با میکوریزا و مصرف کود فسفر، با نقش کوفاکتوری در فتوسنتز گیاه و سنتز اتیلن، جیبرلین و آنتوسیانین، به عنوان عاملی برای کاهش اثر منفی تنش‌های عناصر سنگین شناخته شده است (۲۵). از سویی دیگر، در تنش ناشی از فلزات سنگین، جایگزین شدن یون منیزیم مرکزی با عنصر سنگین سبب از بین رفتن کلروفیل در گیاه می‌گردد (۲۴).

اثر متقابل آرسنیک و فسفر و همچنین آرسنیک و میکوریزا بر غلظت کاروتنوئیدها معنی‌دار گردید ($p\leq0.01$)، و کاربرد فسفر و تلقیح با میکوریزا نقش تعدیل کننده و کاهنده اثر منفی سمیت آرسنیک را بر غلظت کاروتنوئیدهای برگ نشان داد. ترکیب تیمارهای تلقیح گونه *G. mosseae* و عدم مصرف آرسنیک، بیشترین غلظت کاروتنوئید و عدم تلقیح با میکوریزا و کاربرد بیشترین سطح عنصر سنگین آرسنیک با ۳۲/۱ درصد کاهش کمترین میزان آن را نشان دادند (شکل ۱). در برهمکنش آرسنیک و فسفر نیز بیشترین مقدار کاروتنوئید (میانگین ۲/۱۳ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمار عدم کاربرد آرسنیک و مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک و کمترین آن (میانگین ۱/۴۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در تیمار مصرف ۳۰ میلی‌گرم آرسنیک همراه با عدم مصرف فسفر مشاهده شد (شکل ۲). در سطح زیاد تنش آرسنیک، اختلاف زیادی بین گونه‌ها با سطح شاهد بدون قارچ وجود نداشت. این موضوع می‌تواند ناشی از کاهش احتمالی فعالیت میکوریزا در سطح زیاد آرسنیک باشد.

غلظت عناصر غذایی در شاخساره گیاه

نتایج اندازه‌گیری غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و سدیم در شاخساره گیاه تحت تأثیر میکوریزا، آرسینک و فسفر در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های آزمایش، اثر میکوریزا، آرسنیک و فسفر بر تمام عناصر اندازه‌گیری شده، به غیر از سدیم، معنی‌دار بود ($p\leq0.01$).

غلظت عناصر بین عدم کاربرد و کاربرد ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر تفاوت معنی‌داری داشت و این پارامترها با کاربرد فسفر نسبت به عدم کاربرد آن افزایش یافتند. در بین عناصر، بیشترین افزایش مربوط به فسفر (۱۳/۷ درصد) بود و پس از آن پتاسیم (۶/۸ درصد)، نیتروژن (۵/۷ درصد) و سدیم (۱/۵ درصد) قرار داشتند. همچنین، غلظت تمام عناصر اندازه‌گیری شده در گیاهان، بجز سدیم، در تیمارهای تلقیح با میکوریزا نسبت به شاهد تیمار نشده به طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین غلظت نیتروژن در گیاهان تلقیح شده با *G. mosseae* و بیشترین غلظت پتاسیم و فسفر در گیاهان تلقیح شده با *G. versiform* مشاهده شد.

پخش شدن هیف‌های قارچی در خاک علاوه بر آنکه افزایش جذب عناصر را برای گیاه به دنبال دارد، با ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز موجب انحلال فسفر می‌گردد و قابلیت دسترسی به فسفر در خاک بر میزان جذب سایر عناصر و استفاده از آنها در گیاهان مؤثر است (۳۵). بنابراین، مشاهده می‌گردد که استفاده از قارچ میکوریزا و همچنین افزودن کود فسفر سبب افزایش میزان نیتروژن در شنبلیله گردیده است، به طوری که *G. mosseae* توانسته این میزان را ۳۹/۹ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد و تیمار فسفر نیز سبب بهبود ۵ درصدی میزان نیتروژن در اندام‌های هوایی گردیده است.

مطالعات مختلف نشان می‌دهد که قارچ میکوریزا می‌تواند اثر مثبتی بر غلظت فسفر در گیاهان تحت شرایط تنش داشته باشد (۱۸). افزایش انحلال فسفر خاک، که نتیجه رهاسازی اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز از هیف‌های قارچی است (۳۲)، سبب افزایش غلظت فسفر تا مقدار ۱۲/۳ در گیاهان همزیست با *G. intraradices* شده است. گرچه سایر گونه‌های قارچ میکوریزا از نظر آماری در یک گروه قرار داشته و تنها با سطح شاهد تفاوت معنی‌دار دارند. شارما و ادهولیا (۲۸) گزارش کردند که تلقیح پیاز (*Allium cepa*) با قارچ میکوریزا موجب افزایش معنی‌دار فسفر اندام هوایی نسبت به گیاهان تلقیح نشده گردید. نتایج مطالعه حاضر با یافته‌های قبلی که مکانیسم اصلی برای افزایش بردباری در شرایط تنش فلز سنگین در گیاهان میکوریزایی را بهبود جذب فسفر می‌دانند سازگار است (۷ و ۸). همچنین، نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن کود فسفر نیز افزایش ۱۳/۷ درصدی غلظت فسفر گیاه را در پی داشته است. گزارش‌ها حاکی از آن است که اضافه کردن کود فسفر به خاک، افزایش خطی آن را در گیاه به دنبال دارد (۱۱). در همین راستا، توسلی و همکاران (۲) با آزمایش بر روی ارزن مرواریدی به نتایج مشابه دست یافتند.

افزایش غلظت آرسنیک در خاک، کاهش معنی‌دار میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم در شاخساره شنبلیله را به دنبال داشته است، به طوری که در بالاترین سطح آلودگی (۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) این کاهش نسبت به شاهد به ترتیب برای نیتروژن، فسفر و پتاسیم ۵/۶، ۳/۷ و ۱۶/۱ درصد بوده است. سدیم نیز به طور معنی‌داری تحت تأثیر غلظت آرسنیک خاک قرار نگرفت. آرسنیک ممکن است با تأثیر بر نفوذپذیری غشاء پلاسمالما در جذب عناصر غذایی تداخل ایجاد کند. اما مطالعات کمی به منظور تعیین اثر آرسنیک بر جذب عناصر گیاهی انجام شده است و نتایج مطالعاتی که تاکنون ارائه شده کاملاً در تناقض است. در معرض قرار دادن آرسنیک سبب کاهش مقدار آب در شاخساره می‌شود و این احتمالاً بر جذب و انتقال عناصر غذایی تأثیرگذار است (۲۱). همچنین، پیشنهاد شده که آرسنیک از جذب عناصر غذایی ضروری ممانعت به عمل آورده و کمبود عناصر غذایی را القا می‌کند (۲۴).

جدول ۶. نتایج تجزیه واریانس غلظت نیتروژن، پتاسیم، فسفر و سدیم در شاخساره و آرسنیک در اندام هوایی و ریشه

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		N شاخساره	P شاخساره	K شاخساره	Na شاخساره	As شاخساره	As ریشه
میکوریزا (A)	۳	۵/۲۰**	۰/۱۰**	۱/۴۶**	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۱۳**	۰/۱۹**
آرسنیک (B)	۲	۲/۷۱**	۲/۱۸**	۷/۳۴**	۰/۱۱^{ns}	۳/۶۳**	۴۵/۸۲**
فسفر (C)	۱	۰/۷۹**	۰/۷۲**	۵/۲۶**	۰/۰۶ ^{ns}	۰/۲۴**	۱/۲۸**
A×B	٦	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۱۵**	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۳*	۰/۰۵ ^{ns}
A×C	۳	۰/۰۰۳ ^{ns}	۰/۰۱ ^{ns}	۰/۰۵ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۸ ^{ns}
B×C	۲	۰/۰۷ ^{ns}	۰/۰۴ ^{ns}	۰/۵۶**	۰/۱۱ ^{ns}	۰/۰۵*	۰/۰۹ ^{ns}
A×B×C	٦	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۲ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}
E	۴۸	۰/۰۳	۱/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۲
CV (٪)	–	۴/۷۰	۸/۰۵	۱/۸۸	٦/۰۷	۲٦/۳۲	۸/۴۲

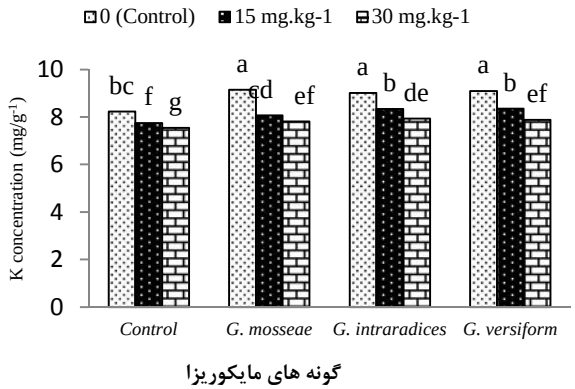
**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

جدول ۷. مقایسه میانگین غلظت نیتروژن، پتاسیم، فسفر و سدیم در شاخساره و آرسنیک در اندام هوایی و ریشه

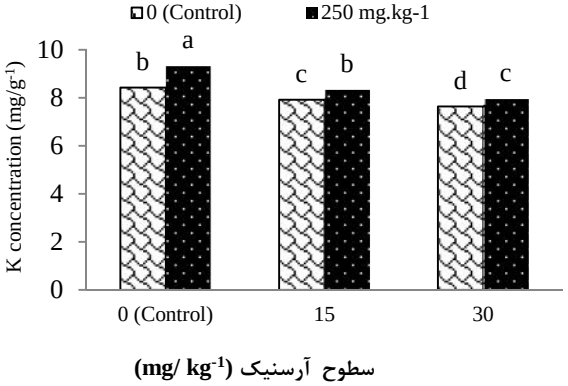
تیمار	N شاخساره (٪)	P شاخساره (mg/g)	K شاخساره (mg/g)	Na شاخساره (mg/g)	As شاخساره (µg/g)	As ریشه (µg/g)
گونه‌های میکوریزا						
شاهد	۲/۹۸d	۱/۴۶b	۷/۸۴b	۳/۹۱a	۰/۵۶a	۱/۸۶a
G. mosseae	۴/۱۷a	۱/۵۵a	۸/۳۴a	۳/۹۸a	۰/۳۸c	۱/۶۶b
G. intraradices	۳/۸۴c	۱/۶۰a	۸/۴۲a	۳/۹۷a	۰/۴۷b	۱/۷۰b
G. versiform	۴/۰۴b	۱/۶۴a	۸/۴۴a	۴/۰۳a	۰/۳۷c	۱/۶۲b
آرسنیک						
شاهد	۴/۱۲a	۱/۸۶a	۸/۸۷a	۴/۱۷a	۰/۰۰۵c	۰/۱۲c
۱۵ mg/kg	۳/۶۹b	۱/۵۶b	۸/۱۲b	۳/۸۶a	۰/۶۰b	۲/۴۳b
۳۰ mg/kg	۳/۴۶c	۱/۲۶c	۷/۷۹c	۳/۸۹a	۰/۷۰a	۲/۵۸a
فسفر						
شاهد	۳/۶۵b	۱/۴۶b	۷/۹۹b	۳/۹۴a	۰/۵۱a	۱/۸۴a
۲۵۰ mg/kg	۳/۸۶a	۱/۶۶a	۸/۵۳a	۴/۰۰a	۰/۳۸b	۱/۵۸b

در هر ستون، اعداد دارای حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ ندارند.

سینگ و همکاران (۲۹) نیز تأثیر منفی آرسنیک بر جذب نیتروژن و پتاسیم را در سرخس بیان نموده‌اند. گزارش‌های موجود در خصوص واکنش غلظت فسفر گیاه نسبت به تنش آرسنیک نتایج متنوعی را نشان می‌دهد. غلظت فسفر در بافت‌های گیاهی در شرایط تنش آرسنیک به سرعت کاهش می‌یابد. در واقع جذب آرسنات و فسفات توسط ریشه گیاه به طور معنی‌داری وابسته به غلظت آنها در محیط است،



شکل ۳. اثر متقابل سطوح آرسنیک و گونه‌های قارچ میکوریزا بر غلظت آرسنیک اندام هوایی شنبلیله



شکل ۴. اثر متقابل سطوح آرسنیک و فسفر بر غلظت پتاسیم اندام هوایی شنبلیله

و ایـن احتمـال وجـود دارد کـه بـه دلیـل تشـابه فیزیکـی و شیمیایی، جذب این دو عنصر توسط ناقـل مشـترک بـوده و از این طریق با یکدیگر رقابت مـی‌کننـد (۳۶). بنـابراین، حضـور آرسنیک در محیط رشد گیاه سبب بـروز واکـنش‌هـای کمبـود فسفر در گیاهان می‌شود.

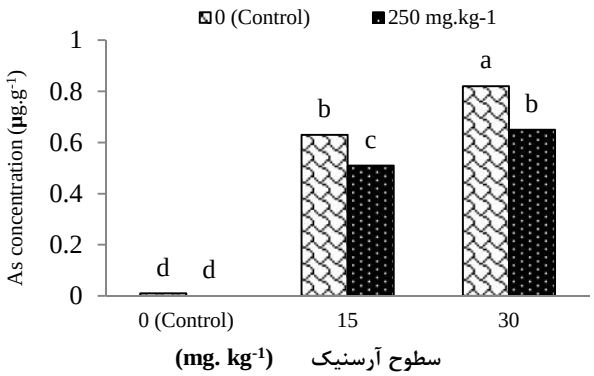
اثر متقابل آرسنیک و میکوریزا و آرسنیک و فسفر بـر غلظـت پتاسیم ($p\leq0.01$) معنی‌دار شد. به طـوری کـه در شـرایط کـاربرد فسفر و تلقیح با میکوریزا، تفاوت غلظت پتاسیم میـان تیمارهـای آرسنیک کمتر شد. ترکیب تیمارهای تلقـیح گونـه *G. mosseae* و *G. intraradices* با عدم مصرف آرسنیک، بیشترین غلظت پتاسیم و کاربرد بیشترین سطح عنصر سنگین آرسنیک، کمترین میزان آن را نشـان داد (شـکل ۳). در بـرهمکنش آرسـنیک و فسـفر نیـز بیشترین غلظت پتاسیم (میانگین ۹/۳۱ میلی‌گرم در کیلـوگرم وزن شاخساره) در تیمار عدم کاربرد آرسنیک و مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک و کمترین آن (میانگین ۷/۶۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن شاخساره) در تیمار مصرف ۳۰ میلی‌گـرم آرسـنیک همراه با عدم مصرف فسفر مشاهده شد (شکل ۴).

غلظت و توزیع آرسنیک در گیاه

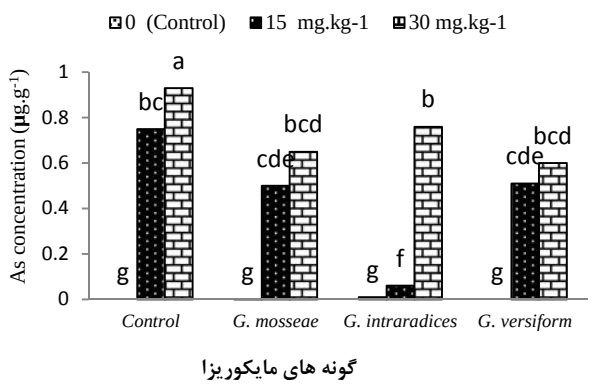
نتایج اندازه‌گیری غلظت آرسـنیک در شاخسـاره و ریشـه گیـاه تحت تأثیر میکوریزا، آرسینک و فسـفر در جـداول ۶ و ۷ ارائـه شده اسـت. نتـایج تجزیـه واریـانس داده‌هـا نشـان داد کـه اثـر میکوریزا، آرسنیک و فسفر بر غلظت آرسـنیک انـدام هـوایی و ریشه معنی‌دار بود ($p\leq0.01$).

در این مطالعه، به طور کلی، غلظت آرسنیک در ریشه بیشتر از شاخساره بود. یعنی به طـور متوسـط بـیش از ۷۰٪ آرسـنیک گیاه در ریشه تجمع یافت. تجمع بیشتر عناصر سـمی در ریشـه نسبت به شاخساره، به طور معمول در سورگوم (۳)، لوبیا (۲۱)، کلزا، خیار (۲۴) و گوجه‌فرنگی (۲۲) گزارش شده اسـت. کمتـر بودن مقدار آرسنیک در شاخساره نسبت به ریشه مـی‌توانـد بـه دلیـل تثبیـت آرسـنیک در درون سـلول‌هـا بـه وسـیله تشـکیل کمپلکس‌هایی با اسیدهای آلی نظیر مـالات و اگـزالات، انتقـال آرسنیک به درون واکوئل‌ها، انسداد آرسنیک توسط سـلول‌هـای اپیدرمی، تثبیت آرسـنیک در دیـواره‌هـای سـلولی، و یـا نتیجـه اتصال آرسنیک با ترکیبات آلـی موجـود در ریشـه (۲۴) باشـد. باقی ماندن فلزات سنگین در ریشه، بخصوص در مورد گیاهـان زراعی، مطلوب است، زیرا این بخش‌ها معمولاً به عنوان غذا یـا خوراک دام مورد استفاده قرار نمـی گیرنـد. در نتیجـه، سـمیت فلزات سنگین برای حیوانات و انسان کاهش می‌یابد (۳۶).

غلظت آرسنیک در شاخساره و ریشه گیاهان میان تیمارهای کاربرد کود فسفر به طور معنی‌داری متفاوت بود، به طـوری کـه غلظت آرسنیک در شاخساره و ریشه در تیمار ۲۵۰ میلی‌گرم بر



شکل ۵. اثر متقابل گونه‌های قارچ میکوریزا و سطوح آرسنیک بر غلظت آرسنیک اندام هوایی شنبلیله



شکل ۶. اثر متقابل سطوح آرسنیک و فسفر بر غلظت آرسنیک اندام هوایی شنبلیله

کیلوگرم فسفر نسبت به عدم کاربرد فسفر به ترتیب ۲۴/۰ و ۱۴/۱ درصد کمتر بود. غلظت آرسنیک شاخساره و ریشه در گیاهان همزیست با گونه‌های مختلف میکوریزا نسبت به شاهد تیمار نشده کاهش یافت. کمترین غلظت آرسنیک در گیاهان همزیست با گونه *G. versiform* و پس از آن تیمارهای همزیست با گونه‌های *G. mosseae*، *G. intraradices* و شاهد قرار داشت.

با افزایش مقدار آرسنیک در خاک، غلظت آرسنیک در شاخساره و ریشه گیاه به طور معنی‌داری افزایش یافت، و در تیمار کاربرد ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، آرسنیک به ترتیب در شاخساره و ریشه به ۰/۷۰ و ۲/۵۸ میکروگرم بر گرم وزن گیاه رسید.

در این بررسی، اثر متقابل معنی‌داری بین آرسنیک و میکوریزا و آرسنیک و فسفر بر آرسنیک شاخساره مشاهده شد، به طوری که در تیمارهای همزیست با گونه‌های مختلف میکوریزا و کاربرد فسفر غلظت آرسنیک شاخساره کاهش یافت (شکل‌های ۵ و ۶).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که شنبلیله قادر به جذب آرسنیک در بافت‌هایش است. با این حال، به علت اینکه مقدار آرسنیک جذب شده در اندام هوایی گیاه کمتر از یک میلی‌گرم در کیلوگرم بود و عمده جذب آرسنیک در ریشه صورت گرفت، لذا این گیاه برای اصلاح خاک‌های آلوده به آرسنیک مناسب نمی‌باشد. تجمع آرسنیک در بافت‌ها سبب کاهش شدید رشد گیاه می‌شود. ریشه گیاه شنبلیله به عنوان سدی در مقابل جذب و انتقال فلزات سنگین به اندام هوایی عمل می‌کند. قابلیت جذب آرسنیک در خاک‌های آلوده توسط کاربرد فسفر و همزیستی با گونه‌های مختلف میکوریزا کمتر بود. یافته‌های این مطالعه برای ارزیابی پیامدهای سمیت فلز سنگین آرسنیک و راهکارهای تخفیف سمیت آن مفید است.

منابع مورد استفاده

۱. امامی، ع. ۱۳۷۵. روش‌های تجزیه گیاه. جلد اول، نشریه فنی شماره ۹۸۲، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، ۲۴۸ صفحه.

۲. توسلی، ا.، ا. قنبری، د. رمضان و س. م. موسوی نیک. ۱۳۸۹. اثر کودهای آلی و شیمیایی بر ویژگی‌های کمی و کیفی ارزن مرواریدی (*Panicum miliaceaum* L.) و لوبیای قرمز (*Phaseolus vulgaris* L.) در کشت مخلوط. اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی

و علف‌های هرز ۴(۱۵): ۱-۱۶.

3. Abo-Kassem, E.M., A. Sharaf and Y.A.H. Mohamed. 1997. Effect of different cadmium concentration on growth, photosynthesis and ion relation of wheat. Egypt. J. Physiol. Sci. 21: 41-51.
4. Adriano, D.C. 1986. Arsenic. PP. 46-72. *In:* Adriano, D.C. (Ed.), Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York.
5. Allison, L.E. 1965. Organic carbon. PP. 1367-1378. *In:* Black, C.A., D.D. Evans, J.L. White, L.E. Ensminger, F.E. Clark and R.C. Dinauer (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, ASA, Madison, WI.
6. Bremner, J.M. and M. Mulvaney. 1982. Nitrogen total. PP. 595-624. *In:* Page, A.L., R.H. Miller and R.R. Keeney (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, American Society of Agronomy, Madison, WI.
7. Chen, B., X. Xiao, Y.G. Zhu, F.A. Smith, Z.M. Xie and S.E. Smith. 2007. The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* gives contradictory effects on phosphorus and arsenic acquisition by *Medicago sativa* L. Sci. Total Environ. 379: 226-234.
8. Demir, S. 2004. Influence of arbuscular mycorrhiza on some physiological growth parameters of pepper. Turk. J. Biol. 28: 85-90.
9. Dere, S., T. Gunes and R. Sivci. 1998. Spectrophotometric determination of chlorophyll- a, b and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. Turk. J. Biol. 22: 13-17.
10. Dong, Y., Y.G. Zhu, F.A. Smith, Y. Wang and B. Chen. 2008. Arbuscular mycorrhiza enhanced arsenic resistance of both white clover (*Trifolium repens* L.) and ryegrass (*Lolium perenne* L.) plants in an arsenic-contaminated soil. Environ. Pollut. 155: 174-181.
11. Ekelof, J. 2007. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. MSc. Thesis in the Horticultural Science, Saint Louis University, USA. Downloaded from: http:/ex-epsilon.slv.se.
12. Freitas, M.S.M., M.A. Martins and I.J.C. Vieira. 2004. Yield and quality of essential oils of *Mentha arvensis* in response to inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. Pesqui. Agropecu. Bras. 9: 887-894.
13. Giri, B., R. Kapoor and K.G. Mukerji. 2002. VA mycorrhizal techniques/VAM technology in establishment of plants under salinity stress conditions. PP. 313-327. *In:* Mukerji, K.G., C. Manorahari and J. Singh (Eds.), Techniques in Mycorrhizal Studies, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
14. Gonzalez-Chavez, C., P.J. Harris, J. Dodd and A.A. Meharg. 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced arsenate resistance on *Holcus lanatus*. New Phytol. 155: 163-171.
15. Kapoor, R., B. Giri and K.G. Mukerji. 2002. *Glomus macrocarpum*: A potential bioinoculant to improve essential oil quality and concentration in dill *(Anethum graveolens* L.) and carum (*Trachyspermum ammi* Sprague). World J. Microbiol. Biotech. 18(5): 459-463.
16. Leyval, C. and E.J. Joner. 2001. Bioavailability of heavy metals in the mycorrhizosphere. PP. 165-185. *In:* Gobran, G.R., W.W. Wenzel and E. Lombi (Eds.), Trace Elements in the Rhizosphere, CRC Press, Boca Raton, FL.
17. Liu, Y., Y.G. Zhu, P. Chen, P. Christie and X.L. Li. 2005. Yield and arsenate uptake of arbuscular mycorrhizal tomato colonized by *Glomus mosseae* BEG167 in As spiked soil under glasshouse conditions. Environ. Int. 31: 867-873.
18. Matschullat, J. 2000. Arsenic in the geosphere- A review. Sci. Total Environ. 249: 297-312.
19. Moral, R., J. Navarro-Pedreno, I. Gomez and J. Mataix. 1994. Distribution and accumulation of heavy metals in tomato plant. Environ. Bull. 3: 395-399.
20. Moreno, G., J.J. Obrador and A. Garcia. 2007. Impact of evergreen oaks on soil fertility and crop production in intercropping. Agric. Ecosys. Environ. 119: 270-280.
21. Obata, H. and M. Umebayashi. 1997. Effects of arsenic on mineral nutrient concentrations in plants differing in tolerance for cadmium. J. Plant Nutr. 20: 97-105.
22. Ouariti, O., H. Gouia and M.H. Ghorbal. 1997. Responses of bean and tomato plants to cadmium: Growth, mineral nutrition, and nitrate reduction. Plant Physiol. Biochem. 35: 347-354.
23. Peryea, F.J. and R. Kammereck. 1997. Phosphate-enhanced movement of arsenic out of lead arsenate-contaminated topsoil and through uncontaminated subsoil. Water, Air, Soil Pollut. 93(1): 243-254.
24. Pettersson, O. 1976. Heavy metal ion uptake by plants from nutrient solutions with metal ion, plant species and growth period variations. Plant Soil 45: 445-449.
25. Prasad, M. and K. Strazalka. 1999. Impact of heavy metals on photosynthesis. J. Exp. Bot. 41: 314-320.
26. Rausch, C., P. Darram, S. Brunner, J. Jansa, M. Laloi and G. Leggewie. 2001. A phosphate transporter expressed in arbuscule-containing cells in potato. Nature 414: 462-470.
27. Saniz, M.J., M.T. Taboada-Castro and A. Vilarino. 1998. Growth, mineral nutrition and mycorrhizal colonization of red clover and cucumber plants grown in a soil amended with composted urban wastes. Plant Soil 205(1): 85-92.
28. Sharma, M.P. and A. Adholeya. 2000. Enhanced growth and productivity following inoculation with indigenous

AM mycorrhiza in four varieties of onion (*Allium cepa* L.) in an Alfisol. Biol. Agric. Hort. 18: 1-14.
29. Singh, N., L.Q. Ma, C.V. Joseph and A. Raj. 2009. Effects of arsenic on nitrate metabolism in arsenic hyperaccumulating and non-hyperaccumulating ferns. Environ. Pollut. 157: 2300-2305.
30. Smith, E., R. Naidu and A.M. Alston. 1998. Arsenic in the soil environment: A review. Adv. Agron. 64: 149-195.
31. Smith, S.E. and D.J. Read. 2008. Mycorrhizal Symbiosis. 3rd Edn., Elsevier, 457 p.
32. Smith, S.E., A.F. Smith and I. Jakobsen. 2003. Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. Plant Physiol. 133: 16-20.
33. Sylvia, D.M. and S.E. Williams. 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and environmental stress. PP. 101-124. *In:* Bethlenfalvay, G.J. and R.G. Linderman (Eds.), Mycorrhizae in Sustainable Agriculture, ASA, Madison, WI.
34. Tsang, A. and M.A. Maun. 1999. Mycorrhizal fungi increase salt tolerance of *Strophostyles helvola* in coastal foredunes. Plant Ecol. 144: 159-166.
35. Tavasoli, A.R. and N. Aliasgharzade. 2009. Effect of arbuscular mycorrhizal on nutrient uptake and onion yield in a saline soil at field conditions. Water Soil Sci. 35: 158-162.
36. Violante, A. and M. Pigna. 2002. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 66: 1788-1796.