به‌زراعی کشاورزی
دوره ۲۲ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۳۹۹
صفحه‌های ۷۲-۵۷

بررسی تأثیر کودهای زیستی بر شاخص‌های رشدی ذرت در خاک‌های آلوده به سرب

فاطمه رستمی[۱]، مسلم حیدری[۲*]، احمد گلچین[۳]
۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۲. دانشجوی دکتری، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
۳. استاد، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.
تاریخ دریافت مقاله : ۱۳۹۸/۰۴/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۲۵

چکیده
به‌منظور بررسی تأثیر کودهای زیستی بر شاخص‌های رشدی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در خاک‌های آلوده به سرب، آزمایشی در گلخانه گروه خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال ۱۳۹٤ به‌صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار به‌اجرا درآمد. تیمارهای موردبررسی عبارت بودند از عامل اول: سطوح آلودگی خاک به سرب (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) و عامل دوم: بدون مایه‌زنی (C)، مایه‌زنی با باکتری حل‌کننده فسفات (*Pseudomonas putida*) (P)، مایه‌زنی با قارچ *Funneliformis mosseae* (M)، مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P)، مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* (I)، مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) بود. پارامترهای مورد اندازه‌گیری شامل: شاخص سبزینگی برگ، ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی، فسفر و پتاسیم ریشه و اندام هوایی و سرب ریشه و اندام هوایی بود. مایه‌زنی خاک با قارچ‌های میکوریزی و باکتری در شرایط عدم وجود عنصر سرب سبب بهبود شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه گردید. بر این اساس تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) توانست شاخص سبزینگی برگ (۱۱/٦۵ درصد)، فسفر ریشه (۱٦۱/۵ درصد) و بخش هوایی (۲۳۷ درصد)، پتاسیم ریشه (۳۵/٦ درصد) و پتاسیم بخش هوایی را (٦۲/۰۱ درصد) نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی (شاهد) افزایش دهد. هم‌چنین کودهای زیستی توانستند میزان سرب جذب‌شده را در ریشه گیاه در مقایسه با تیمار شاهد ٦۱/۹ درصد افزایش دهند به بیان دیگر توانستند سرب جذب‌شده از خاک توسط گیاه را در ریشه گیاه حفظ کنند. با توجه به نتایج حاصله در غلظت بحرانی سرب (٤۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، کودهای زیستی نتوانستند تأثیر مفید و فزاینده‌ای بر شاخص سبزینگی برگ، ارتفاع، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی داشته باشند. با این‌حال در غلظت‌های کم‌تر از فلز سنگین سرب، کودهای زیستی می‌تواند اثرات مضر و سوء این فلزات سنگین را در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه کاهش دهند.

کلیدواژه‌ها: باکتری حل‌کننده فسفات، عملکرد گیاه، فلزات سنگین، قارچ‌های میکوریزی.

Investigating the Efficacy of Biofertilizers on Growth Indices of the Maize, Cultivated in Lead (Pb)-Contaminated Soils

Fatemeh Rostami[1], Moslem Heydari[2*], Ahmad Golchin[3]
1. Former M.Sc. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
2. Ph.D. Candidate, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran.
3. Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran.
Received: June 22, 2019 Accepted: September 16, 2019

Abstract
In order to investigate the effect of biofertilizers on growth indices of maize (*Zea mays* L.) in lead-contaminated soils, a factorial experiment with three iterations was conducted, based on a completely randomized design in a greenhouse of the soil science department at Zanjan University in 2015. Factor I included soil contamination levels of lead (0, 50, 100, 200, and 400 mg / kg soil) with Factor II being no inoculation (C), inoculation with soluble bacteria Phosphate (*Pseudomonas putida*) (P), inoculation with *Funneliformis mosseae* (M), inoculation with mycorrhizal fungus *Funneliformis mosseae* + phosphate solubilizing bacterium (M + P), inoculation with *Rhizophagus intraradices* mycorrhizal (I), and inoculation with mycorrhizal fungi *Rhizophagus intraradices* + phosphate-solubilizing bacterium (I + P). The measured parameters were leaf chlorophyll index, plant height, fresh and dry weight of root and shoot, phosphorus and potassium of root, and the lead content in the shoots and roots. It has been shown that inoculation of soil with mycorrhizal fungi and bacteria improve plant growth and yield indices in the absence of lead. Inoculation with mycorrhizal fungus *Funneliformis mosseae* + phosphate-solubilizing bacterium (I + P) increase leaf chlorophyll index (11.65%), root phosphorus (161.5%), shoot phosphorus (237%), root potassium (35.6%), and shoot potassium (62.01%), compared to the no-inoculation treatment (control). Also, biofertilizers are proven capable of increasing the amount of absorbed lead in the plant root, compared to the control treatment by 61.9%. In other words, they have been able to retain the absorbed lead from the soil by the plant root. According to the obtained results, at a critical concentration of lead (400 mg/kg soil), biofertilizers could not have a beneficial and increasing effect on chlorophyll index, height, and fresh and dry weight of the roots and shoots. However, at lower concentrations of Pb, they are able to decrease the harmful and adverse effects of these heavy metals on the shoots and roots of the plant.

Keywords: Heavy metals, mycorrhizal fungi, plant yield, phosphate solubilizing bacteria.

* نویسنده مسئول Email: M.heydari4066@znu.ac.ir

۱. مقدمه

آلودگی خاک به افزایش غلظت مواد شیمیایی طبیعی و مصنوعی در پروفیل خاک اشاره می‌کند (Liud *et al.*, 2010). فلزات سنگین سمی‌ترین آلاینده‌های معدنی هستند که در خاک به‌صورت طبیعی حضور داشته و یا در نتیجه فعالیت‌های بشری وارد آن می‌شوند (McGrath *et al.*, 2001). فلزات سنگین در خاک غیرقابل تجزیه بوده و می‌توانند از طریق جذب توسط گیاهان، وارد زنجیره غذایی انسان شوند (Salt *et al.*, 1998).

یکی از عناصر سنگین خطرناک و سمی سرب است که به یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی تبدیل شده و باعث بروز خطرات جدی برای انسان و محیط زیست می‌شود. آلودگی بیش از حد خاک‌ها به سرب، بیش‌تر ناشی از توان جابه‌جایی کم آن در محیط زیست و رسوب‌پذیری بالای آن می‌باشد (Reeres. & Baker 1999; Tangahu *et al.*, 2011). عنصر سرب یکی از پایدارترین فلزات سنگین در خاک می‌باشد و در حدود ۱۵۰ تا ۵۰۰۰ سال در خاک ثبات دارد (Kumar *et al.*, 1995).

دامنه طبیعی غلظت سرب در گیاهان از ۰/۲ تا ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و حد بحرانی آن ۳۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Abbaspour *et al.*, 2010). در گیاهان اثرات سمی سرب معمولاً در غلظت‌های بالاتر از ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در برگ ظاهر می‌شود که در نهایت باعث کاهش سنتز کلروفیل و رشد رویشی می‌شود. سمیت سرب به این دلیل است که بسیاری از جنبه‌های رفتاری متابولیسمی کلسیم را تقلید می‌کند و از فعالیت بسیاری از آنزیم‌ها جلوگیری می‌کند و نکته مهم در اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، تحرک و حلالیت کم این ترکیبات و هم‌چنین تمایل اندک گیاهان به جذب سرب و انتقال آن از ریشه به اندام‌های هوایی است (Tao *et al.*, 2003). علایم سمیت سرب درگیاهان به‌صورت تیره‌شدن رنگ برگ‌ها، توقف رشد قسمت هوایی، کاهش زیست‌توده، کاهش سنتز کلروفیل و حتی ناهنجاری‌های کروموزومی دیده شده است (Kapata-Pendis & Pendis, 2010).

کاهش میزان پارامترهای رشدونموی در پاسخ به افزایش غلظت سرب در محیط رشد گیاهان دلایل متعددی از قبیل اثر بازدارنده سرب بر روی فتوسنتز، کاهش توانایی تثبیت CO_2، افزایش هزینه متابولیکی گیاه در مقابله با تنش فلز سنگین، برهم‌زدن تعادل یونی و روابط آبی گیاه با محیط و کاهش میزان تبادلات گازی به‌علت کاهش سطح برگ دارد. محدودشدن فرایند توسعه برگ در حضور غلظت‌های بالای سرب می‌تواند در ارتباط با کاهش رشد طولی سلول‌ها و تعداد تقسیمات آن‌ها باشد که در نهایت منجر به کاهش سطح جذب نور توسط برگ‌ها و کاهش راندمان تثبیت فتوسنتزی و زیست‌توده می‌گردد (Sharma & Dubey, 2005). سرب می‌تواند در حلقه پورفیرینی کلروفیل جانشین منیزیم شود و به این ترتیب مقدار کلروفیل را کاهش دهد (Sharma & Dubey, 2005).

سرب در گیاهان باعث اختلال در میتوز، کلروز برگ‌ها، توقف رشد ریشه و ساقه و در نهایت کاهش سنتز DNA می‌گردد و بر فعالیت‌های آنزیمی تأثیرگذار است. سرب نه تنها بر رشد گیاهان تأثیر منفی دارد بلکه با واردشدن به چرخه غذایی باعث ایجاد خطراتی برای انسان‌ها و حیوانات می‌گردد (Liud *et al.*, 2010). سرب از تقسیم سلول‌های مریستمی و رشد سلول‌های ریشه جلوگیری کرده و عملکرد ریشه گیاهان را کاهش می‌دهد. هم‌چنین این فلز قابلیت ارتجاع دیواره سلولی ریشه را کاهش داده و موجب کاهش رشد ریشه گیاهان می‌شود (Kapata-Pendis & Pendis, 2010).

با توجه به توسعه کشور در زمینه صنعت و فناوری و به‌دنبال آن افزایش روزافزون ضایعات و تولیدات فرعی

کارخانجات و معادن و ورود آن‌ها در زمین‌های کشاورزی امکان گسترش آلودگی‌هایی را فراهم می‌سازد، لذا آگاهی از میزان آلودگی خاک‌های ایران به این عناصر و اقدام در جهت رفع آن ضروری به‌نظر می‌رسد. استان زنجان با دارابودن معادن و کارخانجات متعدد سرب و روی، منطقه‌ای مستعد برای آلوده شدن خاک‌های بخش کشاورزی به عناصر سنگینی از جمله سرب می‌باشد. پژوهش‌های متعدد نشان داده است گاهی میزان سرب در مناطق صنعتی و حریم معادن به ۳۵۷ تا ۱۶۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک می‌رسد (Abbaspour *et al*., 2010).

امروزه به‌کارگیری کودهای آلی و زیستی راه‌کار قابل‌قبولی برای افزایش حاصل‌خیزی خاک و حفظ منابع طبیعی و محیط زیست است (Permakhsar & RajaSheri, 2009).

مکانیسم‌هایی که قارچ میکوریز برای کاهش تنش فلزات سنگین برای گیاهان اعمال می‌کند شامل کلات و غیرپویایی‌شدن فلزات سنگین در میسیلیوم‌های خارجی، بهبود تغذیه معدنی به‌ویژه فسفر، تغییر pH ریزوسفر، تنظیم بیان ژن‌های ناقل فلزی و غیره می‌باشد (Joner *et al*., 2000). علاوه بر این، قارچ‌های میکوریز جذب فلزات توسط گیاهان را از خاک و انتقال آن به ریشه و اندام هوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهند که به نوع فلز، گیاه و گونه قارچ بستگی دارد. قارچ‌های میکوریزی هم‌زیست‌شده با گیاهان از طریق تغییر و تعدیل فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه از قبیل افزایش فعالیت فتوسنتزی می‌توانند موجب کاهش سمیت فلز سنگین در گیاه شوند (Han *et al*., 2011). قارچ‌های میکوریزی انتقال سرب و کادمیوم را به ساقه گیاه کاهش می‌دهند. در واقع این قارچ‌ها به‌دلیل تجمع عناصر سنگین در هیف‌ها و میسیلیوم‌های خود باعث کاهش فرم قابل‌جذب این عناصر در ریزوسفر گیاه می‌شوند که این امر منجر به کاهش جذب این عناصر توسط گیاه می‌شود (Gildon & Tinker, 2000).

بنابراین برای دست‌یابی به کشاورزی پایدار به‌کارگیری کودهای زیستی از جمله باکتری‌های محرک رشد و میکروارگانیسم‌های مفید امری غیرقابل انکار است (Bashang & Holguin, 1997). مهمترین باکتری‌های حل‌کننده فسفات از جنس سودوموناس و باسیلوس هستند. سودوموناس‌ها از مهم‌ترین باکتری‌های افزاینده رشد گیاه هستند (Zahir *et al*., 2004). میکوریز از با اهمیت‌ترین قارچ‌های موجود در اغلب خاک‌های تخریب نشده است. در حدود ۷۰ درصد از توده زنده جامعه میکروبی خاک را ریسه‌های این قارچ‌ها تشکیل می‌دهد. از مهم‌ترین فواید کودهای زیستی می‌توان به افزایش جذب آب، کمک به کاهش تنش‌های محیطی مثل شوری و غلظت زیاد فلزات سنگین اشاره نمود (Azcon & El-Atrash, 2002).

واکنش‌های بین گیاهان و ریزجانداران مفید ریزوسفر می‌تواند تولید زیست‌توده و تحمل گیاه به فلزات سنگین را افزایش دهد (Glick *et al*., 2003). فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها در خاک و تغییر شرایط و ویژگی‌های ریزوسفر و در نتیجه زیست‌فراهمی فلزات، بر جذب فلزات توسط ریشه و اندام‌های هوایی گیاهان تأثیرگذار است (Joner & Leyval, 2001). مطالعاتی که در ارتباط با کودهای زیستی حاوی باکتری‌های حل‌کننده فسفات انجام شده است نشان داده‌اند که این باکتری‌ها سبب کاهش اثرات سوء کودهای شیمیایی و حفظ محیط زیست می‌گردد (Khan *et al*., 2006). بنابراین هدف از انجام این پژوهش بررسی تأثیر کودهای زیستی بر شاخص‌های رشدی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در خاک‌های آلوده به سرب بود.

۲. مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر کودهای زیستی بر شاخص‌های

رشدی گیاه ذرت (*Zea mays* L.) در خاک‌های آلوده به سرب، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان اجرا گردید. پارامترهای آزمایش عبارت بودند از سطوح آلودگی خاک به سرب (۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) (Abbaspour *et al*., 2010) و مایه‌زنی با کودهای زیستی مختلف شامل بدون مایه‌زنی (C)، مایه‌زنی با باکتری حل‌کننده فسفات (*Pseudomonas putida*) (P)، مایه‌زنی با قارچ *Funneliformis mosseae* (M)، مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P)، مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* (I)، مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) بود. باکتری مورداستفاده، باکتری از گونه *Pseudomonas putida* یک باکتری هتروتروف آزادزی است که به‌شکل مایع با جمعیت ۵×۱۰^{۸} تهیه‌شده از مؤسسه تحقیقات آب و خاک، مورد مصرف قرار گرفت. قارچ میکوریز به‌کاررفته در تحقیق حاوی دو گونه *Funneliformis mosseae* و *hizophagus intraradices* تهیه‌شده از کلکسیون میکروبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب، با جمعیتی برابر و معادل ۱۱۵ اندام فعال قارچ به‌ازای هر گرم است.

خاک موردنظر از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان تهیه و پس از هوا خشک‌شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک به‌روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، واکنش در گل اشباع با دستگاه pHمتر (مدل Metrohm 691، کشور آلمان) (Mclean, 1982)، هدایت الکتریکی در عصاره اشباع خاک با دستگاه هدایت‌سنج (مدل WTW Series inolab، کشور ژاپن) (Nelson ,1982)، درصد کربن آلی به‌روش والکیـ بلک (Nelson & Sommers, 1986)، سرب به‌روش عصاره‌گیری با DTPA و به‌وسیله دستگاه جذب اتمی (مدل Spectr AA 20، کشور تایوان Varian-Spectr) (Walingh *et al*., 1998) و هم‌چنین نیتروزن کل خاک با استفاده از دستگاه کجلدال اندازه‌گیری شد (جدول ۱). در عصاره‌های حاصل از هضم گیاهان، غلظت فسفر به‌روش کالری‌متری (رنگ زرد مولیبداتـ وانادات) (Hanson, 1950; Kitson & Mellon, 1944) و با دستگاه اسپکتروفوتومتر (مدل S2000 UV/Vis ، کشور آلمان) و غلظت پتاسیم با دستگاه فلیم‌فتومتر اندازه‌گیری شدند.

به‌منظور آلوده‌سازی نمونه‌های خاک به سرب، مقادیر مناسب از نیترات سرب در آب مقطر حل شدند و به نمونه‌های خاک اسپری گردید (Tessier *et al*., 1979). پس از مصرف نیترات سرب کلیه تیمارها از لحاظ میزان نیتروژن دریافتی یکنواخت شدند (طی دو مرحله) و برای این منظور از نیترات‌آمونیوم استفاده شد. نمونه خاک‌های آلوده‌شده در مقادیر چهار کیلوگرمی (با ابعاد ۳۰ در ٤۵ سانتی‌متری) به داخل گلدان‌های پلاستیکی انتقال و چرخه‌های تر و خشک‌شدن (رسیدن رطوبت ظرفیت مزرعه به هوا خشک) بر آن‌ها اعمال شدند (Rostami *et al*., 2013).

جدول ۱. ویژگی‌های خاک مورد آزمایش

بافت خاک	کربنات کلسیم (٪)	کربن‌آلی (٪)	pH	EC ($dS.m^{-1}$)	نیتروژن کل (٪)	فسفر (mg/kg)	پتاسیم (mg/kg)	سرب کل (mg/kg)	سرب قابل جذب (mg/kg)
لوم رسی	١٤/٧	١/١	٧/٧٤	٠/٢٥	٠/٥	١٤	٢٣٠	٢	٠/١١

پس از گذشت یک ماه دو نوع میکروارگانیسم (قارچ و باکتری) به خاک‌های آلوده و غیرآلوده افزوده شدند. محیط حاوی قارچ‌ها، جامد بود بنابراین پس از افزودن این محیط به تیمارها، به همان مقدار نیز در اتوکلاو مرطوب دو بار استریل به تیمار دارای باکتری اضافه شد. مقدار مصرف محیط جامد حاوی قارچ ۵۰ گرم برای هر گلدان بود. مقدار مصرف باکتری به‌ازای هر بوته دو سی‌سی بود (مقدار میکروب در هر سی سی ۵×۱۰^{۸} عدد بود).

پس از اعمال تیمارها، تعداد چهار عدد بذر گیاه ذرت (*Zea mays* L.) رقم ماکسیما (تهیه‌شده از مرکز تحقیقات کشاورزی زنجان) در هر گلدان کاشته شد. پس از ظهور گیاهچه‌ها و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته در هر گلدان با عملیات تنک، به سه عدد کاهش یافت. گیاهان به‌مدت ۷۵ روز (اتمام رشد رویشی و قبل از واردشدن به رشد زایشی) در شرایط گلخانه‌ای در دمای ۲۵–۲۸ درجه سلسیوس (به‌طور میانگین دمای روزانه بین ۳۴–۳۰ و دمای شب ۲۴–۲۰ درجه سلسیوس بود) و تحت دامنه رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. فاکتورهای مورد بررسی شامل: ارتفاع گیاه، شاخص سبزینگی برگ (با استفاده از دستگاه اسپد (SPAD502) ساخت کشور ژاپن)، فسفر ریشه و اندام هوایی و میزان پتاسیم ریشه و اندام هوایی، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی میزان سرب ریشه و اندام هوایی می‌باشد. هم‌چنین برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۱) و مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵ استفاده گردید.

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. سرب ریشه و اندام هوایی

مایه‌زنی با کودهای زیستی غلظت سرب بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت را در سطح احتمال یک درصد کاهش داد (جدول ۲). بیش‌ترین غلظت سرب بخش هوایی از تیمار شاهد و کم‌ترین آن از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae*+ باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) حاصل گردید (جدول ۳). سازوکارهایی که قارچ هم‌زیست برای کاهش تنش فلزات سنگین به‌کار می‌برد، شامل کلات کردن و غیر پویا کردن فلزات سنگین در ریسه‌های خارج ریشه‌ای می‌باشد (Gonzalez-Guerrero, 2005). بنابراین، بیش‌ترین غلظت سرب ریشه در تیمار کود زیستی مایه‌زنی با قارچ میکوریزی *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) و کم‌ترین آن در تیمار شاهد یا بدون مایه‌زنی به‌دست آمد (جدول ۳). این کود زیستی میزان سرب بخش ریشه را نسبت به تیمار شاهد ۱۵۷٪ افزایش داد. یکی از دلایلی که می‌توان برای کاهش انتقال سرب به بخش هوایی گیاهان با افزایش غلظت سرب متصور بود این است که انتقال فلز به بخش هوایی از طریق آوندهای چوبی صورت می‌گیرد و عامل انتقال در این آوندها، شیب هیدرواستاتیک و شیب پتانسیل آب است. بنابراین با کاهش رشد گیاهان، میزان تبخیر و تعرق کاهش و میزان انتقال در این آوندها نیز کاهش می‌یابد. کود زیستی مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) میزان غلظت سرب اندام هوایی را به‌میزان ۲۶/۵٪ نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (جدول ۳). هم‌زیستی قارچ‌های میکوریزی با ریشه ذرت و شبدر باعث ترشح برخی آنزیم‌های غیرمتحرک‌کننده فلزات سنگین در خاک شده و میزان انباشت آن‌ها را در گیاه کاهش می‌دهد. مواد دیواره سلولی قارچ‌های آربوسکولار حاوی ترکیباتی نظیر آمینواسیدهای آزاد و گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل است که قادر هستند به فلزات سنگین متصل و آنها را به حالت غیرمتحرک درآورند (Kapoor & Viraraghavan, 1995). قارچ‌های میکوریز در گیاه سورگوم تلقیح‌شده در خاک آلوده به سرب منجر به تثبیت

و غیرفعال‌شدن این فلز در اندام‌های قارچ توسط گرانول‌های پلی‌فسفات شدند (Wong *et al*., 2007; Chen *et al*., 2005). نسبت غلظت سرب ریشه به بخش هوایی در هم‌زیستی با قارچ موسهآ به‌طور متوسط بیش‌تر از بوته‌های غیرهم‌زیست و تلقیح با اینترارادیس بود (Amanifar *et al*., 2011; Weber *et al*., 2018).

افزایش سطوح آلودگی خاک به سرب غلظت سرب بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت را به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد افزایش داد (جدول ۲). بیش‌ترین غلظت سرب بخش هوایی و ریشه به‌ترتیب ۲۳/۱۵ و ٦۲/۱٤ میلی‌گرم بر کیلوگرم و از تیمار ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت سرب ریشه و اندام هوایی از تیمار شاهد به‌دست آمد (جدول۳). اثرات متقابل نوع کودهای زیستی و سطوح مختلف سرب خاک بر غلظت سرب بخش هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین غلظت سرب بخش هوایی از تیمار بدون مایه‌زنی و هم‌چنین تیمار قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* و قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* و سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت آن از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریزی *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات و تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریزی *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات و سطح بدون آلودگی به‌دست آمد (جدول ٤). بیش‌ترین غلظت سرب ریشه از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات و مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات و سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین آن‌ها از تیمار شاهد یا بدون تلقیح و سطح صفر سرب خاک به‌دست آمد (جدول ٤). در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، قارچ‌های میکوریزی این عناصر را در ریشه‌ها جمع نمودند و کم‌تر به بخش هوایی انتقال دادند (Andrade *et al*., 2004) هم‌چنین در غلظت‌های بالای سرب اضافه‌شده به خاک، تلقیح گیاه سویا با قارچ میکوریز، سبب افزایش جذب سرب توسط این قارچ شد اندام‌های هوایی گیاهان تلقیح‌شده با میکوریز دارای غلظت کم‌تری از سرب (حدود ۳۰ درصد از گیاهان غیرمیکوریزی) بود (Andrade *et al*., 2004). هم‌زیستی میکوریزی، تجمع سرب را در ریشه گیاهان به‌طور معنی‌داری تشدید کرد. تجمع بیش‌تر سرب در ریشه توسط تیمار کود زیستی قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات سبب شد که غلظت سرب در بخش هوایی این تیمار کم‌تر باشد که می‌توان علت این امر را آزادشدن فسفر بیش‌تر (Kungu *et al*., 2010) در این تیمار کود زیستی به‌دلیل حضور قارچ میکوریز و باکتری حل‌کننده فسفات بیان داشت (Chen *et al*., 2000). ۸۰ تا ۸۷ درصد از کل سرب جذب‌شده توسط آفتابگردان، در ریشه‌های آن تجمع یافت و تنها ۱۳ تا ۲۰ درصد از سرب به اندام هوایی انتقال یافت (Boonyapookana *et al*., 2005).

۲.۳. ارتفاع بوته

مایه‌زنی با کود زیستی، ارتفاع بوته ذرت را به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد افزایش داد (جدول ۲). بیش‌ترین میزان ارتفاع گیاه ذرت در اثر مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) و کم‌ترین میزان آن از تیمار بدون مایه‌زنی ((C حاصل شد (جدول ۳). مایه‌زنی با کود زیستی قارچ گلوموس اینترارادیس و باکتری حل‌کننده فسفات میزان ارتفاع گیاه ذرت را ١٦/٤٤ درصد نسبت به تیمار بدون تلقیح افزایش داد (جدول ۳).

جدول ۲. جدول تجزیه واریانس اثرات ساده و متقابل تیمارهای آزمایشی روی وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه، شاخص کلروفیل برگ، ارتفاع، فسفر و پتاسیم ریشه و اندام هوایی گیاه ذرت

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات											
		سرب ریشه	سرب هوایی	ارتفاع گیاه	کلروفیل	فسفر ریشه	فسفر هوایی	پتاسیم ریشه	پتاسیم هوایی	وزن تر هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک هوایی	وزن خشک ریشه
		(mg/kg)		(cm)		(٪)					(gr/pot)		
سرب (Pb)	٤	٩٨١٧/٤٥**	١١٠١/١٦**	١٦٤/٦٠**	١٣/٧٧**	٠/٢٤**	٠/٠٤**	٠/٦٠**	٢/٨٦**	١٨٥/٦٠**	١٠/٩١**	٨/٠٧**	٠/٢٠**
کود زیستی (F)	٥	١٠٢١/١٨**	٧٦/٥٩**	١١٥/٩١**	٢/١٤**	٠/٣٥**	٠/١٠**	٠/١٢**	٢/٧٨**	٨٥/٦٢**	٣/٠٦**	٨/٦٧**	٠/٠٥**
کود زیستی × سرب (F×Pb)	٢٠	٢٤٩/٣٩**	١٢/٣٥**	١٢/٨٧ns	٠/١٨ns	٠/٠١**	٠/٠٠٥**	٠/٠٩**	٠/٠٩**	٤/ ٠٦ ns	٠/٥٨ ns	٠/٣٨ns	٠/٠٠٤ns
خطا (E)	٦٠	٤/٦٦	٢/٥٣	١٢/٨٤	٠/٢٦	٠/٠٠٠٨	٠/٠٠٠٥	٠/٠١٧	٠/٠٢	٢/٧٢	٠/٥٨	٠/٢٥	٠/٠٠٧
ضریب تغییرات (درصد)		٧/٣٠	١٢/٣٧	٦/٦٧٢	٦/٥١٧	٦/٥٢	٨/٤٧	١٣/٤١	٥/٢٠	٧/٥٠	١٠/٨٤	١٤/٨٢	١٢/٩٥

، * و ns: اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و نبود اختلاف معنی‌دار.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثرات نوع کود زیستی و سطوح سرب (Pb) بر وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه، شاخص سبزینگی برگ و ارتفاع گیاه ذرت

	سرب ریشه	سرب هوایی	ارتفاع	کلروفیل	فسفر ریشه	فسفر هوایی	پتاسیم ریشه	پتاسیم هوایی	وزن تر هوایی	وزن تر ریشه	وزن خشک هوایی	وزن خشک ریشه
	(mg/kg)	(mg/kg)	(cm)				(٪)				(gr/pot)	
نوع کود زیستی												
شاهد	١٥/١٤e	١٦/٣٣a	٤٨/٩٠d	٧/٣٨d	٠/١٦d	٠/١٣d	٠/٨٧c	٢/٠٨e	١٨/٨٦c	٦/٣٥c	٢/٤٩d	٠/٥٧c
باکتری حل‌کننده فسفات	٢٧/٥٦d	١١/٥٥d	٥٢/٧٠c	٨/١٦ab	٠/٤٨b	٠/٣٠b	٠/٩bc	٢/٧٧d	٢٣/٤٢b	٧/٢٥ab	٣/٧٣b	٠/٦٩ab
قارچ *Funneliformis mosseae*	٣١/٦٧c	١٤/٣٣b	٥٣/٦٩bc	٧/٦٩cd	٠/٤٠c	٠/٢٥c	١/٠٥ab	٣/٠٨b	٢٢/٠٣b	٦/٩٠bc	٣/٢١c	٠/٦٤b
باکتری حل‌کننده فسفات + قارچ *Funneliformis mosseae*	٣٩/٠٠a	٩/٨٩e	٥٥/٦٠ab	٨/٢٤a	٠/٥٥a	٠/٣٤a	١/٠٩a	٣/٣٧a	٢٤/٤١a	٧/٢٩ab	٤/٠٨ab	٠/٦٨b
قارچ *Rhizophagus intraradices*	٢٨/٦٧d	١٣/٠٠c	٥٤/٤٠abc	٧/٨٣bc	٠/٥٥a	٠/٣٣a	٠/٩٨b	٢/٨٢d	١٩/٥٠c	٦/٨٦bc	٢/٥٧d	٠/٦٤b
باکتری حل‌کننده فسفات + قارچ *Rhizophagus intraradices*	٣٥/٣٤b	١٢/٠٠cd	٥٦/٩٤a	٨/٣٨a	٠/٥٦a	٠/٣٤a	١/٠٢ab	٢/٩٦c	٢٤/٥٤a	٧/٦٦a	٤/٢٧a	٠/٧٥a
سطوح سرب (mg/kg)												
٠	٥/٥٥e	٢/٥٩e	٥٧/٣٦١a	٩/١١١a	٠/٥٨a	٠/٣٦a	٠/٩٩c	٣/٣٢a	٢٥/٣٥a	٨/٢٨a	٤/٢٠٥a	٠/٨٠٤a
٥٠	١٥/٦٥d	٨/٤٢d	٥٥/٩٦٩a	٨/٣٤١b	٠/٥٤b	٠/٣٠b	١/٢١a	٣/١١b	٢٣/٨٦b	٧/٢٢b	٣/٨٧١b	٠/٧٣٤b
١٠٠	١٩/٢٦c	١٣/٦١c	٥٢/٧٢٢b	٧/٩٦٣c	٠/٤٥c	٠/٢٦c	١/٠٨b	٢/٨٤c	٢٢/٢٣c	٦/٨٩b	٣/٣٨٥c	٠/٦٧١c
٢٠٠	٤٥/١٩b	١٦/٤٨b	٥٢/٨٠٦b	٧/٥٦٩d	٠/٣٩d	٠/٢٦c	٠/٩٢c	٢/٦٧d	٢٠/٥٨d	٦/٦٨bc	٢/٩٨٣d	٠/٥٩٥d
٤٠٠	٦٢/١٤a	٢٣/١٥a	٤٩/٦٦٧c	٦/٧٦١e	٠/٢٩e	٠/٢٣d	٠/٧٢d	٢/٢٩e	١٧/٧٠e	٦/١٩c	٢/٥٣٧e	٠/٥٣٤e

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک با هم دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ٤. اثرات متقابل نوع کود زیستی و سطوح سرب خاک بر غلظت سرب بخش هوایی و ریشه، پتاسیم بخش هوایی و ریشه و فسفر بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت

کود زیستی	سرب (mg/kg)	سرب هوایی (mg/kg)	سرب ریشه (mg/kg)	فسفر ریشه	فسفر هوایی	پتاسیم هوایی (٪)	پتاسیم ریشه
شاهد	۰	۲/۷۷hi	۲/۲۲p	۰/۲۱m	۰/۱۸i	۲/٤۰i	۱/۱۹b-d
	۵۰	۱٤/٤٤d	۱۵/۵۵j-l	۰/۲۱m	۰/۱۷i	۲/٤۰i	۱/۱۱b-f
	۱۰۰	۱۷/۷۸c	۱۲/۷۸ml	۰/۱۷m-o	۰/۱۳j	۱/۹۳j	۰/۸۷f-j
	۲۰۰	۲۰/۵۵bc	۱۸/۸۹j	۰/۱۲op	۰/۰۹k	۱/۹۳j	۰/٦۸i-k
	٤۰۰	۲٦/۱۱a	۲٦/۱۱i	۰/۱۰p	۰/۰٦k	۱/٦۲k	۰/۵۲k
باکتری حل‌کننده فسفات	۰	۳/۳۳hi	۲/۲۲p	۰/٦۳c	۰/٤۲a	۳/۰۱d	۱/۰۱c-h
	۵۰	٦/٦٦fg	۱٦/۱۱jkl	۰/۵۷d-f	۰/۲۱hi	۲/۸۵d-f	۱/۰۹c-f
	۱۰۰	۱۳/۳۳de	۱۹/٤٤j	۰/۵۳f-h	۰/۲۳gh	۲/۸۳d-f	۰/۸۲g-j
	۲۰۰	۱۳/۸۹d	٤۵/۵٦h	۰/۳۳jk	۰/۳۷b	۲/۷۲d-g	۰/۷۸h-j
	٤۰۰	۲۰/۵۵bc	۵٤/٤۵ef	۰/۲۷l	۰/۲۵f-h	۲/٤٤hi	۰/٦٤jk
قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae*	۰	۲/۷۷hi	۷/۷۷no	۰/۵۹c-e	۰/۲۹c-f	۳/۷۳a	۰/۹۷d-h
	۵۰	۱۱/٦٦de	۱۳/۸۹kl	۰/۵٤f-h	۰/۲٦e-g	۳/۵٤a-c	۱/۱۹b-d
	۱۰۰	۱۲/۷۸de	۱۸/۸۹j	۰/۳۹j	۰/۲۱hi	۳/٤۲bc	۱/۳٦b
	۲۰۰	۱۸/۳۳bc	٤۸/۸۹gh	۰/۳۳k	۰/۲۷d-g	۳/۳۲c	۰/۹۷d-h
	٤۰۰	۲٦/٦۷a	٦۸/۹۰c	۰/۱٦no	۰/۲۳gh	۲/۸۳d-f	۰/۷۸h-j
باکتری حل‌کننده فسفات+ قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae*	۰	۱/٦٦i	۷/۲۲no	۰/۷٦a	۰/٤۲a	۳/۷۷a	۰/۸۲g-j
	۵۰	٤/٤٤g-i	۱۷/۷۸jk	۰/۷۲ab	۰/۳۷b	۳/٦۰ab	۱/۵۸a
	۱۰۰	۱۲/۷۸de	۲۵/۵٦i	۰/٤۹hi	۰/۳۲cd	۲/۹۹d	۱/۲۳bc
	۲۰۰	۱۰/۵۵e	۵۸/۹۰d	۰/۳۸j	۰/۲۸c-f	۲/٦۸e-h	۱/۱۵b-e
	٤۰۰	۲۰/۰۰bc	۸۵/۵۷a	۰/۳۸j	۰/۳۱c-e	۲/۳۸i	۰/٦٦i-k
قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices*	۰	۳/۳۳hi	٤/٤٤op	۰/٦۲cd	۰/٤٤a	۳/٤۲bc	۰/۷۰b
	۵۰	۷/۷۸f	۱۳/۸۹kl	۰/٦۱c-e	۰/۳۷b	۳/۳۰c	۱/۱۵b-e
	۱۰۰	۱۱/٦٦de	۱۹/٤٤j	۰/۵۳f-h	۰/۳۲cd	۲/۸۳d-f	۱/۱۹b-d
	۲۰۰	۱۷/۷۸c	٤۷/۷۸gh	۰/٦۰c-e	۰/۲۹c-f	۲/۵۰g-i	۱/۰۵c-g
	٤۰۰	۲٤/٤٤a	۵۷/۷۸de	۰/۳۷jk	۰/۲۵h–f	۲/۰۵j	۰/۸۰g-j
قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات	۰	۱/٦٦i	۹/٤٤mn	۰/٦۸b	۰/٤۳a	۳/٦۰ab	۱/۱۵b-e
	۵۰	۵/۵۵h–f	۱٦/٦۷ l–j	۰/۵۸d-f	۰/٤۰ab	۲/۹۹d	۱/۱۳b-e
	۱۰۰	۱۳/۸۹d	۱۹/٤٤j	۰/۵٦e-g	۰/۳۲cd	۲/۹۱de	۱/۰۱c-h
	۲۰۰	۱۷/۷۸c	۵۱/۱۲fg	۰/۵۲gh	۰/۲۹c-f	۲/۸۷d-f	۰/۹۱e-i
	٤۰۰	۲۱/۱۱b	۸۰/۱۹b	۰/٤٦i	۰/۲٦e-g	۲/٤۲hi	۰/۹۱e-i

میانگین‌هایی که حداقل یک حرف مشترک با هم دارند، از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند.

مایه‌زنی با باکتری‌های محرک رشد تولید اتیلن در گیاه را کاهش داده و موجب افزایش زیست‌توده و ارتفاع گیاه می‌شود (Hall, 2002; Glick *et al*., 2003; Zhuang *et al*., 2007). اثر تیمارهای به‌کار برده‌شده بر ارتفاع بوته را می‌توان به تولید اکسین و جیبرلین و تأمین بهینه عناصر غذایی ارتباط داد. گزارش‌های متعددی به تأثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد و قارچ‌های میکوریزی بر ارتفاع بوته اشاره کرده‌اند (Ansari *et al*., 2013; Dehghani *et al*., 2009). گیاه‌چه‌های نارنگی تلقیح‌شده با قارچ میکوریز آربوسکولار نسبت به تیمار کنترل، از ارتفاع بیش‌تری برخوردار بودند (Wu & Xia, 2006). با افزایش میزان سرب خاک ارتفاع بوته ذرت به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد کاهش یافت (جدول ۲). بیش‌ترین میزان ارتفاع بوته ذرت از سطح صفر سرب خاک و کم‌ترین میزان آن از سطح ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (جدول ۳). ارتفاع گیاه در تیمار ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌میزان ۱۳/٤ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت (جدول ۳). علت کاهش در ارتفاع گیاه تحت تیمار سرب می‌تواند به این دلیل باشد که سرب در گیاهان باعث اختلال در میتوز، کلروز برگ‌ها، توقف رشد ریشه و ساقه، جلوگیری از تقسیم سلول‌های مریستمی و در نهایت کاهش سنتز DNA می‌گردد و بر فعالیت‌های آنزیمی تأثیرگذار است (Liud *et al*., 2010). اثر متقابل سرب و کودهای زیستی اثر معنی‌داری بر ارتفاع گیاه ذرت نداشت (جدول ۲).

۳.۳. شاخص سبزینگی

استفاده از کودهای زیستی مختلف شاخص سبزینگی برگ گیاه ذرت را ($P\leq$۰/۰۱) افزایش داد (جدول ۲). از این‌رو بیش‌ترین میزان شاخص سبزینگی برگ از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae*+ باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) و تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) و کم‌ترین میزان آن از تیمار بدون مایه‌زنی یا شاهد به‌دست آمد (جدول ۳). این کودهای زیستی توانستند میزان شاخص سبزینگی برگ را به‌ترتیب به‌میزان ۱۱/٦٥ و ۱۳/٥٥ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش دهند. بیش‌تر بودن میزان شاخص سبزینگی برگ در تیمار ترکیبی قارچ و باکتری نسبت به تیمار شاهد، احتمالاً به‌دلیل افزایش جذب عناصر غذایی مؤثر در فتوسنتز و تولید کلروفیل برگ به‌ویژه فسفر و فراهم نمودن امکان به‌کارگیری فسفر در بیوسنتز ATP به‌عنوان حامل انرژی در فتوسنتز و هم‌چنین افزایش جذب منیزیم و آهن باشد (Demir, 2004). نتایج جدول (۳) حاکی از آن است که کاربرد مجزای باکتری حل‌کننده فسفات تأثیر بیش‌تری بر شاخص سبزینگی برگ نسبت به قارچ *Funneliformis mosseae* داشته است. علت این اختلاف را می‌توان در توان بیش‌تر این باکتری در حلالیت و تسهیل در جذب حداکثری فسفر برای گیاه که منجر به تولید بیش‌ترATP و هم‌چنین آنزیم‌های دخیل در فتوسنتز (Demir, 2004) و در نهایت افزایش کلروفیل در گیاه داشته باشد، دانست.

مایه‌زنی با قارچ *Funneliformis mosseae* در خاک آلوده به سرب سبب افزایش مقدار کلروفیل برگ گیاهان شد (Ponamia *et al*., 2010) هم‌چنین افزایش میزان کلروفیل برگ در اثر مایه‌زنی با قارچ میکوریز می‌تواند ناشی از جذب فسفر از خاک توسط گیاه باشد (Smith & Read, 2008).

با افزایش سطوح آلودگی خاک به سرب میزان شاخص سبزینگی برگ به‌طور معنی‌داری ($P\leq$۰/۰۱) کاهش یافت (جدول ۲). بیش‌ترین شاخص سبزینگی برگ از تیمار شاهد و کم‌ترین میزان آن از سطح ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد. تیمار ٤٠٠

میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک شاخص سبزینگی برگ را به میزان ۲۵/۷ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد (جدول ۳). فلزات سنگین مانند سرب به‌علت افزایش تجزیه رنگدانه‌های کلروفیل برگ باعث کاهش در میزان کلروفیل برگ می‌شوند (Gajewska *et al*., 2006). از طرف دیگر یکی از علل کاهش شاخص سبزینگی برگ، مهار بیوسنتز آن به‌وسیله فلزات سنگین به خصوص سرب است. فلزات سنگین به‌وسیله مهار آنزیم‌های گاما- آمینو لوالونیک اسید دهیدوژناز و پروتوکلروفیل ردوکتاز سبب مهار بیوسنتز کلروفیل برگ می‌شوند. برهم‌کنش متقابل فلز سنگین با گروه سولفیدریل آنزیم‌ها مهم‌ترین مکانسیم این مهار عنوان شده است (Katebi *et al*., 2008). برهم‌کنش سرب و مایه‌زنی با کودهای زیستی نتوانست از نظر آماری اثری معنی‌داری بر شاخص کلروفیل برگ گیاه ذرت داشته باشد (جدول ۲).

۴.۳. محتوای فسفر

کاربرد کودهای زیستی، فسفر بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت را به‌طور معنی‌داری ($P\leq$۰/۰۱) افزایش داد (جدول۲). بیش‌ترین میزان فسفر بخش هوایی و ریشه از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) و یا تیمار مایه‌زنی با قارچ *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) به‌دست آمد (جدول ۳). این تیمارها میزان فسفر بخش هوایی و ریشه را به‌ترتیب به‌میزان ۱۶۱/۵ و ۲۳۷ درصد نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی (C) افزایش دادند. کم‌ترین میزان فسفر بخش هوایی و ریشه از تیمار بدون مایه‌زنی یا شاهد حاصل گردید (جدول ۳). کاربرد جداگانه کودهای زیستی نتایج مختلفی را مترتب گردانید به‌نحوی‌که کاربرد تیمار *Rhizophagus intraradices* نسبت به تیمار *Funneliformis mosseae* غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۲۷/۲ و ۲۴/۲ درصد افزایش داد (جدول ۳). علت این اختلاف را می‌توان اختلاف در تثبیت و جذب این عنصر از خاک در بین این دو گونه قارچ میکوریز دانست به‌نحوی‌که *Rhizophagus intraradices* در جذب و انتقال عناصری مانند Fe، P، Mg و Ca توانایی بیش‌تری دارد (Ugolini *et al*., 2013).

مایه‌زنی با قارچ‌های میکوریزی، غلظت فسفر را در گیاهان با افزایش جذب فسفر توسط هیف‌های قارچ، افزایش می‌دهند. تخمین زده می‌شود که هیف‌های خارج ریشه‌ای بیش از ۸۰ درصد نیاز فسفره گیاه را تأمین می‌کنند (Matamoros *et al*., 1999). افزایش غلظت فسفر در گیاهان میکوریزی می‌تواند به دلایل مختلف از جمله افزایش سطح جذب ریشه، کاهش pH ریشه و فعالیت آنزیم فسفاتاز توسط قارچ‌های میکوریزی باشد (Aliasgharzadeh *et al*., 2000). باکتری جنس سودوموناس نیز با تولید اسیدهای آلی، قابلیت دسترسی به فسفر را افزایش می‌دهد، هم‌چنین کاربرد هم‌زمان باکتری حل‌کننده فسفات و قارچ‌های میکوریزی آربوسکولار در شرایط مزرعه نشان داد که جذب فسفر افزایش یافت (Asadi & Fallah, 2000).

با افزایش سطوح سرب خاک میزان فسفر بخش هوایی و ریشه به‌طور معنی‌داری ($P\leq$۰/۰۱) کاهش یافت (جدول ۲). بیش‌ترین میزان فسفر بخش هوایی و ریشه از سطح صفر سرب خاک و کم‌ترین میزان آن از سطح ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک حاصل گردید. به بیان دیگر، تیمار ۴۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک غلظت فسفر اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۳۶/۱۱ و ۵۰ درصد کاهش داد (جدول ۳).

سرب عنصری سمی برای گیاهان است و با تخریب سلول‌ها و ایجاد اختلال در سیستم فیزیولوژیکی گیاهان جذب عناصری چون فسفر را کاهش می‌دهد (Sharma &

Diubi, 2005). اثر متقابل نوع کود زیستی و سطوح سرب خاک بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه (P≤۰/۰۱) بود (جدول ۲). بیش‌ترین مقدار فسفر بخش هوایی در همه تیمارهای حاوی کود زیستی در سطح صفر میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و کم‌ترین میزان آن از تیمار بدون کود زیستی و سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد بیش‌ترین میزان غلظت فسفر در ریشه نیز از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات و سطح بدون آلودگی و کم‌ترین مقدار آن از تیمار بدون مایه‌زنی و سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک حاصل گردید. نتایج به‌دست‌آمده قابل پیش‌بینی بود زیرا غلظت ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک غلظت بحرانی این عنصر می‌باشد و از طرفی کودهای زیستی توانایی خنثی‌سازی اثرات سوئ فلزات سنگین را دارا می‌باشند با این‌حال در غلظت بحرانی این فلز خطرناک، عملاً کودهای زیستی در خنثی‌سازی ناتوان می‌باشند.

۵.۳. محتوای پتاسیم

قارچ‌های میکوریزی نقش مؤثری در رهاسازی پتاسیم از کانی‌ها و سرعت‌بخشیدن به انتقال پتاسیم در خاک از طریق هیف‌های خود و در نهایت افزایش جذب پتاسیم توسط گیاه دارند (Dalvand *et al*., 2015) با این تفاسیر، مایه‌زنی با کودهای زیستی پتاسیم بخش هوایی و ریشه را (P≤۰/۰۱) افزایش داد (جدول ۲). قارچ‌های میکوریزی عناصر موجود در محلول خاک را قبل از این‌که دوباره به حالت نامحلول درآیند از طریق ریسه‌های خود به گیاهان میزبان منتقل می‌نمایند و شاید به‌همین علت است که غلظت پتاسیم در گیاهان مایه‌زنی‌شده نسبت به گیاهان مایه‌زنی نشده افزایش داشت (Bagayoko *et al*., 2000).

بیش‌ترین غلظت پتاسیم بخش هوایی از مایه‌زنی با کود زیستی قارچ میکوریزی *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) به‌دست آمد (۳). این کود زیستی غلظت پتاسیم بخش هوایی را به میزان ٦۲/۰۱ درصد هم‌چنین میزان پتاسیم ریشه را به میزان ۳۵/٦ درصد افزایش داد. بیش‌ترین غلظت پتاسیم ریشه از مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) به‌دست آمد (جدول ۳). علت پیشی‌گرفتن قارچ *Funneliformis* mosseae نسبت به قارچ *Rhizophagus intraradices* در جذب پتاسیم در ریشه و بخش هوایی می‌تواند به‌دلیل اختلاف در جذب و انتقال این عنصر در این دو گونه مختلف قارچ و هم‌چنین توانایی بیش‌تر قارچ *Funneliformis mosseae* نسبت به *Rhizophagus intraradices* در کاهش pH خاک باشد (Karlidagh *et al*., 2007). نتایج پژوهش‌های مشابه نشان داد که مایه‌زنی رقم‌های مختلف آفتابگردان با قارچ‌های میکوریزی به‌طور متوسط ۹٦/۲ درصد غلظت پتاسیم را افزایش داد (Yousefirad & Esmail, 2004). افزایش مقدار پتاسیم در گیاهان میکوریزی، به‌ویژه در ریشه، نسبت به تیمار بدون قارچ ممکن است به این دلیل باشد که هیف‌های قارچی باعث افزایش سطح موردنیاز برای جذب شدن و مقادیر بیش‌تری از پتاسیم موردنیاز گیاه را از منطقه اطراف ریشه تخیله می‌کنند (Schenipof *et al*., 2011) از طرف دیگر افزایش پتاسیم گیاه را ممکن است بتوان با کاهش pH خاک به‌وسیله اسیدهای آلی تولیدشده توسط باکتری‌های محرک رشد و افزایش دسترسی به عناصر پتاسیم و کلسیم توضیح داد (Karlidagh *et al*., 2007).

افزایش سطوح سرب خاک میزان پتاسیم بخش هوایی و ریشه را (P≤۰/۰۱) کاهش داد (جدول ۲). بیش‌ترین میزان پتاسیم بخش هوایی از تیمار شاهد و کم‌ترین میزان آن از سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست

آمد (جدول ۳). هم‌چنین بیش‌ترین میزان پتاسیم ریشه از تیمار ۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین میزان آن از تیمار ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (جدول ۳). تیمار ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک غلظت پتاسیم ریشه و اندام هوایی‌های را به‌ترتیب ۳۱ و ۲۲/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد.

اثرات متقابل کودهای زیستی و سطوح سرب خاک بر غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ٤). بیش‌ترین میزان غلظت پتاسیم بخش هوایی از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis* mosseae + باکتری حل‌کننده فسفات و یا تیمار تلقیح با قارچ میکوریز *Funneliformis* mosseae به‌تنهایی و سطح صفر سرب خاک و کم‌ترین میزان آن از تیمار بدون‌مایه‌زنی (کود زیستی) و سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (جدول ٤)، هم‌چنین بیش‌ترین غلظت پتاسیم ریشه از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis* mosseae + باکتری حل‌کننده فسفات و سطح ۵۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین میزان آن از تیمار بدون مایه‌زنی یا شاهد و سطح ٤۰۰ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد (جدول ٤).

٦.۳. وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر نوع کود زیستی و سطوح مختلف آلودگی خاک به سرب بر وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین میزان وزن تر و خشک بخش هوایی از تیمار مایه‌زنی قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) و کم‌ترین میزان آن از تیمار بدون مایه‌زنی (C) به‌دست آمد (جدول ۳). با این حال تیمار I+P از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با تیمار تلقیح با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (M+P) نداشت و هردو در یک کلاس آماری قرار گرفتند (جدول ۳). تلقیح با کود زیستی I+P وزن تر و خشک بخش هوایی را به‌ترتیب به میزان ۳۰/۱۱ و ۷۱/٤۸ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد (جدول ۳).

قارچ‌های میکوریز از طریق گسترش هیف‌ها و توسعه سطح ریشه، امکان جذب آب بیش‌تری برای گیاه را فراهم می‌آوردند و به‌دنبال جذب آب بیش‌تر، مواد غذایی بیش‌تری نیز جذب نموده که منجر به تولید و تجمع ماده خشک بیش‌تری در گیاه می‌شود (Casson & Lindsye, 2003; Auge, 2001).

بیش‌ترین وزن تر و خشک ریشه از تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) و کم‌ترین مقدار آن از تیمار شاهد به‌دست آمد (جدول ۳). استفاده از کود زیستی I+P میزان وزن تر و خشک ریشه را به‌ترتیب به‌میزان ۲۰/٦٦ و ۳۱/۵۷ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد. ترشح هورمون‌های تنظیم‌کننده رشد گیاه و بیوسنتز هورمون‌های محرک رشد توسط قارچ و باکتری استفاده‌شده می‌تواند باعث تحریک و توسعه ریشه و در نتیجه جذب بیش‌تر مواد غذایی و افزایش وزن خشک گیاه گردد (Shiperz *et al.*, 1990). از طرف دیگر نتایج این پژوهش با یافته‌های سایر پژوهش‌گران مبنی بر این‌که باکتری‌های حل‌کننده فسفات با تولید ریزوبیوکیتین، تولید اتیلن در گیاه را کاهش داده و باعث افزایش رشد ریشه می‌شوند، مطابقت دارد (Shiperz *et al.*, 1990; Fasihi *et al.*, 2013).

با افزایش سطوح سرب خاک وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه به‌طور معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد کاهش یافت (جدول ۲). بیش‌ترین میزان وزن تر و خشک بخش هوایی از سطح صفر سرب خاک و کم‌ترین

میزان آن از سطح ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (جدول ٣). تیمار ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک وزن تر و خشک اندام‌های هوایی را به‌ترتیب به‌میزان ٤٣/٢٢ و ٣٩/٧ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. علت این امر را می‌توان چنین بیان نمود که فلزات سنگین بر ناقلان الکترون اثر می‌گذارند و با رساندن خود به مرکز واکنش فتوسیستم II اثر خود را بر جای می‌گذارند و سبب کاهش سطح انرژی و کاهش فتوسنتز در گیاه و در نتیجه کاهش وزن گیاه می‌شوند (Almida *et al.*, 2007).

ریشه‌های گیاه به‌سرعت از طریق کاهش رشد و تغییر در الگوی انشعاب، به میزان سرب جذب‌شده واکنش نشان می‌دهند (Briksle, 1991). هم‌چنین براساس برخی پژوهش‌ها، کاهش رشد ریشه و به‌تبع آن کاهش وزن ریشه گیاه ممکن است به‌دلیل لیگنینی‌شدن دیوارهٔ سلولی ریشه تحت تنش فلز سنگین یا اثر مستقیم تنش فلز بر هستهٔ سلولی باشد (Daud *et al.*, 2009). بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه میانگین‌ها بیش‌ترین وزن تر و خشک ریشه مربوط به سطح صفر سرب خاک و کم‌ترین میزان آن مربوط به سطح ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک بود (جدول ٣). تیمار ٤٠٠ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک وزن تر و خشک ریشه را به‌ترتیب به‌میزان ٣٣/٧٦ ٣٣/٥٨ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش داد. برهم‌کنش سرب و مایه‌زنی با کودهای زیستی از نظر آماری اثری معنی‌داری بر وزن تر و خشک گیاه ذرت نداشت (جدول ٢).

٤. نتیجه‌گیری

غلظت‌های بالای عنصر سنگین (سرب) استفاده‌شده در این مطالعه برای گیاه ذرت سمی بود و توانست اثرات سویی بر شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده داشته باشد. نتایج نشان داد در غلظت ٤٠٠ میلی‌گرم در کیلو گرم سرب شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده از قبیل: وزن تر اندام‌های هوایی (٤٣/٢٢ درصد)، وزن خشک اندام‌های هوایی (٣٩/٧ درصد) و وزن تر ریشه گیاه (٣٣/٧٦ درصد)، وزن خشک ریشه گیاه (٣٣/٥٨ درصد)، شاخص سبزینگی برگ (٢٥/٧ درصد)، ارتفاع گیاه (١٣/٤ درصد)، فسفر ریشه و بخش هوایی (٥٠ درصد)، فسفر بخش هوایی (٣٦/١١ درصد)، پتاسیم ریشه (٣١ درصد) و پتاسیم بخش هوایی (٢٢/٢ درصد) در مقایسه با تیمار شاهد (عدم استفاده از سرب) کاهش پیدا کند.

مایه‌زنی خاک با قارچ‌های میکوریزی و باکتری در شرایط عدم وجود عنصر سرب سبب بهبود شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه گردید. بر این اساس تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Funneliformis mosseae* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) توانست شاخص سبزینگی برگ (١١/٦٥ درصد)، فسفر ریشه (١٦١/٥) و بخش هوایی (٢٣٧ درصد)، پتاسیم ریشه را ٣٥/٦ درصد و پتاسیم بخش هوایی را ٦٢/٠١ درصد نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی (شاهد) افزایش دهد. از طرف دیگر مایه‌زنی خاک با قارچ‌های میکوریزی و باکتری در شرایط عدم وجود عنصر سرب سبب بهبود شاخص‌های رشد و عملکرد گیاه گردید. بر این اساس تیمار مایه‌زنی با قارچ میکوریز *Rhizophagus intraradices* + باکتری حل‌کننده فسفات (I+P) توانست وزن تر اندام‌های هوایی (٣٠/١١ درصد)، وزن خشک اندام‌های هوایی (٧١/٤٨ درصد) و ارتفاع گیاه (١٦/٤٤) را نسبت به تیمار بدون مایه‌زنی (شاهد) افزایش دهد.

اعمال قارچ‌های میکوریز و باکتری به خاک‌های حاوی سرب توانست اثرات مضر این عنصر را کاهش دهد. در شرایط اعمال توأم تیمار قارچ *Funneliformis mosseae* و باکتری حل‌کننده فسفر (M+P) و کادمیوم به گلدان‌های حاوی ذرت، توانست میزان سرب ریشه ٢٧/٣ درصد و سرب اندام هوایی ١٣/٦ درصد در مقایسه با شرایط کابرد

٤٠٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب را کاهش دهد. هم‌چنین اعمال قارچ‌های میکوریز و باکتری به خاک‌های حاوی سرب توانست اثرات مضر این عنصر را کاهش دهد. در شرایط اعمال توأم تیمار قارچ *Rhizophagus intraradices* و باکتری حل‌کننده فسفر (M+P) و کادمیوم به گلدان‌های حاوی ذرت، فسفر ریشه (٣٦/٩ درصد)، فسفر بخش هوایی (١١/٥ درصد)، پتاسیم ریشه (٢٠/٨ درصد) و پتاسیم بخش هوایی را ٥/٣ درصد در مقایسه با شرایط کابرد ١٠٠ میلی گرم بر کیلوگرم سرب را افزایش داد.

نتایج این پژوهش به‌طور واضح نشان داد که کاربرد غلظت بحرانی عنصر سرب به‌صورت مجزا، به‌شدت برای گیاهان خطرناک و مضر می‌باشد و در این شرایط اعمال کودهای زیستی، عملاً توانایی خنثی‌سازی این خطرات را به‌طور کامل نخواهد داشت. با توجه به نتایج حاصله در غلظت بحرانی سرب (٤٠٠ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)، کودهای زیستی نتوانستند تأثیر مفید و فزاینده‌ای بر شاخص سبزینگی برگ، ارتفاع، وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی داشته باشند. با این‌حال در غلظت‌های کم‌تر از فلز سنگین سرب، کودهای زیستی می‌تواند اثرات مضر و سوء این فلزات سنگین را در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه کاهش دهند.

٥. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

٦. منابع

Abbaspour, A., Kalbasi, M., Haj Rasooliha, SH. & Golchin, A. (2010). Survey of contamination of some Iranian agricultural soils with cadmium and lead, *13th Congress of Soil Science, Tehran-Soil Conservation and Watershed Research Center*. University of Tehran. (in Persian)

Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M. & Salimi, G. (2006). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and Bradyrhizobium japonicum on drought stress of soybean. *Biologia*, *61*(19), S324-S328. https://doi.org/10.2478/s11756-006-0182-x.

Amanifar, S., Asgharzadeh, N.A., Najafi, N., Ostan, Sh. V. & Bolandnazar, S. (2011). Effect of mycorrhizal fungi on lead phytoremediation by sorghum (*Sorghum bicolor* L.). *Water and Soil Science*, *22*, 16-1. (in Persian)

Andrade, S.A.L., Abreu, C.A., De Abreu, M.F. & Silveira, A.P.D. (2004). Influence of lead additions on *arbuscular mycorrhiza* and *Rhizobium symbioses* under soybean plants. *Applied Soil Ecology*, *26*(2), 123-131. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2003.11.002

Ansari, A., Razmjoo, J., Karim Majani, H. & M., Zarei, (2014). Effect of mycorrhizal inoculation and pre-treatment with salicylic acid at different levels of drought on morphological factors on *Brassica napus*. *Journal of Crop Production and Processing*, *4*(12), 181-194. (in Persian)

Auge, R. M. (2011). Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, 11(1), 3-42. https://doi.org/10.1007/s005720100097

Bagayoko, M., George, E., Romheld, V. & Buerkert, A. (2000). Effect of mycorrhizae and phosphorus on growth and nutrient uptake of millet, cowpea and sorghum on a West African soil. *The Journal of Agricultural Science*, 135(4), 399-407. DOI: https://doi.org/10.1017/S0021859699008254

Bashan, Y. & Holguin, G. (1997). Azospirillum–plant relationships: environmental and physiological advances (1990–1996). *Canadian Journal of Microbiology*, *43*(2), 103-121. DOI: 10.1139/m97-015

Boonyapookana, B., Parkpian, P., Techapinyawat, S., Delaune, R.D. & Jugsujinda, A. (2005). Phytoaccumulation of lead by Sunflower (*Helianthus annus*), Tobacco (*Nicotiana tabacum*), and Vetiver (*Vetiveria zizanioides*). *Journal of Environmental Science and Health*, *40*(1), 117-137. https://doi.org/10.1081/ESE-200033621

Casson, S. A. & Lindsey, K. (2003). Genes and signalling in root development. *New Phytologist*, *158*(1), 11-38. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00705.x

Chen, B.D., Li, X.L., Tao, H. Q., Christie, P. & Wong, M.H. (2003). The role of *arbuscular mycorrhiza* in zinc uptake by red clover growing in a calcareous soil spiked with various quantities of zinc. *Chemosphere*, *50*(6), 839-846. DOI: 10.1016/s0045-6535(02)00228-x

Dalvand, M., Hamidian, A. H., Zare Chahouki, M. A., Motesharrezadeh, B., Mirjalili, A. A. & Esmaeilzadeh, E. (2015). Determination of the concentration of heavy metals (Cu, Pb, Zn and Mn) in shoots of Artemisia sp. in natural lands of Darreh Zereshk copper mine, Taft, Yazd. *Journal of Range and Watershed Management*, *8*(6), 219-229. (in Persian)

Dehghani Mashkani, M.R., Naghdi Badi, H., Darzi, M.T., Mehrafarin, A., Rezazadeh, Sh. & Kadkhoda, Z. (2011). The Effect of Biological and Chemical Fertilizers on Quantitative and Qualitative Yield of Shirazian Babooneh (*Matricaria recutita* L.). *Journal of Medicinal plants*, *2*(38), 35-48. (in Persian)

Demir, S. (2004). Influence of *arbuscular mycorrhiza* on some physiological growth parameters of pepper. *Turkish Journal of Biology*, *28*(2-4), 85-90.

Fasihi, M. M., Shmshiri, H. & Rousta, R. (2013). Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungus (*Glomus moseae*) on Vegetative Growth of Greenhouse Cucumber Plant of Nahid Cultivar (NIZ 51 484) at Different Levels of Sodium Bicarbonate. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, *5* (17), 62-53. (in Persian)

Gajewska, E., Słaba, M., Andrzejewska, R. & Skłodowska, M. (2006). Nickel-induced inhibition of wheat root growth is related to H2O2 production, but not to lipid peroxidation. *Plant Growth Regulation*, *49*(1), 95-103. doi:10.1007/s10725-006-0018-2

Gee, G. W. & Bauder, J. W., (1986). *Particle-size analysis*. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America. Inc., Madison, WIS, USA.

Gildon, A.A. & Tinker, P.B. (2000). Interactions of vesicular-arbuscular mycorrhizal infection and heavy metals in plants. *Journal of New Phytologist*, *95*(2), 247-261. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1983.tb03491.x

Glick, B. R., Penrose, D. M. & Li, J. (2003). A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*, *190*(1), 63-68. DOI: 10.1006/jtbi.1997.0532

Gonzalez-Guerrero, M., Azcon-Aguilar, C., Mooney, M., Valderas, A., MacDiarmid, C. W., Eide, D.J. & Ferrol, N. (2005). Characterization of a *Glomus intraradices* gene encoding a putative Zn transporter of the cation diffusion facilitator family. *Fungal Genetics and Biology*, *42*(2), 130-140. DOI: 10.1016/j.fgb.2004.10.007.

Hall, J.L. (2002). Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, *53*(366), 1-11. https://doi.org/10.1093/jexbot/53.366.1

Han, S. H., Kim, D. H. & Lee, J. C. (2011). Effects of the ectomycorrhizal fungus Pisolithus tinctorius and Cd on physiological properties and Cd uptake by hybrid poplar Populusalba × glandulosa. *Journal of Ecology and Environment*, *34*(4), 393-400.

Hanson, W.C. (1950). The photometric determination of phosphorus in fertilizers using the phosphovanado-molybdate complex. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *1*(6), 172-173. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740010604

Joner, E. & Leyval, C. (2000). Time-course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimes. *Biology and Fertility of Soils*, *33*(5), 351-357. https://doi.org/10.1007/s003740000331

Kapoor, A. & Viraraghavan, T. (1995). Fungal biosorption an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewaters: a review. *Bioresource Technology*, 53(3), 195-206. https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00072-M

Karlidag, H., Esitken, A., Turan, M. & Sahin, F. (2007). Effects of root inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth and nutrient element contents of leaves of apple. *Scientia Horticulturae*, *114*(1), 16-20. DOI: 10.1016/j.scienta.2007.04.013

Khan, A. G. (2006). Mycorrhizoremediation an enhanced form of phytoremediation. *Journal of Zhejiang University Science B*, *7*(7), 503-514. doi: 10.1631/jzus.2006.B0503

Kitson, R.E. & Mellon, M.G. (1944). Colorimetric determination of phosphorus as molybdivanadophosphoric acid. *Journal of Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition*, *16*(6), 379-383. https://doi.org/10.1021/i560130a017

Kumar, P. N., Dushenkov, V., Motto, H. & Raskin, I. (1995). Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Soils. *Environmental Science and Technol*, *29*(5), 1232-1238. DOI: 10.1021/es00005a014

Kungu, J.B., Lasco, R., Delacruz, L., Delacruz, R. & Husain, T. (2010). Effect of vesicular

arbuscular mycorrhiza (VAM) fungi inoculation on coppicing ability and drought resistance of Senna spectabilis. *Pakistan Journal of Botany*, 40(5), 2217-2224.

Liud, J., Li, K., Xu, J., Zhang, Z., Ma, T., Lu, X., Yang, J.H. & Zhu, Q. (2010). Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars. *Plant Science*, *165*(4), 793-802. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00273-5

Matamoros, M. A., Baird, L. M. & Escuredo, P. R. (2000). Stress-induced legume root nodule senescence: physiological, biochemical and structural alterations. *Plant Physiology*, *121*(1), 97-112. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.121.1.97

McGrath, S. P., Zhao, F. J. & Lombi, E. (2001). Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils. *Plant and Soil*, *232*(1-2), 207-214. https://doi.org/10.1023/A:1010358708525

Mclean, E.O. (1982). Soil pH and Lime Requirement. In: Page, A.L., Ed., *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, 199-224.

Rostami, Gh., Gholamalizadeh Ahangar, A. & Lakzian, A. (2013). The effect of time on the distribution of lead forms in contaminated soil. *Journal of Water and Soil*, *5*(27), 1057-1066. (in Persianin Persian)

Salt, D.E., Smith, R.D. & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*. *49*(1), 643-668. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.*49*.1.643

Sharma, P. & Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. *Plant Physiology*. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, *17*(1), 35-52.

Smith, S.E. & Read, D.J. (2008). Mineral nutrition, toxic element accumulation and water relations of arbuscular mycorrhizal plants. *Mycorrhizal Symbiosis*, *45*(3), 11-28. DOI: 10.1016/B978-012370526-6.50007-6

Tao, L. & Zhiwei, Z. (2005). Arbuscular mycorrhizas in a hot and arid ecosystem in southwest China. *Applied Soil Ecology*, 29(2), 135-141. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.11.005

Tangahu, B.V., Abdullah, S.R.S., Basri, H., Idris, M., Anuar, N. & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, http://dx.doi.org/10.1155/2011/93916.

Tessier, A., Campbell, P.G.C. & Bisson M. (1979). Sequential Extraction procedure for the speciation of particular trace metals. *Analytical Chemistry*, *51*(7), 1-22.

Ugolini, F., Tognetti, R., Raschi, A. & Bacci, L. (2013). Quercus ilex L. as bioaccumulator for heavy metals in urban areas: Effectiveness of leaf washing with distilled water and considerationson the trees distance from traffic. *Urban Forestry and Urban Greening*, *12*(4), 576-584. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.05.007

Weber, F., Kowarik, I. & Säumel, I. (2018). Uptake of Zn by *arbuscular mycorrhizal* white clover from Zn-contaminated soil. *Chemosphere*, *42*(2), 193-199. DOI: 10.1016/s0045-6535(00)00125-9

Wong, C.C., Wu, S.C., Kuek, C., Khan, A.G. & Wong, M.H. (2007). The role of mycorrhizae associated with vetiver grown in Pb-/Zn-contaminated soils: greenhouse study. *Restoration Ecology*, *15*(1), 60-67. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00190.x

Wu, Q.S. & Xia, R.X. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi influence growth, osmotic adjustment and photosynthesis of citrus under well-watered and water stress conditions. *Journal of Plant Physiology*, *163*(4), 417-425. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.04.024

Yousefirad, M. & Karbalaei Esmaeil, M.R. (2010). Effects of mycorrhizal fungi on uptake of macronutrients and some morphological traits in sunflower cultivars (*Heliantus annus* L.). Second National Conference on Agriculture and Sustainable Development: Opportunities and Challenges Facing. Pp: 1-13. (in Persian)