



Effect of Mycorrhiza and Eggshell on Growth Parameters and Hazard Index of Basil (*Ocimum basilicum* L.) in Multi-metal Contaminated Soil

Rokh Aalipour¹ | Nafiseh Rang Zan^{*2}

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science and Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. E-mail: rokh.alipor@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan. E-mail: rangzan@asnrkh.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
<p>Article type: Full Length Research Paper</p> <p>Article history: Received: 01.22.2021 Revised: 06.26.2021 Accepted: 08.24.2021</p> <p>Keywords: Basil, Eggshell, Hazard Index, Heavy metals, Mycorrhiza</p>	<p>Background and Objectives: One of the serious problems of biological communities is environmental pollution caused by heavy metals due to increase of industrial activities regardless of environmental considerations. According to the nature of these contaminants and considerable persistence in environmental components, especially soil, modification of contaminated soils to mitigate the negative effects of these contaminants on plants as a food chain initiator, is necessary. Considering the importance of using waste to recover them and also the different reaction of mycorrhiza in the face of heavy metals, this study aimed to investigate the effect of eggshell and mycorrhiza on changes in hazard index in basil plant.</p> <p>Materials and Methods: This experiment was conducted in factorial completely randomized design consist of soil factors (non-contaminated, contaminated), eggshell waste (0, 3 and 5% w/w) and mycorrhiza (non-inoculated, inoculated with combined <i>Funneliformis mosseae</i> and <i>Rhizophagus irregularis</i>) in 3 replications (36 experimental units). Basil (<i>Ocimum basilicum</i> L.) was selected as an experimental plant due to its high leaf area and production of suitable dry matter. Finally, growth parameters, concentrations of zinc, copper, lead and cadmium in the plant tissue, transfer coefficient, translocation factor, hazard quotient and hazard index of the plant were evaluated.</p> <p>Results: Increasing the level of soil pollution reduced the height of the shoot by 54% and the fresh weight of the shoot by 70%. The use of eggshell waste by 5% w/w as compared to the control treatment in contaminated soil caused 32% increase in plant shoot height and 16.5% increase in fresh shoot weight. In contrast, root inoculation increased shoot height by 25.7% and shoot fresh weight by 4.47%. A relatively similar trend was observed in case of shoot and root dry weight. Under soil contamination conditions, application of 5% of eggshell waste reduced the amount of zinc, copper and cadmium in the shoots of the plant by 11.7%, 4.16% and 16.7%, respectively. In contaminated soil, application of mycorrhiza caused a significant reduction in concentration of zinc, copper, lead and cadmium in the shoots by 33.8%, 2.87, 25.9% and 43.3%, respectively. In contaminated soil, the highest hazard index (2.14) was observed in the treatment without eggshell and not inoculation with mycorrhiza. Because of eggshell application at the rate of 5% and mycorrhiza inoculation, hazard index decreased by 14.9% and 36%, respectively. According to the results, the use of eggshell waste and mycorrhiza inoculation reduced the hazard index in the contaminated soil,</p>

which the effects were different according to the type of element. However, in the case of both treatments, according to the level of contaminants, the value of basil hazard index did not fall below the allowable level, so that in 5% eggshell treatment, the hazard index was 1.54 and in mycorrhiza inoculation treatment, 1.31 was reported. The lowest hazard index in contaminated soil (1.16) was observed in treatment of mycorrhiza inoculated along with 5% eggshell.

Conclusion: Basil cultivated in contaminated soil, despite the effectiveness of treatments in reducing the hazard index, was still at the risk of consumption. Considering the type and concentration of heavy metals in the optimal use of recycled materials such as eggshell waste as well as bioremediators such as mycorrhiza can be of particular importance.

Cite this article: Aalipour, Rokh, Rang Zan, Nafiseh. 2022. Effect of Mycorrhiza and Eggshell on Growth Parameters and Hazard Index of Basil (*Ocimum basilicum* L.) in Multi-metal Contaminated Soil. *Journal of Soil Management and Sustainable*, 11 (4), 1-27.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2022.18790.2006

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



اثر مایکوریزا و پوسته تخم مرغ بر صفات رشدی و میزان شاخص خطر در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت شرایط آلودگی خاک به فلزات سنگین

رخ عالی پور^۱ | نفیسه رنگزن^{۲*}

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. رایانامه: rokh.alipor@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. رایانامه: rangzan@asnruckh.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: یکی از معضلات جدی جوامع زیستی، آلودگی محیط زیست با فلزات سنگین در پی افزایش فعالیت‌های صنعتی بدون توجه به ملاحظات زیست‌محیطی است. با توجه به ماهیت این نوع از آلاینده‌ها و ماندگاری قابل ملاحظه در اجزای محیط زیست به ویژه خاک، نیاز به اصلاح خاک‌های آلوده جهت کاهش اثرات این آلاینده‌ها بر گیاهان به عنوان آغازگر زنجیره غذایی، احساس می‌شود. با توجه به اهمیت استفاده از ضایعات در جهت بازیابی آن‌ها و همچنین اثرات متفاوت مایکوریزا (قارچ‌ریشه) در مواجهه با فلزات سنگین، این پژوهش با هدف بررسی اثر پوسته تخم مرغ و مایکوریزا بر تغییرات شاخص خطر در گیاه ریحان مد نظر قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲	
واژه‌های کلیدی: پوسته تخم مرغ، ریحان، شاخص خطر، فلزات سنگین، مایکوریزا	مواد و روش‌ها: این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی شامل فاکتورهای خاک (غیرآلوده، آلوده)، پوسته تخم مرغ (صفر، ۳ و ۵ درصد وزنی) و قارچ‌ریشه (عدم تلقیح، تلقیح شده با گونه‌های <i>Funneliformis mosseae</i> و <i>Rhizophagus irregularis</i> به صورت ترکیبی) در ۳ تکرار (در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی) اجرا و گیاه ریحان (<i>Ocimum basilicum</i> L.)، با توجه به سطح برگ زیاد و تولید ماده خشک مناسب، به عنوان گیاه آزمایشی انتخاب گردید. در پایان مؤلفه‌های رشد، غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیوم در گیاه، ضریب انتقال، فاکتور جابجایی، نسبت و شاخص خطر در گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت.
	یافته‌ها: افزایش سطح آلودگی خاک ارتفاع اندام هوایی را ۵۴ درصد و وزن تر اندام هوایی را ۷۰ درصد کاهش داد. استفاده از پوسته تخم مرغ به میزان ۵ درصد در مقایسه با تیمار شاهد در شرایط خاک آلوده باعث افزایش ۳۲ درصد در ارتفاع اندام هوایی گیاه و ۱۶/۵ درصد در وزن تر اندام هوایی گیاه گردید. در مقابل تلقیح قارچ‌ریشه ارتفاع اندام هوایی را ۲۵/۷ درصد و وزن تر اندام هوایی را ۴/۴۷ درصد افزایش داد. روند نسبتاً مشابهی در خصوص وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه مشاهده شد. تحت شرایط آلودگی خاک، کاربرد ۵ درصد وزنی

پوسته تخم مرغ در مقایسه با عدم مصرف آن، مقدار عنصر روی، مس و کادمیوم در اندام هوایی گیاه را به ترتیب ۱۱/۷، ۴/۱۶ و ۱۶/۷ درصد کاهش داد. در خاک آلوده به فلزات سنگین کاربرد قارچ ریشه باعث کاهش معنی دار غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیوم در اندام هوایی گیاه به مقدار ۳۳/۸، ۲/۸۷، ۲۵/۹ و ۴۳/۳ درصد گردید. در خاک آلوده بیشترین مقدار شاخص خطر به میزان ۲/۱۴ در تیمار فاقد پوسته تخم مرغ و عدم تلقیح با قارچ ریشه مشاهده شد. تحت تأثیر استفاده از ۵ درصد پوسته تخم مرغ و تلقیح قارچ ریشه، شاخص خطر به ترتیب ۱۴/۹ و ۳۶ درصد کاهش یافت. با توجه به نتایج به دست آمده استفاده از تیمارهای پوسته تخم مرغ و تلقیح قارچ ریشه باعث کاهش شاخص خطر در خاک آلوده گردید که میزان اثر با توجه به نوع عنصر متفاوت گزارش شد. البته در مورد هردو تیمار با توجه به سطح غلظت آلاینده‌ها، مقدار شاخص خطر مصرف گیاه ریحان به پایین‌تر از حد مجاز آن نرسید به نحوی که تحت تأثیر کاربرد ۵ درصد پوسته تخم مرغ شاخص خطر، ۱/۵۴ و در تیمار تلقیح با قارچ ریشه ۱/۳۱ گزارش گردید. کمترین میزان شاخص خطر در خاک آلوده تلقیح شده با قارچ ریشه به همراه ۵ درصد پوسته تخم مرغ به میزان ۱/۱۶ محاسبه گردید.

نتیجه‌گیری: گیاه ریحان کشت شده در خاک آلوده علی‌رغم مؤثر بودن تیمارها در کاهش مقدار شاخص خطر، همچنان در حد خطرآفرینی مصرف قرار داشت. در نظر گرفتن نوع و غلظت فلزات سنگین در استفاده بهینه از مواد بازیافتی اصلاحی مانند پوسته تخم مرغ و همچنین اصلاحگرهای زیستی مانند قارچ ریشه، می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد.

استناد: عالی‌پور، رخ، رنگ‌زن، نفیسه (۱۴۰۰). اثر مایکوریزا و پوسته تخم مرغ بر صفات رشدی و میزان شاخص خطر در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت شرایط آلودگی خاک به فلزات سنگین. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۱ (۴)، ۲۷-۱.

DOI: 10.22069/ejsms.2022.18790.2006



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

جهش جوامع صنعتی از دوره کشاورزی سنتی به کشاورزی مدرن با انبوهی از روش‌های آمیخته به آزمون و خطا همراه بود، اما در نهایت استفاده بی‌رویه از مواد شیمیایی مانند کود و سم، برای تولید بیش‌تر نتایج معکوس به همراه آورد؛ زیرا آلودگی دامنه‌دار آب و خاک، باعث سیر نزولی حاصلخیزی اراضی شد (۱۰). از بین آلاینده‌های خاک، فلزات سنگین در سالیان اخیر به دلیل غیرقابل تجزیه بودن و اثرات فیزیولوژیکی آن‌ها بر موجودات زنده در غلظت‌های کم، دارای اهمیت شناخته شده‌اند. این عناصر در خاک تحرک بسیار کمی دارند به نحوی که با افزوده شدن به خاک تقریباً تمامی آن‌ها در لایه سطحی خاک و حداکثر تا عمق ۳۰ سانتی‌متری باقی می‌مانند. سالانه هزاران تن از عناصر سنگین در مقیاس جهانی وارد سیستم خاک می‌شود (۵۶). این فلزات به طور طبیعی در خاک وجود دارند و در حقیقت فعالیت‌های انسانی مانند آبیاری زمین‌های کشاورزی با آب آلوده به پساب صنایع و یا فاضلاب ممکن است منجر به تجمع بیش از حد فلزات سنگین در خاک شود (۴۲). گزارش سازمان بهداشت جهانی (۱۹۹۸) نشان می‌دهد که از بین فلزات سنگین آرسنیک، جیوه، کادمیوم و سرب مهم‌تر هستند (۵۴). فلزات سنگین علاوه بر اثرات زیان‌آور بر خاک و آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق آبشویی، موجب کاهش عملکرد و کیفیت محصول می‌شوند و در نهایت با ورود به زنجیره غذایی سبب به خطر افتادن سلامتی افراد جامعه و دیگر موجودات زنده خواهند شد (۲۳، ۲۵). بعضی از فلزات سنگین در کشاورزی، عناصر کم‌مصرف نامیده می‌شوند و برای رشد گیاه ضروری و یا مفید تشخیص داده شده‌اند و دسته دیگر دارای اثرات سمی می‌باشند که البته گاه‌ها تمایز روشنی بین این دسته‌بندی‌ها وجود ندارد. برخی از عناصر مانند روی

و مس در غلظت کم ضروری و در غلظت زیاد سمی هستند. سمیت عنصری مانند سرب و کادمیوم ناشی از رفتار مشابه آن‌ها با عناصر ضروری سبک‌تر در رفتار بیوشیمی و جذب به وسیله گیاه است که از جایگزین شدن آن‌ها در وظایف بیوشیمیایی ناشی می‌شود. به عنوان مثال کادمیوم جذب شده می‌تواند وظایف عنصر ضروری روی را تقلید کند. امروزه موضوع تجمع فلزات سنگین در سبزیجات و مخاطرات آن برای مردم به یک نگرانی عمومی تبدیل شده است (۵۷). نتایج محمدی (۲۰۰۱) بیانگر آن است که جذب فلزات سنگین در سبزیجات برگ‌ی به مراتب بیش‌تر از سبزیجات ریشه‌ای و غده‌ای است که همین موضوع سبب افزایش خطر مصرف سبزیجات برگ‌ی آلوده به فلزات سنگین می‌گردد (۳۰). به‌طور کلی میزان عنصر روی در خاک‌ها در حدود ۳۰۰-۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (با متوسط ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) می‌باشد و مقادیر بالاتر از این حد نشان‌دهنده آلودگی خاک است. در این شرایط رشد ریشه و توسعه برگ کاهش یافته و زردی به ویژه در برگ‌های جوان مشاهده می‌شود. مس عنصر نسبتاً متحرکی است و تغییرات کمی را در محتوای کل پروفیل خاک نشان می‌دهد. این عنصر پتانسیل سمیت بالایی دارد. ترکیبات مس در قارچ‌کش‌ها، جلبک‌کش‌ها و کودهای شیمیایی وجود دارند و استفاده مداوم از این ترکیبات در فرایندهای کشاورزی باعث تجمع آن در خاک می‌شود (۲۷). سرب در گیاهان و خاک به مقدار بسیار کم یافت می‌شود. با این‌که سرب عنصری ضروری برای گیاهان یا حیوانات نیست، می‌تواند به راحتی توسط گیاهان و حیوانات جذب شود. کادمیوم در محیط بسیار پایدار است و عنصری غیرضروری برای گیاهان بوده که هیچ‌گونه عملکرد بیولوژیک شناخته شده‌ای ندارد. از آن‌جا که فلزات سنگین به راحتی توسط فرآیندهای

مس در خاک اره و بیشترین مقدار جذب سطحی روی و مس در تیمار پوسته شلتوک رخ داد (۶). مهراستی و همکاران (۲۰۱۰) نیز از پوست موز اصلاح شده به منظور حذف فلزات سرب و کادمیوم از محلول آبی استفاده کردند (۲۹).

قارچ ریشه (مایکوریزا) که از فراوانترین همزیستی‌ها میان ریزجاندارها و گیاهان عالی است، در واقع مشارکت بین گیاهان و قارچ‌ها است که در نتیجه آن در بافت پوسته ریشه، در طی دوره رشد فعال گیاه، همزیستی ایجاد می‌شود. در این سیستم قارچ پوشش گسترده‌ای از هیف‌های به هم تابیده به نام میسلیوم را در اطراف ریشه گیاه میزبان تشکیل می‌دهد که راندمان جذب را در گیاه افزایش می‌دهند. به‌طور کلی ۸۳ درصد از دولپه‌ای‌ها و ۷۹ درصد از تک‌لپه‌ای‌ها قادر به تشکیل سیستم مایکوریزایی هستند. قارچ ریشه حدود ۲۰ درصد از کربن ساخته شده توسط گیاه را دریافت و در مقابل به جذب بیش‌تر آب، فسفر و سایر عناصر غذایی از خاک، کمک می‌نماید (۴۴). گیاهان مایکوریزایی در مقایسه با گیاهانی که فاقد مایکوریزا هستند، تنش‌های محیطی را بهتر تحمل کرده و اغلب قدرت رقابت بیش‌تری دارند. سونگ (۲۰۰۵) گزارش نمود که بهبود شرایط ریزوسفر خاک در شرایط تنش، توسعه سیستم ریشه‌ای و بهبود جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه، افزایش سیستم دفاعی گیاه میزبان و کاهش خطرات اکسیداسیون ناشی از تنش خشکی را می‌توان با اثرات مثبت مایکوریزا مرتبط دانست (۴۵). قارچ ریشه در برخی شرایط باعث افزایش جذب فلزات سنگین و انتقال از ریشه به اندام هوایی گیاه می‌شود که تحت فرایند استخراج گیاهی در محیط‌های آلوده شناخته می‌شود؛ و در برخی موارد نیز باعث غیرمتحرک‌سازی آلاینده‌ها در محیط خاک شده که با عبارت تثبیت گیاهی به آن اشاره می‌شود. بروز فرایند

بیولوژیکی تجزیه نمی‌شوند و حتی در غلظت‌های پایین نیز در موجودات زنده انباشته شده و منجر به مرگ می‌شوند، اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین تنها با استفاده از تکنیک‌هایی که این آلاینده‌ها را از خاک خارج نموده و یا آن‌ها را در مکان‌های خود تثبیت نمایند، امکان‌پذیر است. اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از تکنیک‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی صورت می‌پذیرد (۳۹). انواع روش‌های حذف فلزات سنگین شامل رسوب‌دهی شیمیایی، تبادل یونی، استخراج با حلال، اولترافیلتراسیون، اسمز معکوس، نانو فیلتراسیون و روش‌های جذب سطحی می‌باشد که روش جذب سطحی با ترکیبات گوناگونی صورت می‌پذیرد که مهم‌ترین آن‌ها کربن فعال، اکسی فلزات، نانو لوله‌های کربنی و بیوجاذب‌ها می‌باشد (۳۰). هر عنصری جهت جذب گیاهی ابتدا باید وارد فاز محلول خاک گردد، به‌عبارت دیگر هرگاه در مورد غلظت خطرآفرین عناصر که به‌صورت فعال ایجاد مشکل می‌کنند صحبت می‌شود در حقیقت منظور غلظت در فاز محلول خاک است. بنابراین دسترسی این عناصر برای گیاهان و بروز اثرات زیست‌محیطی آن‌ها وابسته به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک خواهد بود. جذب سطحی این فلزات روی سطح ذرات خاک مهم‌ترین فرآیند شیمیایی است که حرکت این عناصر را در خاک تعیین می‌نماید. پژوهشگران متعددی افزایش غلظت کل فلزات سنگین در خاک را پس از استفاده از کمپوست گزارش کرده‌اند که این نشان از افزایش قابلیت جذب سطحی خاک توسط کمپوست و تثبیت فلزات سنگین می‌باشد (۳۱، ۵۳). اسدی و همکاران (۲۰۰۸) جذب سطحی خاک اره و پوسته شلتوک اصلاح شده را برای حذف فلزات سرب، کادمیوم، روی، مس و نیکل از محلول‌های ترکیبی و پساب مورد مطالعه قرار دادند. بیش‌ترین مقدار جذب

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال ۱۳۹۸ در گلخانه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان اجرا شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی شامل فاکتورهای خاک (غیرآلوده، آلوده)، پوسته تخم مرغ (صفر، ۳ و ۵ درصد وزنی) و قارچ‌ریشه (عدم تلقیح، تلقیح شده) در ۳ تکرار (در مجموع ۳۶ واحد آزمایشی) اجرا و گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) با توجه به سطح برگ زیاد و نتیجتاً تولید ماده خشک مناسب به عنوان گیاه آزمایشی انتخاب گردید. خاک مورد استفاده از مزرعه آزمایشی دانشکده کشاورزی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر برداشت و بعد از عبور از الک ۲ میلی‌متر، برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی شامل بافت (با استفاده از هیدرومتر به روش بایوکاس، ۱۹۶۲)، پ-هاش و شوری (با تهیه گل اشباع، USDA)، درصد مواد آلی (۵۲)، درصد کربن غیرآلی (کربنات کلسیم)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۸)، نیتروژن (کجلدال)، فسفر قابل جذب (با استفاده از اسپکتروفوتومتر به روش اولسن و همکاران، ۱۹۵۴)، پتاسیم قابل جذب (با استفاده از فلم‌فوتومتر به روش توماس، ۱۹۸۲)، مقادیر کل روی، مس، سرب و کادمیوم (با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل ContrAA-300 به روش کواویلر، ۱۹۹۸)، مقادیر فلزات قابل استخراج با DTPA (۲۶)، مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس خاک آزمایشی دارای بافت لومی رسی (۲۱/۵ درصد شن ۰/۰۵-۲ میلی‌متر)، ۵۳/۲ درصد سیلت (۰/۰۰۲-۰/۰۵ میلی‌متر)، ۲۵/۳ درصد رس (کم‌تر از ۰/۰۰۲ میلی‌متر)؛ پ-هاش برابر با ۷/۳۷؛ هدایت الکتریکی ۱/۴۷ دسی‌زیمنس بر متر، درصد مواد آلی برابر با ۰/۰۵؛ کربنات کلسیم ۲۹/۲ درصد؛ ظرفیت تبادل کاتیونی برابر با ۱۳/۷ سانتی‌مول بر کیلوگرم؛ نیتروژن کل برابر با ۰/۲ درصد، فسفر قابل جذب برابر

استخراج یا تثبیت گیاهی به نوع گیاه-قارچ‌ریشه و ترکیب و هم‌چنین غلظت فلزات سنگین در محیط ریشه وابسته است. در بررسی‌های مرتبط با توان گیاه‌پالایی هر دو فرایند می‌توانند به کاهش اثرات زیست‌محیطی آلاینده‌ها منجر شوند؛ اما با تغییر نگرش به سوی ارزیابی خطر مصرف گیاهان کشت شده در محیط‌های آلوده، فرایند تثبیت گیاهی می‌تواند آثار مخرب مصرف تولیدات گیاهی آلوده (به ویژه در سبزیجات و گیاهان با اندام‌های ذخیره‌ای هوایی) را تا حد زیادی کاهش دهد (۳۸). در حال حاضر علاقه رو به رشدی در استفاده از مواد در دسترس و کم‌هزینه برای تثبیت و حذف فلزات سنگین وجود دارد؛ مزایای عمده تکنولوژی‌های جذب، تأثیر آن‌ها در کاهش یون‌های فلزات سنگین به سطوح غلظتی پایین با استفاده از مواد جاذب ارزان‌قیمت می‌باشد. یکی از ضایعاتی که به صورت روزانه تولید می‌شود، پوسته تخم مرغ می‌باشد. پوسته تخم مرغ دارای ۹۱/۱۷ درصد نمک‌های غیرآلی، ۶/۴ درصد پروتئین، ۱/۷ درصد آب و ۰/۰۳ درصد لیپید می‌باشد و ساختار پلیمری آن خصوصیات منحصر به فردی به آن بخشیده است (۳۸). این ماده عمدتاً از آهک تشکیل شده است و بنابراین این سؤال مطرح می‌گردد که آیا پوسته تخم مرغ می‌تواند به عنوان جاذب عمل کرده و امکان جذب آلاینده‌ها را در محیط خاک آلوده فراهم آورد. با توجه به اثرات متفاوت قارچ‌ریشه در مواجهه با فلزات سنگین و هم‌چنین ماهیت ترکیب پوسته تخم مرغ و اهمیت استفاده از ضایعات در جهت بازیابی آن‌ها این پژوهش با عنوان "اثر مایکوریزا و پوسته تخم مرغ بر صفات رشدی و میزان شاخص خطر در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) تحت شرایط آلودگی خاک به فلزات سنگین" مد نظر قرار گرفت.

$$C_d = \sum_{i=1}^{i=n} C_f \quad (2)$$

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_f}{n} \quad (3)$$

میانگین درجه آلودگی کم‌تر از ۱/۵ آلودگی خیلی کم، بین ۱/۵ و ۲ آلودگی کم، بین ۲ و ۴ آلودگی متوسط، بین ۴ و ۸ آلودگی زیاد، بین ۸ و ۱۶ آلودگی خیلی زیاد، بین ۱۶ و ۳۲ آلودگی فوق حاد، تفسیر می‌گردد. بنابراین نمونه خاک به صورت اولیه دارای میانگین درجه آلودگی ۰/۶۱ می‌باشد که نشان‌دهنده آلودگی خیلی کم بوده و به‌عنوان خاک غیرآلوده به آن اشاره می‌شود. جهت تهیه نمونه خاک آلوده به صورت مصنوعی، میانگین درجه آلودگی خاک حدود ۱۱ (درجه آلودگی خیلی زیاد) مد نظر قرار گرفت و با توجه به مقادیر اولیه فلزات موجود در خاک، ۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم روی، ۵۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سرب و ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم با استفاده از نمک‌های نیتراته عناصر به خاک اضافه گردید به‌نحوی که فاکتور آلودگی روی، مس، سرب و کادمیوم به ترتیب ۱۱/۶، ۱۱/۴، ۱۱/۲ و ۱۰/۴ و میانگین درجه آلودگی خاک برابر با ۱۱/۲ محاسبه گردید. سپس توده خاک آلوده در پلاستیک‌های فاقد زهکش به مدت ۳ ماه در مواجهه با دوره‌های متناوب تر و خشک شدن قرار گرفت تا برهمکنش آلاینده‌ها و خاک باعث آمیختگی بیش‌تر و همگن‌تر شدن محیط خاک گردد. با توجه به بررسی نتایج سایر پژوهش‌ها در خصوص اثرگذاری استریل کردن خاک بر تغییرات تمایل میکوریزایی (پاسخ رشد میکوریزایی) و همچنین نزدیک‌تر بودن شرایط آزمایشی به محیط طبیعی، ترجیح داده شد که خاک

با ۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و پتاسیم قابل جذب برابر با ۱۵۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم، بود. مقدار کل فلزات سنگین شامل روی، مس، سرب و کادمیوم به ترتیب ۰/۷۵، ۲۰/۱، ۷/۷۲ و ۰/۴۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و مقادیر قابل استخراج با DTPA (با قابلیت بالای دسترسی زیستی) برابر با ۲۰/۴، ۱۵/۹، ۳/۵۳ و ۰/۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، اندازه‌گیری شد. جهت بررسی سطح آلودگی خاک به صورت اولیه و همچنین تهیه نمونه خاک آلوده از فاکتور آلودگی و میانگین درجه آلودگی استفاده شد که محاسبه آن‌ها از طریق رابطه‌های زیر صورت گرفت:

$$C_f^i = \frac{C_m^i}{C_n^i} \quad (1)$$

فاکتور آلودگی (C_f) در حقیقت نسبت غلظت هر فلز (C_m) به غلظت زمینه آن فلز (C_n) است. مقدار غلظت زمینه‌ای برای روی، مس، سرب و کادمیوم به ترتیب ۷۵، ۵۰، ۱۴ و ۱ میلی‌گرم در کیلوگرم در نظر گرفته شد (۱۵، ۲۲). هاکانسون (۱۹۸۰) فاکتور آلودگی را در چهار کلاس طبقه‌بندی کرد؛ اگر فاکتور آلودگی در مورد عنصر مد نظر کم‌تر از ۱ باشد آلودگی کم، برابر با ۱ و کم‌تر از ۳ آلودگی متوسط، برابر با ۳ و کم‌تر از ۶ آلودگی زیاد و برابر یا بیش‌تر از ۶ نشان‌دهنده آلودگی خیلی زیاد است. اصطلاح غلظت زمینه به عنوان فراوانی نرمال یک عنصر در یک زمین لم‌بزرع و تهی یا خاک بدون اثر فعالیت انسانی گفته می‌شود. در نمونه خاک مورد استفاده فاکتور آلودگی روی، مس، سرب و کادمیوم به ترتیب ۱/۰۴، ۰/۴۰، ۰/۵۵ و ۰/۴۸ محاسبه و میانگین درجه آلودگی خاک (درجه اصلاح شده آلودگی خاک) با توجه به مد نظر قرار دادن آلودگی هم‌زمان به چهار عنصر مورد نظر، با استفاده از رابطه‌های زیر برآورد شد (۱۵، ۲۰):

رنگ آمیزی ریشه‌ها به روش فیلیس و هایمن (۱۹۷۰) استفاده شد (۳۶). با تهیه عصاره گیاهی (به روش هضم با دو اسید) و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی و ریشه گیاه (قرائت با دستگاه جذب اتمی) فاکتورهای زیر جهت بررسی اثر تیمارها بر تغییرات آن‌ها، از طریق رابطه‌های ارائه شده محاسبه گردید.

ضریب انتقال: این فاکتور که نسبت مقدار کل فلز در خاک و مقادیر راه یافته به ریشه گیاه را نشان می‌دهد در حقیقت بیانگر تحرک عنصر بین خاک و گیاه است و با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$TC = \frac{C_{\text{root}}}{C_{\text{soil}}} \quad (4)$$

که در آن، C_{root} غلظت فلز در ریشه گیاه و C_{soil} غلظت کل فلز در خاک می‌باشد (۱). مقادیر بیش‌تر ضریب انتقال نشان‌دهنده تحرک بیش‌تر عنصر از خاک به گیاه است که وابسته به شرایط خاک از لحاظ بافت، پ-هاش و مقدار مواد آلی، ماهیت، غلظت و حلالیت عنصر و نوع گیاه، متفاوت خواهد بود. بیش‌تر بودن مقدار ضریب انتقال از ۱ نشان‌دهنده تجمع فلزات در گیاه می‌باشد. در بررسی محیط‌های آلوده طبیعی (غیرآزمایشی) ضریب انتقال ۰/۱ نشان می‌دهد که گیاه عنصر را از بافت خود خارج می‌کند. هرچه مقدار ضریب از ۰/۵ بیش‌تر باشد، احتمال آلودگی گیاه به فلزات سنگین از طریق فعالیت‌های انسانی بیش‌تر است (۱).

فاکتور جابجایی فلز سنگین در گیاه: به منظور ارزیابی اثر فاکتورهای آزمایشی بر فرآیندهای استخراج و یا تثبیت گیاهی، توان جابجایی فلزات سنگین از ریشه به اندام هوایی قابل برداشت (تحرک گیاهی عنصر) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (۲۸):

غیرآلوده و آلوده شده با فلزات سنگین بدون انجام مرحله اتوکلاو برای افزودن فاکتورهای دیگر مورد استفاده قرار گیرد. پوسته تخم مرغ بعد از جمع‌آوری کاملاً خشک گردید و با استفاده از آسیاب، پودر و یکنواخت شد و در سطوح ۳ و ۵ درصد وزنی به ۳ کیلوگرم خاک اضافه و به نحو مناسبی مخلوط گردید و یک هفته در دما و رطوبت ثابت نگه‌داری شد. بعد از شستشوی گلدان‌های ۳ کیلوگرمی با آب و اسید رقیق، خاک‌ها به گلدان‌ها منتقل گردید. پنجاه گرم مایه تلقیح قارچ‌ریشه گونه‌های *Glomus mosseae* *Funneliformis mosseae* (*G. intraradices*) *Rhizophagus irregularis* به صورت ترکیبی به شکل پودر حاوی اسپورها (حدود ۵۰۰ اسپور در گلدان)، ریشه(هیف)ها و قطعات ریشه گیاه میزبان (شبدر) در بستر ماسه، در ۳ سانتی‌متری زیر بستر بذر قرار داده شد و در تیمار شاهد قارچ‌ریشه، ۵۰ گرم از مخلوط مایه تلقیح استریل شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، جهت حفظ شرایط به صورت مشابه، به خاک گلدان‌ها اضافه گردید. پس از بررسی قوه نامیه بذور (تهیه شده از شرکت پاکان بذر اصفهان) ۱۰ عدد بذر ریحان در عمق ۱/۵ سانتی‌متری خاک قرار داده شد و یک هفته پس از جوانه‌زنی، تعداد ۵ بذر در هر گلدان نگه‌داشته شد. در طول مدت کشت گلخانه‌ای آبیاری متناسب با نیاز گیاه صورت گرفت. شصت روز پس از کاشت، گیاهان کف‌بر شده و اندام هوایی و ریشه به صورت جداگانه برای اندازه‌گیری طول اندام هوایی، وزن تر و وزن خشک ریشه و اندام هوایی گیاه و همچنین برآورد غلظت فلزات سنگین، به آزمایشگاه منتقل گردید. به منظور بررسی اندام‌های قارچی در ریشه و اطمینان از ایجاد همزیستی بین گیاه و قارچ‌ریشه، از

اثرات سرطانزا و یا غیرسرطانزا (از حاصلضرب ED در ۳۶۵ روز در سال به دست می‌آید). در صورتی که مقدار نسبت خطر محاسبه شده کم‌تر از ۱ باشد تهدیدی از لحاظ مصرف محصول غذایی وجود ندارد و اگر مقدار عددی آن از ۱ بیش‌تر شود، مصرف سبزی مورد نظر با ریسک اثرات غیرسرطانزا همراه خواهد بود. با توجه به این‌که سبزیجات تنها منبع غذایی مصرفی نیست و سایر مواد غذایی و هم‌چنین آب و هوای آلوده نیز باعث ورود این فلزات به بدن انسان می‌گردد بنابراین عدد ۰/۵ را می‌توان مبنای واقعی‌تری در نظر گرفت (۱۱). در مورد خاک‌هایی که به‌صورت هم‌زمان به چند نوع فلز آلوده هستند محاسبه شاخص خطر^۲ که در حقیقت مجموع نسبت‌های خطر محاسبه شده برای هر فلز می‌باشد (رابطه ۸)، می‌تواند در بیان دقیق‌تر اثرات آلودگی فلزات در خاک و گیاه مؤثر واقع شود. در صورتی که شاخص خطر از ۱ بیش‌تر باشد، علی‌رغم عدم ایجاد خطر سلامتی از سوی یک فلز خاص، کشت و برداشت محصول با توجه به برآیند خطرآفرینی فلزات به صورت هم‌زمان در خاک، قابل توصیه نخواهد بود (۴۹).

$$HI = \sum HQ = \frac{CDI_1}{RfDo_1} + \frac{CDI_2}{RfDo_2} + \dots + \frac{CDI_i}{RfDo_i} \quad (8)$$

پاسخ رشد میکوریزایی (MGR): این پارامتر به‌صورت نسبت اختلاف وزن خشک گیاه میکوریزایی و غیرمیکوریزایی به وزن خشک گیاه غیرمیکوریزایی، محاسبه و به صورت درصد بیان می‌شود (۱۷).

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}} \quad (5)$$

نسبت و شاخص خطر در گیاه: ارزیابی پتانسیل خطر غیرسرطانزا برای یک عنصر فلزی با بیان نسبت خطر^۱ صورت می‌گیرد که از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد (۴۹):

$$HQ = \frac{CDI}{RfDo} \quad (6)$$

$$CDI = \frac{CF \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (7)$$

در رابطه‌های ۶ و ۷، CDI مصرف روزانه مزمن است که در حقیقت به قرار گرفتن در معرض جرم ماده مورد نظر (فلز سنگین) اشاره دارد که در واحد وزن بدن در واحد زمان، به‌طور متوسط در یک دوره طولانی‌مدت (طول عمر طبیعی انسان) بیان می‌شود؛ RfDo دوز مرجع خوراکی است که به صورت میلی‌گرم در کیلوگرم در روز نشان داده می‌شود (مقادیر برای عنصر روی، مس، سرب و کادمیوم به‌ترتیب ۰/۳، ۰/۰۴، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۱ میلی‌گرم در روز در نظر گرفته شده (۵۰)، بنابراین هر دو پارامتر ذکر شده در رابطه ۵ هم واحد هستند. CF: غلظت فلز در بافت خوراکی گیاه بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم؛ IR: میزان متوسط مصرف روزانه سبزیجات (به‌طور متوسط عدد ۰/۲ کیلوگرم برای هر فرد در روز (۱۲))؛ EF: فراوانی قرار گرفتن در معرض فلز سنگین (۳۶۵ روز در سال)؛ ED: میانگین عمر طبیعی انسان (در این پژوهش عدد ۷۰ سال در نظر گرفته شد؛ BW: وزن بدن انسان بالغ (۷۰ کیلوگرم)؛ AT: متوسط زمان قرار گرفتن در معرض برای بروز

است. افزایش شدت رنگ برگ‌ها در مقابله با آلودگی فلزات می‌تواند به علت فعال شدن مکانیزم‌های دفاعی در جهت حفظ سطح طبیعی رشد گیاه باشد (۴۶). بنابراین بروز اثرات با توجه به غلظت عناصر آلاینده در محیط رشد گیاه متفاوت خواهد بود. افزایش غلظت فلزات در محلول خاک می‌تواند باعث تجمع در بافت‌های گیاهی شود و با توجه به این‌که به آسانی تجزیه نمی‌شوند، بنابراین در بخش‌های مختلف گیاهان شامل ساقه، ریشه و برگ تجمع می‌یابند (۶). تجمع فلزات در گیاه باعث اتصال این عناصر به پروتئین و DNA سلول گیاهی شده که به اختلال در فعالیت‌های آنزیمی می‌انجامد و در نتیجه توزیع متالولیت‌های گیاهی، تنفس و فتوسنتز مختل شده و رشد و عملکرد گیاه کاهش می‌یابد (۱۹).

استفاده از پوسته تخم مرغ به میزان ۳ و ۵ درصد در مقایسه با تیمار عدم مصرف آن در شرایط خاک آلوده به ترتیب باعث افزایش ۹/۱۲ و ۳۲ درصد در ارتفاع اندام هوایی گیاه (شکل ۱) و ۳/۴۱ و ۱۶/۵ درصد در وزن تر اندام هوایی گیاه گردید. روند نسبتاً مشابهی در خصوص وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه مشاهده می‌شود که البته اثر تیمارهای آلودگی خاک و پوسته تخم مرغ بر وزن خشک ریشه معنی‌دار نشد. استفاده از پوسته تخم مرغ به میزان ۳ و ۵ درصد در شرایط خاک آلوده به ترتیب باعث افزایش ۲۶/۶ و ۴۳/۵ درصد در وزن خشک اندام هوایی گردید (شکل ۲).

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. برای مقایسه میانگین‌های اثر فاکتورها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن و سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد و نمودارها با استفاده از Excel ترسیم گردید.

نتایج و بحث

اثر تیمارها بر صفات رشدی گیاه: بر اساس نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) اثر مستقل تیمارها به غیر از اثر پوسته تخم مرغ بر وزن خشک ریشه، در مورد سایر ویژگی‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اثرات متقابل تیمارهای آلودگی خاک و پوسته تخم مرغ بر همه ویژگی‌ها به جز وزن خشک ریشه و اثر متقابل آلودگی خاک و قارچ ریشه بر همه ویژگی‌ها و اثر متقابل پوسته تخم مرغ و قارچ ریشه و همچنین اثرات متقابل سه‌گانه تیمارها بر ارتفاع اندام هوایی در سطح ۱ درصد معنی‌دار گزارش شد. به‌طور کلی افزایش سطح آلودگی خاک باعث کاهش ۵۴ درصدی در ارتفاع اندام هوایی (شکل ۱) و کاهش ۷۰ درصدی در وزن تر اندام هوایی گیاه گردید. همچنین تحت این شرایط وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه به ترتیب ۷۲/۴ و ۵۳/۴ درصد کاهش یافت (شکل ۲). در غلظت‌های کم عناصر کروم، کادمیوم، سرب و نیکل، افزایش رشد در گیاه ریحان گزارش شده است که با تیره شدن رنگ برگ‌ها به دلیل افزایش کلروفیل‌سازی همراه بوده

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد مطالعه بر برخی ویژگی‌های رشدی گیاه ریحان.

Table 1. Analysis of variance of the effects of treatments on some growth parameters of basil.

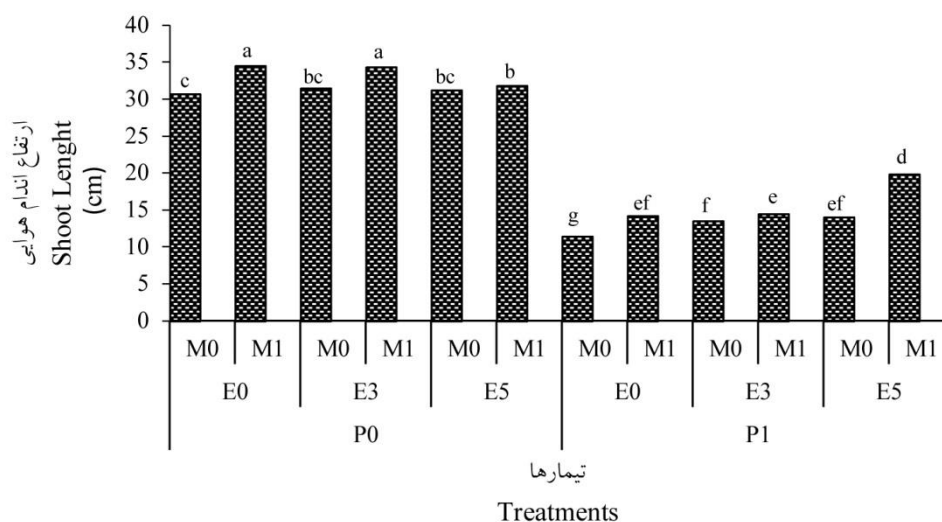
میانگین مربعات Mean Square					
وزن خشک ریشه Root Dry weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot Fresh weight	وزن تر اندام هوایی Shoot Fresh weight	ارتفاع اندام هوایی Shoot Length	درجه آزادی df	منابع تغییر Source
10.48**	214.1**	23518**	2844**	1	آلودگی خاک (P) Soil Pollution
0.007 ^{ns}	0.122**	13.67**	6.601**	2	پوسته تخم مرغ (E) Egg Shell
6.159**	2.993**	390.1**	71.12**	1	قارچ ریشه (M) Mycorrhiza
0.001 ^{ns}	0.124**	13.76**	23.11**	2	آلودگی خاک*پوسته تخم مرغ P*E
2.565**	2.624**	247.0**	1.604*	1	آلودگی خاک*قارچ ریشه P*M
0.102 ^{ns}	0.005 ^{ns}	0.564 ^{ns}	2.010**	2	پوسته تخم مرغ*قارچ ریشه E*M
0.003 ^{ns}	0.121 ^{ns}	1.310 ^{ns}	10.56**	2	آلودگی خاک*پوسته تخم مرغ*قارچ ریشه P*E*M
0.003	0.007	0.833	0.266	22	خطا Error
1.20	1.85	1.92	2.20		ضریب تغییرات (%) CV (%)

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی داری در سطح ۱ درصد، معنی داری در سطح ۵ درصد، عدم وجود اختلاف معنی دار.

**، *، indicate that variances are significant at the level of 1%, 5% and ^{ns} is non-significant, respectively.

پوسته تخم مرغ دارای pH_{ZPC} برابر با ۵/۵، هدایت الکتریکی ۰/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر، کربنات کلسیم معادل حدود ۹۴ گرم در ۱۰۰ گرم خاک خشک، مواد آلی برابر با حدود ۶ درصد (نسبت کربن به نیتروژن ۲/۱)، ۰/۱۰۵ درصد اکسید سدیم، ۰/۹۲۶ درصد اکسید منیزیم، ۰/۴۱۵ درصد فسفات، ۰/۳۲۶ درصد تری‌اکسید گوگرد، ۰/۰۵۴ درصد اکسید پتاسیم می‌باشد؛ بنابراین بخش اعظم ترکیب شیمیایی این ماده زیستی به کربنات کلسیم اختصاص یافته است (۳۸).

عوامل متعددی بر جذب فلزات مؤثر می‌باشند؛ به طوری که به جز نوع و مقدار کلونیدهای خاک، عوامل کنترل‌کننده‌ای مانند پ-هاس، غلظت یونی محلول، غلظت کاتیون فلزی، حضور کاتیون‌های فلزی رقابت‌کننده و وجود لیگاندهای آلی و معدنی در آن نقش دارند (۴). فراوانی نسبی ترکیباتی مانند کربنات کلسیم (آهک) و اکسیدهای آهن و منگنز در خاک عواملی مهم در تعیین جذب و واجذب یک فلز محسوب می‌شوند (۴۳). بر اساس اطلاعات موجود



شکل ۱- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیر آلوده، P1: آلوده)، پوسته تخم مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) و قارچ ریشه (M0: بدون قارچ ریشه، M1: تلقیح با قارچ ریشه) بر ارتفاع اندام هوایی گیاه ریحان.

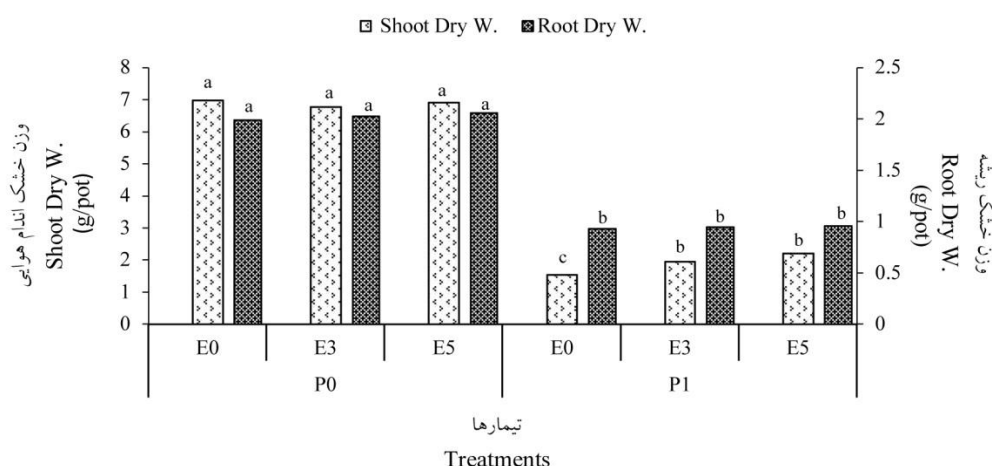
Figure 1. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted), egg shell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on shoot length of basil.

* میانگین هایی که دارای حرف مشترک می باشند، فاقد تفاوت معنی دار در سطح آماری ۵ درصد می باشد.

* For all variables with the same letter, the difference between the means is not statistically significant at the level of 5%.

فلزات سنگین توسط پوسته تخم مرغ ترکیبات آلی موجود در آن نیز با ایجاد ظرفیت تبدلی به صورت فعال در جذب فلزات مؤثر خواهند بود (۱۳). رنگ زن و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند حتی در خاک های طبیعی آهکی آلوده به فلزات سنگین، اضافه کردن ۵ درصد آهک به شکل کربنات کلسیم می تواند باعث کاهش معنی دار حلالیت فلزات سنگین در محلول خاک و در نتیجه کاهش قابلیت جذب زیستی و غلظت عناصر سنگین در اندام هوایی گیاه اسفناج گردد که به عملکرد و کیفیت بهتر محصول منجر می شود (۳۹).

اثر استفاده از پوسته تخم مرغ بر حذف آلاینده های فلزی از آب های آلوده مورد بررسی قرار گرفته است که بر اساس نتایج به دست آمده، این ترکیب زیستی قادر به حذف از طریق ترسیب سرب، کروم و کادمیوم بوده که راندمان حذف برای عنصر کروم به ۹۹ درصد بالغ می گردد (۲۴). فریک (۲۰۱۹) گزارش کرد پوسته تخم مرغ می تواند جایگزین بسیار خوبی برای سنگ آهک رسی جهت حذف فلزات سنگین از محیط های آلوده باشد. در حالی که مکانیزم های اصلی جذب در فرایند حذف آلاینده های فلزی ایجاد رسوب به صورت ترکیبات هیدروکسیدی یا کربناتی است، در حذف



شکل ۲- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیرآلوده، P1: آلوده) و پوسته تخم مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان.

Figure 2. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted) and eggshell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) on shoot and root dry weight of basil.

* میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک می‌باشند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشد.

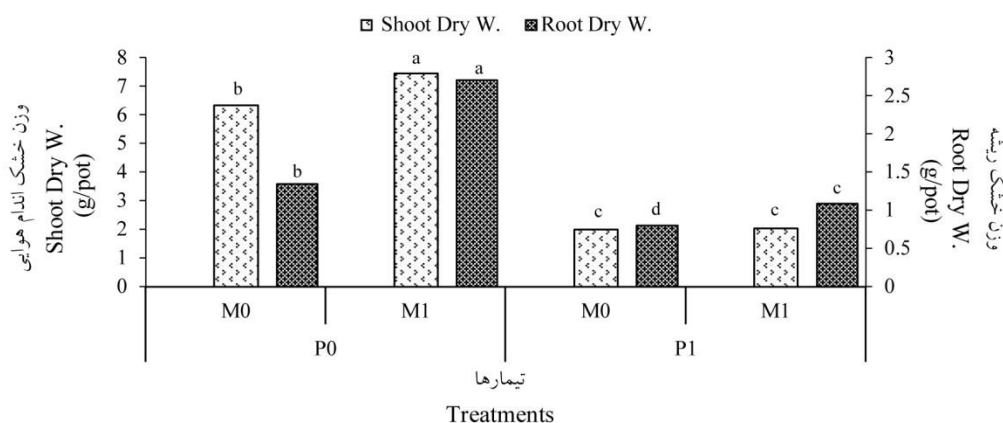
* For all variables with the same letter, the difference between the means is not statistically significant at the level of 5%.

ایجاد شده با تیمار شاهد (عدم تلقیح) بیش از اثر در خاک آلوده گزارش شد (شکل ۳). به عبارت دیگر تحت تنش آلودگی در مورد وزن خشک اندام هوایی اختلاف غیرمعنی‌دار بوده و علی‌رغم اختلاف معنی‌دار در میانگین وزن خشک ریشه، اختلاف ایجاد شده با شرایط عدم تلقیح ناچیز است که نشان‌دهنده تأثیر آلاینده‌ها بر راندمان همزیستی گیاه-قارچ ریشه می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده هر دو تیمار اصلاحی به صورت مؤثر و معنی‌دار باعث افزایش سطح صفات رشدی گیاه گردید. اثرات عمده همزیستی گیاه-قارچ ریشه را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد: ۱. افزایش جذب یون‌های مغذی کم‌تحرك، ۲. بهبود کیفیت ساختمان خاک، ۳. افزایش تنوع جوامع گیاهی، ۴. بهبود سیستم ریشه‌ای و استقرار گیاهی، ۵. بهبود چرخه عناصر غذایی در خاک و ۶. افزایش قابلیت تحمل گیاهان نسبت به تنش‌های زنده و غیرزنده محیطی (۴۴). یکی از مکانیزم‌های دفاعی قارچ ریشه در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین

ارتفاع اندام هوایی گیاه تحت تأثیر تلقیح قارچ ریشه از ۲۲/۰۵ به ۲۴/۸ سانتی‌متر افزایش یافت که به‌صورت مشابه روند افزایشی در خصوص وزن تر اندام هوایی از ۴۴/۱ به ۵۰/۶ گرم در گلدان، مشاهده گردید. قارچ ریشه با بهبود جذب آب و عناصر غذایی (به‌ویژه عناصر غذایی غیرمتحرک) رشد گیاه را بهبود می‌دهد. در حضور قارچ ریشه میزان تعرق نسبت به عدم حضور قارچ به‌دلیل افزایش هدایت روزنه‌ای، افزایش می‌یابد که به افزایش نرخ فتوسنتز منجر می‌شود (۵۵). در شرایط خاک آلوده تلقیح قارچ ریشه باعث افزایش ۲۵/۷ درصد در ارتفاع اندام هوایی و ۴/۴۷ درصد در وزن تر اندام هوایی گردید. بیش‌ترین ارتفاع اندام هوایی در شرایط خاک غیرآلوده، تلقیح قارچ ریشه و عدم حضور پوسته تخم‌مرغ به میزان ۳۴/۵ مشاهده شد که البته اختلاف معنی‌داری را با تیمار مشابه حاوی ۳ درصد پوسته تخم‌مرغ نشان نداد (شکل ۱). اثر قارچ ریشه بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه در خاک غیرآلوده با توجه به اختلاف معنی‌دار

پیوند آلاینده فلزی با اجزای دیواره سلولی قارچ، رسوب فلز آلاینده در اندام‌های ذخیره‌ای سلول مانند واکوئل، استفاده از ناقل‌های اختصاصی و غیراختصاصی فلزات در غشاء پلاسمایی سلول‌های قارچی و انتشار یون‌های سمی به خارج سلول از جمله فرایندهای تحمل قارچ‌ریشه در محیط‌های آلوده به فلزات سنگین می‌باشد؛ وجود ترکیباتی مانند آمینواسیدهای آزاد و گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل باعث شکل‌گیری پیوند با فلزات سنگین آلاینده و ایجاد کمپلکس‌های خارج سلولی می‌گردد (۱۴).

افزایش سرعت تولید هیف و اسپور می‌باشد که به مقاومت بیش‌تر تحت شرایط تنش منجر می‌شود (۱۶). گلومالین یک گلیکوپروتئین است که توسط هیف قارچ‌ریشه و مواد آلی خاک ترشح می‌شود. گلومالین از اجزای تشکیل‌دهنده دیواره هیف‌ها و اسپور قارچ‌ریشه است که در چرخه تجدید هیف‌ها به خاک وارد می‌شود. نقش گلومالین در اکوسیستم هنوز روشن نیست؛ اما فرضیات دال بر این است که این پروتئین رمزی فعال برای افزایش خاکدانه‌سازی و تثبیت فلزات سنگین در خاک می‌باشد (۴۰). به طور کلی کلات شدن آلاینده فلزی خارج از سلول، ایجاد



شکل ۳- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیرآلوده، P1: آلوده) و قارچ‌ریشه (M0: بدون قارچ‌ریشه، M1: تلقیح با قارچ‌ریشه) بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان.

Figure 3. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on shoot and root dry weight of basil.

* میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک می‌باشند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشد.

* For all variables with the same letter, the difference between the means is not statistically significant at the level of 5%.

هوایی معنی‌دار گزارش شد. در مورد عنصر کادمیوم به غیر از اثر متقابل پوسته تخم مرغ و قارچ‌ریشه و هم‌چنین اثرات متقابل سه‌گانه، سایر تیمارها باعث ایجاد تغییرات معنی‌دار بر غلظت کادمیوم اندام هوایی و ریشه گیاه شدند. (جدول ۲). با توجه به نتایج به‌دست آمده، افزایش غلظت فلزات در محیط رشد گیاه باعث افزایش معنی‌دار غلظت عناصر روی، مس،

اثر تیمارها بر غلظت فلزات سنگین در گیاه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌های مربوط به غلظت فلزات در اندام هوایی و ریشه گیاه نشان داد اثرات مستقل و متقابل تیمارها بر غلظت روی و مس در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان در سطح ۱ درصد معنی‌دار شد. اثرات مستقل تیمارها و اثرات متقابل آلودگی خاک و قارچ‌ریشه بر غلظت سرب اندام

ضایعات، اختلاف معنی‌داری با عدم مصرف آن نشان نداد؛ بنابراین سطح ۵ درصد به‌عنوان سطح مؤثر در کاهش غلظت فلزات آلاینده در اندام هوایی گیاه پیشنهاد می‌گردد. بیش‌ترین مقدار فلزات روی، مس، سرب و کادمیوم در ریشه گیاه، در تیمار خاک آلوده و عدم استفاده از ضایعات (با روندی نسبتاً مشابه با اندام هوایی گیاه) مشاهده گردید. علی و همکاران (۲۰۱۶) گزارش کردند پوسته تخم‌مرغ در حذف مس در مقایسه با کادمیوم مؤثرتر عمل می‌کند و حداکثر جذب برای این دو عنصر به ترتیب $8/4$ و $7/01$ میلی‌گرم در گرم عنوان شد. درصد جذب این عناصر به شدت به زمان تماس، پ-هاش و مقدار جاذب وابسته بود و فرایند جذب از نظر ترمودینامیکی خودبه‌خودی و ذاتاً گرماگیر است (۲).

سرب و کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان گردید. الجزیر و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند سبزیجات برگی بیش از سایر گیاهان فلزات را جذب می‌کنند که این موضوع می‌تواند خطر مصرف را در این محصولات افزایش دهد (۳).

با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر تیمارها بر غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی و ریشه گیاه (جدول ۳) در شرایط عدم آلودگی، استفاده از پوسته تخم‌مرغ در سطح ۳ و ۵ درصد اختلاف معنی‌دار با شرایط عدم مصرف آن نشان نمی‌دهد. تحت شرایط آلودگی خاک، کاربرد ۵ درصد وزنی پوسته تخم‌مرغ مقدار عنصر روی، مس و کادمیوم در اندام هوایی گیاه را به ترتیب $11/7$ ، $4/16$ و $16/7$ درصد کاهش داد. لازم به ذکر است کاربرد ۳ درصد

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان.

Table 2. Analysis of variance of the effects of treatments on heavy metal concentration in shoot and root of basil.

میانگین مربعات Mean Square								درجه آزادی df	منابع تغییر Source
کادمیوم (Cd)		سرب (Pb)		مس (Cu)		روی (Zn)			
Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root		
47.81**	96.40**	1.214**	1635.6**	43587**	309655**	168931**	127544**	1	آلودگی خاک (P) Soil Pollution
0.220**	0.419**	0.078*	0.270 ^{ns}	123.63**	224.64**	2086.2**	1042.4**	2	پوسته تخم‌مرغ (E) Egg Shell
5.609**	5.282**	3.045**	0.410*	629.50**	191.36**	9374.1**	621.67**	1	قارچ‌ریشه (M) Mycorrhiza
0.169**	0.356**	0.023 ^{ns}	0.216 ^{ns}	75.020**	169.13**	2828.6**	1411.3**	2	آلودگی خاک*پوسته تخم‌مرغ P*E
5.070**	5.100**	1.946**	0.302 ^{ns}	805.61**	195.06**	18737**	1554.9**	1	آلودگی خاک*قارچ‌ریشه P*M
0.036 ^{ns}	0.102*	0.12 ^{ns}	0.041 ^{ns}	10.231**	9.100**	377.40**	223.27**	2	پوسته تخم‌مرغ*قارچ‌ریشه E*M
0.054 ^{ns}	0.122*	0.034 ^{ns}	0.049 ^{ns}	12.814**	9.569**	345.30**	194.22**	2	آلودگی خاک*پوسته تخم‌مرغ*قارچ‌ریشه P*E*M
0.016	0.025	0.015	0.085	1.067	0.653	4.774	0.603	22	خطا Error
7.76	7.71	3.66	3.61	4.74	1.70	1.77	1.90		ضریب تغییرات CV (%)

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد، معنی‌داری در سطح ۵ درصد، عدم وجود اختلاف معنی‌دار.

**، *، indicate that variances are significant at the level of 1%, 5% and ^{ns} is non-significant, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان.

Table 3. Mean comparison of the interaction effects of treatments on heavy metal concentration in shoot and root of basil.

کادمیوم (Cd) (mg kg ⁻¹)		سرب (Pb) (mg kg ⁻¹)		مس (Cu) (mg kg ⁻¹)		روی (Zn) (mg kg ⁻¹)		تیمارها Treatments	
Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root		
0.493 ^c	0.423 ^b	3.193 ^a	1.341 ^b	12.12 ^c	10.55 ^c	53.45 ^e	22.70 ^d	E0	P0
0.490 ^c	0.413 ^b	3.168 ^a	1.330 ^b	10.90 ^c	9.400 ^c	51.88 ^e	23.00 ^d	E3	P0
0.458 ^c	0.393 ^b	3.120 ^a	1.310 ^b	10.57 ^c	9.183 ^c	57.58 ^e	25.55 ^d	E5	پوسته تخم مرغ P0
3.053 ^a	4.063 ^a	3.643 ^a	15.06 ^a	85.77 ^a	201.5 ^a	218.8 ^a	160.2 ^a	E0	Egg Shell (E) P1 آلودگی
2.755 ^{ab}	3.635 ^a	3.543 ^a	14.85 ^a	82.02 ^{ab}	197.9 ^a	193.0 ^{ab}	147.3 ^b	E3	P1 خاک
2.548 ^b	3.350 ^a	3.396 ^a	14.50 ^a	74.58 ^b	186.1 ^b	162.0 ^b	120.7 ^c	E5	P1 Soil Pollution (P)
0.500 ^c	0.416 ^c	3.218 ^b	1.342 ^c	10.65 ^c	9.688 ^c	47.62 ^d	21.33 ^d	M0	P0
0.461 ^c	0.403 ^c	3.102 ^{bc}	1.312 ^c	11.75 ^c	9.733 ^c	60.98 ^e	26.16 ^c	M1	قارچ ریشه P0
3.555 ^a	4.442 ^a	4.051 ^a	15.00 ^a	89.70 ^a	199.8 ^a	230.2 ^a	153.5 ^a	M0	Mycorrhiza (M) P1
2.015 ^b	2.923 ^b	3.004 ^c	14.61 ^b	71.88 ^b	190.5 ^b	152.3 ^b	132.0 ^b	M1	P1

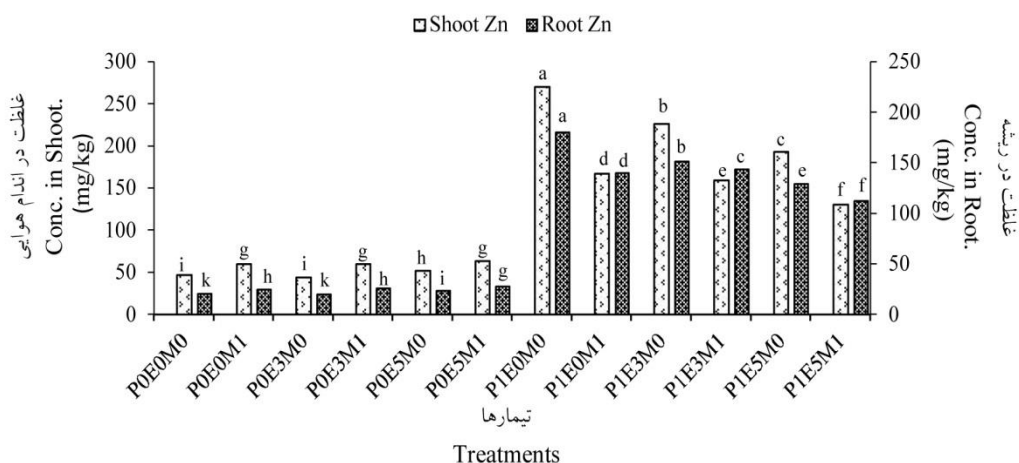
* میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک می‌باشند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشد.

*For all variables with the same letter, the difference between the means is not statistically significant at the level of 5%.

۲۷۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک اندام هوایی گیاه، در تیمار خاک آلوده و عدم مصرف پوسته تخم مرغ و همچنین عدم تلقیح قارچ ریشه گزارش شد که اختلاف معنی‌دار با سایر تیمارها را نشان می‌دهد. با استفاده از پوسته تخم مرغ حتی در سطح ۵ درصد، مقدار روی در اندام هوایی کاهش کم‌تری (۱۹۳/۶) را در مقایسه با تیمار تلقیح قارچ ریشه (۱۶۷/۳) نشان می‌دهد. کم‌ترین میزان روی در اندام هوایی گیاه در شرایط آلودگی خاک به فلزات سنگین، در تیمار استفاده هم‌زمان از ۵ درصد پوسته تخم مرغ و تلقیح قارچ ریشه به میزان ۱۳۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش گردید. روند نسبتاً مشابهی در مورد غلظت عنصر روی در ریشه گیاه مشاهده گردید (شکل ۴).

در خاک آلوده به فلزات سنگین کاربرد قارچ ریشه باعث کاهش معنی‌دار غلظت عناصر روی، مس و کادمیوم در ریشه گیاه به مقدار ۱۴، ۴/۶۵ و ۳۴/۲ درصد گردید که این مقادیر برای غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیوم در اندام هوایی گیاه به ترتیب ۳۳/۸، ۲/۸۷، ۲۵/۹ و ۴۳/۳ درصد گزارش شد. بنابراین بیش‌ترین درصد کاهش مقدار فلز در اندام هوایی گیاه در تیمار قارچ ریشه به ترتیب به عناصر کادمیوم، روی، سرب و مس اختصاص دارد که نشان می‌دهد قارچ ریشه به صورت مؤثر در کاهش ورود فلزات به گیاه عمل کرده است.

با توجه به نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات سه‌گانه تیمارها بر غلظت روی در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان (شکل ۴)، بیش‌ترین مقدار روی به میزان



شکل ۴- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیر آلوده، P1: آلوده)، پوسته تخم مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) و قارچ ریشه (M0: بدون قارچ ریشه، M1: تلقیح با قارچ ریشه) بر غلظت روی در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان.

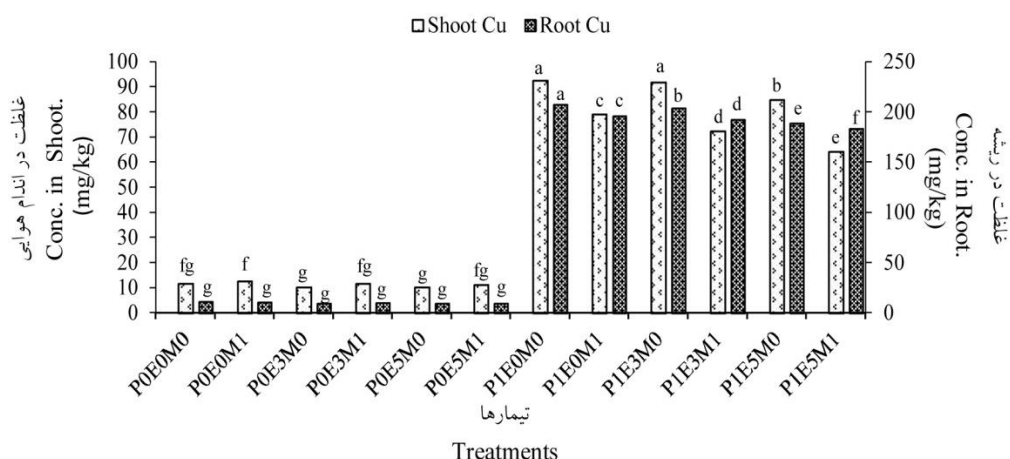
Figure 4. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted), egg shell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on zinc concentration in shoot and root of basil.

* میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک می‌باشند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشد.

* For all variables with the same letter, the difference between the means is not statistically significant at the level of 5%.

درصد گردید. مشابه با عنصر روی، کم‌ترین میزان مس در اندام هوایی گیاه در شرایط آلودگی خاک و در تیمار استفاده همزمان از ۵ درصد پوسته تخم مرغ و تلقیح قارچ ریشه به میزان ۶۴/۲ میلی گرم در کیلوگرم گزارش گردید. در تیمار مشابه، مقدار مس در ریشه گیاه در مقایسه با تیمار عدم اعمال تیمارهای اصلاحی به میزان ۱۱/۳ درصد کاهش یافت (شکل ۵).

مقایسه میانگین اثرات سه گانه تیمارها بر غلظت مس در اندام هوایی گیاه ریحان (شکل ۵)، نشان داد بیش‌ترین مقدار مس به میزان ۹۲/۴ میلی گرم در کیلوگرم وزن خشک اندام هوایی گیاه، در تیمار خاک آلوده و عدم اعمال تیمارهای اصلاحی مشاهده شد که اختلاف معنی‌دار با استفاده از پوسته تخم مرغ در سطح ۳ درصد، نشان نداد؛ در حالی که کاربرد تیمار تلقیح قارچ ریشه باعث کاهش مقدار مس به میزان ۱۴/۵



شکل ۵- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیر آلوده، P1: آلوده)، پوسته تخم مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) و قارچ ریشه (M0: بدون قارچ ریشه، M1: تلقیح با قارچ ریشه) بر غلظت مس در اندام هوایی و ریشه گیاه ریحان.

Figure 5. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted), egg shell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on zinc concentration in shoot and root of basil.

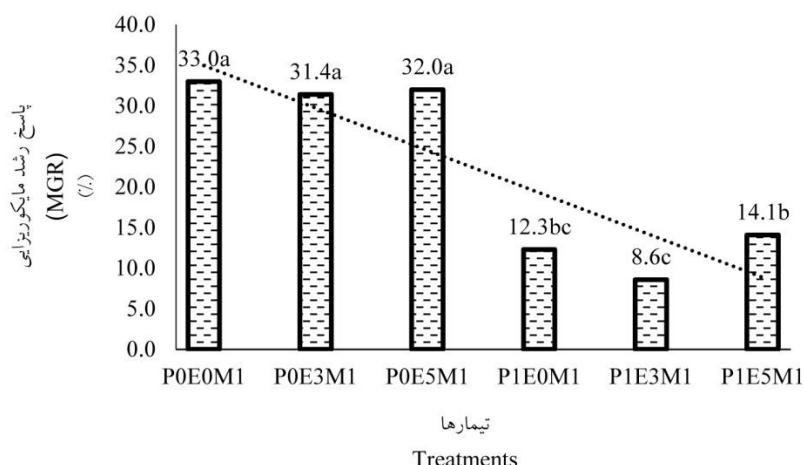
* میانگین‌هایی که دارای حرف مشترک می‌باشند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح آماری ۵ درصد می‌باشد.

* For all variables with the same letter, the difference between the means is not statistically significant at the level of 5%.

فلزات، می‌تواند برای کاهش تنش آلودگی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد. البته نوع و شدت آلودگی می‌تواند موجب تغییر در واکنش قارچ‌ریشه گردد چراکه شرایط ریزوسفر بر روابط متقابل بین ریشه گیاه و ریزجانداران ریزوسفری مؤثر خواهد بود. در مقایسه میانگین‌ها، استفاده از پوسته تخم مرغ در مقایسه با تیمار عدم مصرف آن، تغییرات معنی‌داری بر پاسخ رشد مایکوریزایی تحت شرایط خاک آلوده و غیرآلوده، نشان نداد (شکل ۶). بیش‌ترین درصد پاسخ رشد مایکوریزایی در شرایط خاک غیرآلوده (۳۳ درصد) و کم‌ترین مقدار در خاک آلوده با کاربرد ۳ درصد پوسته تخم مرغ (۸/۶ درصد) مشاهده گردید که با تیمار خاک آلوده و عدم مصرف پوسته تخم مرغ تفاوت معنی‌داری نداشت. با توجه به نقش روی در افزایش متابولیسم گیاه، در شرایط خاک غیرآلوده مقدار غلظت این عنصر در گیاه در تیمار تلقیح با قارچ‌ریشه، افزایش معنی‌دار نشان می‌دهد که این اثر در پاسخ رشد مایکوریزایی نیز بروز یافته است. از طرف دیگر تحت شرایط آلودگی به صورت میانگین پاسخ رشد مایکوریزایی ۶۳/۸ درصد کاهش یافته است.

با توجه به نتایج به دست آمده در شرایط آلودگی خاک و تلقیح قارچ‌ریشه، افزایش میزان پوسته تخم مرغ باعث کاهش غلظت عناصر آلاینده فلزی (روی و مس) در اندام هوایی گیاه گردید که نشان‌دهنده اثر پوسته تخم مرغ بر افزایش انباشت و تثبیت زیستی توسط قارچ‌ریشه در ریزوسفر و کاهش غلظت در اندام‌های گیاه است.

هوانگ و همکاران (۲۰۰۵) گزارش کردند قارچ‌ریشه با تأثیر بر فرم قابل دسترس عناصر آلاینده و تبدیل آن‌ها به فرم غیرقابل جذب از گیاهان در برابر سمیت فلزات سنگین محافظت می‌کند (۱۸). در حقیقت ضدونقیض بودن گزارش‌ها در مورد اثر قارچ‌ریشه بر جذب فلزات سنگین به غلظت فلز در محلول خاک بستگی دارد؛ تحت شرایط عدم وجود آلودگی، قابلیت جذب عناصر فلزی که برای متابولیسم گیاه ضروری هستند با حضور قارچ‌ریشه بهبود می‌یابد، این در حالی است که تحت شرایط آلودگی به ویژه در خصوص عناصر آلاینده فلزی غیرمغذی عملکرد متفاوت بوده و قارچ‌ریشه با کاهش قابلیت جذب از اثرات سوء آلاینده بر گیاه می‌کاهد (۹). بنابراین با توجه به تحمل بالای قارچ‌ریشه نسبت به



شکل ۶- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیرآلوده، P1: آلوده) و پوسته تخم مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) بر درصد پاسخ رشد میکوریزایی در تیمارهای تلقیح شده با قارچ ریشه.

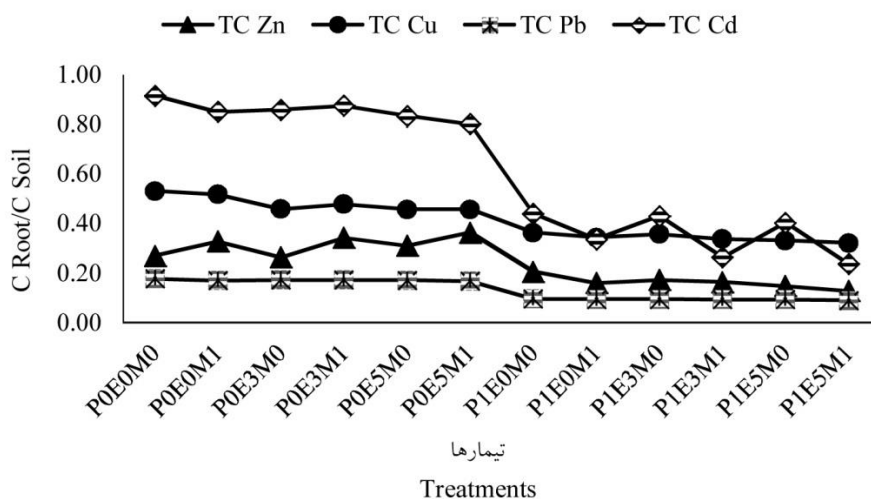
Figure 6. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted) and eggshell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) on percentage of mycorrhizal growth response in inoculated treatments.

عنصر مس نسبتاً مشابه گزارش شد. ضریب انتقال عنصر روی در تیمار شاهد ۰/۲۷ بوده که با تلقیح قارچ ریشه روند افزایشی را نشان داد. تغییرات ضریب انتقال عنصر سرب در خاک غیرآلوده محدود گزارش شد. با مقایسه میانگین اثر تیمارها تحت شرایط آلودگی خاک ضریب انتقال عنصر از خاک به ریشه در مورد عناصر کادمیوم، مس، روی و سرب به ترتیب ۵۹/۳، ۲۹/۱، ۴۸/۳ و ۴۷ درصد کاهش یافت. کاربرد ۵ درصد پوسته تخم مرغ باعث کاهش ۱۷/۹، ۵/۷۰، ۲۲/۲ و ۱۰ درصدی ضریب انتقال عناصر کادمیوم، مس، روی و سرب گردید. روند به صورت مشابه در تیمار تلقیح قارچ ریشه با حداکثر کاهش ۳۳ درصدی در مورد عنصر کادمیوم مشاهده شد. با توجه به نتایج به دست آمده تحت شرایط آلودگی خاک، کاربرد تیمارها به نحو مؤثری مقدار انتقال عناصر از خاک به ریشه گیاه را محدود کردند. در تیمار شاهد فاکتور جابجایی عناصر روی و سرب در خاک غیرآلوده تقریباً برابر بوده که این موضوع در مورد عناصر مس و کادمیوم نیز صادق است. میانگین فاکتور جابجایی عناصر روی، سرب، مس و کادمیوم در شرایط فاقد آلودگی، به ترتیب ۲/۸۸، ۲/۳۸، ۱/۱۷ و ۱/۱۵ بود که

اوده و همکاران (۲۰۰۲) کاهش درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه با قارچ (که به کاهش پاسخ رشد میکوریزایی می انجامد) را تحت شرایط تنش فلزات سنگین گزارش کردند و آن را راهکار احتمالی سازگاری با شرایط سمیت فلز معرفی کردند. به عبارت دیگر کاهش کلونیزاسیون می تواند جذب بیش از حد فلزات از طریق ریشه را کاهش می دهد (۳۴). آریگادا و همکاران (۲۰۰۵) علت کاهش کلونیزاسیون را اثرات سمی فلزات در غلظت های خارج از حد تحمل، بر توسعه اندام های قارچی عنوان کردند (۵). ضریب انتقال فلزات سنگین از خاک به ریشه گیاه و فاکتور جابجایی فلزات در درون اندام های گیاهی در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است. بر این اساس در خاک غیرآلوده بیشترین ضریب انتقال مربوط به عنصر کادمیوم بوده و عناصر مس، روی و سرب در مرتبه بعد قرار می گیرند. در تیمار شاهد خاک غیرآلوده ضریب انتقال برای عنصر کادمیوم ۰/۹۲ بوده که با اضافه شدن ۳ و ۵ درصد ضایعات به ترتیب به ۰/۸۶ و ۰/۸۳ کاهش یافت. در این شرایط تلقیح قارچ ریشه باعث کاهش ضریب انتقال از ۰/۹۲ به ۰/۸۵ گردید. روند تغییرات ضریب انتقال در مورد

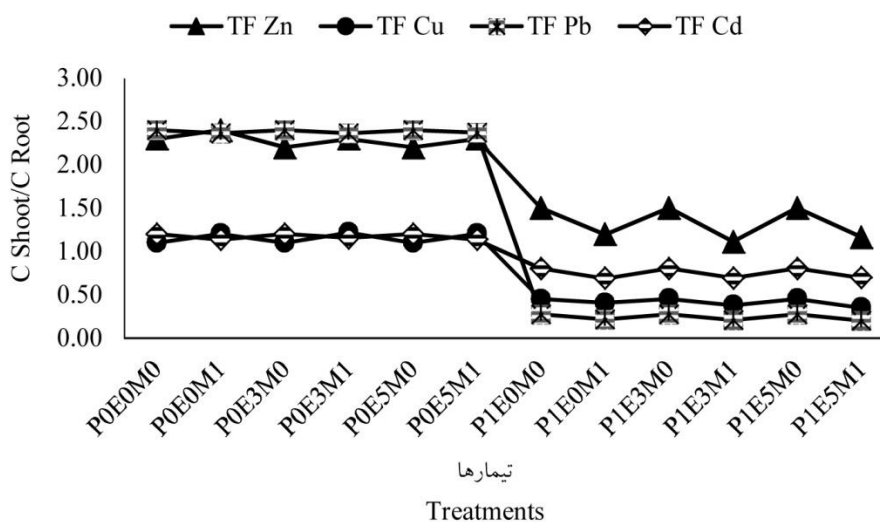
نتایج به دست آمده همه فلزات سنگین در خاک غیرآلوده دارای فاکتور جابجایی بیش‌تر از ۱ بودند؛ بنابراین در شرایط طبیعی تمایل به انتقال فلزات از ریشه به اندام هوایی وجود دارد.

در شرایط خاک آلوده به فلزات سنگین، بیش‌ترین فاکتور جابجایی به مقدار ۱/۳۳ در مورد عنصر روی، ۰/۷۵ در مورد عنصر کادمیوم، ۰/۴۱ در مورد عنصر مس و ۰/۲۴ برای عنصر سرب، گزارش شد. بر اساس



شکل ۷- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیرآلوده، P1: آلوده)، پوسته تخم‌مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) و قارچ‌ریشه (M0: بدون قارچ‌ریشه، M1: تلقیح با قارچ‌ریشه) بر ضریب انتقال فلزات سنگین از خاک به ریشه گیاه ریحان.

Figure 7. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted), eggshell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on transfer coefficient of heavy metals from soil to root of basil.



شکل ۸- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیرآلوده، P1: آلوده)، پوسته تخم‌مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) و قارچ‌ریشه (M0: بدون قارچ‌ریشه، M1: تلقیح با قارچ‌ریشه) بر فاکتور جابجایی فلزات سنگین در گیاه ریحان.

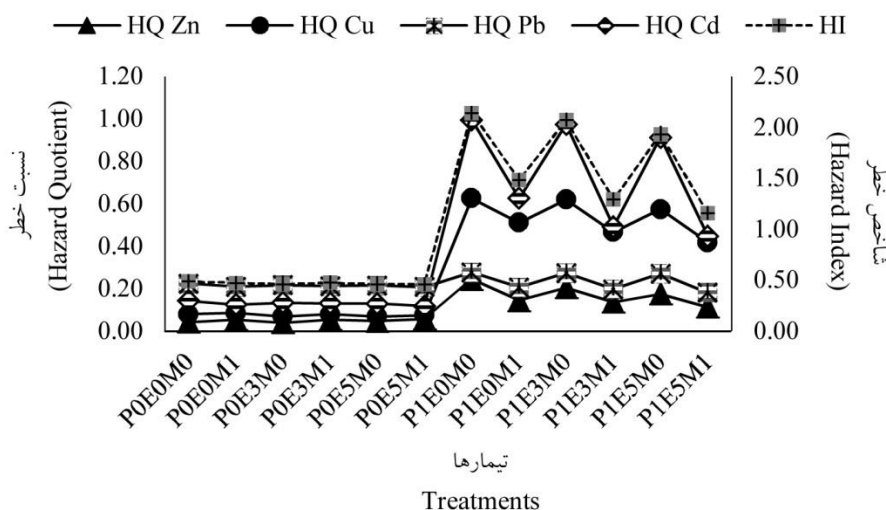
Figure 8. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted), eggshell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on translocated factor of heavy metals in basil.

جایجایی فلزات سنگین گردید؛ بنابراین قارچ‌ریشه باعث برهم خوردن جریان انتقال فلزات سنگین با نسبت‌های طبیعی از ریشه به اندام هوایی می‌گردد. نتایج حاصل از محاسبه نسبت خطر فلزات سنگین نشان داد در خاک غیرآلوده مقادیر در مورد همه عناصر کم‌تر از یک و حتی کم‌تر از ۰/۵ می‌باشد؛ در مقابل در خاک آلوده به صورت میانگین بیش‌ترین نسبت خطر مربوط به عنصر کادمیوم بوده (۰/۷۴) و عناصر مس (۰/۵۴)، سرب (۰/۲۳) و روی (۰/۱۷) در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (شکل ۹). همان‌گونه که اشاره شد از آنجایی که فلزات سنگین از منابعی به غیر از سبزیجات مانند سایر مواد غذایی و همچنین آب و هوا می‌توانند وارد بدن انسان شوند، بنابراین عدد ۰/۵ را می‌توان مبنای واقعی‌تری برای بررسی خطر مصرف سبزیجات کشت شده در خاک با تهدید آلودگی فلزات سنگین در نظر گرفت. بنابراین مصرف گیاه ریحان تحت شرایط آلودگی خاک با سطوح اعمال شده از نظر عناصر کادمیوم و مس، سالم نبوده و با خطر مصرف همراه است. محاسبه شاخص خطر (مجموع نسبت‌های خطر محاسبه شده در خاک با آلودگی هم‌زمان به چند فلز سنگین)، نشان داد در خاک آلوده میانگین شاخص خطر برابر با ۱/۶۸ بوده که با توجه به حد مشخص شده علی‌رغم عدم ایجاد خطر سلامتی از سوی عناصر سرب و روی، کشت و برداشت گیاه ریحان با توجه به برآیند خطرآفرینی فلزات در خاک آلوده با مشخصات ذکر شده در پژوهش حاضر، توصیه نمی‌گردد. در خاک آلوده بیش‌ترین مقدار شاخص خطر به میزان ۲/۱۴ در تیمار فاقد پوسته تخم‌مرغ و عدم تلقیح با قارچ‌ریشه مشاهده می‌شود. تحت تأثیر استفاده از ۵ درصد پوسته تخم‌مرغ، نسبت خطر برای عناصر روی، مس، کادمیوم و سرب به ترتیب ۲۶/۳، ۱۲/۲، ۴/۱۶ و ۱۶ درصد کاهش یافت که این مقدار برای شاخص خطر ۱۴/۹

الووویو و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند فاکتور جایجایی برای همه فلزات سنگین بیش‌تر از یک است که موجب انتقال راحت از ریشه به اندام هوایی می‌گردد (۳۲). وگنر (۱۹۹۳) گزارش کرد تمایل بیش‌تری به ذخیره کادمیوم در اندام هوایی نسبت به ریشه وجود دارد. البته اثرات متقابل عناصر بر هم نیز بسیار مهم است؛ به‌نحوی که در خاک تیمار شده با کادمیوم فاکتور انتقال عناصر آهن، روی و مس کاهش می‌یابد (۵۱). بر اساس نتایج حاصل از پژوهش استانچوا و همکاران (۲۰۱۴) قسمت‌های مختلف گیاه ریحان توانایی متفاوتی در جذب و ذخیره فلزات سنگین نشان می‌دهند به‌نحوی که بیش‌ترین مقدار کروم، کبالت، کادمیوم و سرب در ریشه و بیش‌ترین مقدار نیکل، روی و مس در قسمت گل گیاه تجمع یافت که این قابلیت می‌تواند به تثبیت گیاهی منجر شود (۴۶). هم‌چنین مقدار روی در برگ‌ها (اندام هوایی) می‌تواند با دوره‌ی برداشت ارتباط داشته باشد که برای گیاهان بالغ بیش‌تر است (۳۵). وجود غلظت بالای روی در برگ‌ها و گل‌های گیاه ریحان با فاکتور جایجایی و شدت رنگدانه سبز در ارتباط بود که می‌تواند بیانگر نقش روی در فرایند فتوسنتز و کاهش سمیت سایر فلزات سنگین سمی غیرتغذیه‌ای مانند کادمیوم باشد (۴۱). کاباتا پندیاس (۲۰۱۱) علت تجمع بیش‌تر کادمیوم در ریشه را تشکیل پیوند بین این عنصر و سولفیدریل و هم‌چنین پروتئین‌هایی به‌نام فیتوکنین عنوان کردند. هم‌چنین انتقال کادمیوم درون گیاه شامل طی فاصله کوتاه از ریشه به سیستم ویزیکیول بوده که با انتقال سیتوپلاسمی از کورتکس ریشه عبور می‌کند و در پی آن مسیر طولانی برای انتقال به اندام هوایی به صورت یون در آوندهای چوب و آبکش وجود خواهد داشت (۲۱). بر اساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر حضور قارچ‌ریشه در شرایط آلودگی خاک باعث کاهش بیش‌تر در فاکتور

درصد گزارش شد. در تیمار تلقیح قارچ ریشه به صورت میانگین برای عناصر روی، مس، کادمیوم و سرب به ترتیب ۳۸، ۲۴/۵، ۲۹/۶ و ۴۵/۸ درصد کاهش مشاهده شد؛ هم چنین تلقیح قارچ ریشه میزان شاخص خطر را ۳۶ درصد کاهش داد. با توجه به نتایج به دست آمده استفاده از تیمارهای پوسته تخم مرغ و تلقیح قارچ ریشه باعث کاهش شاخص خطر در خاک آلوده گردید که میزان اثر با توجه به نوع عنصر متفاوت گزارش شد. البته در مورد هردو

تیمار با توجه به سطح غلظت آلاینده ها، مقدار شاخص خطر مصرف گیاه ریحان به پایین تر از حد مجاز آن نرسید به نحوی که تحت تأثیر کاربرد ۵ درصد پوسته تخم مرغ شاخص خطر، ۱/۵۴ و در تیمار تلقیح با قارچ ریشه ۱/۳۱ گزارش گردید. کم ترین میزان شاخص خطر در خاک آلوده تلقیح شده با قارچ ریشه به همراه ۵ درصد پوسته تخم مرغ به میزان ۱/۱۶ محاسبه گردید.



شکل ۹- اثرات متقابل تیمار سطوح آلودگی خاک (P0: غیر آلوده، P1: آلوده)، پوسته تخم مرغ (E0: صفر، E3: ۳ درصد، E5: ۵ درصد وزنی) و قارچ ریشه (M0: بدون قارچ ریشه، M1: تلقیح با قارچ ریشه) بر نسبت و شاخص خطر فلزات سنگین در گیاه ریحان.

Figure 9. Interaction effects of treatments consist of level of soil pollution (P0: unpolluted, P1: polluted), eggshell (E0: 0%, E3: 3%, E5: 5% w/w) and mycorrhiza (M0: not inoculated, M1: inoculated) on hazard quotient and hazard index of heavy metals in basil.

افزایش سطح ویژگی های رشدی گیاه ریحان گردید؛ بنابراین این دو می توانند در خاک آلوده از طریق کمک به تثبیت آلاینده در محیط خاک و هم چنین تثبیت زیستی در گیاه و جلوگیری از انتقال فلزات به اندام هوایی باعث محدود کردن اثرات منفی عناصر در غلظت های بیش از حد تحمل گیاه، گردند. با توجه به نتایج به دست آمده گیاه ریحان کشت شده در خاک آلوده علی رغم مؤثر بودن تیمارها در کاهش مقدار

نتیجه گیری کلی

تجمع بیش از اندازه فلزات سنگین در گیاه ریحان موجب بروز سمیت در گیاه گردید که به علت زیاد بودن غلظت یون های فلزی در محیط رشد، انتقال از ریشه به اندام هوایی صورت گرفته که کاهش رشد و صدمات متابولیسمی گیاه را در پی داشت. کاربرد پوسته تخم مرغ در سطح ۵ درصد به همراه تلقیح قارچ ریشه به ویژه در شرایط آلودگی خاک، باعث

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به علت حمایت مالی از این پژوهش در قالب پایان نامه کارشناسی ارشد، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

شاخص خطر، هم‌چنان در حد خطر آفرینی بوده و مصرف آن توصیه نمی‌گردد. بنابراین استفاده از مواد بازیافتی اصلاحی مانند پوسته تخم مرغ و هم‌چنین اصلاحگرهای زیستی مانند قارچ ریشه با در نظر گرفتن نوع و غلظت فلزات سنگین و متناسب با آن می‌تواند در اصلاح و کاهش اثرات خاک آلوده به فلزات سنگین بر گیاه، مؤثر باشد.

منابع

- Adamczyk-Szabela, D., Romanowska-Duda, Z., Lisowska, K., and Wolf, WM. 2017. Heavy metal uptake by herbs. V. Metal accumulation and physiological effects induced by thiuram in *Ocimum basilicum* L. Water, Air and Soil Pollution. 228: 334-341.
- Ali, I., Al-othmsn, Z.A., and Alharbi, O.M. 2016. Uptake of pantoprazole drug residue from water using novel synthesized composite iron nano adsorbent, Journal of Molecular Liquids. 218: 465-472.
- Al-Jassir, M.S., Shaker, A., and Khalig, M.A. 2005. Deposition of heavy metals on green leafy vegetables sold on roadsides of Riyadh city, Saud-Arabian. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 75: 1020-1027.
- Alloway, B.J. 2001. Heavy Metals in Soils. Chapman & Hall, London, 368p.
- Arriagada, C.A., Herrera, M.A., and Ocampo, J.A. 2005. Contribution of arbuscular mycorrhizal and saprobe fungi to the tolerance of *Eucalyptus globulus* to Pb. Water, Air, and Soil Pollution, 166: 31-47.
- Asadi, F., Shariatmadari, H., and Mirghaffari, N. 2008. Modification of rice hull and sawdust sorptive characteristics for remove heavy metals from synthetic solutions and wastewater. Journal of Hazardous Materials. 154: 451-458.
- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agronomy Journal. 54: 464-465.
- Bower, C.A., Reitemeier, R.F., and Firemen, M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkaline soils. Soil Science. 73: 251-261.
- Colpaert, J.V., and vanAssche J.A. 1987. Heavy metal resistance in some ectomycorrhizal fungi. Functional Ecology. 1: 415-421.
- Das, D.P., and Das, K. 2008. Mobilisation of arsenic in rice (*Oryza Sativa* L.) plants affected by organic matter and zinc application in irrigation water contaminated with arsenic. Plant, Soil and Environment. 54: 1. 30-37.
- Datta, S.P., and Young, S.D. 2005. Predicting metal uptake and risk to the human food chain from leaf vegetables grown on soils amended by long-term application of sewage sludge. Water, Air and Soil Pollution. 163: 119-136.
- Esteghamati, A., Noshad, S., Nazeri, A., Khalilzadeh, O., Khalili, M., and Nakhjavani, M. 2007. Patterns of fruit and vegetable consumption among Iranian adults: a SuRFNCD-2007 study. British Journal of Nutrition. 108: 1. 177-181.
- Fryc, J.M. 2019. Use of the eggshells in removing heavy metals from waste water - the process kinetics and efficiency. Ecological and Chemistry Engineering, 26: 1. 165-174.
- Gohre, V., and Paszkowski, U. 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. Planta, 223: 1115-1122.

15. Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. *Water Research*. 8: 975-1001.
16. Helgason, T., and Fitter, A.H. 2009. Natural selection and the evolutionary ecology of the arbuscular mycorrhizal fungi (phylum Glomeromycota). *Journal of Experimental Botany*. 60: 2465-2480.
17. Hetrick, B.A.D., Wilson, G.W.T., and Cox, T.S. 1993. Mycorrhizal dependence of modern wheat cultivars and ancestors: a synthesis. *Canadian Journal of Botany*. 71: 512-517.
18. Huang Y., Tao, S.A., and Chen Y.J. 2005. The role of arbuscular mycorrhiza on change of heavy metal speciation in rhizosphere of maize in wastewater irrigated agriculture soil. *Journal of Environmental Sciences*. 17: 276-280.
19. Hussain, A.I., Anwar, F., Sherazi, S.T.H., and Przybylski, R. 2008. Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of basil (*Ocimum basilicum*) essential oils depends on seasonal variations. *Food Chemistry*. 108: 986-995.
20. Jahan, S., and Strezov, V. 2018. Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metals in the sediments of seaports of NSW, Australia. *Marine Pollution Bulletin*. 128: 295-306.
21. Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soil and plants, 4th edn. CRC Press, Boca Raton.
22. Karbassi, A.R., Nabi-Bidhendi, Gh.R., and Bayati, I. 2005. Environmental geochemistry of heavy metals in a sediment core off Bushehr, Persian Gulf, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2: 4. 225-260.
23. Khosravi, F., Savaghebi, Gh., and Farahbakhsh, H. 2007. Effect of potassium chloride on cadmium uptake by rapeseed and sunflower in a contaminated soil. *Water and Soil*, 23: 3. 28-35. (In Persian)
24. Kim, D., Hwang, S.J., Kim, Y., Ho, Ch., Jeong, Y. et al. 2019. Removal of heavy metals from water using chicken egg shell powder as a bio-adsorbent. *Bulletin of Korean Chemistry*. 40: 1156-1161.
25. Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T.J., Yuan, Z., and Huang, L. 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Science of the Total Environment*. 468-469: 843-853.
26. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*. 42: 421-428.
27. Mansouri, N., and Azimi, S. 2015. Heavy Metal in the Environment. Hak Publishers. (Vol. 1). Tehran. (In Persian)
28. Marchiol, L., Assolari, S., Sacco, P., and Zerbi, G. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multi-contaminated soil. *Environmental Pollution*. 132: 21-27.
29. Mehrasbi, M., Sekhawatju, M., Hasanalizadeh, A.S., and Ramezanzadeh, Z. 2010. Study of heavy metals in the atmospheric deposition in Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Health and Environment*. 2: 4. 240-249. (In Persian)
30. Mohammadi, J. 2001. Cadmium concentration in vegetable crops grown in polluted soils of Kempen region (Belgium). 4th National Conference on Environmental Health. pp. 528-35. (In Persian)
31. Niknam, M., Shahbazi, A., and Farajlu, J. 2014. Application and efficiency of agricultural wastes in the removal of heavy metals and non-ferrous metals from water and wastewater: A study of optimal adsorption. *Human and Environment Journal*. 31: 23-38. (In Persian)
32. Olowoyo, J.O., van Heerden, E., Fischer, J.L., and Baker, C. 2010. Trace metals in soil and leaves of *Jacaranda mimosifolia* in Tshwane area, South Africa. *Atmospheric Environment*. 44: 1826-1830.
33. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular* 939.

34. Oudeh, M., Khan, M., and Scullion, J. 2002. Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. *Environmental Pollution*. 6: 293-300.
35. Ozyigit, I.I., Yalcin, B., Turan, S., Saracoglu, I.A., Karadeniz, S., Yalcin, I.E., and Demir, G. 2018 Investigation of heavy metal level and mineral nutrients status in widely used medicinal plants' leaves in Turkey: insights into health implications. *Biological Trace Element Research*. 182: 387-406.
36. Philips, J.M., and Hayman, D.S. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhiza fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*. 55: 158-161.
37. Quevauviller, P. 1998. Operationally defined extraction procedures for soil and sediment analysis. *Trends in Analytical Chemistry*. 17: 5. 289-298.
38. Quina, M.J., Soares, M.A.R., and Quinta-Ferreira, R. 2017. Applications of industrial eggshell as a valuable anthropogenic resource. *Resources and Conservation Recycling*. 123: 176-186.
39. Rangzan, N. 2012. Ph.D. Dissertation. Indian Agricultural Research Institute, New Delhi, India.
40. Rillig, M.C., and Mummey, D.L. 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*. 171: 41-53.
41. Rizwan, M., Ali, S., Rehman, M.Z.U., and Maqbool, A. 2019 A critical review on the effects of zinc at toxic levels of cadmium in plants. *Environmental Science and Pollution Research*. 26: 6279-6289.
42. Salardini, A. 1992. Soil fertility. Tehran University Press. 440p. (In Persian)
43. Santillan-Medrano, J., and Jurinak, J.J. 1975. The chemistry of lead and cadmium in soil: solid phase formation. *Soil Science Society of America Journal*. 39: 5. 851-856.
44. Smith, S.E., and Read, D.J. 2008. Mycorrhizal symbiosis. Cambridge, London: Academic, 815p.
45. Song, H. 2005. Effects of VAM on host plant in condition of drought stress and its mechanisms. *Electronic Journal of Biology*. 1: 3. 44-48.
46. Stancheva, I., Geneva, M., Mrakovska, Y., Tzvetkova, N., Mitova, I., Todorova, M., and Petrov, P. 2014 A comparative study on plant morphology, gas exchange parameters, and antioxidant response of *Ocimum basilicum* L. and *Origanum vulgare* L. grown on industrial polluted soil. *Turkish Journal of Biology*. 38: 89-102.
47. Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. P 159-165. In: A.L. Page, R.H. Miller, D. Keeney, (eds.). *Methods of Soil Analysis: Part 2: Chemical and microbiological properties*. Agronomy Monogr. 2nd ed. ASA and SSSA. Madison, WI.
48. United State Department of Agriculture. Methods for soil characterization, Saline and Alkali soils. Agriculture, Chapter 6, Hand book 60.
49. United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2010. Integrated Risk Information System-Database. Philadelphia PA, Washington, DC.
50. USEPA. 2006. Integrated risk information system (IRIS). Washington DC: United States Environmental Protection Agency; [cited 2015 Jul 17]. Available from: <http://www.epa.gov/iris/subst>.
51. Wagner, G.J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Advance in Agronomy*. 51: 173-212.
52. Walakly, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the digestion method for determining soil organic matter and proposed modification of chromic acid titration method. *Soil Science*. 37: 29-38.
53. Warman, P.R., Murphy, C.J., Burnham, J.C., and Eaton, L.J. 2004. Soil and plant response to MSW compost applications on low bush blueberry fields in 2000 and 2001. *Small Fruits Review*. 3: 1-2. 19-31.
54. World Health Organization (WHO). 1998. Environmental Health Criteria for Copper. Available from: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc200.htm>. Accessed 2004 September 13.

55. Wu, Q.S., Zou, Y.N., and Wang, G.Y. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi and acclimatization of micro propagated citrus. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 42: 1825-1832.
56. Yalcin, M.G., Battaloglu, B., and Ilhan, S. 2007. Heavy metal sources in sultan marsh and it's uptake by fruit type vegetable grown in selected agricultural areas. *Pakistan Journal of Biological Science*. 7: 1438-1442.
57. Yong, R. 2001. *Geo-environmental Engineering, Contaminated Soils. Pollutant Fate Mitigation*, CRC Press, LIC, USA, 98p.

