فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۰، شماره ۴۴، مهر و آبان‌ماه ۱۴۰۰ صفحه: ۱۹۳- ۲۱۸

مقاله پژوهشی

برهمکنش قارچ ریشه و پوترسین بر خصوصیات فیزیولوژیکی، رشد و عملکرد بالنگوی شهری (*Lallemantia iberica*) در شرایط تنش سرب

آیدا انصاری[۱]، بابک عندلیبی*[۱]، مهدی زارعی[۲] و فرید شکاری[۱]

[۱]گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان

[۲]گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۱۸، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷)

چکیده

در دو دهه اخیر آلودگی خاک‌ها به فلزات سنگین در بسیاری از مناطق زراعی افزایش یافته است. از این‌رو برای بررسی اثر تعامل قارچ ریشه و پوترسین بر خصوصیات فیزیولوژیکی، غلظت سرب و عملکرد بالنگوی شهری تحت تنش سرب، آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال ۱۳۹۷ انجام شد. آزمایش شامل سرب در چهار سطح (صفر، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از منبع نیترات سرب)، قارچ ریشه در سه سطح (عدم تلقیح، *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus intraradices*) و پوترسین در سه سطح (صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) بود. نتایج نشان داد که در بین سطوح سرب، ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث بیشترین کاهش در شاخص سبزینگی، محتوی نسبی آب، ارتفاع، وزن خشک گیاه، طول ریشه و عملکرد دانه شد و نشت یونی، غلظت سرب گیاه، کلونیزاسیون و محتوی پرولین را افزایش داد. در تمام سطوح سرب، هر دو گونه قارچ به ویژه *F. mosseae* موجب افزایش شاخص سبزینگی، محتوی نسبی آب، ارتفاع، وزن خشک گیاه، طول ریشه و عملکرد و کاهش غلظت سرب گیاه شدند. در تمام سطوح سرب، غلظت ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین نشت یونی و غلظت سرب گیاه را کاهش و محتوی پرولین، وزن خشک گیاه، عملکرد و کلونیزاسیون را افزایش داد. در تمامی صفات، پوترسین با *F. mosseae* اثر هم‌افزایی داشت ولی فقط غلظت ۰/۵ میلی‌مولار با *R. intraradices* اثر هم‌افزایی داشت. به‌طورکلی، تعامل ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین با *F. mosseae* بر رشد گیاه به‌ویژه در شرایط تنش سرب اثر افزایشی داشت.

کلمات کلیدی: پرولین، پلی‌آمین، شاخص سبزینگی، فلزات سنگین، کلونیزاسیون

مقدمه

با افزایش رشد اقتصادی، تولیدات صنعتی، فاضلاب شهری، معادن و سموم کشاورزی در جهان، آلودگی خاک به فلزات سنگین افزایش یافته است (Zhang *et al.*, 2018). غلظت بالای فلزات سنگین به‌دلیل ورود به بدن انسان از طریق زنجیره غذایی، تهدیدی جدی برای سلامت انسان می‌باشد (Zhou *et al.*, 2018). سرب مهم‌ترین فلز آلاینده سمی و دومین ماده خطرناک است (ATSDR, 2017) که پایداری بالا در خاک و اثرات مضر بر رشد، فتوسنتز، عملکرد، متابولیسم، خصوصیات مورفو- فیزیولوژی، وضعیت آب و جذب عناصر در گیاهان

*نویسنده مسؤل، نشانی پست الکترونیکی: andalibi@znu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

دارد (Karimi *et al*., 2017; Zhou *et al*., 2018; Zhang *et al*., 2018). در حضور سرب، تولید گونه‌های اکسیژن فعال در گیاهان افزایش یافته و تنش اکسیداتیو رخ می‌دهد (Kumar *et al*., 2018). روش‌های شیمیایی (مثل کاربرد بیرونی هورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد همچون سیتوکینین و سالیسیلیک اسید) و بیولوژیکی (مثل قارچ‌های مفید) و روش‌های وابسته به گیاهان (مثل گیاهان مقاوم و انباشتگر، به‌عنوان فناوری گیاه-پالایی) راهکارهای مناسبی هستند که می‌توانند برای کاهش اثرات مضر سرب در گیاهان و برای پالایش خاک‌های آلوده به سرب استفاده شوند (Leung *et al*., 2013; Zhang *et al*., 2018; Zhou *et al*., 2018; Chen *et al*., 2019).

کاربرد میکروارگانیسم‌ها، به‌ویژه قارچ‌های ریشه، برای کمک به پالایش خاک‌های آلوده به فلزات سنگین به‌دلیل کم هزینه بودن و کارایی بالا، سازگاری با محیط‌زیست و دوام بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Leung *et al*., 2013; Zhang *et al*., 2018). قارچ‌های ریشه ارتباطات همزیستی با ریشه ۸۰ درصد از گونه‌های گیاهی زمین در انواع مختلف خاک‌ها تشکیل می‌دهند (Wang and Qiu, 2006) و می‌توانند عملکرد و تحمل گیاه میزبان را از طریق اثرات مثبت بر جذب آب و عناصر غذایی و سیستم‌های دفاع آنتی‌اکسیدانی در برابر تنش‌های زنده و غیرزنده مانند خشکی، شوری و فلزات سنگین، افزایش دهند (Ansari *et al*., 2016; Xu *et al*., 2018; Zhang *et al*., 2018). در شرایط آلودگی خاک به فلز سنگین، کاربرد قارچ ریشه موجب افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه شده و غلظت فلزات سنگین در گیاه و علائم سمیت آنها را در ساختار تیلاکوئید کاهش می‌دهد (Zhang *et al*., 2018).

در دهه‌های اخیر، از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه برای کاهش اثرات تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری، گرما و فلزات سنگین استفاده شده است (Ansari *et al*., 2016; Bielach *et al*., 2017; Chen *et al*., 2019). تنظیم‌کننده‌های رشد (مثل اکسین، جیبرلین و پلی‌آمین) به‌عنوان یک روش مناسب برای افزایش کارایی گیاه‌پالایی و جذب فلزات سنگین بررسی شده‌اند (Rostami and Azhdarpoor, 2019). پلی‌آمین‌ها (پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین) ترکیبات آلی و پلی‌کاتیون-های حاوی نیتروژن با وزن مولکولی کم هستند که به‌دلیل مشارکت در انواع مختلف پاسخ به تنش‌های محیطی اهمیت دارند (Rady *et al*., 2016; Chen *et al*., 2019; Parmoon *et al*., 2019). این تنظیم‌کننده‌ها نقش حفاظتی در برابر آسیب غشایی و پراکسیداسیون چربی دارند و در فرایندهای سلولی، تمایز آوندی، مهار اتیلن، فعالیت آنزیمی، رشد ریشه و پیری در گیاهان نقش تنظیمی دارند و از تجمع گونه‌های اکسیژن فعال جلوگیری می‌کنند (Gupta *et al*., 2012; Rady *et al*., 2016; Chen *et al*., 2019). پلی‌آمین‌ها، به‌ویژه پوترسین، تشکیل قارچ ریشه و رشد هیف را تحریک کرده و به‌طور مثبتی بر میکوریزاسیون و جذب عناصر مانند فسفر تأثیر می‌گذارند (Wu *et al*., 2012a, 2012b; Rezvanypour *et al*., 2015). ترکیب پوترسین و *Glomus mosseae* پایداری گیاه را در شرایط تنش کادمیوم افزایش داد (Kumar and Pathak, 2018).

بالنگوی شهری (*Lallemantia iberica* (M. Bieb.) Fischer and C.A. Meyer) گیاهی یکساله از خانواده نعناعیان است که منشأ آن قفقاز و خاورمیانه است و در اروپا و غرب آسیا از جمله سوریه، ترکیه و ایران (مثل کرمانشاه، مرکزی، زنجان، مازندران و آذربایجان غربی) پراکنده می‌باشد (Koohdar *et al*., 2015; Sadeghi-Varkani *et al*., 2018). بالنگوی شهری یک گیاه چند منظوره است که به‌دلیل موسیلاژ بذر، اسانس و روغن دانه اهمیت دارد (Amanzadeh *et al*., 2011). اسانس این گیاه دارای فعالیت آنتی‌اکسیدانی و حاوی اجزای مهمی مانند جرماکرین دی (germacrene-D)، بتا کوبین، سیگما-۳-کارن، لینالول، اسپاتولنول، بتا-کاریوفیلن و لیمونن در مرحله گلدهی می‌باشد (Nori-Shargh *et al*., 2009; Amanzadeh *et al*., 2011). روغن بالنگو (۳۸-۳۰ درصد) یک منبع اسید لینولنیک (۷۴-۶۷ درصد) فراتر از روغن بزرک است که در موارد صنعتی و غذایی کاربرد دارد (Zlatanov *et al*., 2012; Koohdar *et al*., 2015). با توجه به افزایش فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی نزدیک مناطق

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

صنعتی مانند شهرک صنعتی روی زنجان، اهمیت بالنگوی شهری در صنعت، سلامت و تغذیه انسان و حیوان و نبود اطلاعات درباره پاسخ این گیاه به سرب، مطالعه این گیاه از نظر پاسخ به فلزات سنگین مهم است. همچنین با توجه به کمبود اطلاعات در مورد نقش توأم قارچ ریشه و پوترسین در رشد و عملکرد بالنگوی شهری در خاک آلوده به سرب، این آزمایش برای بررسی اثر جداگانه و ترکیبی گونه‌های قارچ ریشه و پوترسین بر خصوصیات فیزیولوژیکی، جذب سرب و عملکرد این گیاه در شرایط تنش سرب انجام شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق سال ۱۳۹۷ در گلخانه تحقیقاتی گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان، انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی، با سه فاکتور و در شش تکرار (سه تکرار برای عملکرد دانه و سه تکرار برای دیگر صفات) در گلدان‌های ۵ کیلوگرمی اجرا شد. تیمار سرب شامل چهار مقدار صفر، ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود که از منبع نیترات سرب (مرک با شماره کاتالوگ ۱۰۷۳۹۸) به هر کیلوگرم خاک، اضافه شد (Sá *et al.*, 2015; Karimi *et al.*, 2017). تیمار پوترسین (سیگما با شماره کاتالوگ ۵۱۷۹۹) شامل سه سطح صفر، ۰/۵ و ۱ میلی‌مولار بود. تیمار قارچ ریشه شامل سه سطح عدم تلقیح، تلقیح با گونه *Funneliformis mosseae* و تلقیح با گونه *Rhizophagus intraradices* بود. زادمایه هر دو قارچ، بومی و غالب در منطقه آلوده به سرب معدن انگوران، زنجان، ایران بود و توسط کشت تله تک گونه-ای با سورگوم علوفه‌ای در حضور فلزات سنگین تکثیر شد. پتانسیل زادمایه برای گونه *F. mosseae* شامل ۱۲ عدد اسپور بر گرم و کلونیزاسیون ریشه ۸۰ درصد بود و برای گونه *R. intraradices* شامل ۱۰ عدد اسپور بر گرم و کلونیزاسیون ریشه ۸۵ درصد بود.

خاک آزمایشی حاوی نسبت ۲ به ۱ از خاک سرند شده به ماسه بود و دارای بافت لومی رسی سیلتی، اسیدیته ۷/۸۷، هدایت الکتریکی ۱/۶۳ دسی‌زیمنس در متر، ماده آلی ۰/۳۹ درصد، فسفر قابل جذب ۴/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم، پتاسیم قابل جذب ۱۹۳/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، نیتروژن کل ۰/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، سرب قابل جذب (استخراجی با DTPA) ۰/۷۳ میلی‌گرم در کیلوگرم، آهن قابل جذب (استخراجی با DTPA) ۵/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم، روی قابل جذب (استخراجی با DTPA) ۴/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم و منگنز قابل جذب (استخراجی با DTPA) ۸/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. مقدار سرب خاک آزمایشی در ابتدای آزمایش اندازه‌گیری و به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. در ابتدا، خاک آزمایشی قبل از اعمال تیمارها توسط اتوکلاو در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت، ضدعفونی شد. سپس برای اعمال سطوح سرب، نیترات سرب برای اختلاط کامل سرب با خاک مربوطه مخلوط شد (Sa *et al.*, 2015; Karimi *et al.*, 2017). خاک گلدان‌ها قبل از کشت، به‌مدت ۴۲ روز برای ایجاد تعادل در خاک، نگهداری شد (Liao *et al.*, 2005). سپس ۵۵ گرم از زادمایه قارچ ریشه بر روی سطح خاک داخل گلدان اضافه شد. برای تیمار شاهد (بدون قارچ) نیز همان مقدار از مایه تلقیح (استریل و بدون قارچ ریشه) برای فراهم کردن شرایط مشابه استفاده گردید. سپس ۲ سانتی‌متر خاک برای پوشاندن زادمایه به گلدان اضافه شد و تعداد ۳۰ بذر بالنگوی شهری که از قبل با هیپوکلریت سدیم ۵ درصد به مدت ۳۰ ثانیه ضدعفونی شده بودند را روی سطح خاک قرار داده و توسط ۲ سانتی‌متر خاک پوشانده شدند.

در هر گلدان، بعد از تنک در مرحله چهار برگی، چهار بوته یکسان در گلدان‌های مربوط به عملکرد دانه و شش بوته یکسان در گلدان‌های مربوط به دیگر صفات نگه داشته شدند. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی به فواصل یک روز در میان انجام شدند. بعد از هر بار آبیاری، به‌منظور ثابت نگه داشتن غلظت سرب در گلدان، آب جمع‌شده در زیر گلدانی از طریق زهکش، مجددا به گلدان برگردانده شد. مقدار نیترات اضافه شده توسط نیترات سرب در بالاترین سطح، با استفاده از نیترات آمونیوم (مرک با شماره کاتالوگ ۱۰۱۱۸۸)

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

برای گلدان‌های سایر سطوح تأمین گردید. همچنین، از آنجا که غلظت عناصر کم مصرف در حد بهینه بودند، کوددهی با کود کامل (کود پودری گرین دراپ NPK 20-20-20) با غلظت ۲ در هزار (۵۰ میلی‌لیتر به هر گلدان) در دو مرحله (مرحله سبز شدن و هشت برگی) انجام شد. نور گلخانه توسط نور خورشید و تهویه با بازکردن پنجره‌ها فراهم شد و میانگین رطوبت نسبی ۶۵ درصد و میانگین دمای حداکثر و حداقل به‌ترتیب ۳۴ و ۱۷ درجه سانتی‌گراد بود. محلول‌پاشی پوترسین قبل از شروع گلدهی (با مشاهده اولین جوانه گل) طی ۲ مرحله (نصف غلظت در مرحله ۱۰ برگی و نصف دیگر ۷ روز بعد) انجام شد. گیاهان از زمان کشت تا گلدهی (۴۳ روز) و تا رسیدگی بذر (۹۰ روز) تحت تیمار سرب بودند. درنهایت گیاهان ۵۶ روزه (در مرحله گلدهی) جهت اندازه‌گیری صفات استفاده شدند.

شاخص سبزینگی با دستگاه کلروفیل‌سنج (SPAD, CCM-200 OPTI-SCIENSES) در مرحله گلدهی اندازه‌گیری شد. پرولین در مرحله گلدهی با ۰/۴ گرم برگ به روش Bates و همکاران (۱۹۷۳) و با دستگاه اسپکتروفتومتر (PerkinElmer, Lambada 25, USA) در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. به‌منظور سنجش محتوی نسبی آب در مرحله گلدهی، ابتدا وزن تر برگ با ترازو (دقت ۰/۰۰۱) به‌دست آمد و بعد برگ‌ها ۱۴ ساعت در دمای اتاق و در تاریکی داخل آب‌مقطر قرار گرفته تا وزن اشباع تعیین گردد. سپس برای اندازه‌گیری وزن خشک، برگ‌ها ۴۸ ساعت در آون ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و محتوی نسبی آب با فرمول زیر محاسبه شد (Turner, 1981).

[(وزن اشباع – وزن خشک) / (وزن تر – وزن خشک)] × ۱۰۰ = محتوی نسبی آب

برای اندازه‌گیری نشت یونی طبق روش Lutts و همکاران (۱۹۹۶)، مقدار ۰/۳ گرم برگ در مرحله گلدهی به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد درون آب دیونیزه نگهداری شد. سپس توسط دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (CMD 500 WPA conductivity meter, Cambridge, UK) مقدار هدایت الکتریکی اول اندازه‌گیری شد. بعد از آن به‌منظور اندازه‌گیری مقدار هدایت الکترولیتی دوم، نمونه‌ها ۳۰ دقیقه در حمام آب گرم با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. نهایتاً نشت یونی توسط معادله زیر محاسبه شد:

(ضریب هدایت الکتریکی دوم / ضریب هدایت الکتریکی اول) × ۱۰۰ = نشت یونی

به‌طور تصادفی ارتفاع ۴ بوته در مرحله گلدهی توسط خط‌کش از سطح خاک تا انتهای بوته اندازه‌گیری شد و متوسط آن در تجزیه داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سپس شش بوته از هر گلدان برداشت شده و نمونه‌ها به‌منظور خشک‌شدن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته و درنهایت وزن خشک اندام هوایی با ترازو (دقت ۰/۰۰۱ گرم) اندازه‌گیری شد. ریشه‌های مربوط به این شش بوته از گلدان خارج و بعد از شستشو با آب، طول آنها توسط خط‌کش اندازه گرفته شد. به‌منظور اندازه‌گیری کلونیزاسیون ریشه به روش کورمانیک و مک گرو (Kormanik and McGraw, 1982)، ابتدا ۰/۲ گرم از نمونه ۱۴ ساعت در محلول هیدروکسید پتاسیم ۸ درصد قرار گرفت. سپس بعد از شستشو با آب، ۱۵ دقیقه در محلول اسید کلریدریک ۲ درصد قرار داده شد. سپس نمونه‌ها ۱۲ ساعت در محلول رنگ (آب: گلیسرین: اسید لاکتیک به‌ترتیب با نسبت حجمی ۱۴:۱:۱ میلی-لیتر که شامل ۱ میلی‌لیتر جوهر آبی بود) قرار گرفتند. بعد از خارج‌کردن محلول رنگ، محلول رنگ‌بر (محلول رنگ بدون جوهر) اضافه شد. نهایتاً توسط میکروسکوپ نوری (Leica galen III)، درصد کلنیزاسیون به روش تلاقی خطوط شبکه محاسبه شد (McGonigle *et al.*, 1990).

برای اندازه‌گیری وزن خشک ریشه با استفاده از ترازو (با دقت ۰/۰۰۱ گرم)، نمونه‌ها در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. مقدار ۰/۳ گرم از اندام هوایی و ریشه بالنگوی شهری که قبلاً در آون خشک و آسیاب شده بودند، براساس روش تر با ۲/۳ میلی‌لیتر از اسید مخلوط (۶ گرم سالیسیلیک اسید، ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

سولفوریک ۹۸٪ و ۱۸ میلی‌لیتر آب‌مقطر) هضم شدند (Walinga *et al*., 1995). درنهایت غلظت سرب اندام هوایی و ریشه با دستگاه جذب اتمی (Varian 220 AA, Australia) اندازه‌گیری و به‌صورت میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گزارش گردید. در انتهای فصل رشد و بعد از رسیدگی کامل، هر چهار بوته از هر گلدان مربوط به عملکرد برداشت شده و پس از جداکردن بذور آن‌ها، عملکرد دانه اندازه‌گیری و با واحد گرم در گیاه گزارش شد. داده‌ها با نرم‌افزار آماری SAS (9.1) تجزیه واریانس شده و مقایسه میانگین آنها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس درصد کلونیزاسیون حاکی از تأثیر معنی‌دار اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۵) و اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین (در سطح احتمال ۰/۰۰۱) بود (جدول ۱). اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین این صفت را تحت تأثیر قرار نداد (جدول ۱). افزایش سطح سرب تا ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، باعث افزایش درصد کلونیزاسیون شد (جدول ۲). در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، بیشترین درصد کلونیزاسیون مربوط به گونه *F. mosseae* بود ولی در سطح ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، بیشترین درصد کلونیزاسیون (میانگین ۹۷/۲ درصد) مربوط به گونه *R. intraradices* بود که تفاوت معنی‌داری با *F. mosseae* نداشت (جدول ۳). کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین در هر چهار سطح سرب کلونیزاسیون را نسبت به عدم کاربرد پوترسین افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار پوترسین فقط در شرایط عدم‌کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم باعث افزایش کلونیزاسیون شد و در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌طور جزئی آن را نسبت به عدم کاربرد پوترسین کاهش داد (جدول ۴). در گونه *F. mosseae*، کاربرد هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش درصد کلونیزاسیون نسبت به عدم کاربرد پوترسین شد (جدول ۵). در گونه *R. intraradices*، کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین درصد کلونیزاسیون را افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار پوترسین باعث کاهش جزئی آن شد و تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (جدول ۵).

هر دو گونه قارچ، به‌ویژه *F. mosseae*، ریشه بالنگوی شهری را به‌ویژه در تنش سرب به خوبی کلونیزه کردند. افزایش کلونیزاسیون با افزایش مقدار سرب در خاک با دیگر مطالعات مطابقت داشت (Alvarado-Lopez *et al*., 2019; Zalaghi *et al*., 2020). کلونیزاسیون ریشه هویج وحشی تلقیحی با *G. intraradices* در تنش سرب (۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر) افزایش یافت (Alvarado-Lopez *et al*., 2019). کلونیزاسیون ریشه شاهدانه تلقیحی با *G. mosseae* با افزایش سرب در خاک تا ۱۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش یافت و سپس در ۱۸۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت (Zalaghi *et al*., 2020). قارچ‌ها، گونه گیاهی، غلظت فلز سنگین و خصوصیات خاک همه مهم هستند و اثرات خاصی بر کلونیزاسیون ریشه دارند (Liao *et al*., 2003). قارچ ریشه اگزالات‌های فلزی تولید می‌کند و ژن‌هایی دارد که با بیان آنها می‌تواند در سطوح بالای فلزات سنگین زنده بماند و موجب افزایش کلونیزاسیون شود، مانند ژن گلوتاتیون S- ترانسفراز در گونه *G. intraradices* (Leung *et al*., 2013). تحریک تشکیل همزیستی قارچ ریشه-گیاه با کاربرد پلی‌آمین‌ها گزارش شده است (Wu *et al*., 2012a, 2012b; Wu *et al*., 2010a, 2010b). کلونیزاسیون ریشه با ترکیب گونه *F. mosseae* با هر دو غلظت پوترسین افزایش یافت ولی در گونه *R. intraradices* با پوترسین ۰/۵ میلی‌مولار توسعه یافت و با ۱ میلی‌مولار کاهش یافت که بیانگر اثر منفی غلظت بالای پوترسین بر *R. intraradices* و اثر هم‌افزایی هر دو غلظت پوترسین با *F. mosseae* است. افزایش کلونیزاسیون *F. mosseae* با پوترسین (۰/۵ و ۱ میلی‌مولار) در این تحقیق با نتایج دیگر محققان مطابقت داشت (Wu *et al*., 2010a; Wu *et al*., 2012a, 2012b). پلی‌آمین‌های بیرونی به روش وابسته

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

جدول ۱- تجزیه واریانس تنش سرب، کاربرد قارچ ریشه و محلول‌پاشی پوترسین بر صفات شاخص سبزینگی، محتوی نسبی آب، نشت یونی، محتوی پرولین، ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی، طول و وزن خشک ریشه، کلونیزاسیون، عملکرد دانه و غلظت سرب اندام هوایی و ریشه در گیاه بالنگوی شهری

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		شاخص سبزینگی	محتوی نسبی آب	نشت یونی	محتوی پرولین	ارتفاع	وزن خشک اندام هوایی
بلوک	۲	۴۲/۰۷**	۲۷۸/۶۳***	۳۲۸۹/۲***	۱/۷۰۰۷*	۱۱۲/۰۹***	۰/۵۳۶۳۶***
سرب	۳	۶۳۱/۴۴***	۲۷۷۵/۶۲***	۷۲۱۲/۳***	۴۴/۶۹۴***	۳۲۷/۷۵***	۰/۰۸۸۰۶***
قارچ ریشه	۲	۱۷۶/۰۳***	۱۰۳۱/۱۴***	۱۰۰۴/۳***	۸/۱۹۵۵***	۱۹۸/۳۹***	۰/۱۲۶۸۹***
پوترسین	۲	۱۰۱/۹۷***	۳۳۴/۶۹***	۱۱۱۶/۵***	۱۱/۶۸۳***	۱۴۳/۵۱***	۰/۰۳۳۵۸***
سرب × قارچ ریشه	۶	۱۸/۳۳۴*	۵۳/۹۳*	۶۳/۶۶۳^{ns}	۰/۵۳۰۳^{ns}	۹/۴۴۸*	۰/۰۰۶۵۷*
سرب × پوترسین	۶	۲/۳۷۶۲^{ns}	۸/۶۴۵^{ns}	۷۶/۱۴۴*	۰/۹۸۸۵*	۱/۴۳۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۸۶^{ns}
قارچ ریشه × پوترسین	۴	۱۰/۸۸۱^{ns}	۷۴/۳۸*	۶۵/۷۹۸^{ns}	۰/۹۴۲۲^{ns}	۱۰/۶۰۵*	۰/۰۰۸۴۱*
سرب × قارچ ریشه × پوترسین	۱۲	۲/۷۲۸^{ns}	۱۳/۶۴۶^{ns}	۴۲/۵۹۲^{ns}	۰/۷۰۷^{ns}	۱/۴۵۹۸^{ns}	۰/۰۰۵۷۱*
خطا	۷۰	۷/۹۰۴۱	۲۲/۳۱۱۸	۳۰/۸۰۳۸	۰/۴۳۳۶۸	۴/۲۱۳۲۵	۰/۰۰۲۷۲۴
ضریب تغییرات (درصد)		۷/۱	۶/۸	۱۲/۳	۱۴	۶/۱	۱۱/۳

^{ns}، *، **و *** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

ادامه جدول ۱-

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		طول ریشه	وزن خشک ریشه	کلونیزاسیون ریشه	غلظت سرب اندام هوایی	غلظت سرب ریشه	عملکرد دانه
بلوک	۲	۲۶۵/۹۱***	۰/۰۰۳۷۱۴***	۳۵/۱۵۲*	۷/۴۶۷***	۹/۶۸۶***	۰/۰۳۰۹۶***
سرب	۳	۸۸۹/۹***	۰/۰۱۳۶۴۷***	۳۲۵/۱۸***	۵۲۴/۹۸۶***	۳۸۶۸/۴***	۰/۱۴۶۳۷***
قارچ ریشه	۲	۱۵۱/۱۴***	۰/۰۰۶۴۸***	۱۰۰۶۴۹/۶***	۸۸/۸۴۹***	۱۱۲/۸***	۰/۰۴۹۰۸***
پوترسین	۲	۹۸/۵۴***	۰/۰۰۵۱۱۱***	۸۹/۶۴۲***	۲۷/۸۶۹***	۲۶/۴۹۴***	۰/۰۴۱۱۹***
سرب × قارچ ریشه	۶	۹/۰۸۷**	۰/۰۰۰۱۴۳^{ns}	۹۷/۷۶۹***	۱۴/۲۱۹***	۳۶/۶۵۹***	۰/۰۰۱۱۶*
سرب × پوترسین	۶	۰/۵۵۴۸^{ns}	۰/۰۰۰۲۰۲^{ns}	۲۱/۷۳۸*	۴/۱۰۶***	۵/۰۸۲***	۰/۰۰۱۲۸*
قارچ ریشه × پوترسین	۴	۱۱/۰۴۶**	۰/۰۰۰۶۶۳*	۶۲/۴۵۸***	۲/۱۴۹***	۲/۵۴**	۰/۰۰۲۸۲***
سرب × قارچ ریشه × پوترسین	۱۲	۰/۶۱۶۲^{ns}	۰/۰۰۰۳۸۲*	۱۳/۰۹۰۳^{ns}	۰/۳۳۰۱^{ns}	۱/۰۰۳^{ns}	۰/۰۰۰۶^{ns}
خطا	۷۰	۲/۲۱۴۶	۰/۰۰۰۱۹۹	۷/۵۶۰۵	۰/۳۹۵۱۹۴	۰/۵۳۷۶۹	۰/۰۰۰۵۰۷
ضریب تغییرات (درصد)		۵/۵	۱۲/۵	۴/۵	۱۱/۲	۶/۳	۱۰/۶

^{ns}، *، **و *** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

به غلظت، کلونیزاسیون قارچ را تحت تأثیر قرار دادند، به‌طوری‌که غلظت کم ($۰/۲ \times ۱۰^{-۴}$ مولار) درصد کلونیزاسیون

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

جدول ۲- اثرات ساده تنش سرب، کاربرد قارچ ریشه و محلول‌پاشی پوترسین بر صفات شاخص سبزینگی، محتوی نسبی آب، نشت یونی، محتوی پرولین، ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی، طول و وزن خشک ریشه، کلونیزاسیون، عملکرد دانه و غلظت سرب اندام هوایی و ریشه در گیاه بالنگوی شهری

تیمارهای آزمایشی	شاخص سبزینگی	محتوی نسبی آب (درصد)	نشت یونی (درصد)	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	ارتفاع (سانتی‌متر)	وزن خشک اندام هوایی (گرم در گیاه)
سرب (میلی¬گرم در کیلوگرم خاک)						
۰	۴۴/۳±۰/۴۴^{a}	۸۱/۹±۱/۵۶^{a}	۲۹/۸±۱/۸^{d}	۳/۴۷±۰/۱۱^{c}	۳۷/۹±۰/۷۱^{a}	۰/۵۲۱±۰/۰۲۲^{a}
۳۰۰	۴۲/۸±۰/۵۵^{a}	۷۲/۳±۰/۹۱^{b}	۳۲/۸±۱/۳^{c}	۳/۹۳±۰/۱۴^{c}	۳۵/۳±۰/۷۳^{b}	۰/۴۹۵±۰/۰۲۷^{a}
۶۰۰	۳۸/۰۳±۰/۶۶^{b}	۶۶/۸±۱/۲۲^{c}	۵۴/۸±۲/۶^{b}	۵/۰۴±۰/۱۵^{b}	۳۲/۵±۰/۴۸^{c}	۰/۴۲۹±۰/۰۲۶^{b}
۹۰۰	۳۳/۶±۱/۰۲^{c}	۵۷/۷±۱/۸۳^{d}	۶۳±۳/۱^{a}	۶/۳۶±۰/۲۸^{a}	۲۹/۸±۰/۷۹^{d}	۰/۳۹۸±۰/۰۲۴^{c}
قارچ ریشه						
عدم تلقیح	۳۷/۲±۱/۱۶^{b}	۶۳/۵±۱/۸۹^{b}	۵۰/۸±۳/۵^{a}	۵/۲۴±۰/۲۸^{a}	۳۱/۴±۰/۷۷^{c}	۰/۳۹۳±۰/۰۲۱^{b}
تلقیح با Fm	۴۱/۴±۰/۶۷^{a}	۷۳/۳±۱/۶۷^{a}	۴۰/۴±۲/۸^{c}	۴/۵۲±۰/۲۲^{b}	۳۶±۰/۷۱^{a}	۰/۵۰۲±۰/۰۲۱^{a}
تلقیح با Ri	۴۰/۵±۰/۷۳^{a}	۷۲/۱±۱/۷۷^{a}	۴۴±۲/۶^{b}	۴/۳۴±۰/۲^{b}	۳۴/۴±۰/۶۴^{b}	۰/۴۸۷±۰/۰۲۲^{a}
پوترسین (میلی–مولار)						
۰	۳۷/۸±۱/۰۲^{b}	۶۶/۶±۱/۹۴^{c}	۵۱/۴±۳/۳^{a}	۴/۰۸±۰/۱۹^{c}	۳۱/۹±۰/۷^{c}	۰/۴۲۸±۰/۰۲۱^{b}
۰/۵	۴۱/۲±۰/۸^{a}	۷۲/۷±۱/۸۳^{a}	۴۰/۸±۲/۸^{b}	۵/۲۱±۰/۲۹^{a}	۳۵/۹±۰/۸۱^{a}	۰/۴۸۹±۰/۰۲۴^{a}
۱	۴۰±۰/۹^{a}	۶۹/۷±۱/۸۷^{b}	۴۳±۲/۹^{b}	۴/۸۱±۰/۲۱^{b}	۳۳/۹±۰/۶۸^{b}	۰/۴۶۵±۰/۰۲۲^{a}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. مقادیر نشان‌دهنده میانگین ± خطای استاندارد هستند. (Fm) *Funneliformis mosseae* و (Ri) *Rhizophagus intraradices*

را افزایش داد اما غلظت‌های زیاد (۱×۱۰^{-۴} و ۵×۱۰^{-۴} مولار) باعث کاهش آن شدند (Yao *et al.*, 2010). از این‌رو، اثر پوترسین بر همزیستی قارچ در این تحقیق می‌تواند به غلظت پوترسین و گونه قارچ وابسته باشد (Wu *et al.*, 2012a, 2012b). پلی‌آمین‌های بیرونی با کاهش سطح اتیلن (بازدارنده آلودگی قارچ ریشه) در بافت ریشه و تحریک جوانه‌زنی اسپور، طویل‌شدن و منشعب‌شدن هیف و طول عمر هیف، قارچ ریشه را تحت تأثیر قرار دادند (El Ghachtouli *et al.*, 1995; El Ghachtouli *et al.*, 1996).

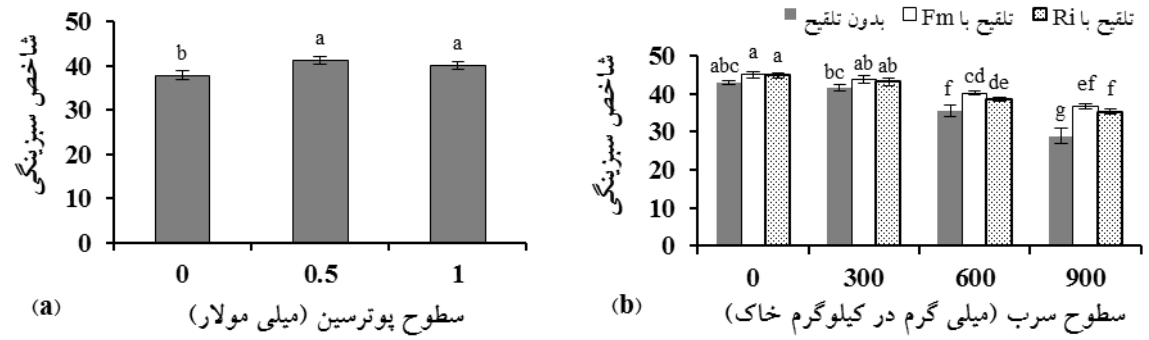
نتایج تجزیه واریانس شاخص سبزینگی نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین در سطح احتمال ۰/۰۰۱ و اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه در سطح احتمال ۰/۰۵ این صفت را تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین، اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر صفت فوق معنی‌دار نبودند (جدول ۱). محلول‌پاشی پوترسین در هر دو غلظت باعث افزایش شاخص سبزینگی نسبت به عدم کاربرد پوترسین شد و بیشترین مقدار آن مربوط به غلظت ۰/۵ میلی‌مولار (با ۹ درصد افزایش) بود گرچه تفاوت معنی‌داری با غلظت ۱ میلی‌مولار نداشت (شکل a ۱). معنی‌دار شدن اثر دوگانه سرب و قارچ بیانگر واکنش متفاوت دو گونه قارچ نسبت به سطوح مختلف سرب است. تنش ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، شاخص سبزینگی را نسبت به تیمار شاهد (بدون سرب) کاهش داد و بیشترین کاهش مربوط به ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). در شرایط تیمار شاهد و کاربرد ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، گونه *F. mosseae* به‌ترتیب

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

ادامه جدول ۲-

تیمارهای آزمایشی	طول ریشه (سانتی‌متر)	وزن خشک ریشه (گرم در گیاه)	کلونیزاسیون ریشه (درصد)	غلظت سرب اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک)	غلظت سرب ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک)	عملکرد دانه (گرم در گیاه)
سرب (میلی¬گرم در کیلوگرم خاک)						
۰	۳۳/۲۸±۰/۵۹^{a}	۰/۱۴±۰/۰۰۵۱^{a}	۵۶/۳±۷/۸۵^{c}	۰/۳۱±۰/۲^{d}	۰/۳۲±۰/۰۱^{d}	۰/۲۹۱±۰/۰۱۲^{a}
۳۰۰	۳۰/۷۲±۰/۶۶^{b}	۰/۱۲۱±۰/۰۰۴۷^{b}	۶۰/۹±۸/۵^{b}	۳/۸۲±۰/۲۲^{c}	۵/۱۸±۰/۲^{c}	۰/۲۵۴±۰/۰۱۱^{b}
۶۰۰	۲۳/۵۷±۰/۶۱^{c}	۰/۱۰۱±۰/۰۰۳۶^{c}	۶۲/۳±۸/۶۸^{b}	۷/۷۸±۰/۴^{b}	۱۱/۰۵±۰/۳۹^{b}	۰/۱۹۵±۰/۰۰۹^{c}
۹۰۰	۲۱/۱۷±۰/۸۲^{d}	۰/۰۸۹±۰/۰۰۴^{d}	۶۴/۶±۸/۹۶^{a}	۱۰/۳۳±۰/۶^{a}	۲۷/۷۹±۰/۸۲^{a}	۰/۱۲۲±۰/۰۱^{d}
قارچ ریشه						
عدم تلقیح	۲۴/۹۸±۱/۰۸^{c}	۰/۰۹۸±۰/۰۰۴۶^{c}	۰±۰^{c}	۷/۳۱±۰/۸۸^{a}	۱۳±۲/۰۸^{a}	۰/۱۷۴±۰/۰۱۴^{c}
تلقیح با Fm	۲۹/۰۳±۰/۹۲^{a}	۰/۱۲۵±۰/۰۰۴۶^{a}	۹۲/۹۶±۱^{a}	۴/۲۶±۰/۵۱^{c}	۹/۵±۱/۵۱^{c}	۰/۲۴۶±۰/۰۱۳^{a}
تلقیح با Ri	۲۷/۵۵±۰/۹۴^{b}	۰/۱۱۵±۰/۰۰۴۸^{b}	۹۰/۱±۱/۱۳^{b}	۵/۱۳±۰/۶۲۱^{b}	۱۰/۸±۱/۷^{b}	۰/۲۲۶±۰/۰۱۲^{b}
پوترسین (میلی-مولار)						
۰	۲۵/۶۸±۰/۹۸^{c}	۰/۱۰۲±۰/۰۰۴۳^{c}	۵۹/۸±۷/۲۲^{b}	۶/۴۸±۰/۸۳^{a}	۱۲/۹±۱/۹^{a}	۰/۱۸۱±۰/۰۱۳^{c}
۰/۵	۲۸/۹۶±۱/۰۱^{a}	۰/۱۲۵±۰/۰۰۵۲^{a}	۶۲/۹±۷/۵۳^{a}	۴/۷۳±۰/۶۱^{b}	۱۰±۱/۷۳^{c}	۰/۲۴۹±۰/۰۱۵^{a}
۱	۲۶/۹۲±۱/۰۱^{b}	۰/۱۱۱±۰/۰۰۴۶^{b}	۶۰/۵±۷/۲۹^{b}	۵/۴۷±۰/۶۸^{b}	۱۰/۹۸±۱/۷۴^{b}	۰/۲۱۶±۰/۰۱۲^{b}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. مقادیر نشان‌دهنده میانگین ± خطای استاندارد هستند. *Funneliformis mosseae* (Fm) و *Rhizophagus intraradices* (Ri)



شکل ۱- اثر ساده محلول‌پاشی پوترسین بر صفت شاخص سبزینگی (a) و اثر کاربرد قارچ ریشه بر صفت شاخص سبزینگی بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب (b). ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند. *Funneliformis mosseae* (Fm) و *Rhizophagus intraradices* (Ri)

۴/۹، ۵/۳، ۱۳/۶ و ۲۶/۶ درصد و *R. intraradices* به‌ترتیب ۴/۷، ۳/۹، ۸/۸ و ۲۲/۲ درصد شاخص سبزینگی را نسبت به عدم تلقیح افزایش دادند. در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، هر دو گونه به‌ویژه *F. mosseae* تفاوت معنی‌داری با شرایط عدم تلقیح داشتند (شکل b ۱).

کاهش شاخص سبزینگی بالنگوی شهری در اثر سمیت سرب به‌ویژه در سطوح بالای سرب با نتایج مطالعه پاداش و همکاران (۱۳۹۵) درباره تأثیر ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

کیلوگرم بر ریحان مطابقت داشت. کاهش جذب عناصر به‌ویژه آهن و منیزیم توسط گیاه، جانشینی سرب به جای منیزیم در مرکز کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز از جمله دلایل کاهش شاخص سبزینگی در گیاه توسط فلز سرب هستند (Sharma and Dubey, 2005; Karimi *et al*., 2017). کاهش شاخص سبزینگی در تنش سرب و افزایش آن با کاربرد قارچ ریشه به‌ویژه در تنش سرب با تحقیق محکمی و همکاران (۱۳۹۶) در گیاه آویشن دنایی مطابقت داشت. افزایش شاخص سبزینگی با کاربرد قارچ ریشه در تنش سرب می‌تواند به‌دلیل بهبود جذب عناصر میکرو مثل آهن و عناصر ماکرو مثل منیزیم توسط گسترش میسلیوم‌های قارچی در خاک و ریشه و نیز بهبود سیستم ریشه باشد (Karimi *et al*., 2017; Miransari, 2017). پوترسین شاخص سبزینگی را در گیاهان همیشه‌بهار (بنی‌اسدی و همکاران، ۱۳۹۴) و رازیانه (Parmoon *et al*., 2019) افزایش داد و نتایج این مطالعه مبنی بر افزایش شاخص سبزینگی در اثر محلول‌پاشی پوترسین با نتایج مطالعات فوق مطابقت داشت. افزایش شاخص سبزینگی با کاربرد پوترسین می‌تواند به افزایش جذب آهن و منیزیم نسبت داده شود (Rezvanypour *et al*., 2015).

نتایج تجزیه واریانس محتوی نسبی آب نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه (سطح احتمال ۰/۰۵) و اثر دوگانه قارچ و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۵) معنی‌دار شدند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر این صفت معنی‌دار نبودند (جدول ۱). معنی‌دار شدن اثر دوگانه سرب و قارچ بیانگر واکنش متفاوت دو گونه نسبت به سطوح مختلف سرب بود. سطوح ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم محتوی نسبی آب را نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند و بیشترین کاهش در غلظت ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). بیشترین افزایش با ۱۴/۲، ۱۲/۴ و ۳۳ درصد به‌ترتیب در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مربوط به کاربرد *F. mosseae* بود. اگرچه در سطوح سرب صفر، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کاربرد *F. mosseae* تأثیر مثبت بیشتری بر محتوی نسبی آب داشت، با این حال در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کاربرد *R. intraradices* تا ۱۰/۷ درصد مقدار آن را افزایش داد (جدول ۳). معنی‌دار شدن اثر دوگانه بین قارچ و پوترسین بیانگر وجود واکنش متفاوت دو گونه نسبت به کاربرد پوترسین بود. در شرایط عدم تلقیح و تلقیح با *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار محتوی نسبی آب را نسبت به عدم کاربرد پوترسین افزایش دادند. در شرایط کاربرد *R. intraradices*، ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین محتوی نسبی آب را تا ۴/۵ درصد افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار باعث کاهش ۳/۵ درصدی شد که تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (جدول ۵).

کاهش محتوی نسبی آب گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب با مطالعات در دیگر گیاهان مانند گشنیز (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶) و آکالیفای هندی (Venkatachalam *et al*., 2017) مطابقت داشت. کاهش محتوی نسبی آب به بسته‌شدن روزنه در اثر تنش سرب نسبت داده شده است که منجر به کاهش فشار آماس و کوچک‌شدن سلول‌ها و کاهش فضای بین سلولی در گیاهان تحت تنش فلز سنگین می‌شود (Venkatachalam *et al*., 2017). افزایش محتوی نسبی آب توسط قارچ ریشه در تنش کادمیوم در تحقیق رسولی صدقیانی و همکاران (۱۳۹۵) مشاهده شد که با نتایج مطالعه ما مبنی بر محتوی نسبی آب بیشتر در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ به‌ویژه در تنش سرب مطابقت داشت. همزیستی قارچ ریشه منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه می‌شود و این جذب آب ناشی از سیستم ریشه بزرگتر به‌دلیل هیف‌های قارچ ریشه است که می‌تواند مساحت بیشتری از اطراف ریشه را شناسایی کند، بنابراین حجم محلول خاک قابل دسترس افزایش می‌یابد و نهایتاً باعث بهبود وضعیت آب گیاه می‌شود (Boutasknit *et al*., 2020). افزایش محتوی نسبی آب در شرایط تلقیح با قارچ می‌تواند به افزایش جذب پتاسیم نسبت داده شود زیرا پتاسیم نقش مهمی در تنظیم فشار تورژسانس و گسترش سلول‌های برگ در شرایط تنش‌های محیطی دارد (رسولی صدقیانی و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

جدول ۳- اثر متقابل کاربرد قارچ ریشه بر صفات محتوی نسبی آب، ارتفاع، طول ریشه و درصد کلونیزاسیون ریشه گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب

سطوح سرب (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	سطوح قارچ ریشه	محتوی نسبی آب (درصد)	ارتفاع (سانتی‌متر)	طول ریشه (سانتی‌متر)	کلونیزاسیون (درصد)
۰	عدم تلقیح	۷۵/۶±۱/۷۴^{b}	۳۶/۲±۰/۹۵^{bc}	۳۱/۹۴±۱/۰۹^{b}	۰±۰^{f}
	تلقیح با Fm	۸۶/۳±۲/۷۱^{a}	۳۹/۸±۱/۳۲^{a}	۳۴/۵۱±۰/۹۴^{a}	۸۵/۸±۱/۷^{d}
	تلقیح با Ri	۸۳/۸±۲/۳۴^{a}	۳۷/۷±۱/۱۸^{b}	۳۳/۴±۰/۹۸^{a}	۸۳/۲±۱/۵^{e}
۳۰۰	عدم تلقیح	۶۸/۲±۱/۴۶^{de}	۳۲/۹±۰/۹۶^{ef}	۲۹/۶±۰/۷۵^{c}	۰±۰^{f}
	تلقیح با Fm	۷۳/۲±۰/۸۷^{bc}	۳۷/۳±۱/۳۶^{bc}	۳۱/۹۱±۱/۴۴^{b}	۹۳/۱±۱/۸^{b}
	تلقیح با Ri	۷۵/۵±۱/۳۲^{b}	۳۵/۶±۱/۱۱^{cd}	۳۰/۶۳±۱/۱۵^{bc}	۸۹/۶±۲/۲^{c}
۶۰۰	عدم تلقیح	۶۲/۱±۲/۳۲^{f}	۳۰/۷±۰/۶۱^{g}	۲۰/۵۴±۰/۷۲^{f}	۰±۰^{f}
	تلقیح با Fm	۶۹/۸±۱/۵۵^{cd}	۳۴/۱±۰/۸^{de}	۲۵/۸۸±۰/۸۳^{d}	۹۶/۴±۱^{a}
	تلقیح با Ri	۶۸/۴±۱/۵۹^{de}	۳۲/۹±۰/۷۳^{ef}	۲۴/۳±۰/۷۵^{e}	۹۰/۶±۱/۶^{bc}
۹۰۰	عدم تلقیح	۴۸/۲±۱/۱۶^{g}	۲۵/۶±۰/۹۱^{h}	۱۷/۸۳±۰/۸۳^{g}	۰±۰^{f}
	تلقیح با Fm	۶۴/۱±۲/۲۶^{ef}	۳۲/۷±۰/۹۱^{ef}	۲۳/۸۲±۱/۳۳^{e}	۹۶/۵±۱/۱^{a}
	تلقیح با Ri	۶۰/۸±۲/۹۵^{f}	۳۱/۲±۰/۹۵^{fg}	۲۱/۸۶±۱/۳۵^{f}	۹۷/۲±۰/۹^{a}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. مقادیر نشان‌دهنده میانگین ± خطای استاندارد هستند. (Fm) *Funneliformis mosseae* و (Ri) *Rhizophagus intraradices* .

همکاران، ۱۳۹۵). افزایش محتوی نسبی آب با کاربرد پوترسین در گندم و همیشه‌بهار گزارش شده است (بنی‌اسدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Gupta *et al*., 2012). کاربرد پلی‌آمین‌ها به‌ویژه پوترسین محتوی نسبی آب را در برگ گندم در تنش سرب افزایش داد (Rady *et al*., 2016). پلی‌آمین‌ها به‌دلیل ماهیت آب‌دوست‌بودن که به حفظ آماس و محتوی آب سلول‌ها کمک می‌کند، اغلب تحت تنش‌های محیطی مانند خشکی به‌عنوان املاح سازگار عمل می‌کنند (Chen *et al*., 2019). پلی‌آمین‌ها توسط افزایش سطوح پرولین و قند محلول که باعث افزایش تنظیم اسمزی می‌شوند، محتوی نسبی آب را بهبود می‌دهند (Rubinowska *et al*., 2012).

نتایج تجزیه واریانس نشت یونی نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین در سطح احتمال ۰/۰۰۱ و اثر دوگانه سرب و پوترسین در سطح احتمال ۰/۰۵ بر این صفت معنی‌دار شدند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه، اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین این صفت را تحت تأثیر قرار ندادند (جدول ۱). کاربرد هر دو گونه قارچ باعث کاهش نشت یونی نسبت به عدم تلقیح شد و بیشترین کاهش (با میانگین ۴۰/۴ درصد) مربوط به تلقیح گیاه با *F. mosseae* بود (شکل a ۲). معنی‌دار شدن اثر دوگانه بین سرب و پوترسین بیانگر واکنش متفاوت کاربرد پوترسین در سطوح مختلف سرب می‌باشد. تنش ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، نشت یونی را نسبت به تیمار شاهد افزایش داد و بیشترین افزایش مربوط به سطح ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به‌ترتیب ۱۶/۲، ۲۵/۹، ۱۵/۴ و ۲۳/۹ درصد نشت یونی را نسبت به عدم کاربرد پوترسین کاهش داد (جدول ۴).

افزایش میزان نشت یونی با افزایش غلظت سرب در دیگر

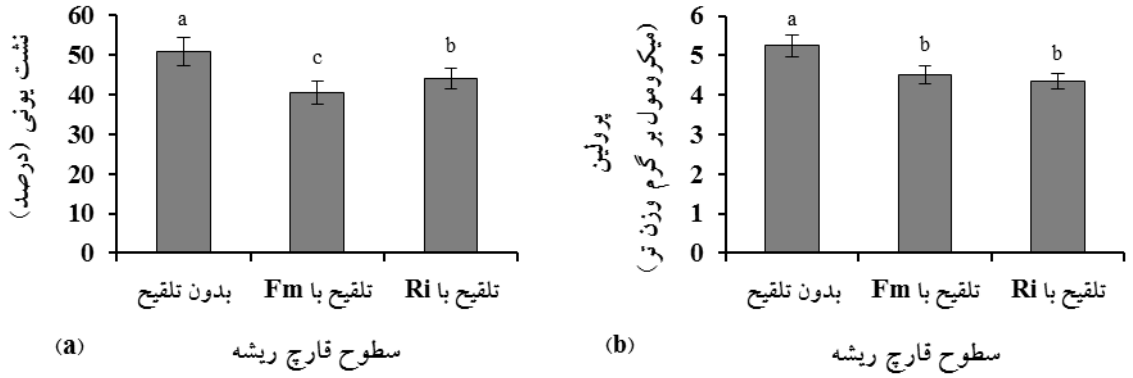
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

جدول ۴- اثر متقابل محلول پاشی پوترسین بر صفات نشت یونی، محتوی پرولین، غلظت سرب اندام هوایی، غلظت سرب ریشه، کلونیزاسیون و عملکرد دانه بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب

سطوح سرب (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	سطوح پوترسین (میلی‌مولار)	نشت یونی (درصد)	پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر)	سرب اندام هوایی (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک)	سرب ریشه (میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک)	کلونیزاسیون (درصد)	عملکرد دانه (گرم در گیاه)
۰	۰	۳۲/۸±۳/۲^{e}	۳/۰۳±۰/۱۶۴^{f}	۰/۳۷±۰/۰۴^{h}	۰/۳۵±۰/۰۲^{h}	۵۳±۱۳/۲۵^{e}	۰/۲۶۴±۰/۰۱۳^{cd}
	۰/۵	۲۷/۵±۲/۸۶^{e}	۳/۷۱±۰/۱۵۸^{ef}	۰/۲۷±۰/۰۳^{h}	۰/۳۰۴±۰/۰۲^{h}	۵۹/۱±۱۴/۷۸^{cd}	۰/۳۲۴±۰/۰۲۱^{a}
	۱	۲۹±۳/۱^{e}	۳/۶۸±۰/۱۷۴^{ef}	۰/۲۹±۰/۰۲^{h}	۰/۳۰۵±۰/۰۲^{h}	۵۷±۱۴/۲۸^{d}	۰/۲۸۴±۰/۰۱۶^{bc}
۳۰۰	۰	۳۸/۳±۱/۶^{d}	۳/۳۳±۰/۲۲۱^{f}	۴/۵۱±۰/۴۵^{f}	۵/۸۲±۰/۳۸^{f}	۵۹±۱۴/۸۲^{cd}	۰/۲۰۵±۰/۰۱۱^{ef}
	۰/۵	۲۸/۴±۲^{e}	۴/۲۹±۰/۲۱۸^{de}	۳/۱۹±۰/۳۴^{g}	۴/۵۶±۰/۳^{g}	۶۳/۷±۱۵/۹۶^{ab}	۰/۳۰۴±۰/۰۱۶^{ab}
	۱	۳۱/۶±۲/۱^{e}	۴/۱۶±۰/۱۸۳^{de}	۳/۷۷±۰/۲۲^{g}	۵/۱۶±۰/۲۴^{fg}	۶۰±۱۵/۰۹^{c}	۰/۲۵۳±۰/۰۱۶^{d}
۶۰۰	۰	۶۰/۴±۴/۲۶^{b}	۴/۵۴±۰/۱۹۳^{d}	۹/۰۶±۰/۸۳^{c}	۱۲/۱۵±۰/۷۷^{c}	۶۲/۷±۱۵/۷۲^{ab}	۰/۱۶۲±۰/۰۱۷^{g}
	۰/۵	۵۱/۱±۴/۷۴^{c}	۵/۴۱±۰/۲۷۲^{c}	۶/۶۸±۰/۵۲^{e}	۹/۷۷±۰/۵۲^{e}	۶۳±۱۵/۷۷^{ab}	۰/۲۲۴±۰/۰۱۶^{e}
	۱	۵۲/۷±۴/۲۹^{c}	۵/۱۸±۰/۲۵۲^{c}	۷/۶۲±۰/۵۱^{d}	۱۱/۲۳±۰/۵۱^{d}	۶۱/۳±۱۵/۴۴^{bc}	۰/۱۹۸±۰/۰۱۵^{f}
۹۰۰	۰	۷۴±۵^{a}	۵/۴۳±۰/۲۲۵^{c}	۱۲±۱/۱۷^{a}	۲۹/۷±۱/۳۴^{a}	۶۴/۳±۱۶/۱۱^{a}	۰/۰۹۴±۰/۰۲^{i}
	۰/۵	۵۶/۳±۴^{bc}	۷/۴۳±۰/۵۶^{a}	۸/۷۹±۰/۹^{c}	۲۶/۶±۱/۴۵^{b}	۶۵/۴±۱۶/۴^{a}	۰/۱۴۳±۰/۰۱۷^{gh}
	۱	۵۸/۸±۵/۲^{b}	۶/۲۲±۰/۴۱^{b}	۱۰/۲±۰/۸^{b}	۲۷/۰۷±۱/۴^{b}	۶۳/۹±۱۶^{ab}	۰/۱۲۹±۰/۰۱۲^{h}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. نتایج به صورت میانگین ± خطای استاندارد نشان داده شده‌اند. مقادیر نشان‌دهنده میانگین±خطای استاندارد هستند.



شکل ۲- اثر ساده سطوح مختلف قارچ ریشه بر صفات نشت یونی (a) و محتوی پرولین (b). ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند. *Funneliformis mosseae* (Fm) و *Rhizophagus intraradices* (Ri)

تحقیقات گزارش شده است (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Garg and Aggarwal, 2012). سرب از طریق جایگزینی با کاتیون‌های ضروری آنزیم‌ها و تغییر فعالیت آنزیم‌های حاوی فلز باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود که نهایتاً

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

موجب پراکسیداسیون چربی، آسیب به غشای سلولی، افزایش نشت یونی و تنش اکسیداتیو می‌شود (Sharma and Dubey, 2005; Kumar *et al*., 2018). کاربرد قارچ ریشه در گیاه نخود سودانی (با نام علمی *Cajanus cajan* در ایران معمولاً برای تهیه لپه کشت می‌شود) میزان نشت یونی را در شرایط بدون تنش و تحت تنش سرب کاهش داد (Garg and Aggarwal, 2012) که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت داشت. قارچ ریشه عناصر و آب مورد نیاز گیاه را تأمین می‌کند و تا حدی از تولید گونه‌های اکسیژن فعال ناشی از تنش و آسیب غشای سلول جلوگیری می‌کند و نهایتاً با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش نشت یونی می‌شود(Garg and Aggarwal, 2012). افزایش میزان نشت یونی در سطوح سرب و کاهش مقدار آن با کاربرد پوترسین تحت تنش سرب نیز در گندم گزارش شده است (Rady *et al*., 2016) که با نتایج این تحقیق مطابقت داشت. کاهش نشت یونی از سلول‌های تحت تنش سرب توسط کاربرد پوترسین به افزایش پتاسیم گیاه نسبت داده شده است زیرا پتاسیم در حفظ یکپارچگی غشا نقش دارد و سلول‌ها را در وضعیت آماس حفظ می‌کند (Rady *et al*., 2016). همچنین کاربرد پوترسین می‌تواند با ماهیت آنتی‌اکسیدانی غشاها و ماکرومولکول‌ها را در برابر صدمات اکسیداتیو محافظت کند و غشاهای زیستی را در شرایط تنش پایدار کند (Gupta *et al*., 2012). کاربرد پوترسین (۲/۵ و ۵ میلی‌مولار) اثرات مضر کادمیوم را کاهش داد، درحالی‌که کاربرد ترکیبی پوترسین و قارچ *G. mosseae* از طریق کاهش تولید گونه‌های اکسیژن فعال در سلول‌های گیاهی، پایداری سورگوم را به‌طور مؤثرتری افزایش داد (Kumar and Pathak, 2018).

نتایج تجزیه واریانس صفت محتوی پرولین حاکی از معنی‌دار بودن اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین در سطح احتمال ۰/۰۰۱ و اثر دوگانه سرب و پوترسین در سطح احتمال ۰/۰۵ بر این صفت بود (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه، اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین تأثیر معنی‌داری بر این صفت نداشتند (جدول ۱). تلقیح با هر دو گونه قارچ ریشه باعث کاهش محتوی پرولین نسبت به عدم تلقیح شد و تفاوت آماری معنی‌داری بین دو گونه وجود نداشت (شکل b ۲). معنی‌دار شدن اثر دوگانه سرب و پوترسین بیانگر واکنش متفاوت کاربرد پوترسین در سطوح مختلف سرب است. با کاربرد سطوح ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، محتوی پرولین افزایش یافت (جدول ۲). محلول‌پاشی ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین در شرایط کاربرد ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، با ۳۶/۸ درصد دارای بیشترین افزایش در مقدار پرولین نسبت به عدم کاربرد پوترسین بود و کمترین مقدار مربوط به سطح عدم کاربرد پوترسین در شرایط بدون سرب بود (جدول ۴).

افزایش محتوی پرولین در بالنگوی شهری در اثر افزایش غلظت سرب در محیط رشد با نتایج دیگر مطالعات در گیاهانی مانند ریحان (پاداش و همکاران، ۱۳۹۵)، اسپند (Mahdavian *et al*., 2016) و گشنیز (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶) مطابقت داشت. تجمع اسیدهای آمینه آزاد از جمله پرولین در پاسخ به تنش فلزات مانند سرب می‌تواند به‌دلیل فعالیت‌های القاشده آنزیم‌های اورنیتین–δ–آمینوترانسفراز و r–گلوتامیل کیناز، افزایش آبسیزیک اسید درونی، تخریب پروتئین‌های خاص و یا سنتز دوباره اسیدهای آمینه باشد (Yang *et al*., 2011; Rady *et al*., 2016). افزایش محتوی پرولین در اثر سرب و کادمیوم و افزایش مقدار آن با کاربرد توأم پوترسین در سطوح سرب و کادمیوم در گندم و ماش گزارش شده است (Rady *et al*., 2016; Nahar *et al*., 2016; Tajti *et al*., 2018) که با نتایج این مطالعه مطابقت داشت. افزایش میزان پرولین با تیمار پوترسین نشان می‌دهد که متابولیسم پلی‌آمین‌ها با سنتز پرولین در ارتباط می‌باشد (Tajti *et al*., 2018). بنابراین، تحریک تجمع پرولین به‌عنوان یک ترکیب اسمولیت و محافظ غشا و آنزیم‌ها، در اثر پلی‌آمین‌های بیرونی می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی اساسی برای بهبود تحمل به تنش در نظر گرفته شود. کاربرد قارچ ریشه در گیاهان همیشه‌بهار و باقلا منجر به کاهش میزان پرولین نسبت به عدم کاربرد قارچ شد (مقدسان و همکاران، ۱۳۹۴؛ Rabie and Almadini, 2005) که با نتایج حاصل از مطالعه ما مطابقت داشت. با توجه به این‌که قارچ

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

ریشه از طریق گسترش میسلیوم‌ها و جذب آب و عناصر به بهبود رشد گیاه میزبان در شرایط طبیعی و تنش‌زا کمک می‌کند، به‌نظر می‌رسد گیاهان تلقیح‌شده با قارچ ریشه مقادیر پرولین کمتری را نسبت به گیاهان تلقیح‌نشده سنتز می‌کنند (شکل b ۲). درحالی‌که گیاهان تلقیح‌نشده برای حفظ بقای خود به پرولین به‌عنوان یک تنظیم‌کننده اسمزی نیاز دارند و در نتیجه مقادیر پرولین بیشتری را نسبت به گیاهان تلقیح‌شده سنتز می‌کنند. کاهش تجمع پرولین در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ ریشه می‌تواند به این دلایل باشد که ۱- قارچ موجب افزایش مقدار پلی‌آمین‌های آزاد در گیاه میزبان می‌شود و این پلی‌آمین‌ها باعث توسعه ریشه و نهایتاً بهبود روابط آبی و عناصر غذایی می‌شوند و ۲- وجود رقابت پرولین با مسیر سنتز کلروفیل و کربوهیدرات باشد که در شرایط تلقیح با قارچ میزان کلروفیل و کربوهیدرات افزایش یافته و میزان پرولین کاهش می‌یابد (Chun *et al*., 2018).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه و اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۵) بر ارتفاع بوته معنی‌دار شدند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر این صفت معنی‌دار نبودند (جدول ۱). با اعمال تنش سرب ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از ارتفاع بالنگوی شهری کاسته شد و بیشترین کاهش ارتفاع مربوط به غلظت ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، گونه *F. mosseae* به‌ترتیب ۹/۹، ۱۳/۴، ۱۱/۱ و ۲۷/۷ درصد و گونه *R. intraradices* به‌ترتیب ۴/۱، ۸/۲، ۷/۲ و ۲۱/۹ درصد ارتفاع را نسبت به عدم تلقیح افزایش دادند (جدول ۳). در شرایط عدم تلقیح و تلقیح با گونه *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش ارتفاع نسبت به عدم کاربرد پوترسین شدند. در شرایط تلقیح با گونه *R. intraradices*، کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین ارتفاع را ۱۳/۵ درصد افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار پوترسین تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (جدول ۵).

کاهش میزان ارتفاع گیاه بالنگوی شهری با افزایش غلظت سرب در خاک با دیگر مطالعات در گیاهانی مانند ریحان (Fattahi *et al*., 2019)، آکالیفای هندی (Venkatachalam *et al*., 2017) و گشنیز (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶) مطابقت داشت. آسیب به سیستم انتقال آب در بافت‌های گیاه و کاهش رشد ریشه در حضور فلز سرب، منجر به کاهش میزان آب و درنتیجه کاهش آماس و توسعه و تقسیم سلول به‌ویژه در ساقه می‌شود (Sharma and Dubey, 2005). این حالت رشد سلول، رشد گیاه و اندازه اندام‌ها به‌ویژه ارتفاع را به‌عنوان اولین اثر محسوس کمبود آب، محدود می‌کند (Jazi *et al*., 2011). کاهش ارتفاع بالنگوی شهری در تنش سرب و افزایش آن با کاربرد قارچ ریشه به‌ویژه تحت تنش سرب در این مطالعه با نتایج دیگر تحقیقات در گیاه گل آهار (El-Saady *et al*., 2017) در یک راستا بود. این اثر مثبت قارچ با توجه به این واقعیت است که قارچ جذب آب و عناصر معدنی مانند فسفر، آهن، روی و منگنز را توسط میسلیوم‌های خارج ریشه بسیار گسترده و افزایش مساحت جذب، به‌ویژه در حضور فلز سرب بهبود می‌بخشد (Miransari, 2017). کاربرد پوترسین در گندم نسبت به عدم کاربرد پوترسین، ارتفاع را به‌ویژه در شرایط تنش بهبود داد (Gupta *et al*., 2012; Rady *et al*., 2016). افزایش ارتفاع با کاربرد پوترسین ممکن است به‌دلیل افزایش جذب آب، افزایش محتوی نسبی آب و بهبود ویژگی‌های ریشه و نیز افزایش توسعه و تقسیم سلولی باشد (Gupta *et al*., 2012). گیاهچه نارنج سه برگ تلقیح‌شده با قارچ *G. mosseae* تحت تیمار پوترسین ۰/۰۵، ۰/۱ و ۱ میلی‌مولار، ارتفاع بیشتری داشت (Wu *et al*., 2012a).

نتایج تجزیه واریانس وزن خشک اندام هوایی حاکی از تأثیر معنی‌دار اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه (سطح احتمال ۰/۰۵)، اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۵) و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

جدول ۵- اثر متقابل محلول‌پاشی پوترسین بر صفات محتوی نسبی آب، ارتفاع و کلونیزاسیون ریشه گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف قارچ ریشه

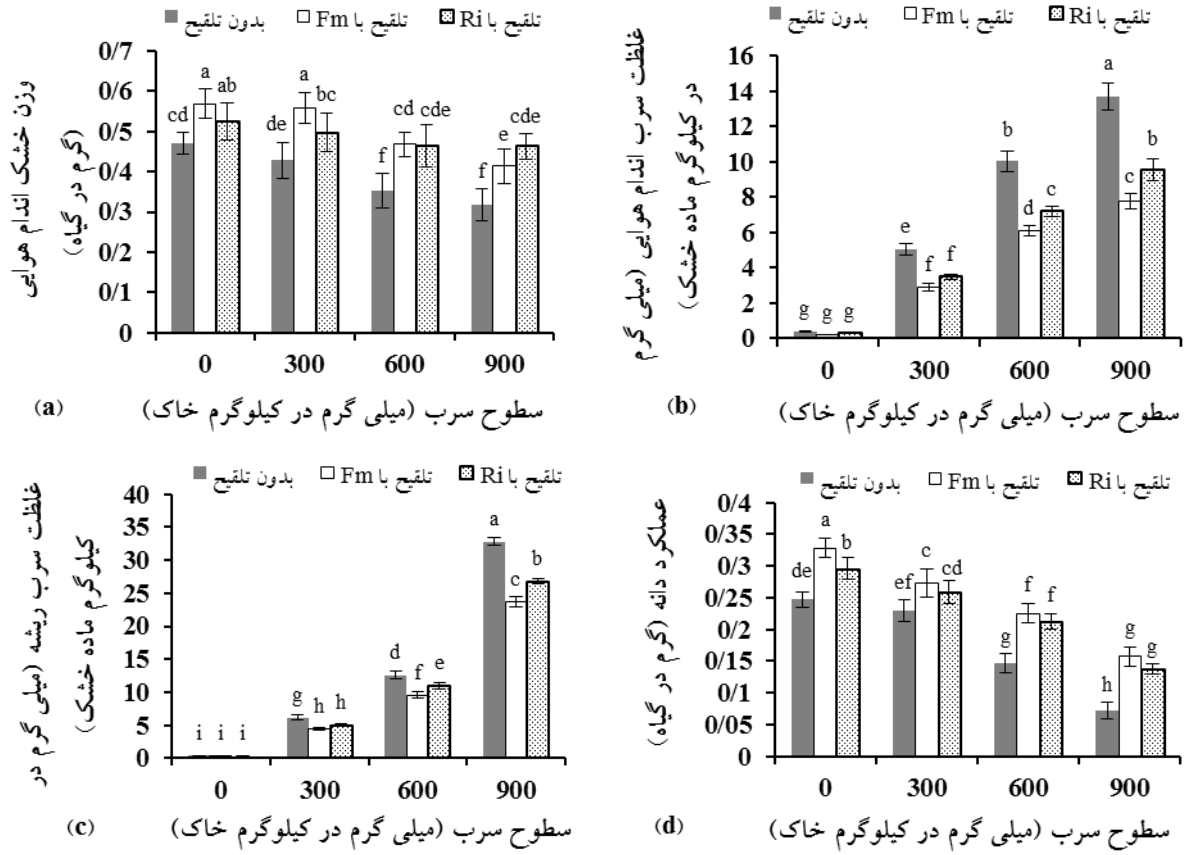
سطوح قارچ ریشه	سطوح پوترسین (میلی‌مولار)	محتوی نسبی آب (درصد)	ارتفاع (سانتی‌متر)	کلونیزاسیون (درصد)
عدم تلقیح	۰	۵۹/۶±۳/۵^{f}	۲۹/۴±۱/۳۵^{d}	۰±۰^{d}
	۰/۵	۶۶/۱±۳/۱^{de}	۳۲/۵±۱/۲۸^{c}	۰±۰^{d}
	۱	۶۴/۹±۳/۱۷^{e}	۳۲/۲±۱/۳۲^{c}	۰±۰^{d}
تلقیح با Fm	۰	۶۸/۲±۲/۶۲^{cde}	۳۳/۶±۱/۰۲^{c}	۹۰±۲/۲^{b}
	۰/۵	۷۶/۹±۲/۵۹^{a}	۳۸/۱±۱/۳۶^{a}	۹۴/۶±۱/۳۴^{a}
	۱	۷۴/۹±۳/۰۳^{ab}	۳۶/۳±۱/۰۲^{b}	۹۴/۳±۱/۳۱^{a}
تلقیح با Ri	۰	۷۱/۹±۳/۰۷^{bc}	۳۲/۷±۰/۹۴^{c}	۸۹/۳±۲/۲۹^{bc}
	۰/۵	۷۵/۱±۳/۰۸^{ab}	۳۷/۱±۱/۰۶^{ab}	۹۳/۸±۱/۴۱^{a}
	۱	۶۹/۴±۳/۱^{cd}	۳۳/۳±۰/۹۴^{c}	۸۷/۳±۱/۷۳^{c}

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. مقادیر نشان‌دهنده میانگین ± خطای استاندارد هستند. (Fm) *Funneliformis mosseae* و (Ri) *Rhizophagus intraradices*

۰/۰۵) بود (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین بر وزن خشک اندام هوایی تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۱). کاربرد ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، وزن خشک اندام هوایی را نسبت به تیمار شاهد کاهش داد و بیشترین کاهش مربوط به غلظت ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). در شرایط عدم کاربرد سرب و سطوح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، کاربرد گونه *F. mosseae* وزن خشک اندام هوایی را افزایش داد و در سطح ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، این افزایش مربوط به کاربرد *R. intraradices* بود که تفاوت معنی‌داری با *F. mosseae* داشت (شکل a ۳). در شرایط عدم تلقیح و تلقیح با گونه *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین این صفت را نسبت به عدم کاربرد آن افزایش دادند و تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند ولی در شرایط تلقیح با گونه *R. intraradices*، ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین وزن خشک اندام هوایی را افزایش داد و ۱ میلی‌مولار پوترسین باعث کاهش جزئی این صفت شد که تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (شکل a ۴). اثر سه‌گانه بین سرب و پوترسین و قارچ ریشه در این صفت نشان داد که در شرایط عدم تلقیح، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار وزن خشک اندام هوایی را نسبت به عدم کاربرد پوترسین در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش دادند و ۱ میلی‌مولار پوترسین فقط در شرایط عدم کاربرد سرب و سطح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تأثیر بهتری داشت. در شرایط تلقیح با گونه *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار وزن خشک اندام هوایی را نسبت به عدم کاربرد پوترسین در همه سطوح سرب افزایش دادند. در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین وزن خشک اندام هوایی را در مقایسه با عدم کاربرد پوترسین در همه سطوح سرب افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار پوترسین وزن خشک اندام هوایی را فقط در سطوح ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و عدم کاربرد سرب به مقدار جزئی افزایش داد و در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مقدار آن را کاهش داد (شکل a ۵). وزن خشک اندام هوایی در گیاهان تلقیح‌شده با گونه *F. mosseae* و کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین در شرایط عدم کاربرد سرب (میانگین ۰/۶ گرم در گیاه) دارای بیشترین مقدار و در گیاهان تلقیح‌نشده و بدون کاربرد پوترسین در سطح ۹۰۰

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]



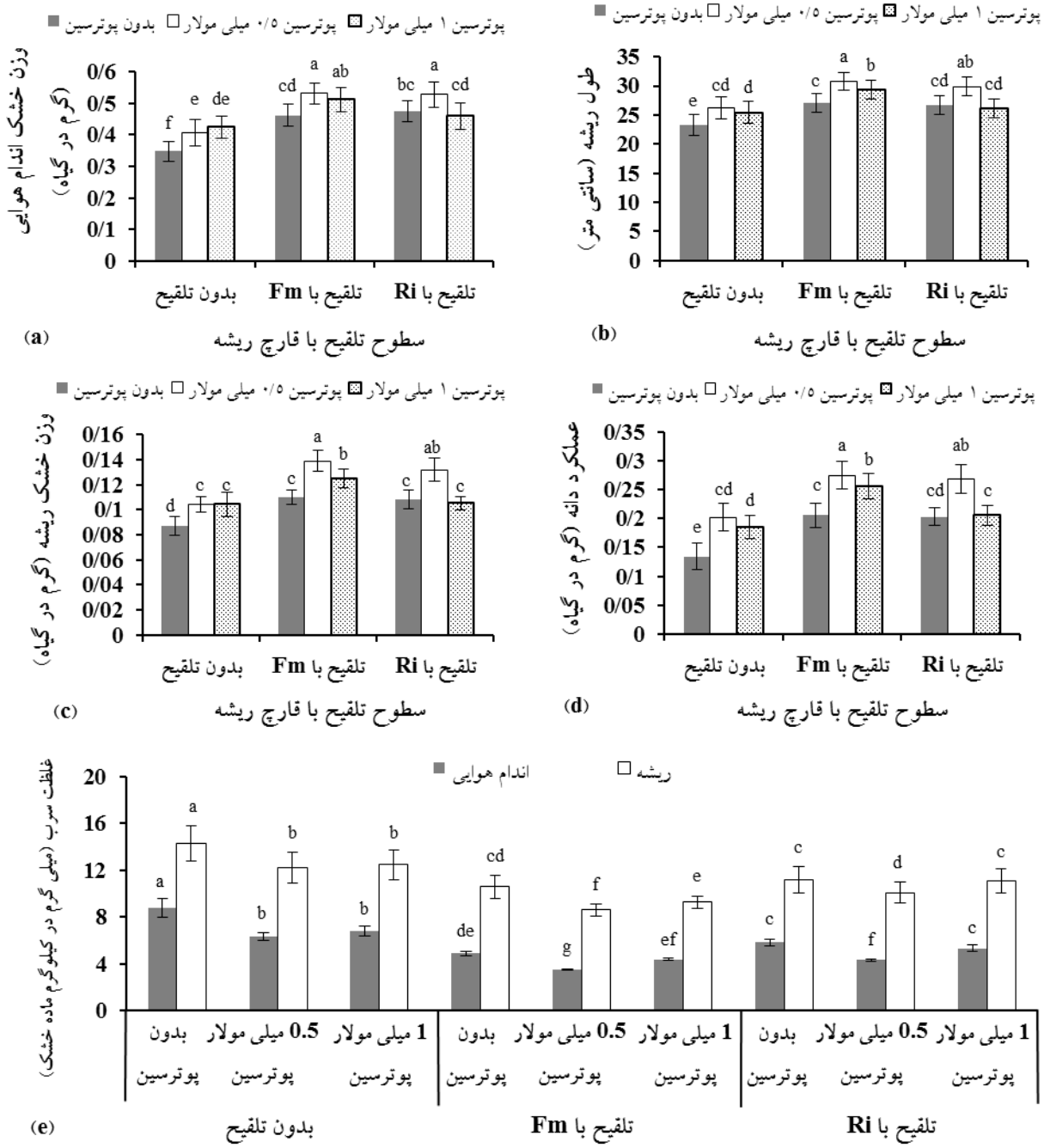
شکل ۳- اثر کاربرد قارچ ریشه بر وزن خشک اندام هوایی (a)، غلظت سرب اندام هوایی (b)، غلظت سرب ریشه (c) و عملکرد دانه (d) گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب. ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند. (Fm) *Funneliformis mosseae* و (Ri) *Rhizophagus intraradices*

میلی‌گرم در کیلوگرم (میانگین ۰/۲۸۴ گرم در گیاه) دارای کمترین مقدار بود (شکل a ۵).

کاهش وزن خشک اندام هوایی با افزایش غلظت سرب خاک در گیاهان زیادی مانند ریحان، آکالیفای هندی، اسپند و گشنیز گزارش شده است (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Mahdavian *et al*., 2016; Venkatachalam *et al*., 2017; Fattahi *et al*., 2019). نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات فوق مطابقت داشت. کاهش رشد گیاه ناشی از افزایش سرب، به کاهش فتوسنتز در پی تخریب فراساختار کلروپلاست، مهار سنتز کلروفیل، انسداد انتقال الکترون، مهار آنزیم‌های چرخه کالوین، اختلال در وضعیت آب، بسته‌شدن روزنه و کاهش ورود CO_2 به‌منظور کاهش تعرق، آسیب ژنتیکی ناشی از افزایش ROSها، کاهش سطح برگ و کاهش جذب عناصر مانند نیتروژن، فسفر، منیزیوم و آهن نسبت داده شده است (Kumar *et al*., 2018; Zhang *et al*., 2018). افزایش وزن خشک اندام هوایی با کاربرد قارچ ریشه به‌ویژه تحت تنش سرب در این مطالعه با تحقیق در گیاهانی مانند کاسنی (Rozpądek *et al*., 2014) و شاهدانه (Zalaghi *et al*., 2020) مطابقت داشت.

افزایش وزن خشک اندام هوایی توسط قارچ در تنش سرب می‌تواند با جذب بالای فسفر، آهن و منگنز در گیاه و پتانسیل کلونیزاسیون مطلوب ریشه و به‌دنبال آن رشد میسلیوم‌های خارجی و گسترش سیستم ریشه گیاه توجیه شود (Miransari, 2017). قارچ ریشه می‌تواند با افزایش محتوی کلروفیل و افزایش قابلیت تثبیت CO_2، کاهش آسیب ناشی از سرب در ساختار تیلاکوئید باعث بهبود فتوسنتز شود که نهایتاً می‌تواند وزن خشک گیاه را بهبود بخشد (Zhang *et al*.,

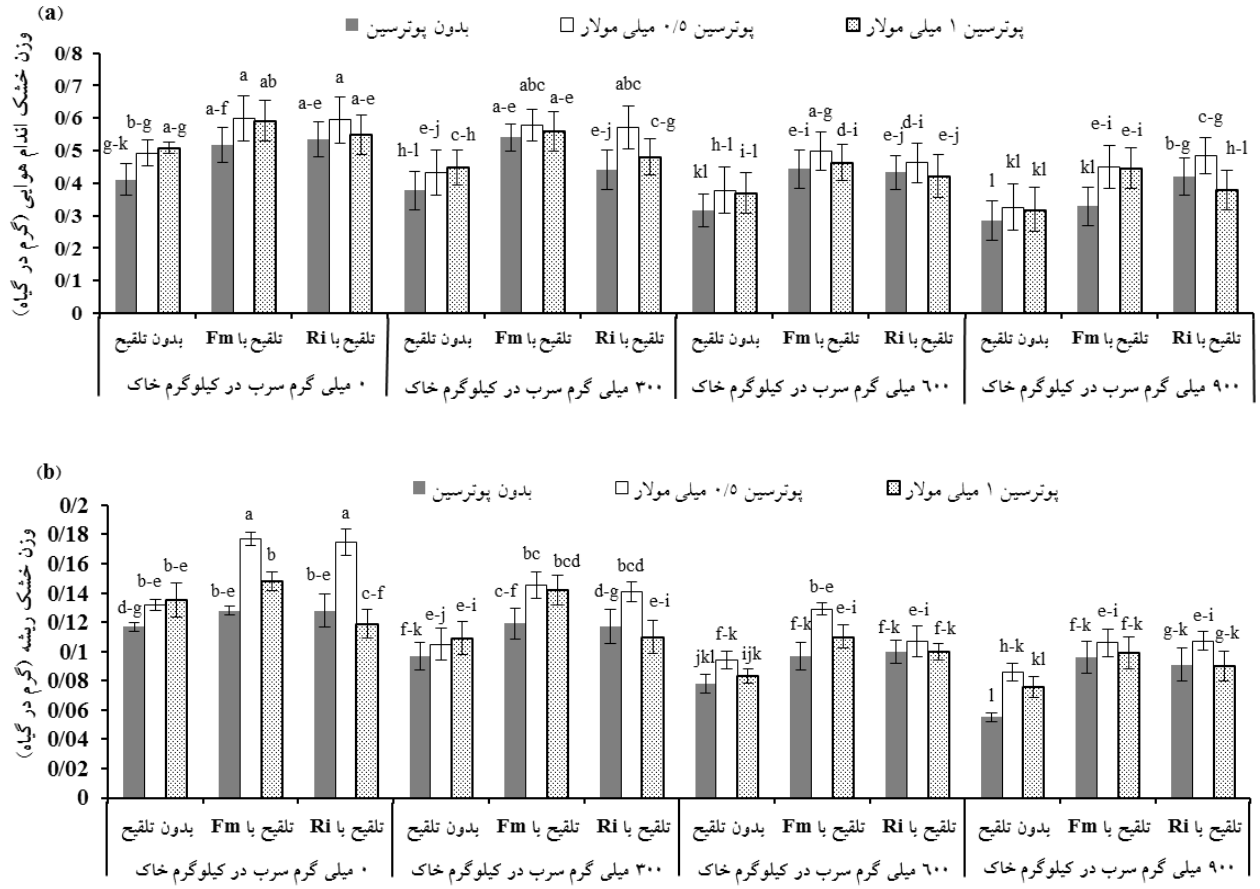
[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]



شکل ۴- اثر محلول‌پاشی پوترسین بر صفات وزن خشک اندام هوایی (a)، طول ریشه (b)، وزن خشک ریشه (c)، عملکرد دانه (d) و غلظت سرب اندام هوایی و ریشه (e) گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف قارچ ریشه. ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند. (Fm) *Funneliformis mosseae* و (Ri) *Rhizophagus intraradices*.

2018). پوترسین ۱ میلی‌مولار در تنش سرب، وزن خشک اندام هوایی گندم را نسبت به عدم کاربرد آن افزایش داد (Rady *et al.*, 2016). کاربرد برگی و خیساندن بذر با پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین رشد گندم را در تنش کادمیوم و سرب بهبود داد (Taie *et al.*, 2019). پوترسین ۰/۲ میلی‌مولار در ماش و ۰/۵ میلی‌مولار در گندم تحت تنش کادمیوم وزن تر و خشک را افزایش داد (Nahar *et al.*, 2016; Tajti *et al.*, 2018). نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات فوق

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]



شکل ۵- اثر متقابل کاربرد قارچ ریشه و محلول‌پاشی پوترسین بر وزن خشک کل اندام هوایی (a) و وزن خشک ریشه (b) گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب. ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند. (Fm) *Funneliformis mosseae* و (Ri) *Rhizophagus intraradices*

مطابقت داشت. افزایش رشد گیاه با کاربرد پوترسین در تنش فلز سنگین می‌تواند ناشی از این باشد که با کاربرد پوترسین غلظت پلی‌آمین‌های درونی در مریستم انتهایی گیاه زیاد و مقدار اتیلن کم شده و نهایتاً با تأثیر بر تقسیم سلولی، رشد گیاه را نسبت به شاهد افزایش می‌دهد (Nahar *et al*., 2016; Chen *et al*., 2019). پلی‌آمین‌ها با بهبود جذب عناصر مانند فسفر، پتاسیم و نیتروژن و کاهش غلظت سرب در گیاه رشد و بهره‌وری را بهبود می‌بخشند (Rady *et al*., 2016; Chen *et al*., 2019). کاربرد پوترسین در گیاهچه نارنگی و نارنج سه برگ تلقیح‌شده با قارچ ریشه، وزن خشک اندام هوایی را افزایش داد. افزایش رشد با کاربرد پوترسین در گیاهان تلقیحی با قارچ می‌تواند به‌دلیل تأثیر مثبت پوترسین بر کلروفیل و سطوح جیبرلین، اکسین و سیتوکینین درونی در گیاهان تلقیحی باشد (Wu *et al*., 2010a, 2012b). نتایج فوق با نتایج این مطالعه مطابق بود که ممکن است به‌دلیل کاربرد پوترسین، به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باشد که در رشد و تشکیل ریشه‌ها نقش دارد و نیز کلونیزاسیون ریشه بالنگوی شهری را توسط گونه‌های *F. mosseae* و *R. intraradices* تحریک می‌کند، بنابراین به گیاه میزبان کمک می‌کند تا آب و عناصر را از خاک جذب کند (Wu *et al*., 2010a, 2010b).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱) بر صفات طول و وزن خشک ریشه معنی‌دار شدند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه بر طول ریشه (سطح احتمال ۰/۰۱) معنی‌دار بود

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

ولی بر وزن خشک ریشه معنی‌دار نبود (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین بر این صفات معنی‌دار نبود (جدول ۱). اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین طول (سطح احتمال ۰/۰۱) و وزن خشک ریشه (سطح احتمال ۰/۰۵) را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۱). اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر وزن خشک ریشه (سطح احتمال ۰/۰۵) معنی‌دار بود ولی بر طول ریشه تأثیر معنی‌داری نداشت (جدول ۱). سطوح ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، طول و وزن خشک ریشه را نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند و بیشترین کاهش مربوط به غلظت ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. در شرایط بدون کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، دو گونه قارچ به طور یکسان طول ریشه را نسبت به شرایط عدم تلقیح افزایش دادند، درحالی‌که در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، دو گونه تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند و کاربرد *F. mosseae* بیشترین طول ریشه (به‌ترتیب ۲۵/۹ و ۲۳/۸ سانتی‌متر) را در این شرایط داشت (جدول ۳). در شرایط عدم تلقیح، هر دو غلظت پوترسین طول و وزن خشک ریشه را نسبت به عدم کاربرد پوترسین افزایش دادند و تفاوت معنی‌داری بین دو غلظت پوترسین وجود نداشت. در شرایط تلقیح با گونه *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش طول و وزن خشک ریشه نسبت به عدم کاربرد پوترسین شدند و بین دو غلظت تفاوت معنی‌داری بود. در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، فقط ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین طول و وزن خشک ریشه را به‌ترتیب ۱۲/۱ و ۲۲/۲ درصد افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار پوترسین به‌طور جزئی (به ترتیب ۲/۴ و ۲/۸ درصد) این صفات را کاهش داد و تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (شکل ۴ b, c). اثر سه‌گانه نشان داد که در شرایط عدم تلقیح، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار وزن خشک ریشه را در مقایسه با عدم کاربرد پوترسین در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم افزایش دادند و ۱ میلی‌مولار پوترسین فقط در شرایط عدم کاربرد سرب و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تأثیر بهتری داشت. در شرایط تلقیح با *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش وزن خشک ریشه نسبت به عدم کاربرد پوترسین در همه سطوح سرب شدند. در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین وزن خشک ریشه را در مقایسه با عدم کاربرد آن در همه سطوح سرب افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار پوترسین آن را در هر چهار سطح سرب به مقدار جزئی کاهش داد (شکل ۵ b).

اولین نشانه سمیت سرب در گیاه ممانعت از رشد ریشه است. کاهش طول و وزن خشک ریشه بالنگوی شهری با افزایش سرب، در گیاهان آکالیفای هندی، اسپند و گشنیز مشاهده شده است (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Mahdavian *et al.*, 2016; Venkatachalam *et al.*, 2017). سرب به فراساختار میکروتوبول‌های داخل سلول‌های مریستمی در حال تقسیم ریشه، آسیب زده و از تقسیم سلولی جلوگیری می‌کند و باعث لیگنینی‌شدن دیواره سلولی می‌شود؛ از این‌رو می‌تواند رشد ریشه را کاهش دهد (Jiang *et al.*, 2010). قسمت بیشتر سرب جذب شده در دیواره سلول‌های ریشه رسوب کرده و موجب ایجاد شکاف‌هایی در دیواره می‌شود و نهایتاً از رشد طولی ریشه ممانعت می‌کند (Foy *et al.*, 1978). کاهش رشد ریشه بالنگوی شهری در تنش سرب و افزایش آنها با کاربرد قارچ به‌ویژه در تنش با دیگر تحقیقات در گیاهانی مانند کاسنی (Rozpądek *et al.*, 2014)، شاهدانه (Zalaghi *et al.*, 2020) و گل آهار (El-Saady *et al.*, 2017) مطابقت داشت. وزن خشک ریشه کاسنی در تنش فلزی کاهش یافت و تلقیح کاسنی با *G. intraradices* در تنش فلزات سنگین (کادمیوم و سرب) وزن خشک ریشه را افزایش داد (Rozpadek *et al.*, 2014). قارچ ریشه با افزایش سطح جذب ریشه‌ها و آزادسازی اسیدها و اسیدی‌کردن ریزوسفر باعث افزایش فراهمی عناصر مانند فسفر برای گیاه می‌شود که این حالت همزمان با افزایش جذب آب موجب افزایش فتوسنتز و اسیمیلات‌ها شده و اختصاص کربن به ریشه را افزایش داده و نهایتاً موجب بهبود رشد ریشه می‌شود (Miransari, 2017; Zhang *et al.*, 2018). پوترسین ۱ میلی‌مولار در تنش سرب، رشد ریشه را در خردل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

هندی نسبت به عدم کاربرد آن افزایش داد (Lakra *et al.*, 2016). کاربرد پوترسین در تنش کادمیوم طول ریشه ماش و گندم را افزایش داد (Nahar *et al.*, 2016; Tajti *et al.*, 2018). پلی‌آمین‌ها از طریق تولید محصولات اکسیداتیو که در غلظت کم سیگنال هستند، رشد ریشه را تنظیم می‌کنند که این بیانگر آن است که پراکسید هیدروژن در تشکیل ریشه موئین نقش دارد و بازدارنده‌های پلی‌آمین‌ها مثل β- هیدروکسی اتیل هیدرازین از طریق کاهش پلی‌آمین‌ها و کاهش پراکسید هیدروژن موجب کاهش رشد ریشه سویا می‌شوند (Su *et al.*, 2006). کاربرد پوترسین در شرایط تلقیح با قارچ، وزن ریشه را در گیاهچه نارنگی و نارنج سه‌برگ افزایش داد (Wu *et al.*, 2010a, 2010b) که با نتایج این تحقیق مبنی بر افزایش وزن خشک ریشه با کاربرد ترکیبی ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین و هر دو گونه قارچ مطابقت داشت.

نتایج تجزیه واریانس غلظت سرب اندام هوایی و ریشه بیانگر تأثیر معنی‌دار اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه (سطح احتمال ۰/۰۰۱) و اثر دوگانه سرب و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱) بود (جدول ۱). اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین بر غلظت سرب اندام هوایی (سطح احتمال ۰/۰۰۱) و ریشه (سطح احتمال ۰/۰۱) معنی‌دار شد (جدول ۱). اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر این صفات معنی‌دار نبود (جدول ۱). سطوح ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک باعث افزایش غلظت سرب اندام هوایی و ریشه در گیاه بالنگوی شهری نسبت به تیمار شاهد شدند و بیشترین افزایش مربوط به غلظت ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. اگرچه هر دو گونه قارچ در هر چهار سطح سرب باعث کاهش غلظت سرب اندام هوایی و ریشه نسبت به شرایط عدم تلقیح شدند، با این حال گونه *F. mosseae* تأثیر بهتری داشت و باعث بیشترین درصد کاهش در سطح ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم شد (شکل ۳ b, c). هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار در هر چهار سطح سرب، غلظت سرب اندام هوایی و ریشه را نسبت به عدم کاربرد پوترسین کاهش دادند و در شرایط عدم کاربرد سرب، هر دو غلظت تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشتند (جدول ۴). در شرایط عدم تلقیح و تلقیح با *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باعث کاهش غلظت سرب اندام هوایی و ریشه نسبت به عدم کاربرد پوترسین شدند. در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین کاهش معنی‌داری (۲۵/۶ و ۹/۶ درصد) به‌ترتیب در غلظت سرب اندام هوایی و ریشه داشت ولی ۱ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (شکل e ۴).

افزایش غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه بالنگوی شهری با افزایش غلظت سرب در خاک با مطالعه در گیاهانی مثل ریحان (Fattahi *et al.*, 2019)، خارپنبه (Karimi *et al.*, 2017) و اسپند (Mahdavian *et al.*, 2016) مطابقت داشت. عمدتاً یون‌های سرب از طریق مسیر آپوپلاستی یا کانال‌های یونی کلسیم به ریشه وارد می‌شوند. انتقال یون‌های سرب از طریق مسیر آپوپلاستی به آسانی با حل‌شدن سرب در آب صورت می‌گیرد و نوار کاسپاری موجود در اندودرم ریشه از انتقال آن به استوانه مرکزی ممانعت می‌کند (Sharma and Dubey, 2005). کاهش غلظت سرب در اندام هوایی و ریشه بالنگوی شهری با کاربرد قارچ ریشه با مطالعه در گیاهانی مانند ریحان (Prasad *et al.*, 2011) و گل آهار (El-Saady *et al.*, 2017) مطابقت داشت. این حالت ممکن است به‌دلیل اثر رقت از طریق بهبود تغذیه فسفر و وزن خشک گیاه با کاربرد قارچ ریشه باشد (Zhang *et al.*, 2018). کاربرد پوترسین باعث مهار تجمع سرب در اندام هوایی و ریشه و کاهش انتقال سرب به اندام هوایی بالنگوی شهری در مقایسه با عدم کاربرد آن در تمام سطوح سرب شد که مطابق با نتایج سایر محققان بود (Nahar *et al.*, 2016; Rady *et al.*, 2016; Taie *et al.*, 2019). کاربرد پوترسین ۱ میلی‌مولار تجمع سرب را در اندام هوایی گندم به‌ویژه تحت تنش فلز سنگین کاهش داد. کاربرد پوترسین ۰/۲ میلی‌مولار در ماش موجب کاهش غلظت کادمیوم در ریشه و اندام هوایی شد (Nahar *et al.*, 2016). غلظت کم سرب و کادمیوم در اندام هوایی گیاهان تیمارشده با پوترسین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]
[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

می‌تواند به‌دلیل کاهش جابجایی سرب و یا کادمیوم از ریشه به اندام هوایی و نیز رقیق‌شدگی به‌دلیل افزایش بیوماس در اثر کاربرد پوترسین، باشد (Mishra and Singh, 2000). افزایش رشد گیاه (ریشه و اندام هوایی)، تحریک کلونیزاسیون ریشه و افزایش جذب آب و عناصر به‌ویژه فسفر با کاربرد پوترسین در گیاهان تلقیح‌شده با قارچ ریشه می‌تواند موجب رقیق‌شدگی و نهایتاً کاهش غلظت سرب در گیاه شود.

نتایج تجزیه واریانس عملکرد دانه نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱)، اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه (سطح احتمال ۰/۰۵)، اثر دوگانه سرب و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۵) و اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین (سطح احتمال ۰/۰۰۱) معنی‌دار شدند ولی اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین معنی‌دار نبود (جدول ۱). در شرایط شاهد و کاربرد ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، گونه *F. mosseae* به‌ترتیب ۳۲/۸، ۱۸/۳، ۵۳/۱ و ۱۱۸/۱ درصد و گونه *R. intraradices* به‌ترتیب ۱۹/۸، ۱۲/۱، ۴۴/۹ و ۹۰/۳ درصد عملکرد را نسبت به شرایط عدم تلقیح افزایش دادند (شکل d ۳). در هر چهار سطح سرب، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باعث افزایش عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد پوترسین شدند، با این حال در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، دو غلظت تفاوت معنی‌داری با یکدیگر داشتند ولی در سطح ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، دو غلظت به‌طور یکسان عملکرد دانه را افزایش داده و تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴). بیشترین عملکرد دانه (میانگین ۰/۳۲۴ گرم در گیاه) با کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین در شرایط عدم کاربرد سرب به‌دست آمد و کمترین مقدار مربوط به عدم کاربرد پوترسین در سطح ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۴). در شرایط عدم تلقیح و تلقیح با گونه *F. mosseae*، دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار عملکرد را نسبت به عدم کاربرد آن افزایش دادند (شکل d ۴). در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین عملکرد دانه را ۳۲/۵ درصد نسبت به عدم کاربرد آن افزایش داد ولی ۱ میلی‌مولار باعث افزایش بسیار جزئی در عملکرد شد و تفاوت معنی‌داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (شکل d ۴). بیشترین مقدار عملکرد دانه (میانگین ۰/۲۷۵ گرم در گیاه) با کاربرد ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین در گیاهان تلقیح‌شده با *F. mosseae* به‌دست آمد و کمترین مقدار مربوط به عدم کاربرد پوترسین در گیاهان تلقیح نشده بود (شکل d ۴).

در بسیاری از مطالعات با افزایش سرب در محیط رشد گیاه، کاهش عملکرد دانه گزارش شده است (Ahmad *et al*., 2011; Ashraf and Tang, 2017). نتایج مطالعات فوق با مطالعه حاضر مبنی بر کاهش عملکرد بالنگوی شهری در تنش سرب مطابقت داشت. از آنجا که سرب موجب تغییر در ساختار کلروپلاست، کاهش کلروفیل، اختلال در فتوسنتز و کاهش مواد فتوسنتزی، افزایش پراکسیداسیون چربی و نشت یونی، کاهش عناصر، کوتاهی دوره پرشدن دانه و نهایتاً کاهش وزن خشک گیاه می‌شود، درنتیجه کاهش عملکرد دانه را به دنبال دارد (Sharma and Dubey, 2005; Ashraf and Tang, 2017; Kumar *et al*., 2018). افزایش عملکرد دانه با کاربرد قارچ ریشه در بسیاری گیاهان مانند برنج و ذرت گزارش شده است (Li *et al*., 2011; Ghorchiani *et al*., 2018). گیاهان برنج تلقیحی با قارچ ریشه در خاک آلوده به آرسنیک عملکرد بیشتری را نسبت به گیاهان تلقیح نشده داشتند (Li *et al*., 2011). مطالعات فوق با نتایج این تحقیق مبنی بر افزایش عملکرد بالنگوی شهری با کاربرد قارچ به‌ویژه در تنش سرب مطابقت داشت. افزایش عملکرد دانه با کاربرد قارچ به افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز، گسترش سیستم ریشه گیاهان تلقیح شده، بهبود جذب آب و عناصر مانند فسفر و اثر مثبت فسفر بر روی گلدهی گیاه به‌ویژه در تنش فلز سنگین نسبت داده شد (Li *et al*., 2011; Miransari, 2017). کاربرد برگی پلی‌آمین‌ها عملکرد گندم را در تنش کادمیوم و سرب با افزایش مکانیسم‌های تحمل بهبود داد (Taie *et al*., 2019). پلی‌آمین‌ها در فرآیندهای مختلف زیستی مانند تقسیم سلول، رشد، آغازش گل، نمو گل و میوه نقش مهمی دارند (Chen *et al*., 2019) و با افزایش مقدار هورمون‌های درونی (به‌ویژه سیتوکینین) و از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

طریق شکست غالبیت انتهایی باعث افزایش تعداد گل می‌شود؛ بنابراین با افزایش گلدهی موجب افزایش اجزای عملکرد و عملکرد دانه می‌شوند. پوترسین با خاصیت آنتی‌اکسیدانی و مهار پراکسیداسیون چربی موجب بهبود فتوسنتز و افزایش بیوماس گیاه شده و از طریق افزایش طول عمر برگ‌ها موجب افزایش دوره پرشدن دانه و نهایتاً افزایش عملکرد می‌شود (Taie *et al*., 2019). می‌توان چنین اذعان کرد که تحریک کلونیزاسیون، افزایش رشد و تشکیل ریشه، بهبود جذب آب و عناصر و افزایش رشد گیاه با کاربرد پوترسین در گیاهان تلقیح شده با قارچ (Wu *et al*., 2010a, 2010b) موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود.

نتیجه‌گیری

سطوح سرب به‌ویژه ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، نشت یونی، غلظت سرب گیاه، کلونیزاسیون و پرولین را افزایش داد و شاخص سبزینگی، محتوی نسبی آب، ارتفاع، وزن خشک گیاه، طول ریشه و عملکرد دانه بالنگوی شهری را کاهش داد. کاربرد هر دو گونه قارچ به‌ویژه *F. mosseae* اثرات مفیدی در این گیاه داشت و در تنش سرب از طریق افزایش شاخص سبزینگی، محتوی نسبی آب، ارتفاع، طول و وزن خشک ریشه و کاهش غلظت سرب گیاه، موجب افزایش رشد و عملکرد دانه بالنگوی شهری شد. پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار توانست اثر بهبوددهنده بر صفات فوق داشته باشد و در تنش سرب با کاهش نشت یونی و غلظت سرب گیاه و افزایش وزن خشک، پرولین و کلونیزاسیون منجر به افزایش رشد و عملکرد این گیاه شود. کاربرد ترکیبی ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین با هر دو گونه قارچ از طریق افزایش ارتفاع، محتوی نسبی آب، وزن خشک گیاه و طول ریشه، عملکرد بالنگوی شهری را افزایش داد، درحالی‌که ترکیب ۱ میلی‌مولار پوترسین فقط با *F. mosseae* اثر هم‌افزایی داشت. در شرایط تلقیح با *F. mosseae*، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار کلونیزاسیون را افزایش دادند ولی در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین کلونیزاسیون را افزایش داد و ۱ میلی‌مولار باعث کاهش آن شد. به‌طورکلی، تعامل ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین با *F. mosseae* اثرات بهبوددهنده در رشد این گیاه به‌ویژه در تنش سرب داشت. کمتربودن اثر پوترسین ۱ میلی‌مولار نسبت به ۰/۵ میلی‌مولار می‌تواند این گونه توجیه شود که غلظت بالای پلی‌آمین‌ها موجب تولید پراکسید هیدروژن می‌شود که این افزایش تولید پراکسید هیدروژن می‌تواند اثرات کاهشی در گیاه ایجاد کند. از طرفی در غلظت بالای پلی‌آمین‌های درونی گیاه و قارچ، این اثر می‌تواند افزایش یابد که در این زمینه پیشنهاد می‌شود غلظت پلی‌آمین‌های درونی این گیاه و قارچ‌ها در تحقیقات آینده مورد مطالعه قرار بگیرد. با توجه به این‌که خاک‌های آلوده در سراسر دنیا وجود دارند و خاک‌ها بر اثر اضافه‌شدن مواد حاوی فلزات به‌طور غیرمستقیم آلوده می‌شوند، سازمان بهداشت جهانی غلظت سرب را در گیاهان دارویی تا غلظت ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مجاز دانسته است و غلظت سرب در اندام هوایی بالنگوی شهری کمتر از ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. بنابراین با توجه به بحران افزایش غلظت فلزات سنگین به‌ویژه سرب در خاک‌های کشاورزی، کاربرد ترکیبی پوترسین با *F. mosseae* می‌تواند برای افزایش رشد و عملکرد بالنگوی شهری و استفاده از این گیاه در مناطق آلوده به سرب جهت احیای پوشش گیاهی از بین رفته، پیشنهاد گردد.

منابع

بنی‌اسدی، ف.، صفاری، و. ر. و مقصودی مود، ع. ا. (۱۳۹۴) اثر پوترسین بر برخی خصوصیات فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی گیاه همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.) تحت تنش شوری. تنش‌های محیطی در علوم زراعی ۸: ۸۲-۷۳.

پاداش، ع.، قنبری، ا. و اصغری‌پور، م. ر. (۱۳۹۵) اثر متقابل سرب و اسید سالیسیلیک بر برخی پارامترهای رشد کمی و کیفی و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی ریحان. علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای ۷: ۱۹۱-۱۸۱.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

رسولی صدقیانی، م. ح.، خداوردیلو، ح.، برین، م. و کاظم علیلو، س. (۱۳۹۵) تأثیر باکتری‌های PGPR و قارچ‌های میکوریزا-آربوسکولار بر رشد و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک خارزن‌بابا در خاک آلوده به کادمیم. آب و خاک ۳۰: ۵۵۴-۵۴۲.

فاطمی، ح.، اسماعیل‌پور، ب.، سلطانی طولارود، ع. ا. و نعمت اللهزاده ع. (۱۳۹۶) تأثیر محلولپاشی نانو ذرات سیلیسیم بر برخی شاخص‌های مورفولوژیک و بیوشیمیایی گیاه گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) در شرایط تنش فلز سنگین سرب. تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران ۳۳: ۸۷۰-۸۵۳.

محکمی، ز.، بیدرنامنی، ف.، قربانی قوژدی، ح. و غفاری مقدم، ز. (۱۳۹۶) تأثیر قارچ‌های میکوریزا بر رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه دارویی آویشن دنایی در خاک آلوده به فلزات سنگین. تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی ۴: ۱۰۸-۹۱.

مقدسان، ش.، صفی‌پور افشار، ا. و سعید نعمت‌پور، ف. (۱۳۹۴) نقش میکوریزا در تحمل به خشکی همیشه‌بهار (*Calendula officinalis* L.). اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی ۴: ۵۳۲-۵۲۱.

Ahmad, K., Ejaz, A., Azam, M., Khan, Z. I., Ashraf, M., Al-qurainy, F., Fardous, A., Gondal, S., Bayat, A. R. and Valeem, E. E. (2011) Lead, cadmium and chromium contents of canola irrigated with sewage water. Pakistan Journal of Botany 43: 1403-1410.

Alvarado-Lopez, C. J., Dasgupta-Schubert, N., Ambriz, J. E., Arteaga-Velazquez, J. C. and Villegas, J. A. (2019) Lead uptake by the symbiotic *Daucus carota* L.–*Glomus intraradices* system and its effect on the morphology of extra- and intraradical fungal microstructures. Environmental Science and Pollution Research 26: 381-391.

Amanzadeh, Y., Dehaghi, N. K., Gohari, A. R., Monsef-Esfehan, H. R. and Sadat Ebrahimi, S. E. (2011) Antioxidant activity of essential oil of *Lallemantia iberica* in flowering stage and post-flowering stage. Research Journal of Biological Sciences 6: 114-117.

Ansari, A., Razmjoo, J. and Karimmojeni, H. (2016) Mycorrhizal colonization and seed treatment with salicylic acid to improve physiological traits and tolerance of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) plants grown under drought stress. Acta Physiologiae Plantarum 38: 34.

Ashraf, U. and Tang, X. (2017) Yield and quality responses, plant metabolism and metal distribution pattern in aromatic rice under lead (Pb) toxicity. Chemosphere 176: 141-155.

ATSDR. (2017) Priority list of hazardous substances. Agency for toxic substances and diseases. Available online at: https://www.atsdr.cdc.gov/spl/resources/index.html. Accessed 17 January 2020.

Bates, L. S., Waldren, R. P. and Teare, I. D. (1973) Rapid determination of free poline for water stress studies. Plant and Soil 39: 205-207.

Bielach, A., Hrtyan, M. and Tognetti, V. B. (2017) Plants under stress: Involvement of auxin and cytokinin. International Journal of Molecular Sciences 18: 1427.

Boutasknit, A., Baslam, M., Ait-El-Mokhtar, M., Anli, M., Ben-Laouane, R., Douira, A., El Modafar, C., Mitsui, T., Wahbi, S. and Meddich, A. (2020) Arbuscular mycorrhizal fungi mediate drought tolerance and recovery in two contrasting carob (*Ceratonia siliqua* L.) ecotypes by regulating stomatal, water relations, and (in)organic adjustments. Plants 9: 80.

Chen, D., Shao, Q., Yin, L., Younis, A. and Zheng, B. (2019) Polyamine function in plants: Metabolism, regulation on development, and roles in abiotic stress responses. Frontiers in Plant Science 9: 1945.

Chun, S. C., Paramasivan, M. and Chandrasekaran, M. (2018) Proline accumulation influenced by osmotic stress in arbuscular mycorrhizal symbiotic plants. Frontiers in Microbiology 9: 2525.

El Ghachtouli, N., Paynot, M., Martin-Tanguy, J., Morandi, D. and Gianinazzi, S. (1996) Effect of polyamines and polyamine biosynthesis inhibitors on spore germination and hyphal growth of *Glomus mosseae*. Mycological Research 100: 597-600.

El Ghachtouli, N., Paynot, M., Morandi, D., Martin-Tanguy, J. and Gianinazzi, S. (1995) The effect of polyamines on endomycorrhizal infection of wild-type *Pisum sativum*, cv. Frisson (nod^+myc^+) and two mutants (nod^-myc^+ and nod^-myc^-). Mycorrhiza 5: 189-192.

El-Saady, M. B., Ahmed, H. H. A., Ebrahim, H. and Dina, M. S. (2017) Effect of mycorrhizal fungi (AMF), brassinosteroids and sodium silicate on vegetative growth, flower production and Pb concentration of zinnia (*Zinnia elegans*) plant under Pb stress. Journal of Environmental Science and Technology 10: 157-174.

Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K. and Barzegar, M. (2019) Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). Industrial Crops and Products 138: 111584.

Foy, C. D., Chaney, R. L. and White, M. C. (1978) The physiology of metal toxicity. Annual Review of Plant Physiology 29: 511-566.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

Garg, N. and Aggarwal, N. (2012) Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils. Plant Growth Regulation 66: 9-26.

Ghorchiani, M., Etesami, H. and Alikhani, H. A. (2018) Improvement of growth and yield of maize under water stress by co-inoculating an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant growth promoting rhizobacterium together with phosphate fertilizers. Agriculture, Ecosystems and Environment 258: 59-70.

Gupta, S., Agarwal, V. P. and Gupta, N. K. (2012) Efficacy of putrescine and benzyladenine on photosynthesis and productivity in relation to drought tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). Physiology and Molecular Biology of Plants 18: 331-336.

Jazi, S. B., Yazdi, H. L. and Ranjbar, M. (2011) Effect of salicylic acid on some plant growth parameters under lead stress in *Brassica napus* var. Okapi. Iranian Journal of Plant Physiology 1: 177-185.

Jiang, N., Luo, X., Zeng, J., Yang, Z. R., Zheng, L. Y. and Wang, S. T. (2010) Lead toxicity induced growth and antioxidant responses in *Luffa cylindrica* seedlings. International Journal of Agriculture and Biology 12: 205-210.

Karimi, A., Khodaverdiloo, H. and Rasouli Sadaghiani, M. H. (2017) Characterisation of growth and biochemical response of *Onopordum acanthium* L. under lead stress as affected by microbial inoculation. Chemistry and Ecology 33: 963-976.

Koohdar, F., Sheidai, M., Talebi, S. M. and Noormohammadi, Z. (2015) Population genetic structure in medicinal plant *Lallemantia iberica* (Lamiaceae). Biodiversitas 16: 139-144.

Kormanik, P. P. and McGraw, A. C. (1982) Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. In: Methods and Principles of Mycorrhizal Research (eds. Schenk, N. C. and Paul, S. M. N.) Pp. 37-45. American Phytopathological Society, USA.

Kumar, A., Narasimha, M. and Prasad, V. (2018) Plant-lead interactions: Transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms. Ecotoxicology and Environmental Safety 166: 401-418.

Kumar, P. and Pathak, S. (2018) Short-term response of plants grown under heavy metal toxicity. In: Heavy Metals (eds. Saleh, H. E. D. M. and Aglan, R. F.) Pp. 69-89. Intech Open, London.

Lakra, N., Tomar, P. C. and Mishra, S. N. (2016) Growth response modulation by putrescine in Indian mustard *Brassica juncea* L. under multiple stress. Indian Journal of Experimental biology 54: 262-270.

Leung, H. M., Wang, Z. W., Ye, Z. H., Yung, K. L., Peng, X. L. and Cheung, K. C. (2013) Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: A review. Pedosphere 23: 549-563.

Li, H., Ye, Z. H., Chan, W. F., Chen, X. W., Wu, F. Y., Wu, S. C. and Wong, M. H. (2011) Can arbuscular mycorrhizal fungi improve grain yield, As uptake and tolerance of rice grown under aerobic conditions? Environmental Pollution 159: 2537-2545.

Liao, M., Yun-kuo, L., Xiao-min, Z. and Chang-yong, H. (2005) Toxicity of cadmium to soil microbial biomass and its activity: Effect of incubation time on Cd ecological dose in paddy soil. Journal of Zhejiang University Science 6: 324-330.

Liao, J. P., Lin, X. G., Cao, Z. H., Shi, Y. Q. and Wong, M. H. (2003) Interactions between arbuscular mycorrhizae and heavy metals under sand culture experiment. Chemosphere 50: 847-853.

Lutts, S., Kinet, J. M. and Bouharmont, J. (1996) NaCl-induced senescene in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. Annual Botany 78: 389-398.

Mahdavian, K., Ghaderian, S. M. and Schat, H. (2016) Pb accumulation, Pb tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous *Peganum harmala* L. under Pb exposure. Environmental and Experimental Botany 126: 21-31.

McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L. and Swan, J. A. (1990) A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular–arbuscular mycorrhizal fungi. New Phytologist 115: 495-501.

Miransari, M. (2017) Arbuscular mycorrhizal fungi and heavy metal tolerance in plants. In: Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants (ed. Wu, Q. S.) Pp. 147-161. Springer, Singapore.

Mishra, S. N. and Singh, D. B. (2000) Accumulation of lead and cadmium in upper parts of mustard (*Brassica juncea*) seedlings in response to putrescine. Indian Journal of Experimental Biology 38: 814-818.

Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Alam, M. M., Rahman, A., Suzuki, T. and Fujita, M. (2016) Polyamine and nitric oxide crosstalk: Antagonistic effects on cadmium toxicity in mung bean plants through upregulating the metal detoxification, antioxidant defense and methylglyoxal detoxification systems. Ecotoxicology and Environmental Safety 126: 245-255.

Nori-Shargh, D., Kiaei, S. M., Deyhimi, F., Mozaffarian, V. and Yahyaei, H. (2009) The volatile constituents analysis of *Lallemantia iberica* (M.B.) Fischer and Meyer from Iran. Natural Product Research 23: 546-548.

Parmoon, G., Ebadi, A., Jahanbakhsh, S., Hashemi, M. and Moosavi, S. A. (2019) Assessing photosynthetic performance of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) influenced by plant growth regulators and drought stress imposed

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

at vegetative and reproductive stages. Italian Journal of Agronomy 14: 93-100.
Prasad, A., Kumar, S., Khaliq, A. and Pandey, A. (2011) Heavy metals and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can alter the yield and chemical composition of volatile oil of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). Biology and Fertility of Soils Journal 47: 853-861.
Rabie, G. H. and Almadini, A. M. (2005) Role of bioinoculants in development of salt-tolerance of *Vicia faba* plants under salinity stress. African Journal of Biotechnology 4: 210-222.
Rady, M. M., El-Yazal, M. A. S., Taie, H. A. A. and Ahmad, S. M. A. (2016) Response of wheat growth and productivity to exogenous polyamines under lead stress. Journal of Crop Science and Biotechnology 19: 363-371.
Rezvanypour, S., Hatamzadeh, A., Elahinia, S. A. and Asghari, H. R. (2015) Exogenous polyamines improve mycorrhizal development and growth and flowering of *Freesia hybrid*. Journal of Horticultural Research 23: 17-25.
Rostami, S. and Azhdarpoor, A. (2019) The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: A review. Chemosphere 220: 818-827.
Rozpadek, P., Wezowicz, K., Stojakowska, A., Malarz, J., Surowka, E., Sobczyk, L., Anielska T., Wazny R., Miszalski, Z. and Turnau, K. (2014) Mycorrhizal fungi modulate phytochemical production and antioxidant activity of *Cichorium intybus* L. (Asteraceae) under metal toxicity. Chemosphere 112: 217-224.
Rubinowska, K., Pogroszewska, E. and Michalek, W. (2012) The effect of polyamines on physiological parameters of post- harvest quality of cut stems of Rosa 'Red Berlin'. Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus 11: 81-93.
Sa, R. A., Sa, R. A., Alberton, O., Gazim, Z. C., LaverdeJr, A., Caetano, J., Amorin, A. C. and Dragunski, D. C. (2015) Phytoaccumulation and effect of lead on yield and chemical composition of *Mentha crispa* essential oil. Desalination and Water Treatment 53: 3007-3017.
Sadeghi-Varkani, A., Emam-Djomeh, Z. and Askari, G. R. (2018) Physicochemical and microstructural properties of a novel edible film synthesized from Balangu seed mucilage. International Journal of Biological Macromolecules 108: 1110-1119.
Sharma, P. and Dubey, R. S. (2005) Lead toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology 17: 35-52.
Su, G. X., Zhang, W. H. and Liu, Y. L. (2006) Involvement of hydrogen peroxide generated by polyamine oxidative degradation in the development of lateral roots in soybean. Journal of Integrative Plant Biology 48: 426-432.
Taie, H. A., El-Yazal, M. A. S., Ahmed, S. M. and Rady, M. M. (2019) Polyamines modulate growth, antioxidant activity, and genomic DNA in heavy metal-stressed wheat plant. Environmental Science and Pollution Research 26: 22338-22350.
Tajti, J., Janda, T., Majlath, E., Szalai, G. and Pal, M. (2018) Comparative study on the effects of putrescine and spermidine pre-treatment on cadmium stress in wheat. Ecotoxicology and Environmental Safety 148: 546-554.
Turner, N. C. (1981) Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. Plant and Soil 58: 339-366.
Venkatachalam, P., Jayalakshmi, N., Geetha, N., Sahi, S. V., Sharma, N. C., Rene, E. R., Sarkar, S. K. and Favas P. J. C. (2017) Accumulation efficiency, genotoxicity and antioxidant defense mechanisms in medicinal plant *Acalypha indica* L. under lead stress. Chemosphere 171: 544-553.
Walinga, I., Van Der Lee, J. J., Houba, V. J. G., Van Vark, W. and Novozamsky, I. (1995) Digestion in tubes with H_2SO_4-salicylic acid- H_2O_2 and selenium and determination of Ca, K, Mg, N, Na, P, Zn. In: Plant Analysis Manual (eds. Walinga, I., Van Der Lee, J. J., Houba, V. J. G., Van Vark, W. and Novozamsky, I.) Pp. 7-45. Springer, Dordrecht.
Wang, B. and Qiu, Y. L. (2006) Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. Mycorrhiza 16: 299-363.
Wu, Q. S., Zou, Y. N., Liu, M. and Cheng, K. (2012a) Effects of exogenous putrescine on mycorrhiza, root system architecture, and physiological traits of *Glomus mosseae*-colonized *Trifoliate orange* seedlings. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 40: 80-85.
Wu, Q. S., Zou, Y., Liu, C. and Lu, T. (2012b) Interacted effect of arbuscular mycorrhizal fungi and polyamines on root system architecture of citrus seedlings. Journal of Integrative Agriculture 11: 1675-1681.
Wu, Q. S., Peng, Y. H., Zou, Y. N. and Liu, C. Y. (2010a) Exogenous polyamines affect mycorrhizal development of *Glomus mosseae*-colonized citrus (*Citrus tangerine*) seedlings. Science Asia 36: 254-258.
Wu, Q. S., Zou, Y. N. and He, X. H. (2010b) Exogenous putrescine, not spermine or spermidine, enhances root mycorrhizal development and plant growth of trifoliate orange (*Poncirus trifoliata*) seedlings. International Journal of Agriculture and Biology 12: 576-580.
Xu, H., Lu, Y. and Tong, S. (2018) Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of maize seedlings under salt stress. Emirates Journal of Food and Agriculture 30: 199-204.
Yang, Y., Zhang, Y., Wei, X., You, J., Wang, W., Lu, J. and Shi, R. (2011) Comparative antioxidative responses and proline metabolism in two wheat cultivars under short term lead stress. Ecotoxicology and Environmental Safety 74: 733-740.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

Yao, Q., Wang, L. R., Xing, Q. X., Chen, J. Z. and Zhu, H. H. (2010) Exogenous polyamines influence root morphogenesis and arbuscular mycorrhizal development of *Citrus limonia* seedlings. Plant Growth Regulation 60: 27-33.

Zalaghi, R., Safari-Sinegani, A. A. and Aliasgharzad, N. (2020) The effects of inoculation with three Glomus species on growth and Pb uptake by hemp (*Cannabis sativa*) in a Pb-contaminated soil. Systematic Bioscience and Engineering 1: 1-15.

Zhang, Y., Hu, J., Bai, J., Wang, J., Yin, R., Wang, J. and Lin, X. (2018) Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate the heavy metal toxicity on sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants cultivated on a heavily contaminated field soil at a WEEE-recycling site. Science of the Total Environment 628-629: 282-290.

Zhou, J., Zhang, Z., Zhang, Y., Wei, Y. and Jiang, Z. (2018) Effects of lead stress on the growth, physiology, and cellular structure of privet seedlings. PLoS One 13: e0191139.

Zlatanov, M., Antova, G., Angelova-Romova, M., Momchilova, S., Taneva, S. and Nikolova-Damyanova, B. (2012) Lipid structure of Lallemantia seed oil: A potential source of omega-3 and omega-6 fatty acids for nutritional supplements. Journal of the American Oil Chemists' Society 89: 1393-1401.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]

Interaction of mycorrhizal fungi and putrescine on physiological characteristics, growth and yield of *Lallemantia iberica* under Pb stress conditions

Aida Ansari[1], Babak Andalibi[1*], Mehdi Zarei[2], Farid Shekari[1]

[1]Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

[2]Department of Soil Science, School of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Fars Province, Iran

(Received: 07/01/2021, Accepted: 06/04/2021)

Abstract

In the last two decades, soil contamination with heavy metals has increased in many agricultural areas. Therefore, in order to investigate the interaction of mycorrhiza and putrescine on physiological characteristics, lead content, and yield of *Lallemantia iberica* under lead (Pb) stress, a factorial experiment was conducted in a randomized complete block design in the Research Greenhouse of the Faculty of Agriculture, University of Zanjan in 2018. The experiment consisted of Pb in four levels (0, 300, 600, and 900 mg Pb/kg soil) from the source of $Pb(NO_3)_2$, mycorrhiza at three levels (no inoculation, *Funneliformis mosseae*, and *Rhizophagus intraradices*), and also putrescine in three levels (0, 0.5, and 1 mM). The results showed that among the Pb levels, 900 mg/kg caused the greatest decrease in the greenness index, relative water content, plant height, plant dry weight, root length, and grain yield, whereas increased electrolyte leakage, plant Pb concentration, colonization, and proline content. At all Pb levels, both fungi, especially *F. mosseae*, increased greenness index, relative water content, plant height, plant dry weight, root length, and yield, whereas decreased plant Pb concentration. At all Pb levels, the concentration of 0.5 mM putrescine decreased electrolyte leakage and plant Pb concentration, but increased proline content, plant dry weight, yield, and colonization. In all traits, putrescine had a synergistic effect with *F. mosseae*, but only 0.5 mM putrescine had a synergistic effect with *R. intraradices*. In general, the interaction of 0.5 mM putrescine with *F. mosseae* had an additive effect on plant growth, especially under Pb stress conditions.

Keywords: Colonization, Greenness Index, Heavy Metals, Polyamine, Proline

Corresponding author, Email: andalibi@znu.ac.ir

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2024-03-28]

[DOR: 20.1001.1.23222727.1400.10.44.17.3]