

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

آیدا انصاری^۱، بابک عندلیمی*^۲، مهدی زارعی^۲ و فرید شکاری^۱

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

^۲گروه 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 سبزیگی، 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 سبزیگی، 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. به‌طور کلی، تعامل ۰/۵ میلی‌مولار پوترسین با *F. mosseae* بر رشد گیاه به‌ویژه در شرایط تنش سرب اثر افزایشی داشت.

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

مقدمه

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

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

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

(پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین) ترکیبات آلی و پلی کاتیون-های حاوی نیتروژن با وزن مولکولی کم هستند که به دلیل 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 آسیب‌های 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., 2019; Chen et al., 2016). 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 به دلیل 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-کاروفیلین 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

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 به دلیل کم‌هزینه 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., 2019; Chen et al., 2017). 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

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 به صورت 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 (Sa 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 به مدت 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، به مدت 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، مجدداً به گلدان برگردانده شد. مقدار نیترات اضافه شده توسط نیترات سرب در بالاترین سطح، با استفاده از نیترات آمونیوم (مرک با شماره کاتالوگ ۱۰۱۱۸۸)

Cambridge, UK) مقدار هدایت الکتریکی اول اندازه‌گیری شد. بعد از آن به منظور 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:

$$100 \times (\text{ضریب هدایت الکتریکی دوم} / \text{ضریب هدایت الکتریکی اول}) = \text{نشت یونی}$$

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 به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته و در نهایت 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 به ترتیب با نسبت حجمی ۱:۱۴:۱ میلی-لیتر که شامل ۱ میلی‌لیتر جوهر آبی بود) قرار گرفتند. بعد از خارج کردن محلول رنگ، محلول رنگ‌بر (محلول رنگ بدون جوهر) اضافه شد. نهایتاً توسط میکروسکوپ نوری (Leica galen III)، درصد کلونیزاسیون به روش تلافی 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 به مدت 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

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 به ترتیب 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 (۲۳ روز) و تا رسیدگی بذر (۹۰ روز) تحت تیمار سرب بودند. در نهایت گیاهان ۵۶ روزه (در مرحله گلدهی) جهت اندازه‌گیری صفات استفاده شدند.

شاخص سبزی‌نگی با دستگاه کلروفیل سنج (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, Lambda 25, USA) در طول موج ۵۲۰ نانومتر خوانده شد. به‌منظور سنجش محتوی نسبی آب در مرحله گلدهی، ابتدا وزن تر برگ با ترازو (دقت ۰/۰۰۱) به دست آمد و بعد برگ‌ها ۱۴ ساعت در دمای اتاق و در تاریکی داخل آب مقطر 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).

$$\text{وزن اشباع} / (\text{وزن خشک} - \text{وزن تر}) = \text{محتوی نسبی آب} \times 100$$

برای اندازه‌گیری نشت یونی طبق روش Lutts و همکاران (۱۹۹۶)، مقدار ۰/۳ گرم برگ در مرحله گلدهی به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد درون آب دیونیزه نگهداری شد. سپس توسط دستگاه اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (CMD 500 WPA conductivity meter,)

میلی مولار باعث افزایش درصد کلونیزاسیون نسبت به عدم کاربرد پوترسین شد (جدول ۵). در گونه *R. intraradices* کاربرد ۰/۵ میلی مولار پوترسین درصد کلونیزاسیون را افزایش داد ولی ۱ میلی مولار پوترسین باعث کاهش جزئی آن شد و تفاوت معنی داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (جدول ۵).

هر دو گونه قارچ، به ویژه *F. mosseae*، ریشه بالنگوی شهری را به ویژه 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 میلی گرم در لیتر) افزایش یافت (Alvarado-Lopez et al., 2019).

کلونیزاسیون ریشه شاهدانه تلقیحی با *G. mosseae* با افزایش سرب در خاک تا ۱۲۰۰ میلی گرم در کیلوگرم افزایش یافت و سپس در ۱۸۰۰ میلی گرم 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 اگراللات‌های 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 گلوکاتایون 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., 2010a, 2012a, 2012b; Wu et al., 2012a, 2012b). کلونیزاسیون ریشه با ترکیب گونه *F. mosseae* با هر دو غلظت پوترسین افزایش یافت ولی در گونه *R. intraradices* با پوترسین ۰/۵ میلی مولار توسعه یافت و با ۱ میلی مولار 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 میلی مولار) در این تحقیق با نتایج دیگر محققان مطابقت داشت (Wu et al., 2010a; Wu et al., 2012a, 2012b). پلی‌آمین‌های بیرونی به روش وابسته

سولفوریک ۹۸٪ و ۱۸ میلی لیتر آب مقطر) هضم شدند (Walinga et al., 1995). در نهایت غلظت سرب اندام هوایی و ریشه با دستگاه جذب اتمی (Varian 220 AA, Australia) اندازه‌گیری و به صورت میلی گرم 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 جدا کردن 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 معنی دار 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 ۰/۰۰۱) 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 میلی گرم در کیلوگرم خاک، باعث افزایش درصد کلونیزاسیون شد (جدول ۲). در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، بیشترین درصد کلونیزاسیون مربوط به گونه *F. mosseae* بود ولی در سطح ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، بیشترین درصد کلونیزاسیون (میانگین ۹۷/۲ درصد) مربوط به گونه *R. intraradices* بود که تفاوت معنی داری با *F. mosseae* نداشت (جدول ۳). کاربرد ۰/۵ میلی مولار پوترسین در هر چهار سطح سرب کلونیزاسیون را نسبت به عدم کاربرد پوترسین افزایش داد ولی ۱ میلی مولار پوترسین فقط در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم باعث افزایش کلونیزاسیون شد و در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم به‌طور جزئی آن را نسبت به عدم کاربرد پوترسین کاهش داد (جدول ۴). در گونه *F. mosseae* کاربرد هر دو غلظت پوترسین به ویژه ۰/۵

جدول ۱- تجزیه واریانس تنش سرب، کاربرد قارچ ریشه و محلول پاشی پوترسین بر صفات شاخص سبزیگی، 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

| میانگین مربعات | | | | | | درجه آزادی | منابع تغییر |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|---------------------------|
| وزن خشک اندام هوایی | ارتفاع | محتوی پرولین | نشت یونی | محتوی نسبی آب | شاخص سبزیگی | | |
| ۰/۵۳۶۳۶*** | ۱۱۲/۰۹*** | ۱/۷۰۰۷* | ۳۲۸۹/۲*** | ۲۷۸/۶۳*** | ۴۲/۰۷** | ۲ | بلوک |
| ۰/۰۸۱۰۶*** | ۳۲۷/۷۵*** | ۴۴/۶۹۴*** | ۷۲۱۲/۳*** | ۲۷۷۵/۶۲*** | ۶۳۱/۴۴*** | ۳ | سرب |
| ۰/۱۲۶۸۹*** | ۱۹۸/۳۹*** | ۸/۱۹۵۵*** | ۱۰۰۴/۳*** | ۱۰۳۱/۱۴*** | ۱۷۶/۰۳*** | ۲ | قارچ ریشه |
| ۰/۰۳۳۵۸*** | ۱۴۳/۵۱*** | ۱۱/۶۸۳*** | ۱۱۱۶/۵*** | ۳۳۴/۶۹*** | ۱۰۱/۹۷*** | ۲ | پوترسین |
| ۰/۰۰۶۵۷* | ۹/۴۴* | ۰/۵۳۰۳ ^{ns} | ۶۳/۶۶۳ ^{ns} | ۵۳/۹۳* | ۱۸/۳۳۴* | ۶ | سرب × قارچ ریشه |
| ۰/۰۰۰۸۶ ^{ns} | ۱/۴۳۰۳ ^{ns} | ۰/۹۸۸۵* | ۷۶/۱۴۴* | ۸/۶۴۵ ^{ns} | ۲/۳۷۶۲ ^{ns} | ۶ | سرب × پوترسین |
| ۰/۰۰۸۴۱* | ۱۰/۶۰۵* | ۰/۹۴۲۲ ^{ns} | ۶۵/۷۹۸ ^{ns} | ۷۴/۳۸* | ۱۰/۸۸۱ ^{ns} | ۴ | قارچ ریشه × پوترسین |
| ۰/۰۰۵۷۱* | ۱/۴۵۹۸ ^{ns} | ۰/۷۰۷ ^{ns} | ۴۲/۵۹۲ ^{ns} | ۱۳/۶۴۶ ^{ns} | ۲/۷۲۸ ^{ns} | ۱۲ | سرب × قارچ ریشه × پوترسین |
| ۰/۰۰۲۷۲۴ | ۴/۲۱۳۲۵ | ۰/۴۳۳۶۸ | ۳۰/۸۰۳۸ | ۲۲/۳۱۱۸ | ۷/۹۰۴۱ | ۷۰ | خطا |
| ۱۱/۳ | ۶/۱ | ۱۴ | ۱۲/۳ | ۶/۸ | ۷/۱ | | ضریب تغییرات (درصد) |

^{ns}، *، ** و *** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

ادامه جدول ۱-

| میانگین مربعات | | | | | | درجه آزادی | منابع تغییر |
|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------|---------------------------|
| عملکرد دانه | غلظت سرب ریشه | غلظت سرب اندام هوایی | کلونیزاسیون ریشه | وزن خشک ریشه | طول ریشه | | |
| ۰/۰۳۰۹۶*** | ۹/۶۸۶*** | ۷/۴۶۷*** | ۳۵/۱۵۲* | ۰/۰۰۳۷۱۴*** | ۲۶۵/۹۱*** | ۲ | بلوک |
| ۰/۱۴۶۳۷*** | ۳۸۶۸/۴*** | ۵۲۴/۹۸۶*** | ۳۲۵/۱۸*** | ۰/۰۱۳۶۴۷*** | ۸۸۹/۹*** | ۳ | سرب |
| ۰/۰۴۹۰۸*** | ۱۱۲/۸*** | ۸۸/۸۴۹*** | ۱۰۰۶۴۹/۶*** | ۰/۰۰۶۴۸*** | ۱۵۱/۱۴*** | ۲ | قارچ ریشه |
| ۰/۰۴۱۱۹*** | ۲۶/۴۹۴*** | ۲۷/۸۶۹*** | ۸۹/۶۴۷*** | ۰/۰۰۵۱۱۱*** | ۹۸/۵۴*** | ۲ | پوترسین |
| ۰/۰۰۱۱۶* | ۳۶/۶۵۹*** | ۱۴/۲۱۹*** | ۹۷/۷۶۹*** | ۰/۰۰۰۱۴۳ ^{ns} | ۹/۰۸۷** | ۶ | سرب × قارچ ریشه |
| ۰/۰۰۱۲۸* | ۵/۰۸۲*** | ۴/۱۰۶*** | ۲۱/۷۳۸* | ۰/۰۰۰۲۰۲ ^{ns} | ۰/۵۵۴۸ ^{ns} | ۶ | سرب × پوترسین |
| ۰/۰۰۲۸۲*** | ۲/۵۴** | ۲/۱۴۹*** | ۶۲/۴۵۸*** | ۰/۰۰۰۶۶۳* | ۱۱/۰۴۶** | ۴ | قارچ ریشه × پوترسین |
| ۰/۰۰۰۶ ^{ns} | ۱/۰۰۳ ^{ns} | ۰/۳۳۰۱ ^{ns} | ۱۳/۰۹۰۳ ^{ns} | ۰/۰۰۰۳۸۲* | ۰/۶۱۶۲ ^{ns} | ۱۲ | سرب × قارچ ریشه × پوترسین |
| ۰/۰۰۰۵۰۷ | ۰/۵۳۷۶۹ | ۰/۳۹۵۱۹۴ | ۷/۵۶۰۵ | ۰/۰۰۰۱۹۹ | ۲/۲۱۴۶ | ۷۰ | خطا |
| ۱۰/۶ | ۶/۳ | ۱۱/۲ | ۴/۵ | ۱۲/۵ | ۵/۵ | | ضریب تغییرات (درصد) |

^{ns}، *، ** و *** به ترتیب غیر معنی دار و معنی دار در سطوح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱

به غلظت، کلونیزاسیون قارچ را تحت تأثیر قرار دادند، به طوری که غلظت کم ($10^{-4} \times 0/2$ مولار) درصد کلونیزاسیون

جدول ۲- اثرات ساده تنش سرب، کاربرد قارچ ریشه و محلول پاشی 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

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

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حرف مشابه هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. مقادیر

نشان‌دهنده میانگین \pm خطای استاندارد هستند. *Rhizophagus intraradices* (Ri) و *Funneliformis mosseae* (Fm)

پوترسین، اثر دوگانه قارچ ریشه و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر صفت فوق معنی‌دار نبودند (جدول ۱). محلول پاشی 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 ۱ a). 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* به ترتیب

را افزایش داد اما غلظت‌های زیاد (1×10^{-4} و 5×10^{-4} مولار) باعث کاهش آن شدند (Yao et al., 2010). از این رو، 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، طولیل شدن و منشعب شدن هیف و طول عمر هیف، قارچ ریشه را تحت تأثیر قرار دادند (El Ghachtouli et al., 1995; El Ghachtouli et al., 1996).

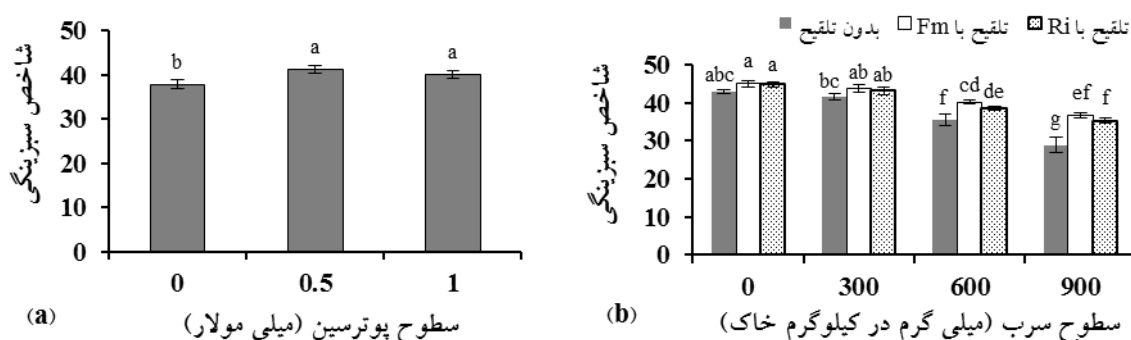
نتایج تجزیه واریانس شاخص سبزینگی نشان داد که اثرات ساده سرب، قارچ ریشه و پوترسین در سطح احتمال ۰/۰۰۱ و اثر دوگانه سرب و قارچ ریشه در سطح احتمال ۰/۰۵ این صفت را تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و

ادامه جدول ۲-

| تیمارهای آزمایشی | طول ریشه (سانتی متر) | وزن خشک ریشه (گرم در گیاه) | کلونیزاسیون ریشه (درصد) | غلظت سرب اندام هوایی (میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک) | غلظت سرب ریشه (میلی گرم 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 | ۰/۳۲±۰/۰۱ ^d | ۰/۳۱±۰/۰۲ ^d | ۰/۲۹۱±۰/۰۱۲ ^a |
| ۳۰۰ | ۳۰/۷۲±۰/۶۶ ^b | ۰/۱۲۱±۰/۰۰۴۷ ^b | ۶۰/۹±۸/۵ ^b | ۵/۱۸±۰/۰۲ ^c | ۳/۸۲±۰/۰۲۲ ^c | ۰/۲۵۴±۰/۰۱۱ ^b |
| ۶۰۰ | ۲۳/۵۷±۰/۶۱ ^c | ۰/۱۰۱±۰/۰۰۳۶ ^c | ۶۲/۳±۸/۶۸ ^b | ۱۱/۰۵±۰/۰۳۹ ^b | ۷/۷۸±۰/۰۴ ^b | ۰/۱۹۵±۰/۰۰۹ ^c |
| ۹۰۰ | ۲۱/۱۷±۰/۸۲ ^d | ۰/۰۸۹±۰/۰۰۴ ^d | ۶۴/۶±۸/۹۶ ^a | ۲۷/۷۹±۰/۸۲ ^a | ۱۰/۳۳±۰/۰۶ ^a | ۰/۱۲۲±۰/۰۱ ^d |
| قارچ ریشه | | | | | | |
| عدم تلقیح | ۲۴/۹۸±۱/۰۸ ^c | ۰/۰۹۸±۰/۰۰۴۶ ^c | ±۰ ^c | ۱۳±۲/۰۸ ^a | ۷/۳۱±۰/۸۸ ^a | ۰/۱۷۴±۰/۰۱۴ ^c |
| تلقیح با Fm | ۲۹/۰۳±۰/۹۲ ^a | ۰/۱۲۵±۰/۰۰۴۶ ^a | ۹۲/۹۶±۱ ^a | ۹/۵±۱/۵۱ ^c | ۴/۲۶±۰/۵۱ ^c | ۰/۲۴۶±۰/۰۱۳ ^a |
| تلقیح با Ri | ۲۷/۵۵±۰/۹۴ ^b | ۰/۱۱۵±۰/۰۰۴۸ ^b | ۹۰/۱±۱/۱۳ ^b | ۱۰/۸±۱/۷ ^b | ۵/۱۳±۰/۶۲ ^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 | ۱۲/۹±۱/۹ ^a | ۶/۴۸±۰/۸۳ ^a | ۰/۱۸۱±۰/۰۱۳ ^c |
| ۰/۵ | ۲۸/۹۶±۱/۰۱ ^a | ۰/۱۲۵±۰/۰۰۵۲ ^a | ۶۲/۹±۷/۵۳ ^a | ۱۰±۱/۷۳ ^c | ۴/۷۳±۰/۶۱ ^b | ۰/۲۴۹±۰/۰۱۵ ^a |
| ۱ | ۲۶/۹۲±۱/۰۱ ^b | ۰/۱۱۱±۰/۰۰۴۶ ^b | ۶۰/۵±۷/۲۹ ^b | ۱۰/۹±۱/۷۴ ^b | ۵/۴۷±۰/۶۸ ^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. *Rhizophagus intraradices* (Ri) و *Funneliformis mosseae* (Fm)



شکل ۱- اثر ساده محلول‌پاشی پوترسین بر صفت شاخص سبزیگی (a) و اثر کاربرد قارچ ریشه بر صفت شاخص سبزیگی 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. *Rhizophagus intraradices* (Ri) و *Funneliformis mosseae* (Fm)

با شرایط عدم تلقیح داشتند (شکل b ۱).

کاهش شاخص سبزیگی 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

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 سبزیگی را نسبت به عدم تلقیح افزایش دادند. در سطوح ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، هر دو گونه به‌ویژه *F. mosseae* تفاوت معنی‌داری

میلی گرم در کیلوگرم، کاربرد *F. mosseae* تأثیر مثبت بیشتری بر محتوی نسبی آب داشت، با این حال در سطح ۳۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، کاربرد *R. intraradices* تا ۱۰/۷ درصد مقدار آن را افزایش داد (جدول ۳). معنی دار 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 به ویژه ۰/۵ میلی مولار محتوی نسبی آب را نسبت به عدم کاربرد پوترسین افزایش دادند. در شرایط کاربرد *R. intraradices*، ۰/۵ میلی مولار پوترسین محتوی نسبی آب را تا ۴/۵ درصد افزایش داد ولی ۱ میلی مولار باعث کاهش ۳/۵ درصدی شد که تفاوت معنی داری 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 بسته شدن روزنه در اثر تنش سرب نسبت داده شده است که منجر به کاهش فشار آماس و کوچک شدن 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 تلقیح شده با قارچ به ویژه در تنش سرب مطابقت داشت. همزیستی قارچ ریشه منجر به افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه می‌شود و این جذب آب ناشی از سیستم ریشه بزرگتر به دلیل 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 تورژانس و گسترش سلول‌های برگ در شرایط تنش‌های محیطی دارد (رسولی صدقیانی و

کیلوگرم بر ریحان مطابقت داشت. کاهش جذب عناصر به ویژه آهن و منیزیم توسط گیاه، جانشینی سرب به جای منیزیم در مرکز کلروفیل و افزایش فعالیت آنزیم کلروفیل‌از 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 به ویژه در تنش سرب با تحقیق محکمی و همکاران (۱۳۹۶) در گیاه آویشن دناپی مطابقت داشت. افزایش شاخص سبزینگی با کاربرد قارچ ریشه در تنش سرب می‌تواند به دلیل بهبود جذب عناصر میکرو مثل آهن و عناصر ماکرو مثل منیزیم توسط گسترش میسلیم‌های 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 (Rezvanpour 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) معنی دار شدند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر این صفت معنی دار نبودند (جدول ۱). معنی دار شدن اثر دوگانه سرب و قارچ بیانگر واکنش متفاوت دو گونه نسبت به سطوح مختلف سرب بود. سطوح ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم محتوی نسبی آب را نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند و بیشترین کاهش در غلظت ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). بیشترین افزایش با ۱۴/۲، ۱۲/۴ و ۳۳ درصد به ترتیب در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم مربوط به کاربرد *F. mosseae* بود. اگرچه در سطوح سرب صفر، ۶۰۰ و ۹۰۰

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

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

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. *Rhizophagus intraradices* (Ri) و *Funneliformis mosseae* (Fm).

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 ۲ a). 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 به ترتیب 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

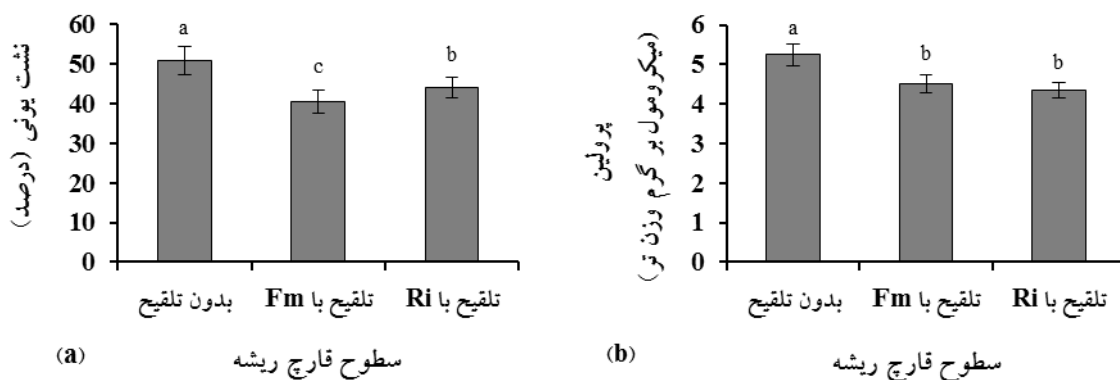
همکاران، ۱۳۹۵). افزایش محتوی نسبی آب با کاربرد پوترسین در گندم و همیشه‌بهار گزارش شده است (بنی‌اسدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Gupta et al., 2012). کاربرد پلی‌آمین‌ها به‌ویژه پوترسین محتوی نسبی آب را در برگ گندم در تنش سرب افزایش داد (Rady et al., 2016). پلی‌آمین‌ها به‌دلیل ماهیت آب‌دوست‌بودن که به حفظ آماس و 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

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

| عملکرد دانه (گرم در گیاه) | کلونیزاسیون (درصد) | سرب اندام هوایی | | پرولین (میکرومول بر گرم وزن تر) | نشست یونی (درصد) | سطوح پوترسین (میلی مولار) | سطوح سرب (میلی گرم در کیلوگرم خاک) |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|---------------------------------|--|
| | | سرب ریشه | سرب ریشه | | | | |
| ۰/۲۶۴±۰/۰۱۳ ^{cd} | ۵۳±۱۳/۲۵ ^e | ۰/۳۵±۰/۰۲ ^h | ۰/۳۷±۰/۰۴ ^h | ۳/۰۳±۰/۱۶۴ ^f | ۳۲/۸±۳/۲ ^e | ۰ | |
| ۰/۳۲۴±۰/۰۲۱ ^a | ۵۹/۱±۱۴/۷۸ ^{cd} | ۰/۳۰۴±۰/۰۲ ^h | ۰/۲۷±۰/۰۳ ^h | ۳/۷۱±۰/۱۵۸ ^{ef} | ۲۷/۵±۲/۸۶ ^e | ۰/۵ | ۰ |
| ۰/۲۸۴±۰/۰۱۶ ^{bc} | ۵۷±۱۴/۲۸ ^d | ۰/۳۰۵±۰/۰۲ ^h | ۰/۲۹±۰/۰۲ ^h | ۳/۶۸±۰/۱۷۴ ^{ef} | ۲۹±۳/۱ ^e | ۱ | |
| ۰/۲۰۵±۰/۰۱۱ ^{ef} | ۵۹±۱۴/۸۲ ^{cd} | ۵/۸۲±۰/۳۸ ^f | ۴/۵۱±۰/۴۵ ^f | ۳/۳۳±۰/۲۲۱ ^f | ۳۸/۳±۱/۶ ^d | ۰ | |
| ۰/۳۰۴±۰/۰۱۶ ^{ab} | ۶۳/۷±۱۵/۹۶ ^{ab} | ۴/۵۶±۰/۳ ^g | ۳/۱۹±۰/۳۴ ^g | ۴/۲۹±۰/۲۱۸ ^{de} | ۲۸/۴±۲ ^e | ۰/۵ | ۳۰۰ |
| ۰/۲۵۳±۰/۰۱۶ ^d | ۶۰±۱۵/۰۹ ^c | ۵/۱۶±۰/۲۴ ^{fg} | ۳/۷۷±۰/۲۲ ^g | ۴/۱۶±۰/۱۸۳ ^{de} | ۳۱/۶±۲/۱ ^e | ۱ | |
| ۰/۱۶۲±۰/۰۱۷ ^g | ۶۲/۷±۱۵/۷۲ ^{ab} | ۱۲/۱۵±۰/۷۷ ^c | ۹/۰۶±۰/۸۳ ^c | ۴/۵۴±۰/۱۹۳ ^d | ۶۰/۴±۴/۲۶ ^b | ۰ | |
| ۰/۲۲۴±۰/۰۱۶ ^e | ۶۳±۱۵/۷۷ ^{ab} | ۹/۷۷±۰/۵۲ ^e | ۶/۶۸±۰/۵۲ ^e | ۵/۴۱±۰/۲۷۲ ^c | ۵۱/۱±۴/۷۴ ^c | ۰/۵ | ۶۰۰ |
| ۰/۱۹۸±۰/۰۱۵ ^f | ۶۱/۳±۱۵/۴۴ ^{bc} | ۱۱/۲۳±۰/۵۱ ^d | ۷/۶۲±۰/۵۱ ^d | ۵/۱۸±۰/۲۵۲ ^c | ۵۲/۷±۴/۲۹ ^c | ۱ | |
| ۰/۰۹۴±۰/۰۰۲ ⁱ | ۶۴/۳±۱۶/۱۱ ^a | ۲۹/۷±۱/۳۴ ^a | ۱۲±۱/۱۷ ^a | ۵/۴۳±۰/۲۲۵ ^c | ۷۴±۵ ^a | ۰ | |
| ۰/۱۴۳±۰/۰۱۷ ^{gh} | ۶۵/۴±۱۶/۴ ^a | ۲۶/۶±۱/۴۵ ^b | ۸/۷۹±۰/۹ ^c | ۷/۴۳±۰/۵۶ ^a | ۵۶/۳±۴ ^{bc} | ۰/۵ | ۹۰۰ |
| ۰/۱۲۹±۰/۰۱۲ ^h | ۶۳/۹±۱۶ ^{ab} | ۲۷/۰۷±۱/۴ ^b | ۱۰/۲±۰/۸ ^b | ۶/۲۲±۰/۴۱ ^b | ۵۸/۸±۵/۲ ^b | ۱ | |

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 نشست 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)

کاتیون‌های ضروری آنزیم‌ها و تغییر فعالیت آنزیم‌های حاوی فلز باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود که نهایتاً

تحقیقات گزارش شده است (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Garg and Aggarwal, 2012). سرب از طریق جایگزینی با

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 به دلیل فعالیت‌های القاشده آنزیم‌های اورنیتین-δ-آمینوترانسفراز و ۲-گلوتامیل کیناز، افزایش آبسیزیک اسید درونی، تخریب پروتئین‌های خاص و 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). 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

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 ۰/۰۱ 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

۱۳/۵ درصد افزایش داد ولی ۱ میلی مولار پوترسین تفاوت معنی داری 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 در نتیجه 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-Saad 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 میسلیم‌های 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 میلی مولار، ارتفاع بیشتری داشت (Wu et al., 2012a).

نتایج تجزیه واریانس وزن خشک اندام هوایی حاکی از تأثیر معنی دار 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

ریشه از طریق گسترش میسلیم‌ها 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 معنی دار شدند (جدول ۱). اثر دوگانه سرب و پوترسین و اثر سه‌گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین بر این صفت معنی دار 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* به ترتیب ۹/۹، ۱۳/۴، ۱۱/۱ و ۲۷/۷ درصد و گونه *R. intraradices* به ترتیب ۴/۱، ۸/۲ و 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 میلی مولار باعث افزایش ارتفاع نسبت به عدم کاربرد پوترسین شدند. در شرایط تلقیح با گونه *R. intraradices*، کاربرد ۰/۵ میلی مولار پوترسین ارتفاع را

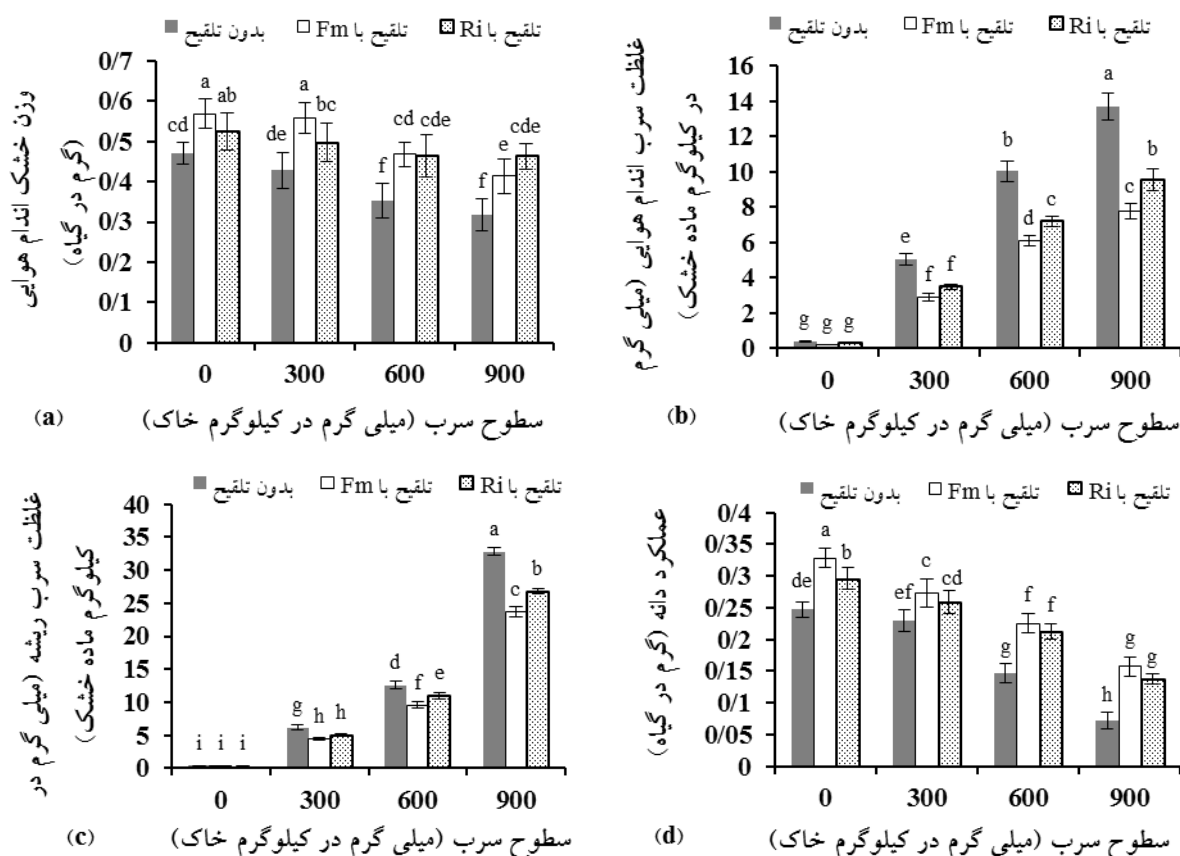
جدول ۵- اثر متقابل محلول پاشی پوترسین بر صفات محتوی نسبی آب، ارتفاع و کلونیزاسیون ریشه گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف قارچ ریشه

| سطوح قارچ ریشه | سطوح پوترسین (میلی مولار) | محتوی نسبی آب (درصد) | ارتفاع (سانتی متر) | کلونیزاسیون (درصد) |
|----------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | ۰ | ۵۹/۶±۳/۵ ^f | ۲۹/۴±۱/۳ ^{۵d} | ۰±۰ ^d |
| عدم تلقیح | ۰/۵ | ۶۶/۱±۳/۱ ^{de} | ۳۲/۵±۱/۲ ^{۸c} | ۰±۰ ^d |
| | ۱ | ۶۴/۹±۳/۱ ^{۷e} | ۳۲/۲±۱/۳ ^{۲c} | ۰±۰ ^d |
| | ۰ | ۶۸/۲±۲/۶ ^{۲cde} | ۳۳/۶±۱/۰ ^{۲c} | ۹۰±۲/۳ ^b |
| تلقیح با Fm | ۰/۵ | ۷۶/۹±۲/۵ ^{۹a} | ۳۸/۱±۱/۳ ^{۶a} | ۹۴/۶±۱/۳ ^{۴a} |
| | ۱ | ۷۴/۹±۳/۰ ^{۳ab} | ۳۶/۳±۱/۰ ^{۲b} | ۹۴/۳±۱/۳ ^{۱a} |
| | ۰ | ۷۱/۹±۳/۰ ^{۷bc} | ۳۲/۷±۰/۹ ^{۴c} | ۸۹/۳±۲/۲ ^{۹bc} |
| تلقیح با Ri | ۰/۵ | ۷۵/۱±۳/۰ ^{۸ab} | ۳۷/۱±۱/۰ ^{۶ab} | ۹۳/۸±۱/۴ ^{۱a} |
| | ۱ | ۶۹/۴±۳/۱ ^{cd} | ۳۳/۳±۰/۹ ^{۴c} | ۸۷/۳±۱/۷ ^{۳c} |

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. *Rhizophagus intraradices* (Ri) و *Funneliformis mosseae* (Fm)

عدم تلقیح، هر دو غلظت پوترسین به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار 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*، 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 ۵ a). 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

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 ۳ a). 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 ۴ a). اثر سه‌گانه بین سرب و پوترسین و قارچ ریشه در این صفت نشان داد که در شرایط



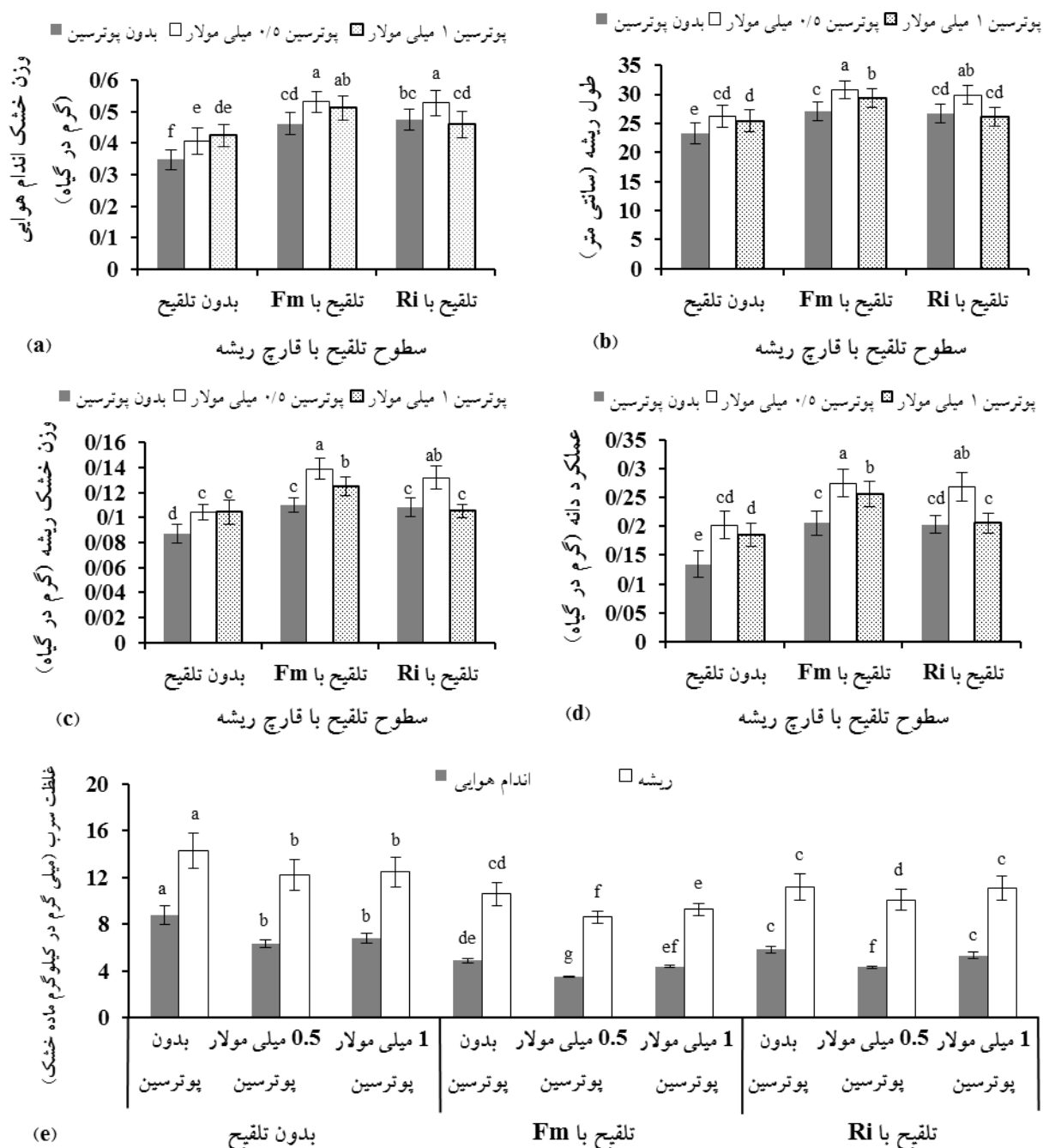
شکل ۳- اثر کاربرد قارچ ریشه بر وزن خشک اندام هوایی (a)، غلظت سرب اندام هوایی (b)، غلظت سرب ریشه (c) و عملکرد دانه (d) گیاه بالنگوی شهری در سطوح مختلف سرب. ستون‌های دارای حروف مشابه براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری ندارند. میله‌های عمودی خطای استاندارد را نشان می‌دهند. *Rhizophagus intraradices*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

افزایش وزن خشک اندام هوایی با کاربرد قارچ ریشه به‌ویژه تحت تنش سرب در این مطالعه با تحقیق در گیاهانی مانند کاسنی (Zalaghi et al., 2020) و شاه‌دانه (Rozpadek et al., 2014) 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 میسلیم‌های خارجی و گسترش سیستم ریشه گیاه توجیه شود (Miransari, 2017). قارچ ریشه می‌تواند با افزایش محتوی کلروفیل و افزایش قابلیت تثبیت CO₂، کاهش آسیب ناشی از سرب در ساختار تیلاکوئید باعث بهبود فتوسنتز شود که نهایتاً می‌تواند وزن خشک گیاه را بهبود بخشد (Zhang et al.,

2018; 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 (Zalaghi et al., 2020) و شاه‌دانه (Rozpadek et al., 2014) مطابقت داشت.

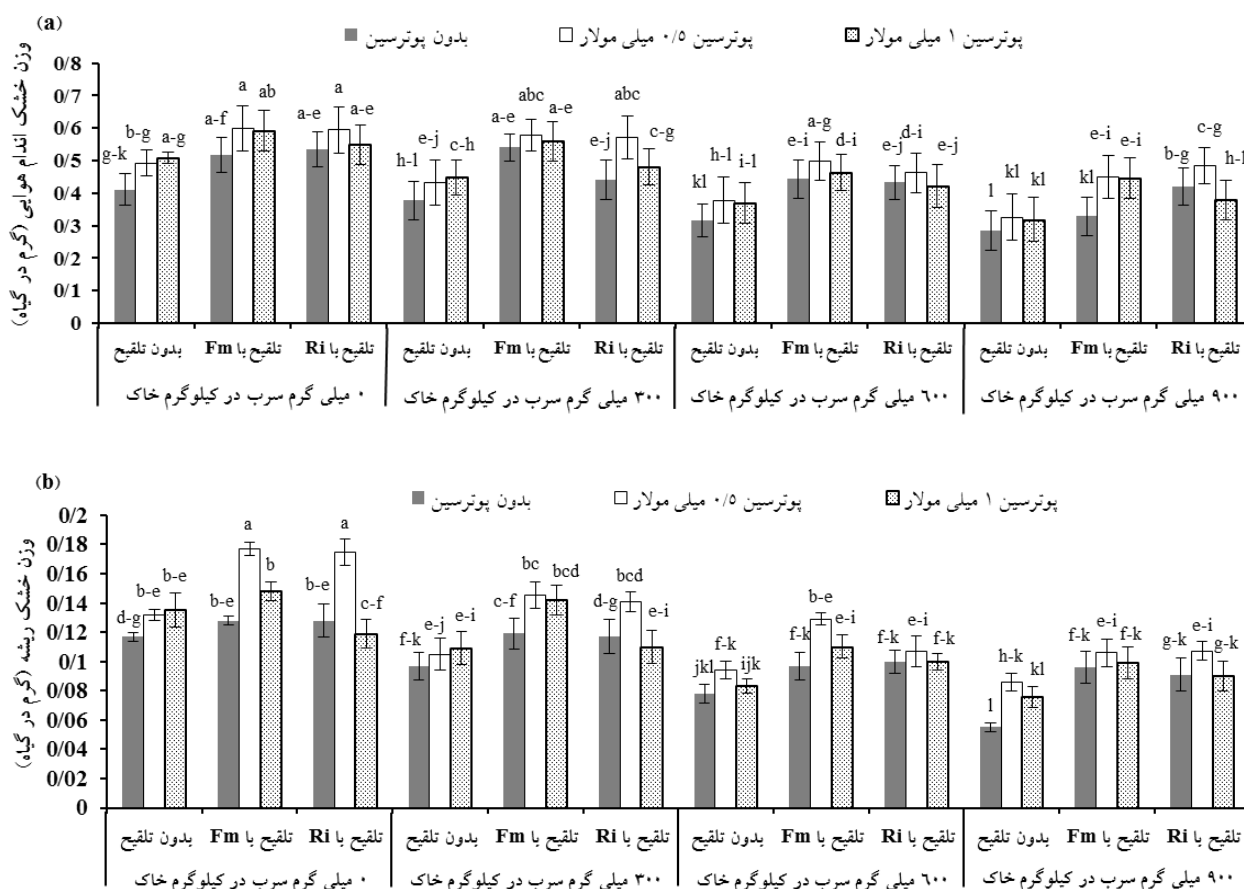
کاهش وزن خشک اندام هوایی با افزایش غلظت سرب خاک در گیاهان زیادی مانند ریحان، آکالیفای هندی، اسپند و گشنیز گزارش شده است (فاطمی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Mahdavian et al., 2016; Venkatachalam et al., 2017; Fattahi et al., 2019). نتایج این مطالعه با نتایج مطالعات فوق مطابقت داشت. کاهش رشد گیاه ناشی از افزایش سرب، 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 CO₂ به‌منظور کاهش تعرق، آسیب ژنتیکی ناشی از افزایش ROSها، کاهش سطح برگ و کاهش جذب عناصر مانند نیتروژن، فسفر، منیزیم و آهن نسبت داده شده است



شکل ۴- اثر محلول پاشی 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. *Funneliformis mosseae* (Fm) و *Rhizoglyphus intraradices* (Ri)

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

(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 برگری و خیساندن بذر با پوترسین، اسپرمیدین و اسپرمین رشد گندم را در تنش کادمیوم و سرب



شکل ۵- اثر متقابل کاربرد قارچ ریشه و محلول پاشی 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. *Funneliformis mosseae* (Fm) و *Rhizophagus intraradices* (Ri)

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 به دلیل کاربرد پوترسین، به‌ویژه ۰/۵ میلی‌مولار باشد که در رشد و تشکیل ریشه‌ها نقش دارد و نیز کلونیزاسیون ریشه بالنگوی شهری را توسط گونه‌های *R. intraradices* و *F. mosseae* 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 ۰/۰۱) 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

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 به دلیل تأثیر مثبت پوترسین بر کلروفیل و

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., 2017; Venkatachalam et al., 2016). 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 این رو 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 (Rozpadek 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

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 (به ترتیب 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 به ترتیب 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

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 ۴ e).

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-Saad 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 تیمار شده با پوترسین

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

داد ولی ۱ میلی مولار باعث افزایش بسیار جزئی در عملکرد شد و تفاوت معنی داری با عدم کاربرد پوترسین نداشت (شکل ۴ d). بیشترین مقدار عملکرد دانه (میانگین ۰/۲۷۵ گرم در گیاه) با کاربرد ۰/۵ میلی مولار پوترسین در گیاهان تلقیح شده با *F. mosseae* به دست آمد و کمترین مقدار مربوط به عدم کاربرد پوترسین در گیاهان تلقیح نشده بود (شکل ۴ d).

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 می شود، در نتیجه 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; Ghorchani 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 به ویژه 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 به ویژه در تنش فلز سنگین نسبت داده شد (Li et al., 2011; Miransari, 2017). کاربرد برگری پلی آمین ها عملکرد گندم را در تنش کادمیوم و سرب با افزایش مکانیسم های تحمل بهبود داد (Taie et al., 2019). پلی آمین ها در فرآیندهای مختلف زیستی مانند تقسیم سلول، رشد، آغاز گل، نمو گل و میوه نقش مهمی دارند (Chen et al., 2019) و با افزایش مقدار هورمون های درونی (به ویژه سیتوکینین) و از

می تواند به دلیل کاهش جابجایی سرب و یا کادمیوم از ریشه به اندام هوایی و نیز رقیق شدگی به دلیل 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 به ویژه فسفر با کاربرد پوترسین در گیاهان تلقیح شده با قارچ ریشه می تواند موجب رقیق شدگی 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) معنی دار شدند ولی اثر سه گانه سرب و قارچ ریشه و پوترسین معنی دار نبود (جدول ۱). در شرایط شاهد و کاربرد ۳۰۰، ۶۰۰ و ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک، گونه *F. mosseae* به ترتیب ۳۲/۸، ۱۸/۳، ۱۸/۱، ۵۳/۱ و ۱۱۸/۱ درصد و گونه *R. intraradices* به ترتیب ۱۹/۸، ۱۲/۱، ۴۴/۹ و ۹۰/۳ درصد عملکرد را نسبت به شرایط عدم تلقیح افزایش دادند (شکل ۳ d). در هر چهار سطح سرب، هر دو غلظت پوترسین به ویژه ۰/۵ میلی مولار باعث افزایش عملکرد دانه نسبت به عدم کاربرد پوترسین شدند، با این حال در شرایط عدم کاربرد سرب و کاربرد ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، دو غلظت تفاوت معنی داری با یکدیگر داشتند ولی در سطح ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، دو غلظت به طور یکسان عملکرد دانه را افزایش داده و تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۴). بیشترین عملکرد دانه (میانگین ۰/۳۲۴ گرم در گیاه) با کاربرد ۰/۵ میلی مولار پوترسین در شرایط عدم کاربرد سرب به دست آمد و کمترین مقدار مربوط به عدم کاربرد پوترسین در سطح ۹۰۰ میلی گرم در کیلوگرم بود (جدول ۴). در شرایط عدم تلقیح و تلقیح با گونه *F. mosseae*، دو غلظت پوترسین به ویژه ۰/۵ میلی مولار عملکرد را نسبت به عدم کاربرد آن افزایش دادند (شکل ۴ d). در شرایط تلقیح با *R. intraradices*، ۰/۵ میلی مولار پوترسین عملکرد دانه را ۳۲/۵ درصد نسبت به عدم کاربرد آن افزایش

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

منابع

- بنی‌اسدی، ف.، صفاری، و. ر. و مقصودی، م. 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.

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. کم‌تر بودن 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.

- 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 نعمت‌اللهزاده، 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 دنیایی 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-Esfahan, 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 proline 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.

- 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 senescence 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

- 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., Laverde Jr, A., Caetano, J., Amorin, A. C. and Dragunski, D. C. (2015) Phytoaccumulation and effect of lead on yield and chemical composition of *Mentha crisper* 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 H₂SO₄-salicylic acid- H₂O₂ 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.

- 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.

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

Aida Ansari¹, Babak Andalibi^{1*}, Mehdi Zarei², Farid Shekari¹

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

²Department 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(NO₃)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