

مقاله پژوهشی

ارزیابی تاثیر تنش خشکی و عنصر مس بر برخی صفات رویشی، اسانس و غلظت مس در گیاه شاهتره (*Fumaria parviflora* Lam.)

منصوره تشکری زاده^۱، محمد رضا وهابی^۱، پوران‌دخت گلکار*^۲ و کبری مهدویان^۲

^۱ گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه زیست شناسی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰، تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷)

چکیده

تنش‌های محیطی باعث بروز واکنش‌های مختلف از طرف گیاهان می‌شوند. خشکی و فلزات سنگین از جمله عوامل نامساعد محیطی هستند که عملکرد گیاهان دارویی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این تحقیق به منظور بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف عنصر مس (شاهد، ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم/گیلوگرم) و سطوح مختلف تنش خشکی (شاهد، ۵۰٪ و ۷۵٪ بر اساس تخلیه درصد رطوبت خاک) بر روی صفات رویشی مختلف، درصد اسانس و تجمع مس در ریشه، اندام هوایی و تفاله گیاه شاهتره (*Fumaria. Parviflora* Lam.) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه با ۳ تکرار انجام شد. بذر گیاه جهت کشت، از چهار ناحیه (Z_1, Z_2, Z_3 و Z_4) در دو منطقه معدنی در استان کرمان (عسکری و رابر) جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد که در همه تیمارها غلظت ۵۰ (میلی‌گرم/کیلوگرم) مس و سطح بدون تنش خشکی (شاهد) منجر به افزایش صفات رویشی شد. صفات رشد در اندام هوایی، در غلظت ۱۵۰ (میلی‌گرم/کیلوگرم) مس و سطح بدون تنش خشکی اختلاف معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند. بیشترین درصد اسانس در تیمار با غلظت ۱۵۰ (میلی‌گرم/کیلوگرم) مس و سطح تنش متوسط خشکی در ناحیه Z_3 از معدن مس عسکری و بیشترین میزان غلظت مس در ریشه، اندام هوایی و تفاله گیاه در تیمار ۴۰۰ (میلی‌گرم/کیلوگرم) مس و سطح تنش شدید خشکی در ناحیه Z_3 از معدن عسکری مشاهده شد. عنصر مس در طی فرایند تقطیر به مقدار زیادی در بافت گیاهی باقی ماند و غلظت عنصر مس در تفاله، تقریباً مشابه اندام هوایی گیاه قبل از فرایند اسانس‌گیری بود. این یافته‌ها استفاده از گیاه دارویی شاهتره، به عنوان گونه‌ای مناسب برای خاک‌هایی که تا غلظت ۱۵۰ (میلی‌گرم/کیلوگرم) مس آلوده شده‌اند را پیشنهاد می‌کند. همچنین داده‌ها نشان داد که گیاه شاهتره به لحاظ رشد کند در غلظت‌های بالای مس (۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم/کیلوگرم) دارای زیست توده مناسب برای جمع‌آوری عنصر مس از خاک نمی‌باشد.

کلمات کلیدی: تفاله گیاه، طول ریشه‌چه، طول ساقه‌چه، وزن تر، وزن خشک.

مقدمه

سرشاخه گل دار به حالت تازه و خشک مصرف می‌شود (Orhan et al., 2015). اندام‌های مختلف این گیاه دارای مواد رزینی، املاح معدنی، موسیلاژ، اسیدهای آلی قابل تبلور به نام اسید فوماریک (Fumaric acid) و آلکالوئیدی به نام فومارین (Fumarin) که دارای خاصیت حفاظت کبدی است می‌باشند

گیاه شاهتره گل‌ریز (*Fumaria parviflora* Lam.) متعلق به خانواده شاهتره (Fumariaceae) و بومی اروپا، آسیا و آفریقا می‌باشد (Orhan et al., 2015). شاهتره گیاهی علفی به ارتفاع ۲۰ تا ۸۰ سانتی‌متر است که همه بخش‌های آن مخصوصاً

نظیر اسانس‌ها و ترکیبات فعال گیاهان دارویی است (Nasim & Dhir, 2010). اعتقاد بر این است که ساخت این ترکیبات پاسخ‌های سازگاری گیاه به تنش فلزات است (Singh & Sinha, 2004b). هدف از این مطالعه بررسی اثر سمیت مس بر عملکرد و برخی از صفات رویشی، کمیت اسانس و تجمع مس در ریشه، اندام هوایی و تفاله گیاه شاهتره تحت شرایط تنش خشکی در شرایط گلخانه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

بر اساس مطالعات انجام شده در معادن مختلف مس در استان کرمان، دو منطقه معدنی مس عسکری (R_1) (طول جغرافیایی $30^{\circ}56'18.94''$ و عرض $31^{\circ}16'18.94''$ ، ارتفاع متوسط ۲۱۱۱ متر از سطح دریا) و مس رابر (R_2) (طول جغرافیایی $30^{\circ}56'17.59''$ و عرض $32^{\circ}51'33''$ ، ارتفاع متوسط ۲۱۷۶ متر از سطح دریا) با سطوح مشابه از نظر غلظت مس انتخاب شدند. در هر معدن ۴ منطقه از نظر میزان مس با نام‌های Z_1 ، Z_2 ، Z_3 و Z_4 به ترتیب باغلظت‌های متوسط ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک انتخاب شد. نمونه‌های گیاهی روئیده بر روی خاک‌های معدنی و آلوده به عناصر سنگین از مناطق معدنی ($R_{1,2}$) و از هر ۴ ناحیه ($Z_{1,2,3,4}$) مربوط به مناطق معدنی جمع‌آوری شدند و مورد شناسایی قرار گرفتند. انتخاب بذر از گیاه شاهتره (*Fumaria parviflora* Lam.) به صورت تصادفی از چهار ناحیه متعلق به دو معدن صورت گرفت. جهت شکستن خواب بذر از تیمار سرمادهی مرطوب و نیترات‌پتاسیم استفاده شد. بدین منظور بذور، پس از ضد عفونی شدن با سدیم هیپوکلراید ۰/۱ درصد، به مدت ۱۲ ساعت در آب مقطر خیسانده و در لای حوله مرطوب و در درون ظروف درب‌دار به مدت ۲۰ روز در دمای یخچال (۴- درجه سانتیگراد) نگهداری شدند. پس از اعمال سرمادهی، تعداد ۲۰ عدد بذر در درون هر پتری دیش و بر روی کاغذ صافی واتمن قرار گرفتند و ۳ میلی‌لیتر از محلول ۰/۲ درصد نیترات پتاسیم به پتری دیش‌ها اضافه شد و پتری دیش‌ها در درون انکوباتور با دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند

(زرگری، ۱۳۷۶). سرشاخه گیاه دارای خواص درمانی بسیاری است به طوری که از آن به عنوان مدر، خلط‌آور، معرق، مقوی معده، تصفیه‌کننده خون، اشتهاآور، درمان برخی بیماری‌های پوستی، قابض و آرام بخش استفاده می‌شود (Jameel et al., 2014). در گیاهان دارویی، تنش‌های محیطی از عوامل تأثیرگذار بر کمیت و کیفیت متابولیت‌های ثانویه می‌باشند و یکی از مهمترین وظایف متابولیت‌های ثانویه از جمله اسانس‌ها در گیاهان نقش محافظتی آنها در برابر تنش است (Walpola & Arunakumara., 2017). وقوع تنش خشکی یکی از عوامل محیطی موثر بر تغییرات مورفولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان می‌باشد. کمبود رطوبت، گیاه را وادار به واکنش‌های مختلف مورفولوژیکی مانند کاهش سطح برگ، کاهش اندام هوایی، افزایش رشد ریشه، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش سرعت رشد و تحت تأثیر قرار دادن عملکرد و موثره گیاهان دارویی می‌کند (Araya et al., 2010). از دیگر تنش‌های محیطی وارد شده به گیاهان، وجود فلزات سنگین است. این فلزات، قابلیت تجزیه بیولوژیکی ندارند و باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی می‌شوند که از میان آنها جیوه، سرب، کادمیوم، مس، کروم، منگنز، روی و آلومینیوم از جمله فلزات سنگین رایج می‌باشند (Herrera-Estrella & Guevara-Garcia, 2009). از میان این عناصر، مس جزء ریزمغذی‌های ضروری و جزء ساختمانی بسیاری از پروتئین‌ها است که نقش کلیدی در فرآیندهای فیزیولوژیکی و مسیرهای متابولیکی بازی می‌کند ولی در غلظت‌های بالا شدیداً سمی بوده و آسیب‌ها و بی‌نظمی‌های فیزیولوژیک برای گیاه ایجاد می‌کند (سلیمی و عمواقایی، ۱۳۹۵). غلظت‌های سمی مس باعث کاهش جذب عناصر مفید و در نتیجه کاهش وزن تر ریشه، ساقه و برگ‌ها و وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان و به طور کلی سبب کاهش زیست توده گیاهی می‌شوند (Fuentes et al., 2006). جذب و تجمع فلزات سمی نظیر مس در بافت‌های گیاه باعث تغییرات عمده‌ای در گیاهان در سطوح ژنتیکی، بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی می‌شوند (Sarma & Environ, 2011). از جمله این تغییرات تأثیر این فلزات بر کمیت و کیفیت متابولیت‌های ثانویه

جدول ۱- نتایج حاصل از تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

| خصوصیات شیمیایی | | | | خصوصیات فیزیکی | | | | | | |
|------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------|----------------|--|-----------------|-------------------|-------------|-----------|-------|
| مس (mg.kg ⁻¹) | پتاسیم (mg.kg ⁻¹) | فسفر (mg.kg ⁻¹) | نیترژن (%) | pH | هدایت الکتریکی (ds.m ⁻¹) | کربن آلی (%) | کلاس رس (%) | سیلت (%) | شن (%) | |
| ۰/۶۵ | ۱۷۶/۱۱ | ۶/۷۳ | ۰/۱۸ | ۷/۴ | ۱/۲۴ | ۰/۸۶ | لومی شنی | ۱۵/۷۲ | ۱۷ | ۶۷/۲۸ |

دمایی مناسب (۲۶ درجه سانتیگراد در روز و ۱۵ درجه سانتیگراد در شب) در گلخانه پرورش یافتند. در هنگام رسیدگی کامل گیاه، ویژگی‌های مورفولوژیکی (طول شاخساره (ارتفاع اندام هوایی گیاه)، طول ریشه، وزن تر و خشک شاخساره و ریشه) اندازه‌گیری شدند. برای استخراج اسانس از گیاه خشک شده، از روش تقطیر با آب در دستگاه کلونجر استفاده شد (Clevenger, 1928). برای تعیین غلظت مس، ۰/۱ گرم از ریشه، اندام هوایی و تفاله (بعد از اسانس‌گیری، تفاله گیاه، هوا خشک و در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت تا ثابت ماندن مقدار وزن آن قرار گرفت (Zheljazkov & et al. 2006)) خشک شده گیاه، خرد و درون لوله‌های آزمایش ریخته شدند. سپس به هر نمونه ۴ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۶۵ درصد، ۱/۵ میلی‌لیتر پرکلریک اسید، ۱/۵ میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن اضافه شد، سپس نمونه‌ها در بن ماری یا حمام شنی در دمای ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد به مدت دو ساعت قرار داده شدند. در این مرحله محلول کاملاً بی‌رنگ شد. پس از آن، نمونه‌ها در زیر هود نگهداری شدند. سپس محلول‌ها توسط قیف و کاغذ صافی، صاف شده و حجم محلول به کمک آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد (Reeves et al., 1999). مقدار مس موجود در نمونه‌ها با دستگاه جذب اتمی Shimadzu مدل 7000AA اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با آزمون ANOVA و نرم افزار SAS (ورژن ۹/۱) انجام و مقایسه میانگین‌ها بر مبنای آزمون دانکن در سطوح احتمال یک و پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثرات منطقه و ناحیه روی صفات رشد گیاه: نتایج تجزیه و

(فرخی و همکاران، ۱۳۹۶). بذور جوانه زده (با طول ریشه‌چه حدود ۲ میلی‌متر) در محیط گلخانه کشت شدند. با توجه به هدف آزمایش، جهت اطمینان از پایین بودن میزان مس در خاک، قبل از کاشت، نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر تهیه و از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۱).

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه با ۳ تکرار انجام شد. برای اعمال تیمار مس، عنصر مس در غلظت‌های ۰، ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ (میلی‌گرم/کیلوگرم) از منبع $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ به صورت نمک‌های محلول در مقدار مشخصی آب مقطر حل و به صورت لایه لایه و یکنواخت به سطح خاک هر گلدان اسپری شد تا مخلوط یکنواخت شود. به مدت دو ماه خاک گلدان‌ها انکوباسیون شدند تا فرایند تعادل بهتر صورت گیرد (Talukder et al., 2011). تنش مس همراه با سطوح تنش خشکی شامل آبیاری تا حد ظرفیت زراعی (D₁: شاهد)، آبیاری تا ۵۰٪ ظرفیت زراعی (D₂: تنش متوسط) و آبیاری تا ۲۵٪ ظرفیت زراعی (D₃: تنش شدید) انجام شد. برای اعمال تیمار تنش خشکی پس از استقرار کامل گیاه (مرحله ۶ تا ۸ برگی)، ابتدا خاک مورد استفاده، در داخل آون با حرارت ۱۰۳ درجه سانتیگراد قرار داده و بعد از ۴۸ ساعت، وزن خاک خشک تعیین شد. سپس خاک خشک شده را در گلدانی ریخته و تا حد اشباع به آن آب اضافه و پس از خارج شدن کامل آب ثقلی، گلدان وزن شد و پس از کسر وزن گلدان و خاک خشک مقدار آب نگهداری شده در ظرفیت زراعی تعیین شد و وزن هر گلدان برای هر سه تنش محاسبه شد. بذور در گلدان‌هایی از جنس پلی‌اتیلن با قطر دهانه ۱۵ و ارتفاع ۱۷ سانتی‌متر با وزن خالی 270 ± 10 گرم در شرایط

تحلیل داده ها نشان داد که تأثیر منطقه معدنی (R_1 و R_2) بر صفات رشد گیاه معنی دار نبود اما ناحیه ($Z_{1,2,3,4}$) بر صفات طول، وزن تر و خشک ریشه تأثیر معنی داری ($P \leq 0.01$) داشت (جدول ۲). ریشه گیاه اولین منطقه جذب فلزات سنگین موجود در خاک است، کاهش طول ریشه گیاه یک تغییر سازشی با هدف کاهش سطح جذب یون های سمی می باشد (Kabir et al., 2008) و همین امر سبب کاهش رشد ریشه و در نتیجه وزن تر و خشک ریشه در غلظت های بالای مس در خاک می شود. گیاهان رشد کرده در تیمار Cu_0D_1 (شاهد) از نواحی $Z_{1,2}$ ، طول و وزن تر و خشک ریشه ی بیشتری نسبت به نواحی $Z_{3,4}$ داشتند (جداول ۳ و ۴)، که این می تواند به دلیل غلظت بالاتر مس در محیط رشد نواحی $Z_{3,4}$ و تأثیر آن در طول زمان بر کاهش رشد اندام زیرزمینی گیاه باشد (جدول ۳ و ۴). همچنین نتایج تجزیه و تحلیل داده ها نشان داد که اثر متقابل منطقه و ناحیه، روی صفات رشد معنی دار نبود (جدول ۲).

تأثیر مستقل و توأم تنش های مس و خشکی روی صفات

رشد گیاه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر غلظت های مختلف مس بر صفات رشد گیاه معنی دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲) در همه تیمارها بیشترین و کمترین میزان صفات رشد به ترتیب مربوط به تیمار Cu_{50} و Cu_{400} بود. در غلظت Cu_{50} صفات رشد نظیر طول، وزن تر و وزن خشک شاخساره و ریشه نسبت به تیمار شاهد در همه تیمارها افزایش یافت (شکل ۱). به نظر می رسد که در این غلظت گیاه توانسته است از عنصر مس استفاده بهینه کند زیرا مس در غلظت های پایین نظیر سایر ریزمغذی ها، نقش اساسی در واکنش های فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و فرایندهای متابولیکی گیاه دارد و منجر به افزایش کمی و کیفی محصول می شود (کامکار و همکاران، ۱۳۹۰). با بالا رفتن غلظت مس، رشد منفی در صفات رشد مشاهده شد. طول شاخساره و ریشه حساسیت قابل توجهی را نسبت به غلظت اضافی مس در خاک نشان دادند که این حساسیت در ریشه گیاه بیشتر بود به گونه ای که در غلظت Cu_{150} ، کاهش رشد در ریشه گیاه بیشتر از اندام

هوایی نمایان بود. در این غلظت، رشد ریشه به طور معنی داری ($P \leq 0.01$) نسبت به شاهد کاهش یافت و به تبع آن، وزن تر و خشک ریشه نیز نسبت به شاهد کاهش معنی داری ($P \leq 0.01$) یافتند در حالی که در اندام های هوایی کاهش معنی داری در طول شاخساره و زیست توده هوایی گیاه نسبت به شاهد در اکثر تیمارها مشاهده نشد و رشد شاخه های جدید در این غلظت همچنان ادامه داشت (طول ساقه در غلظت Cu_{150} ، در چهار ناحیه به طور متوسط $5/13\%$ و طول ریشه $29/35\%$ نسبت به شاهد کاهش داشتند) (شکل ۱). این نشان می دهد که گیاه شاهره نسبت به یون مس در سیستم ریشه خود حساسیت بیشتری را نشان می دهد و اثر سمیت مس به طور عمده در بافت های ریشه با جابجایی اندک به سمت شاخه ها در این غلظت مشاهده می شود. گزارشات مشابهی در جو (*Hordeum vulgare* L) (Zaltauskaitė and Sliumpaitė, 2013)، خردل چینی (*Brassica juncea* L) و کلزا (*B. napus* L) (Feigl et al., 2013) مشاهده شده است. با بالا رفتن غلظت مس (Cu_{300} و Cu_{400}) رشد منفی و کاهش شدید در تمام صفات رشد در اثر سمیت شدید مس در شاخساره و ریشه مشاهده شد که این کاهش نسبت به شاهد معنی دار ($P \leq 0.01$) بود (شکل ۱). فلزات سنگین موجود در محیط (خاک و هوا)، توسط گیاهان جذب و در غلظت های بالا به اندام های هوایی منتقل می شوند، این امر منجر به اختلال در رشد اندام هوایی گیاه می شود (Paz-Ferreiro et al., 2013). همچنین کاهش میزان جذب آب و مواد معدنی که به دلیل کمبود مواد معدنی در گیاهان و کاهش تقسیم سلول ریشه رخ می دهد باعث کاهش طول ریشه گیاهان می شود (Muhammad et al., 2015). جذب فلزات سنگین از طریق ریشه و انتقال آن به اندام هوایی، سبب کاهش جذب برخی عناصر ضروری نظیر آهن و کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش وزن تر و خشک ساقه و ریشه می شود (Fuentes et al., 2006) که این کاهش در اثر غلظت بالای فلزات سنگین نظیر مس در تحقیقات متعددی گزارش شده است (Moya et al., 1993, 2005, Papazoglou et al., 2006, Fuentes et al., 2006). از طرفی گیاه ایده آل برای تصفیه خاک از فلزات سنگین باید

جدول ۲- تجزیه واریانس تنش‌های مس و خشکی بر صفات مورد ارزیابی گیاه شاهتره در شرایط گلخانه.

| میانگین مربعات | | | | | df | منابع تغییر |
|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----|---------------|
| وزن خشک شاخساره | وزن تر ریشه | وزن تر شاخساره | طول ریشه | طول شاخساره | | |
| ۰/۲۸ ^{ns} | ۰/۱۴ ^{**} | ۰/۸۶ ^{ns} | ۴/۳۳ ^{**} | ۳/۰۸ ^{ns} | ۷ | محیط (M) |
| ۰/۵۹ ^{ns} | ۰/۰۰۳ ^{ns} | ۲/۲۳ ^{ns} | ۱/۴۶ ^{ns} | ۰/۸۹ ^{ns} | ۱ | منطقه |
| ۰/۴۴ ^{ns} | ۰/۳۰۵ ^{**} | ۱/۱۶ ^{ns} | ۹/۴۴ ^{**} | ۲/۸ ^{ns} | ۳ | ناحیه |
| ۰/۰۳ ^{ns} | ۰/۰۱ ^{ns} | ۰/۱۲ ^{ns} | ۰/۱۷ ^{ns} | ۴/۰۸ ^{ns} | ۳ | منطقه×ناحیه |
| ۱۷۸/۸۴ ^{**} | ۱۳/۴۸ ^{**} | ۱۲۵۴/۹۲ ^{**} | ۵۱۷/۷ ^{**} | ۷۱۴۵/۶۱ ^{**} | ۴ | غلظت مس (C) |
| ۱۱۹/۸۹ ^{**} | ۱۷/۶۴ ^{**} | ۸۵۶/۶۸ ^{**} | ۱۹۳/۳۶ ^{**} | ۳۴۳۱/۱ ^{**} | ۲ | خشکی (D) |
| ۰/۴ ^{**} | ۰/۱۸ ^{**} | ۲/۹۳ ^{**} | ۲/۷۲ ^{**} | ۳۳/۹۹ ^{**} | ۲۸ | M×C |
| ۰/۰۰۷ ^{ns} | ۰/۰۴۳ ^{ns} | ۰/۰۴۹ ^{ns} | ۰/۱۹ ^{ns} | ۱/۹ ^{ns} | ۱۴ | M×D |
| ۴/۱۳ ^{**} | ۰/۱۸ ^{**} | ۲۹/۴۶ ^{**} | ۲/۵۳ ^{**} | ۹۳/۹ ^{**} | ۸ | C×D |
| ۰/۰۱ ^{ns} | ۰/۰۱۳ ^{ns} | ۰/۰۸۸ ^{ns} | ۰/۱ ^{ns} | ۰/۷ ^{ns} | ۵۶ | M×C×D |
| ۰/۱۵ | ۰/۰۲۵ | ۰/۶۴ | ۰/۱۶ | ۲/۲۲ | ۲۴۰ | خطایا آزمایشی |

| غلظت مس در تفاله | اسانس | غلظت مس در ریشه | غلظت مس در شاخساره | وزن خشک ریشه | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|-----|---------------|
| ۱۰۲۹/۶۵ ^{**} | ۰/۰۰۸ ^{**} | ۱۶۰۳/۱۶ ^{**} | ۱۵۲۶/۶۸ ^{**} | ۰/۰۶۵ ^{**} | ۷ | محیط (M) |
| ۱۵۳/۶۱ ^{ns} | ۰/۰۰۸ ^{**} | ۱۹۰/۴۹ ^{ns} | ۳۴۵/۸۸ ^{ns} | ۰/۰۳ ^{ns} | ۱ | منطقه |
| ۲۳۰۶/۵۷ ^{**} | ۰/۰۱۶ ^{ns} | ۳۶۶۳/۲۴ ^{**} | ۳۳۸۹/۴۲ ^{**} | ۰/۱۴ ^{**} | ۳ | ناحیه |
| ۴۴/۷۶ ^{ns} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۱۳/۹۶ ^{ns} | ۵۷/۵۴ ^{ns} | ۰/۰۰۵ ^{ns} | ۳ | منطقه×ناحیه |
| ۵۷۶۴۳۳/۳۷ ^{**} | ۰/۲۲ ^{**} | ۹۵۲۳۲۴/۷۱ ^{**} | ۶۸۰۲۰/۹۳ ^{**} | ۳/۱۸ ^{**} | ۴ | غلظت مس (C) |
| ۸۱۷/۱۴ ^{ns} | ۰/۱۴ ^{**} | ۱۸۲۳/۸۶ ^{**} | ۶۹۵/۴۷ ^{ns} | ۲/۷ ^{**} | ۲ | خشکی (D) |
| ۴۰۱/۸۵ ^{**} | ۰/۰۰۱ ^{ns} | ۲۹۸/۳۲ ^{**} | ۳۸۳/۶۹ ^{**} | ۰/۰۴ ^{**} | ۲۸ | M×C |
| ۶/۱۷ ^{ns} | ۰/۰۰۰۵ ^{ns} | ۶/۷۸ ^{ns} | ۳/۶۰ ^{ns} | ۰/۰۰۶ ^{ns} | ۱۴ | M×D |
| ۱۴۴/۴۴ ^{ns} | ۰/۰۰۳ ^{ns} | ۱۵۸/۰۹ ^{ns} | ۱۶۲/۳۴ ^{ns} | ۰/۰۳ ^{**} | ۸ | C×D |
| ۱۵/۳۵ ^{ns} | ۰/۰۰۰۳ ^{ns} | ۱۰/۴۶ ^{ns} | ۴/۹ ^{ns} | ۰/۰۰۶ ^{ns} | ۵۶ | M×C×D |
| ۸۶/۵۴ | ۰/۰۰۰۸ | ۱۷۰/۸ | ۱۱۳/۴۲ | ۰/۰۰۷ | ۲۴۰ | خطایا آزمایشی |

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns غیر معنی‌دار.

تأثیر متقابل محیط و عنصر مس بر صفات رشد گیاه معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲). از بین چهار ناحیه، نواحی Z_3 و Z_4 از نظر صفات رشد عملکرد بهتری را در برابر غلظت‌های بالای مس نشان دادند. رشد و عملکرد گیاهان در اکوسیستم‌ها، تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر نوع گونه، اقلیم منطقه، محیط خاک و موقعیت جغرافیایی قرار دارد (حبیبی و همکاران، ۱۳۸۵) و

دارای سیستم ریشه‌ای گسترده با حداکثر تولید زیست توده در حضور غلظت بالای فلزات سنگین باشد (Chen et al 2015). رشد ریشه و اندام هوایی گیاه شاهتره در غلظت‌های بالای مس (Cu_{400} و Cu_{300}) به شدت کاهش پیدا کرد و زیست توده گیاه برای جمع‌آوری عنصر مس از خاک در غلظت‌های بالا بسیار ناچیز بود. نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات ریخت‌شناسی گیاه شاهتره تحت تأثیر توام تنش‌های خشکی و مس در معدن مس عسکری در شرایط گلخانه‌ای

| وزن تر ساقه (g/plant) | | | طول ریشه (cm) | | | طول شاخساره (cm) | | | مس (mg/kg) | ناحیه |
|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|-------|
| D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1(شاهد) | | |
| ۹/۱ ^c | ۱۴/۲ ^b | ۱۵/۹ ^{ab} | ۱۰ ^c | ۱۲/۴ ^b | ۱۳/۱ ^{ab} | ۲۶/۴ ^{de} | ۳۵/۳ ^{bc} | ۳۹/۸ ^{ab} | ۰ | Z1 |
| ۱۱/۶ ^{bc} | ۱۵/۹ ^{ab} | ۱۶/۸ ^a | ۱۱/۶ ^{bc} | ۱۳/۱ ^{ab} | ۱۳/۵ ^a | ۳۱/۳ ^{cd} | ۳۸/۲ ^{ab} | ۴۰/۹ ^a | ۵۰ | |
| ۸/۸ ^c | ۱۴/۶ ^b | ۱۵/۳ ^{ab} | ۶/۸ ^{fg} | ۸/۴ ^{de} | ۸/۹ ^d | ۲۵/۲ ^e | ۳۴/۸ ^{bc} | ۳۷/۹ ^{ab} | ۱۵۰ | |
| ۳/۶ ^{ef} | ۵/۷ ^{de} | ۶/۴ ^d | ۶/۰ ^g | ۷/۳ ^f | ۷/۶ ^{ef} | ۱۱/۷ ^{gh} | ۱۶/۱ ^{fg} | ۱۷/۹ ^f | ۳۰۰ | |
| ۲/۵ ^g | ۳/۹ ^{ef} | ۴/۴ ^e | ۴/۵ ^h | ۵/۲ ^{gh} | ۵/۶ ^g | ۷/۴ ⁱ | ۱۰/۱ ^h | ۱۱/۲ ^{gh} | ۴۰۰ | Z2 |
| ۸/۹ ^{de} | ۱۳/۸ ^{bc} | ۱۵/۵ ^{ab} | ۱۰/۰۴ ^c | ۱۲/۴ ^{۵b} | ۱۳/۰۱ ^{ab} | ۲۵/۷ ^d | ۳۵/۳ ^{۶bc} | ۳۹/۲ ^{ab} | ۰ | |
| ۱۱/۳ ^{۱d} | ۱۵/۷ ^{۲ab} | ۱۶/۶ ^{۸a} | ۱۱/۵ ^{۲bc} | ۱۳/۱ ^{ab} | ۱۳/۶ ^{۳a} | ۳۳/۴ ^{۱c} | ۳۹/۰۸ ^{ab} | ۴۱/۱ ^a | ۵۰ | |
| ۸/۵ ^{۳de} | ۱۳/۲ ^{۷c} | ۱۴/۸ ^{۷abc} | ۶/۸ ^{۷f} | ۸/۵ ^{۵de} | ۹/۰ ^d | ۲۴/۰۱ ^{de} | ۳۳/۷ ^{۳c} | ۳۷/۳ ^{۹abc} | ۱۵۰ | |
| ۴/۰۷ ^g | ۶/۳ ^{۳f} | ۷/۱ ^{ef} | ۶/۳ ^{۲f} | ۷/۸ ^e | ۸/۲ ^{de} | ۱۳/۰۷ ^g | ۱۷/۹ ^{۸f} | ۱۹/۹ ^{۳ef} | ۳۰۰ | Z3 |
| ۲/۸ ^{۶h} | ۴/۴ ^{۵g} | ۴/۹ ^{۹fg} | ۴/۴ ^{۲h} | ۵/۶ ^{۵fg} | ۶/۰ ^{۷f} | ۷/۸ ^{۵i} | ۱۲/۱ ^{۷h} | ۱۳/۵ ^{gh} | ۴۰۰ | |
| ۸/۶ ^{۱cd} | ۱۳/۳ ^{۸b} | ۱۵ ^{ab} | ۹/۸ ^{۴d} | ۱۲/۱ ^{۶c} | ۱۲/۸ ^{۳bc} | ۲۴/۴ ^{۷ef} | ۳۲/۳ ^{cd} | ۳۷/۳ ^{ab} | ۰ | |
| ۱۰/۸ ^{۴bc} | ۱۵/۳ ^{۱ab} | ۱۶/۳ ^{۱a} | ۱۱/۸ ^{۹c} | ۱۳/۴ ^{۱ab} | ۱۳/۸ ^{۸a} | ۳۱/۲ ^{۳d} | ۳۶/۲ ^{۲ab} | ۳۹/۱ ^a | ۵۰ | |
| ۸/۱ ^{۷cd} | ۱۲/۷ ^b | ۱۴/۲ ^{۴ab} | ۷/۲ ^{۱ij} | ۸/۹ ^{۸ef} | ۹/۵ ^{de} | ۲۳/۲ ^{ef} | ۳۰/۹ ^{۷d} | ۳۵/۳ ^{۹bc} | ۱۵۰ | Z4 |
| ۴/۵ ^{fg} | ۷ ^{de} | ۷/۸ ^{۵cde} | ۶/۵ ^{jk} | ۸/۰ ^{۵ghi} | ۸/۵ ^{fg} | ۱۴/۰ ^{۴ij} | ۱۸/۷ ^{۲gh} | ۲۱/۰ ^{۴fg} | ۳۰۰ | |
| ۲/۷ ^{۴h} | ۴/۸ ^{۱fg} | ۵/۵ ^{۲efg} | ۴/۵ ^{۱l} | ۵/۸ ^{۶k} | ۶/۳ ^{jk} | ۹/۸ ^{۶k} | ۱۳/۸ ^{۳ij} | ۱۶/۲ ^{hi} | ۴۰۰ | |
| ۸/۶ ^{۳cd} | ۱۳/۴ ^b | ۱۵/۰ ^{۳ab} | ۹/۸ ^{de} | ۱۲/۱ ^c | ۱۲/۷ ^{۶bc} | ۲۴/۳ ^{۳ef} | ۳۳/۴ ^{۶cd} | ۳۷/۴ ^{۳ab} | ۰ | |
| ۱۰/۸ ^{۳bc} | ۱۵/۵ ^{۱ab} | ۱۶/۴ ^{۹a} | ۱۱/۷ ^{۳cd} | ۱۳/۲ ^b | ۱۳/۷ ^{۴ab} | ۳۱/۲ ^{۳d} | ۳۷/۶ ^{۲ab} | ۳۹/۵ ^a | ۵۰ | Z4 |
| ۸/۱ ^{۸cde} | ۱۲/۷ ^b | ۱۴/۲ ^{۵ab} | ۷/۱ ^{۵i} | ۸/۸ ^{۹fg} | ۹/۴ ^{ef} | ۲۳/۰ ^{۶ef} | ۳۱/۸ ^{۲d} | ۳۵/۱ ^{۷bc} | ۱۵۰ | |
| ۴/۶ ^{۹fg} | ۷/۲ ^{۹cde} | ۸/۱ ^{۸cde} | ۶/۵ ^{ij} | ۸/۰ ^{۶gh} | ۸/۵ ^{gh} | ۱۴/۴ ^{۵jk} | ۱۹/۸ ^{۷gh} | ۲۲/۰ ^{۴fg} | ۳۰۰ | |
| ۳/۷ ^g | ۵/۹ ^{۴efg} | ۶/۶ ^{۶def} | ۴/۸ ^{۱k} | ۵/۹ ^{۷i} | ۶/۴ ^{۱ij} | ۹/۷ ^{۳l} | ۱۴/۵ ^{۱jk} | ۱۶/۳ ^{ij} | ۴۰۰ | |

در هر ستون حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

را تحت تأثیر قرار داده و با تأثیر بر فرایندهای آنزیمی، که به طور مستقیم با پتانسیل آب کنترل می‌شوند، بر رشد گیاه اثر منفی می‌گذارد (Zhang et al., 2015) و سبب کاهش ارتفاع گیاه می‌گردد. گزارشات مشابهی در زمینه کاهش طول ساقه در نتیجه افزایش تنش خشکی مشاهده شده است (Chai et al., 2016, Khalil et al., 2018). طول ریشه نیز در اثر تنش خشکی کاهش یافت اما میزان کاهش آن نسبت به اندام هوایی کمتر بود. طول ریشه در تیمارهای شدید و متوسط خشکی، نسبت به شاهد به طور متوسط در چهار ناحیه به ترتیب ۳۴/۵٪ و ۲۳/۵٪ کاهش نشان داد (شکل ۲). در مواجهه گیاهان با تنش خشکی، حتی اگر طول اندام‌ها کاهش یابد مقدار کاهش

از آنجا که بذور گیاهان نواحی Z₃ و Z₄ از مناطق با غلظت بالای مس جمع‌آوری شده‌اند لذا می‌توان انتظار داشت که این بذور با گذشت زمان سازگاری بالاتری را نسبت به غلظت بالای این عنصر پیدا نمایند.

نتایج تأثیر تیمارهای مختلف خشکی نشان داد که افزایش تنش خشکی منجر به کاهش معنی‌دار ($P \leq 0.01$) صفات رشد گیاه شد (جدول ۲). بیشترین میزان طول شاخساره در تیمار شاهد و کمترین میزان آن در حالت تنش شدید خشکی بود. طول شاخساره در تیمارهای شدید و متوسط نسبت به شاهد به طور متوسط در چهار ناحیه به ترتیب ۱۳/۴٪ و ۳۵٪ کاهش نشان داد (شکل ۲). تنش خشکی فرایندهای فتوسنتز، تنفس و تعرق

ادامه جدول ۳-

| وزن خشک ریشه (g/plant) | | | وزن خشک شاخساره (g/plant) | | | وزن تر ریشه (g/plant) | | | مس (mg/kg) | ناحیه |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|------------|-------|
| D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | | |
| ۱/۴۵ ^d | ۱/۶۹ ^c | ۱/۷۷ ^{ab} | ۳/۶ ^b | ۵/۴۶ ^a | ۶/۱ ^a | ۱/۸۸ ^g | ۲/۵۷ ^c | ۲/۸ ^{ab} | . | |
| ۱/۶ ^c | ۱/۷ ^{bc} | ۱/۷۸ ^a | ۴/۳۴ ^{ab} | ۵/۷۳ ^a | ۶/۲۵ ^a | ۲/۲۷ ^e | ۲/۷۱ ^{ab} | ۲/۸۶ ^a | ۵۰ | |
| ۱/۳ ^e | ۱/۴۶ ^d | ۱/۵۲ ^d | ۳/۴۶ ^{bc} | ۵/۲۵ ^a | ۵/۸۷ ^a | ۱/۵۷ ^h | ۲/۳۶ ^d | ۲/۱۶ ^f | ۱۵۰ | Z1 |
| ۱/۲ ^f | ۱/۳۱ ^e | ۱/۳۵ ^e | ۱/۴۶ ^{de} | ۲/۲۲ ^{cd} | ۲/۴۸ ^{bcd} | ۱/۳۳ ⁱ | ۱/۷۷ ^g | ۱/۸۹ ^g | ۳۰۰ | |
| ۰/۷۱ ^g | ۱/۰۹ ^{fg} | ۱/۲۲ ^f | ۱/۰۵ ^e | ۱/۶ ^d | ۱/۷۹ ^d | ۰/۸۷ ^j | ۱/۲۵ ⁱ | ۱/۳۵ ⁱ | ۴۰۰ | |
| ۱/۴۴ ^{def} | ۱/۶۸ ^{abc} | ۱/۷۶ ^{ab} | ۳/۵۴ ^{cd} | ۵/۴۳ ^{ab} | ۶/۰۷ ^{ab} | ۱/۹۲ ^e | ۲/۵۹ ^c | ۲/۸ ^{ab} | . | |
| ۱/۶۱ ^{cd} | ۱/۷۱ ^{ab} | ۱/۷۹ ^a | ۴/۳۲ ^c | ۵/۷۹ ^{ab} | ۶/۳۶ ^a | ۲/۳۴ ^{cd} | ۲/۷۵ ^{ab} | ۲/۸۷ ^a | ۵۰ | Z2 |
| ۱/۳۴ ^{fg} | ۱/۵۳ ^{cde} | ۱/۶ ^{bcd} | ۳/۳۳ ^{cd} | ۵/۱۱ ^b | ۵/۷۲ ^{ab} | ۱/۷ ^f | ۲/۲۱ ^d | ۲/۳۷ ^d | ۱۵۰ | |
| ۱/۲۲ ^g | ۱/۳۴ ^{fg} | ۱/۳۸ ^{efg} | ۱/۶۴ ^e | ۲/۵۲ ^{de} | ۲/۸۲ ^{cd} | ۱/۳۵ ^g | ۱/۸۶ ^{ef} | ۱/۹۸ ^e | ۳۰۰ | |
| ۰/۷۳ ^h | ۱/۱۲ ^{gh} | ۱/۲۵ ^g | ۱/۱۹ ^f | ۱/۸۳ ^e | ۲/۰۴ ^{de} | ۰/۷ ⁱ | ۱/۲۳ ^g | ۱/۴۲ ^g | ۴۰۰ | |
| ۱/۴۴ ^{cde} | ۱/۶۷ ^{ab} | ۱/۷۵ ^a | ۳/۳۹ ^{de} | ۵/۱۹ ^{bc} | ۵/۸ ^{ab} | ۱/۸۴ ^{fg} | ۲/۴۹ ^c | ۲/۷۱ ^{ab} | . | |
| ۱/۶ ^b | ۱/۷۲ ^a | ۱/۷۸ ^a | ۴/۴۱ ^{cd} | ۵/۷۸ ^{ab} | ۶/۳ ^a | ۲/۲۷ ^d | ۲/۶۹ ^{ab} | ۲/۷۷ ^a | ۵۰ | |
| ۱/۳۵ ^{def} | ۱/۵۵ ^{bc} | ۱/۶۱ ^b | ۳/۱۶ ^{def} | ۴/۸۳ ^c | ۵/۴ ^{bc} | ۱/۶۶ ^{gh} | ۲/۱۸ ^{de} | ۲/۳۵ ^{cd} | ۱۵۰ | Z3 |
| ۱/۲۴ ^{fg} | ۱/۳۷ ^{def} | ۱/۴۱ ^{de} | ۱/۷۹ ^{hi} | ۲/۷۵ ^{ef} | ۳/۰۷ ^{def} | ۱/۴۹ ^{hi} | ۱/۸۸ ^{fg} | ۲/۰۱ ^{ef} | ۳۰۰ | |
| ۱/۰۹ ⁱ | ۱/۲۱ ^h | ۱/۲۸ ^{fg} | ۱/۴۵ ⁱ | ۲/۱۵ ^{gh} | ۲/۲۲ ^{gh} | ۱/۲ ⁱ | ۱/۴۳ ^{hi} | ۱/۵۵ ^h | ۴۰۰ | |
| ۱/۴۴ ^{de} | ۱/۶۷ ^{ab} | ۱/۷۵ ^a | ۳/۴۸ ^{de} | ۵/۲۸ ^{bc} | ۵/۹ ^{ab} | ۱/۸۲ ^{ef} | ۲/۴۷ ^c | ۲/۷۶ ^{ab} | . | |
| ۱/۵۸ ^{cd} | ۱/۷۱ ^a | ۱/۷۸ ^a | ۴/۶۸ ^{cd} | ۶/۰ ^{ab} | ۶/۳۳ ^a | ۲/۲۶ ^d | ۲/۶۵ ^{ab} | ۲/۸۲ ^a | ۵۰ | |
| ۱/۳۵ ^{efg} | ۱/۵۳ ^{cd} | ۱/۶۲ ^{bc} | ۳/۲۱ ^{def} | ۴/۸۷ ^c | ۵/۴ ^{bc} | ۱/۶۹ ^f | ۲/۲۴ ^d | ۲/۳۸ ^{cd} | ۱۵۰ | Z4 |
| ۱/۲۴ ^{gh} | ۱/۳۷ ^{ef} | ۱/۴۱ ^{def} | ۱/۹ ^{hi} | ۲/۹ ^{efg} | ۳/۲۵ ^{def} | ۱/۴۹ ^g | ۱/۸۷ ^{ef} | ۲/۰ ^e | ۳۰۰ | |
| ۱/۰۲ ⁱ | ۱/۳۱ ^{fgh} | ۱/۳۶ ^{efg} | ۱/۳۵ ^j | ۲/۲ ^{ghi} | ۲/۳۲ ^{fgh} | ۱/۱۲ ^h | ۱/۴۵ ^g | ۱/۵۳ ^g | ۴۰۰ | |

در هر ستون حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

وزن تر ریشه به ترتیب ۷/۲۲٪ و ۳۵/۱٪، وزن خشک شاخساره به ترتیب ۱۱/۴۷٪ و ۴۱/۵۵٪ و وزن خشک ریشه به ترتیب ۵/۱۴٪ و ۲۰/۷۱٪ کاهش نشان دادند (شکل ۲). روند عمومی که گیاهان در شرایط تنش خشکی با آن روبرو هستند کاهش تولید وزن تر و خشک گیاه است که به نظر می رسد در اثر کاهش سطح برگ و در نتیجه کاهش فتوسنتز رخ می دهد (Farooq et al., 2009). کاهش زیست توده هوایی و زیرزمینی در اثر تنش خشکی توسط محققان زیادی گزارش شده است (Alishah et al., 2006, Bahreininejad et al., 2013). تجزیه و تحلیل داده ها نشان داد که اثر متقابل محیط و تنش خشکی بر صفات رشد گیاه معنی دار نبود (جدول ۲).

تأثیر توأم عنصر مس و تنش خشکی بر صفات رشد گیاه

در اندام زیرزمینی به مراتب کمتر از اندام هوایی است تا بتواند با ایجاد تعادل در نسبت ساقه به ریشه، شرایط تنش را بهتر تحمل کند (Zhang et al., 2012) این کاهش در گیاه نعناع ژاپنی (Japanese mint) (Misra & Srivastava, 2000) و بومادران (*Achillea millefolium*) (لباسچی و شریفی آشورآبادی، ۱۳۸۲) گزارش شده است. بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تنش خشکی بر وزن اندام هوایی و ریشه گیاه شاهره نیز معنی دار بود ($P \leq 0.01$) (جدول ۲) به طوری که بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه مربوط به تیمار شاهد و کمترین آن در تیمار تنش شدید خشکی مشاهده شد. در تیمارهای شدید و متوسط نسبت به شاهد به طور متوسط در چهار ناحیه وزن تر اندام هوایی به ترتیب ۱۱/۳۳٪ و ۴۲/۵۸

جدول ۴- مقایسه میانگین صفات ریخت‌شناسی گیاه شاهتره تحت تأثیر توام تنش‌های خشکی و مس در معدن مس رابر در شرایط گلخانه‌ای

| وزن تر ساقه (g/plant) | | | طول ریشه (cm) | | | طول شاخساره (cm) | | | مس (mg/kg) | ناحیه |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|------------|-------|
| D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | | |
| ۹/۲۵ ^e | ۱۴/۳۶ ^{cd} | ۱۶/۱ ^{ab} | ۱۰/۲۳ ^{bc} | ۱۲/۶۹ ^a | ۱۳/۴ ^a | ۲۶/۵۵ ^e | ۳۶/۵۳ ^{cd} | ۴۰/۵ ^{ab} | ۰ | Z1 |
| ۱۱/۴۶ ^d | ۱۵/۹۳ ^{ab} | ۱۷/۰۵ ^a | ۱۱/۸۷ ^b | ۱۳/۷ ^a | ۱۳/۸۱ ^a | ۳۱/۴۱ ^{de} | ۳۹/۵ ^{abc} | ۴۱/۶۲ ^a | ۵۰ | |
| ۸/۹ ^e | ۱۳/۸۱ ^{cd} | ۱۵/۴۹ ^{bc} | ۶/۹ ^{fg} | ۸/۶ ^{de} | ۹/۱ ^{cd} | ۲۵/۷۳ ^e | ۳۵/۳۹ ^d | ۳۹/۲۴ ^{abc} | ۱۵۰ | |
| ۳/۷ ^g | ۵/۷۴ ^f | ۶/۴۴ ^f | ۶/۰۷ ^g | ۷/۴۵ ^{ef} | ۷/۸۹ ^{def} | ۱۱/۹۴ ^g | ۱۶/۴۳ ^f | ۱۸/۲۲ ^f | ۳۰۰ | |
| ۲/۶ ^h | ۴/۰۴ ^{fg} | ۴/۵۳ ^{fg} | ۴/۰۷ ⁱ | ۵/۴۵ ^h | ۵/۸۵ ^{gh} | ۷/۴۹ ⁱ | ۱۰/۳ ^{gh} | ۱۱/۴۲ ^g | ۴۰۰ | Z2 |
| ۹/۱۳ ^e | ۱۴/۱۸ ^{cd} | ۱۵/۹ ^{ab} | ۱۰/۳۱ ^d | ۱۲/۴۴ ^c | ۱۳/۴ ^{ab} | ۲۵/۷۶ ^e | ۳۵/۴ ^{cd} | ۳۹/۳ ^{ab} | ۰ | |
| ۱۱/۵۵ ^d | ۱۶/۰۸ ^{ab} | ۱۷/۲ ^a | ۱۲/۰۴ ^c | ۱۲/۹۴ ^{bc} | ۱۳/۹۵ ^a | ۳۱/۰ ^{de} | ۳۹/۱۱ ^{ab} | ۴۱/۲ ^a | ۵۰ | |
| ۸/۷۶ ^{ef} | ۱۳/۶ ^d | ۱۵/۲۵ ^{bc} | ۷/۰۶ ^{gh} | ۸/۵۴ ^{ef} | ۹/۲ ^e | ۲۴/۵۷ ^e | ۳۳/۷۷ ^d | ۳۷/۵ ^{bc} | ۱۵۰ | |
| ۴/۱۹ ^h | ۶/۵ ^g | ۷/۲۹ ^{fg} | ۶/۴۸ ^h | ۷/۷۹ ^{fg} | ۸/۳۸ ^f | ۱۲/۱ ^g | ۱۷/۰ ^f | ۱۸/۹۸ ^f | ۳۰۰ | Z3 |
| ۲/۹ ⁱ | ۴/۵۷ ^h | ۵/۱۲ ^{gh} | ۴/۳۲ ^j | ۵/۷۸ ⁱ | ۶/۲ ^{hi} | ۷/۸ ⁱ | ۱۰/۸۳ ^{gh} | ۱۱/۹ ^g | ۴۰۰ | |
| ۸/۷۳ ^{de} | ۱۳/۵۶ ^{bc} | ۱۵/۲ ^{ab} | ۱۰/۰۲ ^{cd} | ۱۲/۴ ^b | ۱۳/۱ ^{ab} | ۲۴/۳ ^{ef} | ۳۴/۳۶ ^{cd} | ۳۸/۱ ^{ab} | ۰ | |
| ۱۱/۱۷ ^{cd} | ۱۵/۴۸ ^{ab} | ۱۶/۵۴ ^a | ۱۱/۹۲ ^{bc} | ۱۳/۰ ^{ab} | ۱۳/۸۱ ^a | ۲۹/۴۷ ^{de} | ۳۸/۰۲ ^{ab} | ۳۹/۹۴ ^a | ۵۰ | |
| ۸/۳ ^{def} | ۱۲/۹ ^c | ۱۴/۴۳ ^{bc} | ۷/۳۵ ^{gh} | ۹/۱۷ ^{de} | ۹/۷ ^{def} | ۲۳/۰۶ ^{ef} | ۳۲/۶ ^d | ۳۶/۱۶ ^{bc} | ۱۵۰ | Z4 |
| ۴/۵۷ ^{hi} | ۷/۱ ^{efg} | ۷/۹۶ ^{def} | ۶/۶۴ ^{hi} | ۸/۲۱ ^{efg} | ۸/۶۷ ^{ef} | ۱۳/۹۴ ^j | ۱۹/۷۱ ^{gh} | ۲۱/۸۶ ^{fg} | ۳۰۰ | |
| ۳/۷ ⁱ | ۵/۸۷ ^{gh} | ۶/۶۱ ^{fg} | ۴/۰ ^j | ۶/۰۲ ⁱ | ۶/۴۷ ^{hi} | ۹/۷۸ ^k | ۱۴/۶۶ ⁱ | ۱۶/۴۷ ^{hi} | ۴۰۰ | |
| ۸/۷۳ ^{de} | ۱۳/۵۳ ^{bc} | ۱۵/۲۱ ^{ab} | ۹/۸۹ ^{cd} | ۱۲/۲۲ ^b | ۱۲/۹ ^a | ۲۴/۲۳ ^{ef} | ۳۳/۳۸ ^{cd} | ۳۷/۷ ^{ab} | ۰ | |
| ۱۱/۲۵ ^c | ۱۵/۵۷ ^{ab} | ۱۶/۶۸ ^a | ۱۱/۵۸ ^{bc} | ۱۳/۰۳ ^a | ۱۳/۵ ^a | ۲۵/۸۲ ^e | ۳۵/۵۴ ^{bc} | ۳۹/۴ ^a | ۵۰ | Z4 |
| ۸/۲۷ ^{def} | ۱۲/۸۳ ^{bc} | ۱۴/۶۲ ^b | ۷/۲۲ ^g | ۸/۹ ^e | ۹/۵ ^d | ۲۳/۰ ^f | ۳۱/۶۴ ^d | ۳۵/۰۸ ^{bc} | ۱۵۰ | |
| ۴/۵۵ ^{hi} | ۷/۳۶ ^{efg} | ۸/۲۹ ^{def} | ۶/۵۸ ^h | ۸/۱ ^f | ۸/۵۹ ^{ef} | ۱۴/۴ ^j | ۱۹/۸۳ ^{gh} | ۲۱/۹۸ ^{fg} | ۳۰۰ | |
| ۳/۶ ⁱ | ۶/۰ ^{gh} | ۶/۷۴ ^{fg} | ۴/۰۸ ^j | ۶/۰۵ ^{hi} | ۶/۵ ^h | ۹/۹۶ ^k | ۱۴/۴۷ ^j | ۱۶/۲۶ ^{ij} | ۴۰۰ | |

در هر ستون حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد می باشد.

تحمل کند به طوری که در این غلظت در تیمارهای متوسط و شدید خشکی، به طور متوسط در چهار ناحیه به ترتیب، ارتفاع ساقه ۵/۹٪ و ۲۰/۵۶٪، طول ریشه ۳/۵۹٪ و ۱۴/۷۲٪، وزن تر اندام هوایی ۵/۴۸٪ و ۳۱/۴۹٪، وزن تر ریشه ۴/۱۲٪ و ۱۸/۷۲٪، وزن خشک اندام هوایی ۸/۳۵٪ و ۳۰٪ و وزن خشک ریشه ۳/۰۳٪ و ۹/۹۶٪ کاهش نشان دادند که این روند تغییرات با سایر تیمارهای مس متفاوت است که نشان از تأثیر عنصر مس بر کاهش تأثیر تنش خشکی دارد (جدول ۳ و ۴). ریزمغذی‌ها نظیر مس فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت را افزایش داده و باعث افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی می‌شوند (Cakmak, 2000). این نتیجه مطابق با نتایج مطالعات

معنی دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲). بیشترین میزان صفات رشد در تیمار $Cu_{50}D_1Z_1R_2$ برای طول شاخساره (۴۱/۶۲ سانتی‌متر) و وزن تر ریشه (۲/۹۱ گرم) و $Cu_{50}D_1Z_2R_2$ برای طول ریشه (۱۳/۹۵ سانتی‌متر)، وزن تر ساقه (۱۷/۲ گرم)، وزن خشک شاخساره (۶/۴۶ گرم) و وزن خشک ریشه (۱/۸۳ گرم) و کمترین میزان صفات رشد در تیمارهای $Cu_{400}D_3Z_1R_1$ برای طول (۷/۴ سانتی‌متر)، وزن تر (۲/۵ گرم) و وزن خشک (۱/۰۵ گرم) شاخساره و وزن خشک ریشه (۰/۷۱ گرم) و $Cu_{400}D_3Z_2R_1$ برای طول ریشه (۴ سانتی‌متر) و برای وزن تر ریشه (۰/۷ گرم) بود (جدول ۳ و ۴). در تیمار Cu_{50} گیاه شاهتره تنش ناشی از کمبود آب را بهتر توانست

ادامه جدول ۴-

| وزن خشک ریشه (g/plant) | | | وزن خشک شاخساره (g/plant) | | | وزن تر ریشه (g/plant) | | | مس (mg/kg) | ناحیه |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|------------|-------|
| D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | D3 | D2 | D1 | | Z1 |
| ۱/۴۶ ^{cd} | ۱/۷ ^{ab} | ۱/۷۹ ^a | ۳/۶۸ ^d | ۵/۶۴ ^{bc} | ۶/۳ ^a | ۱/۹۱ ^{ef} | ۲/۶۱ ^c | ۲/۸۵ ^{ab} | . | |
| ۱/۶۶ ^b | ۱/۷۲ ^{ab} | ۱/۸ ^a | ۴/۶۱ ^{cd} | ۶/۱۲ ^{ab} | ۶/۴۵ ^a | ۲/۱۳ ^d | ۲/۷۳ ^{bc} | ۲/۹۱ ^a | ۵۰ | |
| ۱/۳۱ ^{de} | ۱/۴۷ ^{cd} | ۱/۵۳ ^{bc} | ۳/۵۴ ^d | ۵/۴۲ ^c | ۶/۰۶ ^{ab} | ۱/۵۸ ^g | ۲/۰۳ ^{de} | ۲/۱۹ ^d | ۱۵۰ | |
| ۱/۲ ^e | ۱/۳۱ ^{de} | ۱/۳۵ ^{cde} | ۱/۴۹ ^f | ۲/۲۹ ^e | ۲/۵۶ ^e | ۱/۳۴ ^h | ۱/۷۹ ^f | ۱/۹۱ ^{ef} | ۳۰۰ | |
| ۰/۷۲ ^f | ۱/۰۹ ^{ef} | ۱/۲۲ ^e | ۱/۰۸ ^g | ۱/۶۶ ^{ef} | ۱/۸۵ ^{ef} | ۰/۷۲ ⁱ | ۱/۲۸ ^h | ۱/۴۷ ^{gh} | ۴۰۰ | |
| ۱/۴۵ ^{de} | ۱/۷۲ ^{ab} | ۱/۸ ^a | ۳/۵۶ ^e | ۵/۴۶ ^{cd} | ۶/۱ ^{ab} | ۱/۸۸ ^{de} | ۲/۵۷ ^a | ۲/۸ ^a | . | |
| ۱/۶۷ ^{bc} | ۱/۷۵ ^{ab} | ۱/۸۳ ^a | ۴/۵۷ ^{de} | ۶/۰۶ ^{ab} | ۶/۴۶ ^a | ۲/۰۹ ^{bc} | ۲/۶۹ ^a | ۲/۸۵ ^a | ۵۰ | Z2 |
| ۱/۳۵ ^{ef} | ۱/۵۷ ^{cd} | ۱/۶۳ ^{bc} | ۳/۳۵ ^e | ۵/۱۴ ^d | ۵/۷۵ ^{bc} | ۱/۶۷ ^e | ۲/۱۹ ^{bc} | ۲/۳۷ ^b | ۱۵۰ | |
| ۱/۲۲ ^f | ۱/۳۶ ^{ef} | ۱/۴ ^e | ۱/۸۵ ^g | ۲/۵۳ ^f | ۲/۸۳ ^f | ۱/۳۷ ^f | ۱/۸۵ ^{de} | ۱/۹۷ ^{cd} | ۳۰۰ | |
| ۰/۷۴ ^g | ۱/۱۴ ^{fg} | ۱/۲۷ ^f | ۱/۱۹ ^h | ۱/۸۳ ^g | ۲/۴ ^{fg} | ۰/۷۵ ^g | ۱/۳۲ ^f | ۱/۵۲ ^{ef} | ۴۰۰ | |
| ۱/۴۴ ^{de} | ۱/۷ ^{abc} | ۱/۷۹ ^{ab} | ۳/۵۱ ^{ef} | ۵/۳۸ ^{cd} | ۶/۰۱ ^{ab} | ۱/۸۸ ^{fg} | ۲/۵۶ ^c | ۲/۷۹ ^{ab} | . | |
| ۱/۶۶ ^{bc} | ۱/۷۳ ^{abc} | ۱/۸۱ ^a | ۴/۱۳ ^e | ۶/۰۶ ^{ab} | ۶/۳۸ ^a | ۲/۱ ^{ef} | ۲/۶۸ ^{bc} | ۲/۸۶ ^a | ۵۰ | |
| ۱/۳۶ ^{ef} | ۱/۵۷ ^{cd} | ۱/۶۵ ^{bc} | ۳/۲۷ ^{efg} | ۵/۰۱ ^d | ۵/۶ ^{bc} | ۱/۶۹ ^{gh} | ۲/۲۳ ^{de} | ۲/۴۲ ^{cd} | ۱۵۰ | Z3 |
| ۱/۲۴ ^{fg} | ۱/۳۸ ^{ef} | ۱/۴۳ ^{de} | ۱/۸۶ ^{jk} | ۲/۸۵ ^{gh} | ۳/۱۸ ^{fg} | ۱/۵۲ ⁱ | ۱/۹۲ ^{fg} | ۲/۰۵ ^{ef} | ۳۰۰ | |
| ۱/۱۹ ^g | ۱/۳۴ ^{efg} | ۱/۳۸ ^{ef} | ۱/۵ ^k | ۲/۳ ^{ij} | ۲/۵۷ ^{hi} | ۱/۲۳ ^j | ۱/۶۷ ^{hi} | ۱/۸۹ ^h | ۴۰۰ | |
| ۱/۴۳ ^{cde} | ۱/۶۸ ^{ab} | ۱/۷۷ ^{ab} | ۳/۵ ^{ef} | ۵/۳۷ ^{cd} | ۶/۰ ^{ab} | ۱/۸۶ ^{cde} | ۲/۳۶ ^{abc} | ۲/۷۵ ^a | . | |
| ۱/۶۷ ^{ab} | ۱/۷۱ ^{ab} | ۱/۸۱ ^a | ۴/۵۹ ^{de} | ۶/۰۹ ^{ab} | ۶/۴۳ ^a | ۲/۰۹ ^{bcd} | ۲/۴۹ ^{ab} | ۲/۸۲ ^a | ۵۰ | |
| ۱/۳۶ ^{def} | ۱/۵۸ ^{bc} | ۱/۶۵ ^{ab} | ۳/۲۳ ^{ef} | ۴/۹۵ ^d | ۵/۵۳ ^{bc} | ۱/۷ ^{de} | ۲/۱۱ ^{bcd} | ۲/۴۳ ^{ab} | ۱۵۰ | |
| ۱/۲۳ ^f | ۱/۳۷ ^{def} | ۱/۴۲ ^{cde} | ۱/۹۲ ^h | ۲/۹۵ ^{fg} | ۳/۳ ^{ef} | ۱/۵۱ ^{de} | ۱/۸۱ ^{bcd} | ۲/۰۷ ^{bcd} | ۳۰۰ | Z4 |
| ۱/۱ ^g | ۱/۳۴ ^{def} | ۱/۳۷ ^{def} | ۱/۵۲ ⁱ | ۲/۳۴ ^h | ۲/۶۲ ^{gh} | ۱/۳۸ ^e | ۱/۷۵ ^{cde} | ۱/۹۶ ^{cde} | ۴۰۰ | |

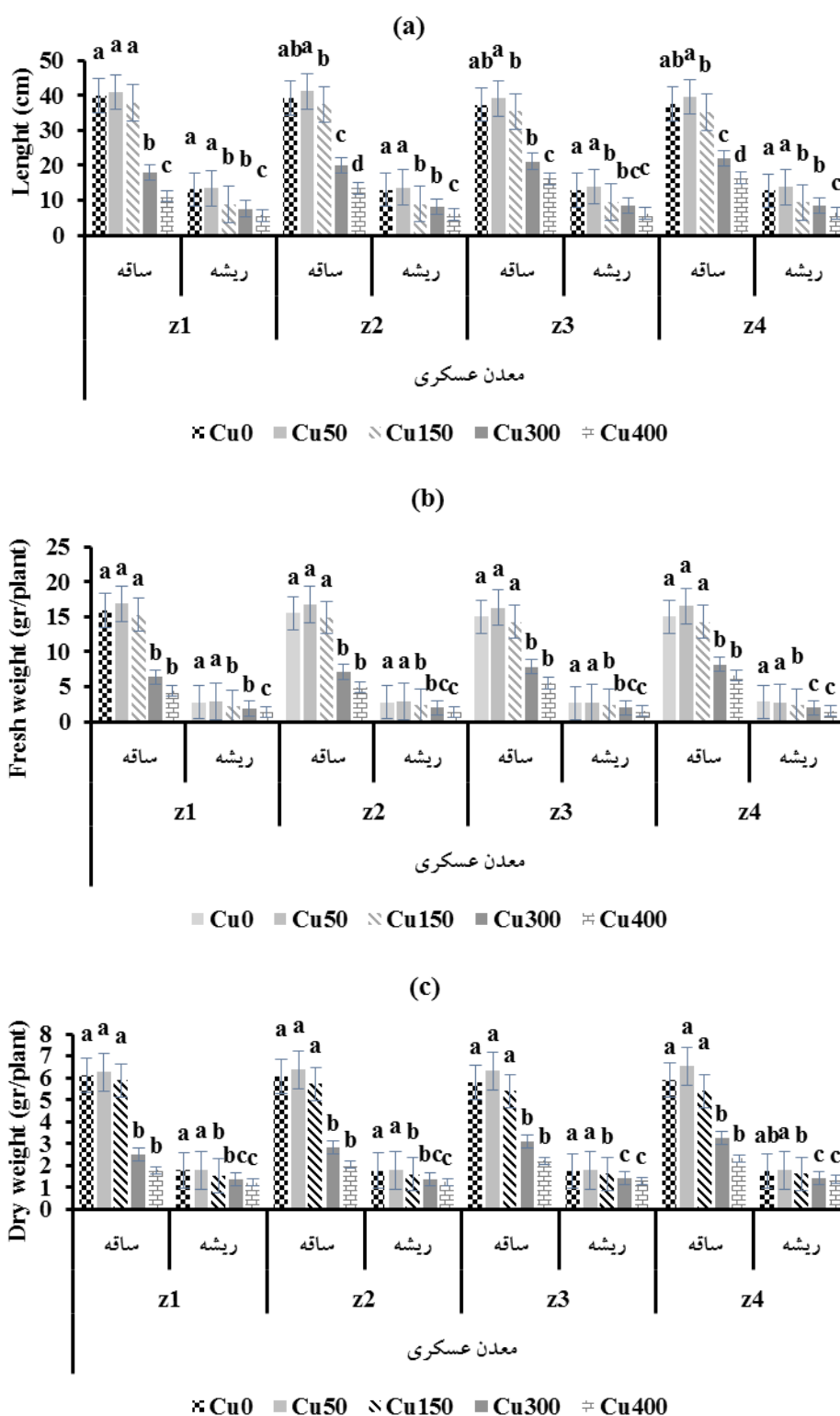
در هر ستون حروف مشابه بیانگر عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد می باشد.

تنش‌های خشکی و مس بر صفات رشد گیاه معنی دار نبود (جدول ۲).

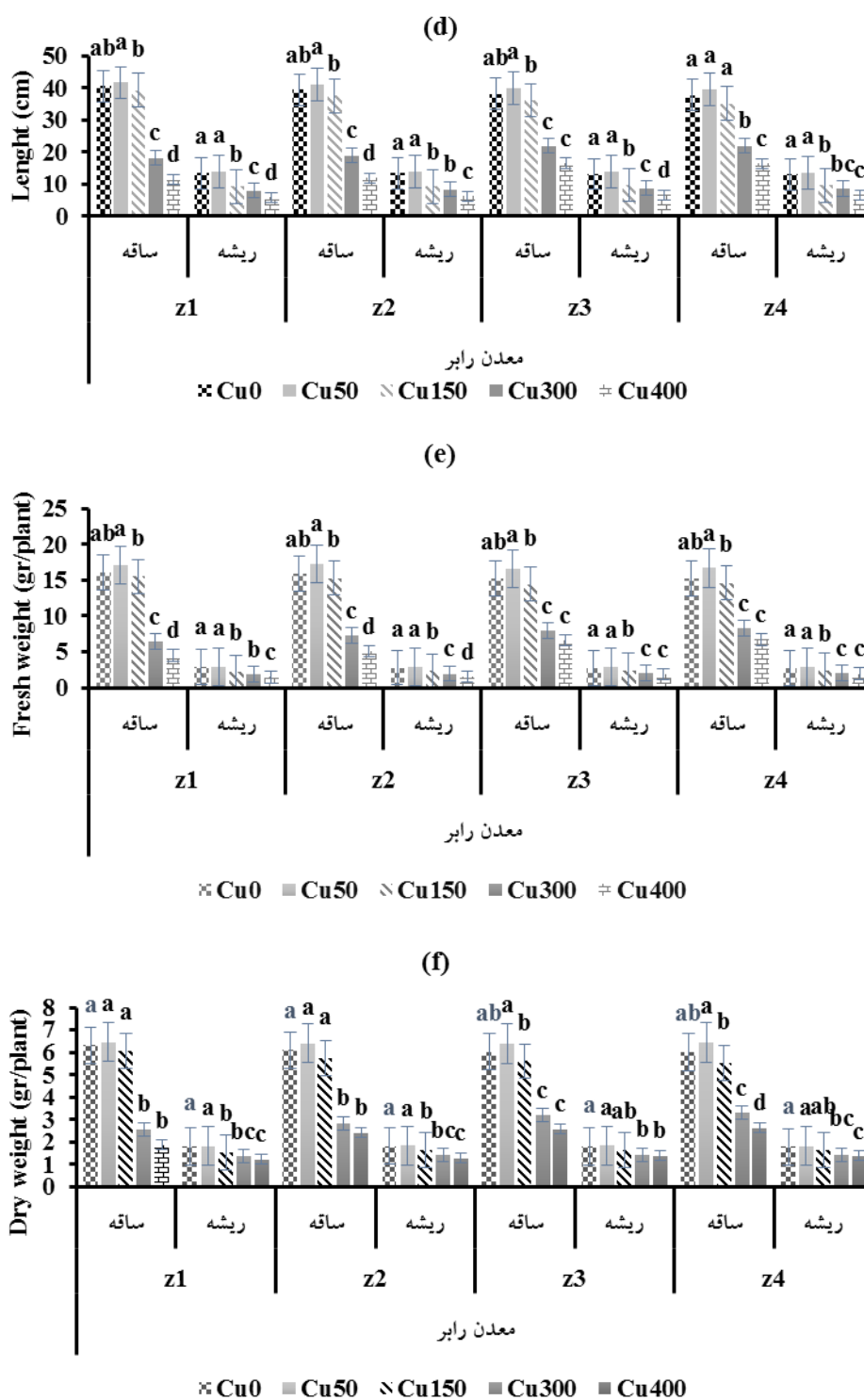
نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که سطوح پایین مس، اثر تنش خشکی بر صفات رشد گیاه را کاهش داد اما برهمکنش منفی یا مثبت بین تنش خشکی و عنصر مس در سطوح بالای مس روی صفات رشد دیده نشد. همچنین، تنش خشکی و عنصر مس در تمام سطوح مس اثر افزایشی یا کاهش‌دهنده در تولید اسانس بر هم نداشتند. در جذب مس توسط اندام هوایی و ریشه گیاه، یک رابطه تعاملی در جهت مثبت بین عنصر مس و تنش خشکی مشاهده شد به طوری که با بالا رفتن میزان

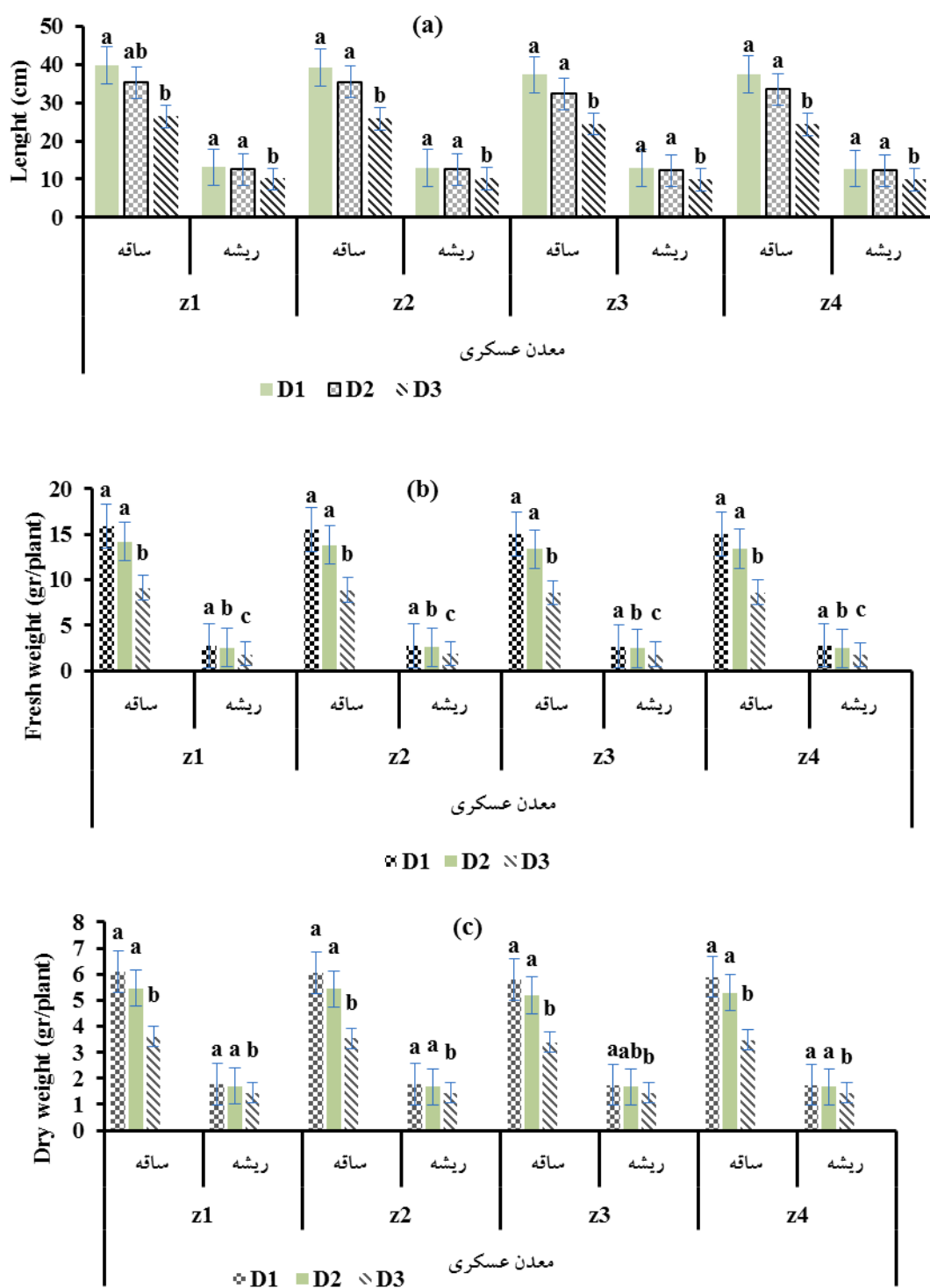
Waraich و همکاران (۲۰۱۱) و Ahanger و همکاران (۲۰۱۶) مبنی بر تأثیر ریزمغذی‌ها بر کاهش اثر تنش خشکی است. در غلظت‌های بالاتر مس (Cu_{300} , Cu_{150} , Cu_{400}) گیاهان رشد کرده در شرایط تنش متوسط (D_2) و شدید خشکی (D_3)، کوچکتر بودند و تأثیر دو تنش مس و خشکی را با هم نشان دادند ولی اثر افزایشی بین دو تنش در آنها دیده نشد. بدین معنی که در تیمارهای Cu_{150} , Cu_{300} و Cu_{400} ، درصد کاهش صفات رشد در تنش‌های متوسط و شدید خشکی مشابه روند کاهش در تیمار Cu_0 بود (جدول ۳ و ۴). این نتایج با تحقیقات صورت گرفته روی گیاه افرای قرمز (*Acer rubrum L.*) مشابه است (Dilini gardiyehewa de silva et al., 2011). نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان داد که تأثیر متقابل محیط و



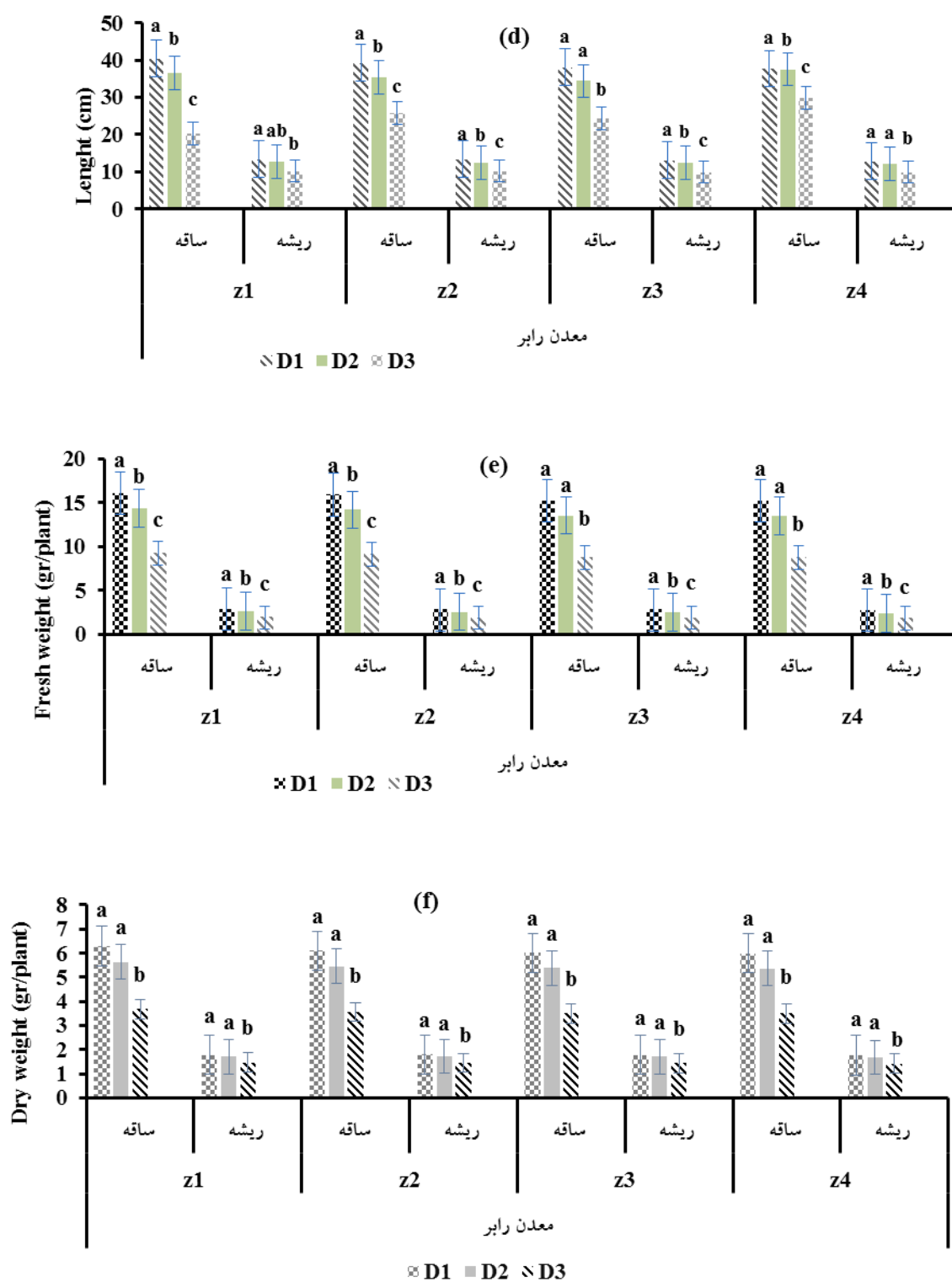
شکل ۱- تأثیر عنصر مس در معدن عسکری بر طول (a)، وزن تر (b) و وزن خشک (c) ریشه و ساقه گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. Cu0: شاهد، Cu50: غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu150: غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu300: غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu400: غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس. Z1: ناحیه ۱، Z2: ناحیه ۲، Z3: ناحیه ۳، Z4: ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) ندارند.



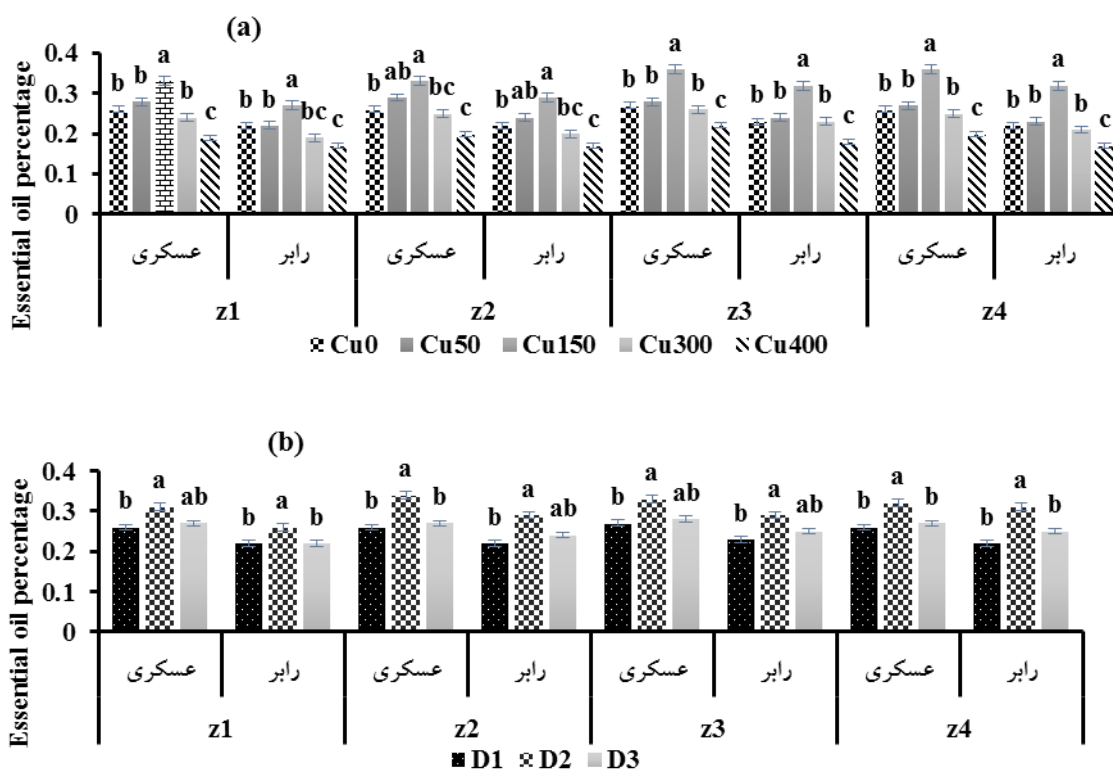
ادامه شکل ۱- تأثیر عنصر مس در معدن رابر بر طول (d)، وزن تر (e) و وزن خشک (f) ریشه و ساقه گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. Cu0: شاهد، Cu50: غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu150: غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu300: غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu400: غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس. Z1: ناحیه ۱، Z2: ناحیه ۲، Z3: ناحیه ۳، Z4: ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) ندارند.



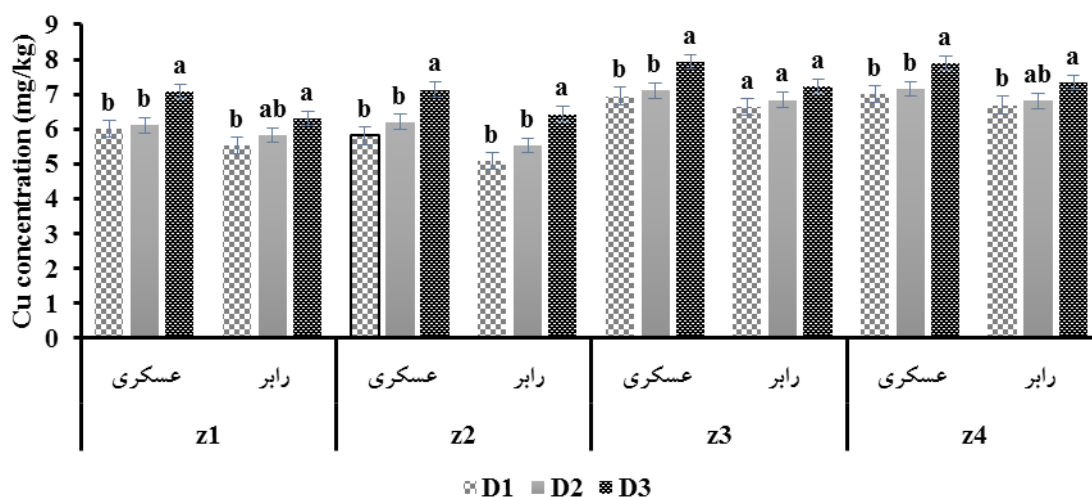
شکل ۲- تأثیر تنش خشکی در معدن عسکری بر طول (a)، وزن تر (b) و وزن خشک (c) ریشه و ساقه گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. D1: شاهد، D2: ۵۰٪ ظرفیت زراعی، D3: ۲۵٪ ظرفیت زراعی. Z1: ناحیه ۱، Z2: ناحیه ۲، Z3: ناحیه ۳، Z4: ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی دار ($P \leq 0.05$) ندارند.



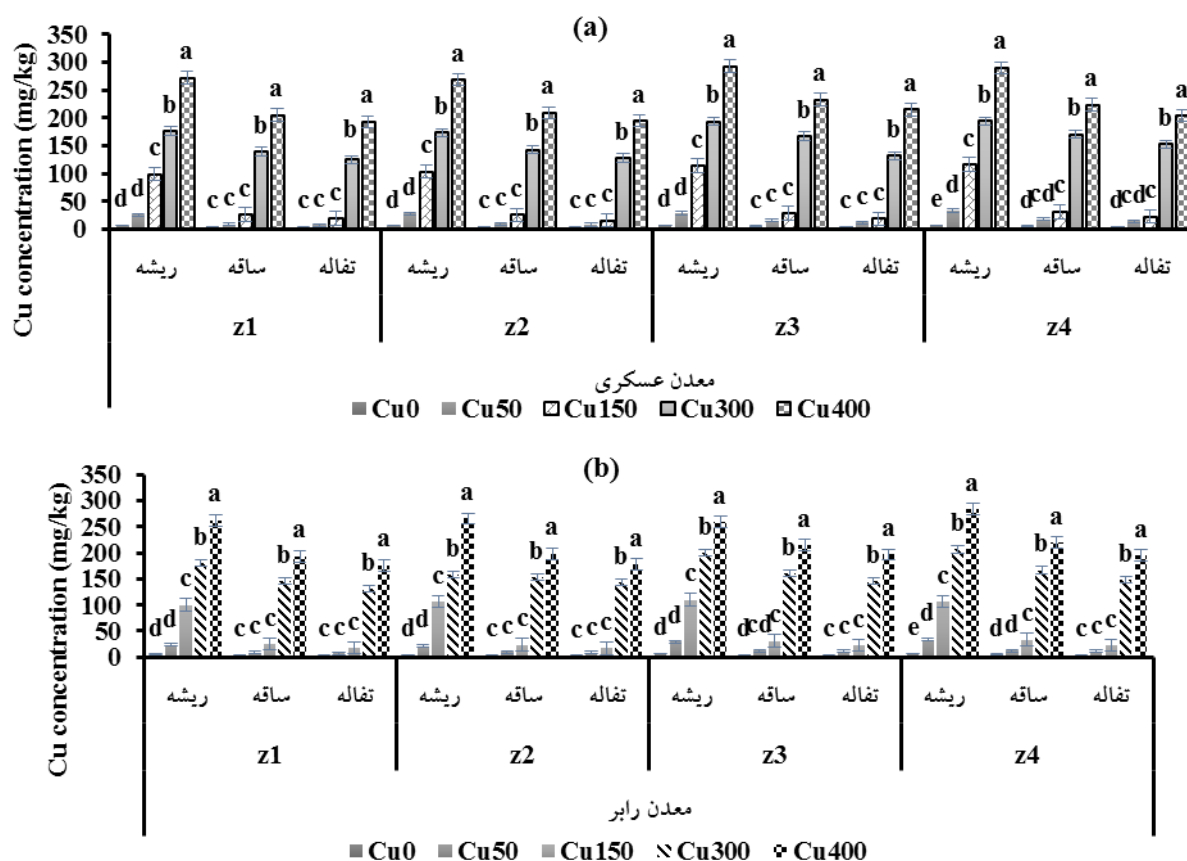
ادامه شکل ۲- تأثیر تنش خشکی در معدن رابر بر طول (d)، وزن تر (e) و وزن خشک (f) ریشه و ساقه گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. D1: شاهد، D2: ۵۰٪ ظرفیت زراعی، D3: ۲۵٪ ظرفیت زراعی. z1 ناحیه ۱، z2 ناحیه ۲، z3 ناحیه ۳، z4 ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی دار ($P \leq 0.05$) ندارند.



شکل ۳- تأثیر مستقل عنصر مس (a) و تنش خشکی (b) بر درصد اسانس گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. Cu0: شاهد، Cu50: غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu150: غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu300: غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu400: غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس. D1: شاهد، D2: ۵۰٪ ظرفیت زراعی، D3: ۲۵٪ ظرفیت زراعی. Z1: ناحیه ۱، Z2: ناحیه ۲، Z3: ناحیه ۳، Z4: ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) ندارند.



شکل ۴- تأثیر تنش خشکی بر تجمع مس در ریشه گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. D1: شاهد، D2: ۵۰٪ ظرفیت زراعی، D3: ۲۵٪ ظرفیت زراعی. Z1: ناحیه ۱، Z2: ناحیه ۲، Z3: ناحیه ۳، Z4: ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌دار ($P \leq 0.05$) ندارند.



شکل ۵- تأثیر عنصر مس بر تجمع مس در ریشه، شاخساره و تفاله گیاه شاهتره در شرایط گلخانه‌ای. (a): معدن عسکری، (b): معدن رابر. Cu0: شاهد، Cu50: غلظت ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu150: غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu300: غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس، Cu400: غلظت ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس. z1: ناحیه ۱، z2: ناحیه ۲، z3: ناحیه ۳، z4: ناحیه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی دار ($P \leq 0.05$) ندارند.

مناسب برای خاکهایی که به طور ملایم (تا غلظت ۱۵۰ میلی‌گرم/کیلوگرم) با مس آلوده شده‌اند را پیشنهاد می‌کند. در این تحقیق گیاهان رشد کرده از بذور جمع‌آوری شده از نواحی Z₃ و Z₄، در غلظت‌های بالاتر مس عملکرد رشد و درصد اسانس بالاتری را نسبت به نواحی Z₁ و Z₂ نشان دادند که نشان دهنده مقاومت بالاتر آنها نسبت به خاک‌های آلوده به مس بود و همچنین گونه مس عسکری وزن اسانس بیشتری را نسبت به گونه‌ی مس رابر نشان داد. رشد اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاه شاهتره در غلظت‌های بالای مس (Cu₃₀₀ و Cu₄₀₀) به شدت کاهش پیدا کرد و زیست توده بسیار کوچکی برای جمع‌آوری عنصر مس از خاک داشت. اما تحقیقات بیشتری

خشکی، جذب مس توسط ریشه افزایش یافت که این افزایش در ریشه معنی‌دار بود. همچنین در گیاه شاهتره، میزان تجمع مس تا سطح Cu₁₅₀ در ریشه در مقایسه با شاخساره بیشتر بود که علت آن مربوط به سازوکار دفاعی گیاه در جلوگیری از انتقال مس به بخش هوایی بود که به دلیل این حالت تدافعی، رشد شاخه‌های جدید در اندام هوایی تا این غلظت همچنان ادامه داشت. اسانس گیاه در تمام تیمارها در غلظت Cu₁₅₀ و سطح تنش متوسط خشکی در بالاترین حد خود قرار داشت. همچنین در مطالعه‌ی حاضر عنصر مس در طی فرایند تقطیر به مقدار زیادی در بافت گیاهی باقی ماند و غلظت عنصر مس در تفاله، تقریباً مشابه غلظت اندام هوایی گیاه قبل از فرایند تقطیر بود. این نتایج استفاده از گیاه دارویی شاهتره، به عنوان گیاهی

لازم است تا پتانسیل جمع‌آوری عنصر مس از خاک توسط گیاه شاهره را با پالایندگان دیگر مقایسه کند.

منابع

حبیبی، ح.، مظاهری، د.، مجنون حسینی، ن.، چائی چی، م.ر.، فخر طباطبایی، م. و بیگدلی، م. (۱۳۸۵) اثر ارتفاع بر روغن اسانس و ترکیبات دارویی آویشن وحشی (*Thymus kotschyanus Boiss.*) منطقه طالقان. مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی. ۷۳: ۱۰-۲.

زرگری، ع. (۱۳۷۶) گیاهان دارویی، چاپ هفتم، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
 سلیمی، م. و عمواقایی، ر. (۱۳۹۵) اثر غلظت های مختلف مس بر جوانه زنی، رشد دانه رست و فعالیت آمیلاز در شبلیله. دومین همایش بین المللی و پنجمین همایش ملی گیاهان دارویی و کشاورزی پایدار، گروه منابع طبیعی و کشاورزی، ایران.
 فرخی، م.، نبوی کلات، س. م. و رهباریان، ر. (۱۳۹۶) بررسی روش های مختلف شکستن خواب بذر شاهره (*Fumaria parviflora Lam*)، مجله تحقیقات بذر ۷(۲): ۳۰-۴۰.

کامکار، ب.، صفاهانی لنگرودی، ع.ر. و محمدی ر. (۱۳۹۰) کاربرد مواد معدنی در تغذیه گیاهان زراعی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، ۵۰۰ صفحه.

لباسچی، م. ح. و شریفی عاشورآبادی، ا. (۱۳۸۳) شاخص های رشد برخی گونه های گیاهان دارویی در شرایط مختلف تنش خشکی، مجله تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران ۲۰ (۳): ۲۴۹-۲۶۱.

Ahanger, M. A., Morad Talab, N., Abd Allah, E. F., Ahmad, P. and Hajiboland R. (2016) Plant growth under drought stress: significance of mineral nutrients. *Water stress and crop plants: A sustainable Approach 2*: 649-668.

Akhzari, D. and Pessaraki, M. (2016) Effect of drought stress on total protein, essential oil content and physiological traits of *Levisticum officinale* Koch. *Journal of Plant Nutrition* 39(10): 1365-1371.

Alishah, H.M., Heidari, R., Hassani, A. and Dizaji, A. (2006) Effect of water stress on some morphological and biochemical characteristics of purple basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Biological Sciences* 6(4): 763-767.

Araya, T., Noguchi, K. and Terashima, I. (2010) Effect of nitrogen nutrition on the carbohydrate repression of photosynthesis in leaves of *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Plant Research* 123: 371-379.

Bahreininejad, B., Razmjoo, J. and Mirza, M. (2013) Influence of water stress on morphophysiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. *International Journal of Plant Production* 7:151-166.

Biswas, SH., Koul, M. and Bhatnagar, A.K. (2011) Effect of salt, drought and metal stress on essential oil yield and quality in plants. *Natural Product Communications* 6(10): 1559-1564.

Çakmak, I., Kalayci, M., Brauni, H.J., Kilinc, Y. and Yilmaz, A. (1999) Zn deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A Nato-Science for stability project. *Field Crop Res* 60: 175-188.

Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H. L., Waskom, R.M., Niu, Y. and Siddique, K.H. (2016) Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 36(1): 1-3.

Chen, j., shafi, M., Li, S., Wang, Y., Wu, J., Ye, Zh., Peng, D., Yan, W. and Liu, D. (2015) Copper induced oxidative stresses, antioxidant responses and phytoremediation potential of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). *Scientific Reports* | 5:13554 | DOI: 10.1038/srep13554.

Clevenger, J. F. (1928) Apparatus for the determination of volatile oil, *J. Pharm.* 17. 345-349.

Dilini gardiyehewa de silva, N., Cholewa, E. and Ryser, P. (2012) Effects of combined drought and heavy metal stresses on xylem structure and hydraulic conductivity in red maple (*Acer rubrum* L.). *Journal of Experimental Botany* 63(16): 5957-5966.

Dudareva, N., Pichersky, E. and Gershenzon, J. (2004) Biochemistry of plant volatiles. *Plant Physiology* 135: 1893-902.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, M., Fujita, D. and Basra, S.M.A. (2009) Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable Agriculture* 29: 185-212.

Feigl, G., Kumar, D., Lehotai, N., Tugyi, N., Molnár, Á., Ördög, A., Szepesi, Á., Gémes, K., Laskay, G., Erdei, L. and Kolbert, Z. (2013) Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 94, 179-189.

- Formisano, C., Delfino, S., Oliviero, F., Tenore, G.C., Rigano, D. and Senatore, F. (2015) Correlation among environmental factors. Chemical composition and antioxidative properties of essential oil and extracts of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) collected in Molise (South-central Italy). *Industrial Crops and Products* 63: 256–263.
- Fuentes, D.; Disante, KB.; Valdecantos, A.; Cortina, J. and Vallejo, VR. (2006) Response of Pinushalepensis mill Seedlings to biosolids enriched with Cu, Ni and Zn in three Mediterranean forest soils. *Environmental Pollution* 14: 1-8.
- Herrera-Estrella, L. R. and Guevara-Garcia, A. A. (2009) Heavy metal adaptation. eLS encyclopedia of life sciences. Wiley, Ltd. Published Online: 15 Mar 2009, doi:10.1002/9780470015902.a0001318.
- Jameel, M., Islamuddin, M., Ali, A., Afrin, F. and Ali, M. (2014) Isolation, characterization and antimicrobial evaluation of a novel compound N-octacosan 7 β ol, from *Fumaria parviflora* Lam. *BMC Complementary and Alternative Medicine* 14(98): 1-9.
- Kabata-Pendias, A. (2001) Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, New York 365 p.
- Kabir, M., Zafar Iqbal, M., Shafiq, M. and Farooqi, Z. R. (2008) Reduction in germination and seedling growth of *Thespesia populnea* L. causes by lead and cadmium treatments. *Pakistan. Bot* 40:2419-2426.
- Khalil, N., Fekry, M., Bishr, M., El-Zalabani, S. and Salama, O. (2018) Foliar spraying of salicylic acid induced accumulation of phenolics, increased radical scavenging activity and modified the composition of the essential oil of water stressed *Thymus vulgaris* L. *Plant Physiology and Biochemistry* 123: 65-74
- Liao, M., Hedley, M., Woolley, D., Brooks, R. and Nichols, M. (2000) Copper uptake and translocation in chicory (*Cichorium intybus* L.cv Grasslands Puna) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. CvRondy) plants grown in NFT system. II. The role of nicotianamine and histidine in xylem sap copper transport, *Plant and soil* 223: 245-254.
- Misra, A. and Srivastava, N.K. (2000) Influence of water stress on Japanese mint. *Journal of Herbs, Spices and Medicinal Plants* 7: 51-58.
- Moya, J. L., Ros, R. and Picazo, I. (1993) Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthesis Research* 36:75-80.
- Muhammad, A., Shafaqat, A., Muhammad, R., Muhammad, I., Farhat, A., Mujahid, F. and Saima, A. B. (2015) The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: A review. *Environmental Science and Pollution Research* 22(11), 8148–8162.
- Nasim, S.A. and Dhir, B. (2010) Heavy metals alter the potency of medicinal plants. *Reviews of environmental contamination and toxicology*. Springer 21: 139-149.
- Omidbaigi, R., Hassani, A. and Sefidkon, F. (2003) Essential oil content and composition of sweet basil (*Ocimum basilicum*) at different irrigation regimes. *Journal of Essential Oil Bearing Plants* 6(2): 104-108.
- Orhan, I. E., Ozturk, N. and Sener, B. (2015) Antiprotozoal assessment and phenolic acid profiling of five *Fumaria* (fumitory) species. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine* 8(4): 283-286.
- Papazoglou, E. G., Karantounias, G. A., Vemmos, S. N. and Bouranis, D. L. (2005) Photosynthesis and growth responses of giant reed (*Arundo donax* L.) to the heavy metals Cd and Ni. *Environment International* 31:243-249.
- Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Mendez, A. and Gasco, G. (2013) Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: A review. *Solid Earth Discuss* 5: 2155–2179.
- Rahman, M. M., Chongling, Y., Rahman, M. M. and Islam K. S. (2009) Accumulation, distribution and toxicological effects induced by chromium on the development of mangrove plant *Kandelia candel* (L.) Druce. *Ambiente e Agua- An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 4(1): 6-19.
- Reeves R. D., Baker A. J. M., Borhidi A. and Berazain R. (1999) Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany* 83: 29-38.
- Sarma, H. (2011) Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology. *Environmental Science and Technology* 4:118–138
- Singh, S. and Sinha, S. (2004b) Scanning electron microscopic studies and growth response of the plants of *Helianthus annuus* L. grown on Tannery Sludge Amended Soil. *Environ. Int* 30: 389–395.
- Talukder, K. H., Ahmed, A.U., Islam, M. S., Asaduzzaman, M. and Hossain, M. D. (2011) Incubation studies on exchangeable Zn for varying levels of added Zn under aerobic and anaerobic conditions in grey terrace soils, non-calcareous floodplain soils and calcareous floodplain soils. *Journal Science of Foundation* 9: 9-14.
- Tátrai, Z.A., Sanoubar, R., Pluhár, Z., Mancarella, S., Orsini, F. and Gianquinto, G. (2016) Morphological and physiological plant responses to drought stress in *Thymus citriodorus*. *International Journal of Agronomy* 20(16): 1-8.
- Turtola, S., Manninen, A.M., Rikala, R. and Kainulainen, P. (2003) Drought stress alters the concentration of wood terpenoids in Scots pine and Norway spruce seedlings. *Journal of Chemical Ecology* 29: 1981-1985.
- Walpola, B.C. and Arunakumara, K.K. (2017) Effect of salt stress on decomposition of organic matter and nitrogen mineralization in animal manure amended soils. *Journal of Agricultural Science* 5 (1): 9-18.

- Waraich, E. A., Rashid, A. and Ashraf, M. Y. (2011) Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. *Australian Journal of Crop Science* 5(6): 764-777.
- Žaltauskaitė, J. and Šliumpaitė, I. (2013) Single and combined toxicity of copper and cadmium to *H. vulgare* growth and heavy metal bioaccumulation. *E3S Web of Conferences* 1:15013.
- Zhang, H., Zhu, L. D., Ning, Y. W., Zhang, C. Z., and Zhang, Y. C. (2014). Effect of water deficit condition on water use efficiency and carbon isotope discrimination in sweet potato. *Soil* 5, 806–813. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2014.05.006
- Zhang, Y., Xu, S., Yang, S. and Chen, Y. (2015) Salicylic acid alleviates cadmium-induced inhibition of growth and photosynthesis through up-regulating antioxidant defense system in two melon cultivars (*Cucumis melo* L.). *Protoplasma* 252(3): 911-924.
- Zheljazkov, V. D., Craker, L. E. and Xing, B. (2006) Effects of Cd, Pb and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. *Environmental and Experimental Botany* 58 (1): 1-9.

The effect of drought stress and copper element on some vegetative traits, essential oil and copper concentration in *Fumaria parviflora* Lam

Mansoreh Tashakorizadeh¹Mohammad Reza Vahabi¹, Porandokht Golkar^{1*} and Kobra Mahdavian²

¹ Department Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

²Department of Biology, Payamenour University, Tehran, Iran

(Received: 11/01/2020, Accepted: 08/04/2020)

Abstract

Environmental stresses cause different reactions from plants. Drought and heavy metals stresses are among the unfavorable environmental factors that affect the yield of medicinal plants. This study was conducted to investigate the effects of different concentrations of copper (control, 50, 150, 300 and 400 mg/kg) and different levels of drought stress (control, 50% and 75% based on soil moisture percentage depletion) on vegetative traits, percentage of essential oil and copper accumulation in roots, shoots and distilled plant material of *Fumaria parviflora* Lam. The experiment was done factorially in a completely randomized design under greenhouse conditions with 3 replications. Plant seeds were collected for cultivation from four areas (Z₁, Z₂, Z₃ and Z₄) in two mineral areas in Kerman province (Askari and Rabar). The results showed that in all of the treatments, the concentration of 50 (mg/kg) copper without drought stress (control) led to the highest value in terms of vegetative traits. The highest percentage of essential oil (0.45) in the treatment with concentration 150 (mg/kg) of copper and medium drought stress in zone 3 of Askari copper mine and the highest concentration of copper in roots, shoots and distilled plant material in treatment with 400(mg/kg) copper and severe drought stress in zone 3 of Askari mine were observed. In this study, the Cu remained in the plant tissue during the distillation process and the concentration of copper in the distilled plant material was almost similar to the concentration of plant shoots before the distillation process. These findings suggest the use of Shahtareh medicinal plant as a suitable species for soils contaminated up to 150 (mg /kg) copper. Also, the data showed that *Fumaria parviflora* did not have a suitable biomass for collecting copper from the soil in terms of slow growth in high concentrations of copper.

Keywords: Distilled plant material, Dry weight, Fresh weight, Root length, Shoot length.

Corresponding author, Email: poorangolkar@gmail.com