

Independent and combined effects of region and copper on morphological characteristics, chlorophyll content and phytoremediation of purslane (*Portulaca oleracea*) (Case study: Askari Raver copper mine pastures)

Mansoureh Tashakorizadeh^{1*}, Elham Mehrabi gohari², Narges Hatami³

¹ Corresponding Author, Assistant Professor, Forests and Rangelands Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran, Email: mtashakorizadeh1981@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Soil and Water, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran, Email: e.mehrabi@areeo.ac.ir.

³ Assistant Professor, Research Institute of Forest and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Email: narges.hatami5579@gmail.com.

Article type:	Abstract
Research article	Remediation of soils contaminated with heavy metals has become one of the major problems in the world. Plant-remediation is one of the most promising breeding methods that has received attention all over the world today. Environmental factors also play a role in the degree of purification of heavy elements by plants and establishment of different types of medicinal species with different capabilities. In the present study, the independent and combined effects of the region (R1, R2, R3 and R4) and different concentrations of copper element (control, 50, 150, 300 and 400 mg/kg) on length and dry weight, chlorophyll content, the amount of absorption and distribution of copper element, biological transfer factor (TF) and bioaccumulation factor (BAF) in roots and shoots of purslane was tested. Purslane seeds were collected from four regions with concentrations of 50, 150, 300 and 400 mg of copper per kilogram of soil from Askari Raver copper mine in Kerman province and cultivated under greenhouse conditions. The present study showed that the critical level of copper (mg/kg) for reducing morphological traits and chlorophyll content in purslane compared to optimal growth was 300 for R1 and R2 regions and 400 for R3 and R4 regions. Plants grown from seeds collected from R3 and R4 regions were able to tolerate higher levels of copper concentration and showed more morphological traits and chlorophyll content in high copper concentrations. The biological accumulation factor was in the range of 1.6 to 9.41 in the root and in the range of 1.07 to 6.8 in the shoot and the biological transfer factor was in the range of 0.56 to 0.73, which made the results of purslane plant as The title introduces a plant that accumulates and biostabilizes copper metal in the studied area.
Article history	
Received:19.08.2024	
Revised:19.10.2024	
Accepted:01.11.2024	
Published:21.03.2025	
Keywords	
Biological transfer	
Bio concentration	
Dry weight	
Medicinal plant	

Introduction: Remediation of soils contaminated with heavy metals with high levels of contamination has become one of the major problems in the world. Phytoremediation is considered one of the most promising breeding methods that has received attention all over the world today. Environmental factors also play a role in the amount of purification of heavy elements by plants and establishment of different types of medicinal species with different capabilities. The purpose of this research was to investigate the

independent and mutual effects of region and copper toxicity on the morphological characteristics, chlorophyll content and phytoremediation of purslane (*Portulaca oleracea*).

Materials and methods: Purslane seeds from four regions (R₁, R₂, R₃ and R₄) with concentrations of 50, 150, 300 and 400 mg of copper per kilogram of soil were collected with randomly classified method from the pastures of Askari Raver copper mine located in Kerman province. The experiment was done factorially in a completely randomized design under greenhouse conditions with 3 replications. Cultivation was carried out in polyethylene pots with a diameter of 17 and a height of 15 cm and an empty weight of 270 ± 10 grams under suitable temperature conditions in the greenhouse. After 55 days, during harvest, purslane plants were divided into aerial and root parts, and length and dry weight, chlorophyll content, absorption and distribution of copper element, biological transfer factor (TF) and bio concentration factor (BAF) in the aerial parts and roots of purslane were measured.

Results and Discussion: The present study showed that the critical level of copper (mg/kg) for reducing morphological traits and chlorophyll content in purslane compared to optimal growth was 300 for R₁ and R₂ areas and 400 for R₃ and R₄ areas. Plants grown from seeds collected from R₃ and R₄ areas were able to tolerate higher levels of copper concentration and showed more morphological traits and chlorophyll content at high copper concentrations. The bioaccumulation factor ranged from 1.6 to 9.41 in roots and from 1.07 to 6.8 in shoots, and the bio transfer factor ranged from 0.56 to 0.73. Heavy metal contamination of rangelands poses a serious environmental risk by reducing plant productivity and facilitating metal entry into the food chain, with copper toxicity markedly impairing growth, biomass accumulation, and chlorophyll content through disruption of root integrity and key physiological processes. The present findings demonstrate that *Portulaca oleracea* exhibits differential tolerance to copper depending on ecotype origin, with plants from highly contaminated regions (R₃ and R₄) showing greater growth performance and chlorophyll stability at elevated Cu levels, likely due to long-term adaptive selection. Moreover, preferential copper accumulation in roots, low translocation factors, and high bioaccumulation indices indicate that purslane functions primarily as a metal-excluding, phytostabilizing species, making it a suitable candidate for the stabilization of copper-contaminated soils.

Conclusion: Purslane is capable of accumulating a high percentage of copper that can be absorbed from the soil in its various organs, especially the roots, and can be used as a super accumulator plant to remove copper pollution in the study area. Also, given that the biological transfer coefficient in this plant was less than one and the bioaccumulation coefficient was higher than one, this species can be introduced as a suitable biological stabilizer in the study area.

Cite this article as: Jahanshahi, H., Ajam Norouzi, H., Dadashi, M.R., Rezaee, M.A. (2025). Independent and combined effects of region and copper on morphological characteristics, chlorophyll content and phytoremediation of purslane (*Portulaca oleracea*) (Case study: Askari Raver copper mine pastures). *Journal of Plant Environmental Physiology*, 77(1): 146-162.



©The author(s)

Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch

Doi: <https://doi.org/10.71890/iper.2025.1129496>

اثرات مستقل و توأم منطقه و مس بر خصوصیات مورفولوژی، محتوای کلروفیل و گیاه پالایی گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*) (مطالعه موردی: مراتع معدن مس عسکری راور)

منصوره تشکری زاده^{۱*}، الهام مهربانی گوهری^۲، نرگس حاتمی^۳

^۱ نویسنده مسئول، بخش تحقیقات جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران.

رایانامه: mtashakorizadeh1981@gmail.com

^۲ بخش خاک و آب، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران، رایانامه: e.mehrabi@areeo.ac.ir.

^۳ موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، رایانامه: narges.hatami5579@gmail.com

نوع مقاله:

چکیده

مقاله پژوهشی

اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با سطح آلودگی زیاد به یکی از مشکلات اساسی در جهان تبدیل شده است. گیاه پالایی، یکی از امیدوار کننده‌ترین روش‌های اصلاح محسوب می‌شود که امروزه در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است. عوامل محیطی نیز در میزان پالایش عناصر سنگین توسط گیاهان و استقرار انواع مختلف گونه‌های دارویی با قابلیت‌های متفاوت نقش دارند. در مطالعه حاضر اثرات مستقل و توأم منطقه (R_1, R_2, R_3 و R_4) و غلظت‌های مختلف عنصر مس (شاهد، ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم) بر طول و وزن خشک، محتوای کلروفیل، میزان جذب و توزیع عنصر مس، فاکتور انتقال بیولوژیکی و فاکتور تجمع زیستی در ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه آزموده شد. بذر گیاه خرفه از چهار منطقه با غلظت‌های ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم مس در کیلوگرم خاک از معدن مس عسکری راور در استان کرمان جمع‌آوری و در شرایط گلخانه کشت شد. مطالعه حاضر نشان داد که سطح بحرانی مس (میلی گرم در کیلوگرم) برای کاهش صفات مورفولوژی و محتوای کلروفیل در خرفه در مقایسه با رشد بهینه، غلظت ۳۰۰ برای مناطق R_1 و R_2 و غلظت ۴۰۰ برای مناطق R_3 و R_4 بود. گیاهان رشد یافته از بذور جمع‌آوری شده از مناطق R_3 و R_4 سطوح بالاتری از غلظت مس را توانستند تحمل کنند و صفات مورفولوژی و محتوای کلروفیل بیشتری را در غلظت‌های بالای مس نشان دادند. فاکتور تجمع بیولوژیکی، در محدوده ۱/۶ تا ۹/۴۱ در ریشه و در محدوده ۱/۰۷ تا ۶/۸ در اندام هوایی و فاکتور انتقال بیولوژیکی در محدوده ۰/۵۶ تا ۰/۷۳ متغیر بود که این نتایج گیاه خرفه را به عنوان یک گیاه بیش انباشتگر و تثبیت کننده زیستی فلز مس در منطقه مورد مطالعه معرفی می‌کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۱

تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱

واژه‌های کلیدی:

انتقال بیولوژیکی

تجمع زیستی

گیاهان دارویی

وزن خشک.

استناد: تشکری زاده، منصوره؛ مهربانی گوهری، الهام؛ حاتمی، نرگس. (۱۴۰۳۴). اثر منابع مختلف کود های زیستی و شیمیایی نیتروژن و

فسفر بر صفات مورفولوژیکی و عملکردی گندم (رقم مروارید). فیزیولوژی محیطی گیاهی، ۱۷(۱)، ۱۶۲-۱۴۶.

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان

Doi: <https://doi.org/10.71890/iper.2025.1129496>

© نویسندگان.



مقدمه

گیاه دارویی خرفه با نام لاتین *Portulaca oleracea* از خانواده *Portulacaceae*، گیاهی است یکساله که در زمان بذردهی تا ارتفاع ۴۰ سانتی متر می رسد و در مناطق معتدل و گرمسیر پراکنده است. دارای ساقه و برگ گوشتی و بدون کرک می باشد. میوه کپسول و دارای بذرهای سیاه مایل به قهوه‌ای است (Cros et al., 2006). این گیاه سرشار از اسیدهای چرب، پروتئین و ویتامین‌های A، C و E می باشد که حدود ۷۰ درصد اسیدهای چرب تشکیل دهنده روغن آن غیر اشباع بوده و حدود ۵۰ درصد آن را تنها اسید چرب امگا ۳ تشکیل می دهد (Masoodi et al., 2011). از خواص دارویی این گیاه می توان به خواصی نظیر تب بر، ضد درد، ضد اسکوربوت، ضد عفونی کننده، ضد سرفه، ضد التهاب، تصفیه کننده خون، ضد سوختگی پوست، کاهش تورم حاصل از آبسه، گزیدگی نیش حشرات و عقرب اشاره کرد (Zargari, 1997).

تغییر در ترکیب و ساختار گیاهان دارویی نظیر خرفه، در جوامع گیاهی تا حد زیادی تحت کنترل و تاثیر عوامل محیطی قرار دارد و در حقیقت این عوامل موجب استقرار انواع مختلف گونه‌های دارویی در زیستگاه‌ها و مناطق مختلف می گردند و زیستگاه طبیعی گیاهان به وسیله این عوامل مشخص می شود (Habibi et al., 2009). از میان عوامل محیطی، عامل خاک، بیشترین تاثیر را بر رشد و پراکنش جغرافیایی گونه‌های دارویی دارد و وجود ترکیبات و غلظت‌های مختلف عناصری نظیر فلزات سنگین در خاک در مناطق مختلف می تواند بر خصوصیات مورفوفیزیولوژیکی این گیاهان تاثیر گذارد (Habibi et al., 2009).

فلز سنگین یک اصطلاح کلی برای فلزات با عدد اتمی بالای ۲۰ و چگالی نسبی بیشتر از ۴ گرم بر

سانتی مترمکعب است و انواع رایج آن عبارتند از: سرب (Pb)، کادمیوم (Cd)، مس (Cu)، روی (Zn) کروم (Cr)، آرسنیک (As) و جیوه (Hg)؛ Nagajyoti et al., 2010). با توسعه سریع صنعتی شدن و شهرنشینی، فعالیت‌های انسانی منجر به انتشار فلزات سنگین در محیط از طریق مسیرهای مختلف می شوند (Farooq et al., 2020). آلودگی فلزات سنگین به دلیل زمان طولانی باقیماندن در محیط و خواص فیزیکی و شیمیایی غیرقابل تجزیه، به یک موضوع زیست محیطی جهانی تبدیل شده است و تعداد زیادی از مطالعات تأیید کرده اند که فلزات سنگین می توانند باعث ایجاد اثرات منفی زیست محیطی و اکولوژیکی شوند (Yang et al., 2021). از میان فلزات سنگین، مس یک ماده ریزمغذی است که برای متابولیسم گیاهان ضروری است و هنگامی که گیاهان در شرایط کمبود مس رشد می کنند، رفتارهای غیرعادی مختلفی نظیر توقف رشد و نمو، پیچ خوردگی برگ‌های جوان و انتقال ناکافی آب از خود نشان می دهند (Zhang et al., 2019). اما غلظت بالای مس می تواند بر رشد و متابولیسم گیاه تأثیر منفی بگذارد و باعث تداخل جدی در رشد و نمو گیاهان و جذب مواد مغذی، مهار فتوسنتز، رشد ریشه و گسترش برگ شود و همچنین بر عملکرد برخی از اجزای کلیدی سلول، مانند پروتئین‌ها، لیپیدها، DNA و RNA تأثیر گذارد (Gong et al., 2021). گیاهان تحت تنش فلزات سنگین، به دلیل آلودگی خاک باید خود را از طریق تغییر در سیستم‌های فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، تشریحی و مورفولوژیکی سازگار کنند (Ramteke et al., 2016). علاوه بر این، فلزات سنگین نه تنها بر روی گیاهان، بلکه بر سلامت همه موجودات زنده‌ای که این گیاهان را از طریق زنجیره غذایی دریافت می کنند نیز تأثیر می گذارند و متأسفانه امروزه بسیاری از سبزیجات و میوه‌ها حاوی مقادیر متفاوتی

از فلزات سنگین هستند (Ramteke et al., 2016; Negi, 2018). برای کاهش اثرات مضر فلزات سنگین امروزه استفاده از موجودات زنده نظیر میکروارگانیسم‌ها و گیاهان به عنوان راهکار مناسب جهت پالایش خاک از عناصر سنگین مطرح شده و کمترین هزینه را در بردارد (Chaney et al., 1997). در این مطالعه اثر منطقه و سمیت مس بر طول و وزن خشک، محتوای کلروفیل، جذب مس، فاکتورهای انتقال بیولوژیکی (TF) و تجمع بیولوژیکی (BAF) در اندام هوایی و ریشه گیاه خرفه (*Portulaca oleracea*) در شرایط گلخانه بررسی شد.

مواد و روش‌ها

بذر گیاه خرفه، از مراتع آلوده به عنصر مس در منطقه معدنی مس عسکری شهرستان راور (طول جغرافیایی $30^{\circ}54'30''$ و عرض $31^{\circ}16'18''$ ارتفاع متوسط ۲۱۱۱ متر از سطح دریا) واقع در استان کرمان جمع‌آوری شد. از عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتی متری از ناحیه اطراف ریشه گیاهان خرفه در منطقه معدنی، خاک برداشت و غلظت مس اندازه‌گیری و بر اساس غلظت مس، منطقه معدنی به چهار منطقه (R_1, R_2, R_3 و R_4) با غلظت‌های ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم مس بر کیلوگرم خاک تقسیم شد. بذر گیاه خرفه به روش تصادفی طبقه‌بندی شده از چهار منطقه برداشت و در گلدان‌هایی با جنس پلی اتیلن و قطر دهانه ۱۷ و ارتفاع ۱۵ سانتی متر و وزن خالی 270 ± 10 گرم، به صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار کاشته شد. ۶۰ گلدان (۴ منطقه $\times$ ۵ غلظت مس $\times$ ۳ تکرار) وجود داشت و هر گلدان با خاک الک شده با الک ۲ میلی متری پر شد. قبل از شروع آزمایش، خاک از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (جدول ۱). در ابتدا

در هر گلدان ۱۰ عدد بذر خرفه کاشته شد و ۴ عدد از بوته‌هایی که رشد یکنواختی از خود نشان دادند برای بررسی پس از مرحله جوانه‌زنی نگه داشته شدند. به عنوان تیمارهای آزمایش، ۴ دوز مختلف $CuSO_4$ (۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم مس در کیلوگرم خاک)، در مقدار مشخصی آب مقطر حل و به طور یکنواخت به سطح خاک گلدان‌ها اسپری و به مدت دو ماه انکوباسیون شدند تا فرایند تعادل بین خاک و محلول بهتر صورت گیرد (Talukder et al., 2011). گیاهان پس از ۵۵ روز برداشت شدند. در هنگام برداشت بوته‌های خرفه به قسمت‌های اندام‌هوایی و ریشه تقسیم شدند و صفات مورفولوژیکی، محتوای کلروفیل، میزان تجمع مس، TF و BAF در قسمت‌های مختلف گیاه اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری صفات مورفولوژی و محتوای کلروفیل کل: جهت اندازه‌گیری ارتفاع اندام هوایی و طول ریشه از خط کش با دقت ± 1 میلی‌متر به وسیله شاخص ارتفاع اندازه‌گیری و بر اساس واحد سانتی متر گزارش شد. برای تخمین وزن خشک گیاه پس از جدا کردن اندام هوایی و ریشه از یکدیگر، نمونه‌ها در فویل آلومینیومی پیچیده و به مدت دو شبانه روز در آون در دمای ۷۲ درجه سلسیوس خشک شدند تا وزن خشک ثابت شود. سپس وزن خشک نمونه‌ها با دقت ± 0.001 توزین شد. اندازه‌گیری کلروفیل کل نیز با استفاده از روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) انجام پذیرفت.

سنجش میزان جذب عنصر مس، فاکتور تجمع

بیولوژیکی و ضریب انتقال زیستی گیاه خرفه

برای تعیین غلظت مس، 0.1 گرم از ریشه و اندام هوایی گیاه خرفه خرد و درون لوله‌های آزمایش ریخته شدند. سپس به هر نمونه ۴ میلی لیتر اسیدنیتریک ۶۵ درصد، $1/5$ میلی لیتر پرکلریک اسید، $1/5$ میلی لیتر پراکسید هیدروژن اضافه شد، سپس

نمونه‌ها در بن‌ماری 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.

از شاخص‌های فاکتور تجمع بیولوژیکی (BAF)، نسبت غلظت فلز در وزن خشک ریشه یا اندام هوایی به غلظت فلز در وزن خشک خاک (Yoon et al., 2006) و ضریب انتقال زیستی (TF)، نسبت غلظت فلزات سنگین در اندام هوایی گیاه به غلظت فلزات سنگین در ریشه گیاه (Yoon et al., 2006) برای ارزیابی کارایی گیاه جهت پالایش آلودگی استفاده شد.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در گلدان‌ها

خصوصیات فیزیکی					خصوصیات شیمیایی				
شن	سیلت	رس	کلاس بافت	ماده آلی (%)	هدایت الکتریکی (دسی-زیمنس بر متر)	pH	نیترژن (%)	فسفر (میلی گرم بر کیلوگرم)	پتاسیم (میلی گرم بر کیلوگرم)
۶۷/۲۸	۱۷	۱۵/۷۲	لوم شنی	۰/۸۶	۱/۲۴	۷/۴	۰/۱۸	۶/۷۳	۱۷۶/۱۱

نتایج

تاثیر منطقه بر صفات مورفوفیزیولوژیکی خرفه: نتایج

حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر منطقه بر طول و وزن خشک و غلظت مس در اندام هوایی و ریشه معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲).

در تیمار شاهد، گیاهان حاصل از بذور جمع‌آوری شده از مناطق R_3 و R_4 نسبت به R_1 و R_2 سطح پایین‌تری از صفات مورفولوژی را نشان دادند. کاهش این صفات، در مناطق با غلظت بالای مس (R_3 و R_4)

نسبت به مناطق با غلظت پایین مس (R_1 و R_2) برای ارتفاع اندام هوایی ۱۹٪، طول ریشه ۲۱٪، وزن خشک اندام هوایی ۱۵٪ و وزن خشک ریشه ۱۸٪ بود. در شرایط شاهد، غلظت مس جذب شده توسط گیاه نیز در مناطق مختلف معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲). میزان مس جذب شده در مناطق با غلظت بالای مس (R_3 و R_4) ۲۱٪ برای اندام هوایی و ۱۸٪ برای ریشه بیشتر از مناطق با غلظت پایین مس (R_1 و R_2) بود (شکل ۱).

جدول ۲: تجزیه واریانس اثرات مستقل و متقابل منطقه و مس بر صفات مورفولوژی، محتوای کلروفیل، غلظت مس، انتقال بیولوژیکی (TF) و تجمع بیولوژیکی (BAF) در گیاه خرفه (*P.oleracea*)

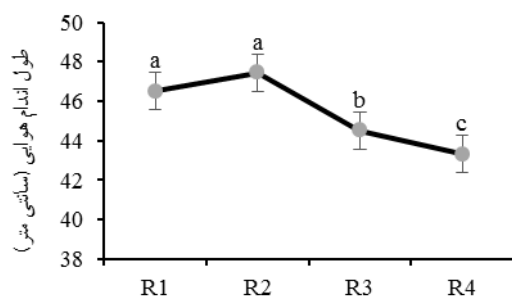
میانگین مربعات										
منابع تغییر	df	طول اندام هوایی	طول ریشه	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل کل	غلظت مس در اندام هوایی	غلظت مس در ریشه	TF	BAF ساقه
منطقه	۳	۱۱/۳۴۱ ^{ns}	۲/۲ ^{ns}	۰/۰۰۵ ^{ns}	۰/۰۰۲ ^{ns}	۰/۵۸ ^{ns}	۰/۳۳ ^{ns}	۷۷/۹۲ ^{ns}	۳۳/۱۲ ^{ns}	۱۵/۱۳ ^{ns}
مس (Cu)	۴	۳۸۲/۸ ^{ns}	۱۶/۷ ^{ns}	۰/۰۲۸ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۲/۵۳ ^{ns}	۱۲/۲۸ ^{ns}	۴۱/۶۶ ^{ns}	۴/۱۲ ^{ns}	۲۳/۵۲ ^{ns}
منطقه × مس	۱۲	۱۳/۹ ^{ns}	۰/۰۱۸ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۰۱ ^{ns}	۰/۰۸۴ ^{ns}	۰/۲۱۵ ^{ns}	۰/۵ ^{ns}	۱۶/۲۱ ^{ns}	۴۲/۶۳ ^{ns}
خطا	۴۰	۲/۱	۰/۲۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۰۵۵	۰/۸۵	۰/۰۱	۱/۳
ضریب تغییرات (%)		۸/۱	۹/۵	۸/۷	۵/۹	۴/۵	۸/۷	۶/۷	۵/۴	۴/۶

* و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

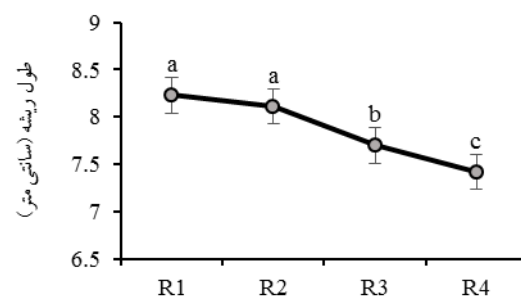
تأثیر مستقل و توأم مس و منطقه بر صفات مورفولوژی و محتوای کلروفیل خرفه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت مس طول اندام هوایی به طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) کاهش پیدا کرد (جدول ۲). همچنین تأثیر متقابل غلظت مس و منطقه بر طول ریشه معنی‌دار نبود (جدول ۲). طول ریشه در غلظت‌های ۰ تا ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس در تمام تیمارها با شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. با بالا رفتن غلظت مس، میزان کاهش طول ریشه به طور متوسط در تمامی تیمارها در غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مس به ترتیب ۲۳٪ و ۳۱٪ در مقایسه با شاهد بود. حداکثر طول ریشه در تیمار شاهد در منطقه R_1 (۸/۵۳ سانتی‌متر) و حداقل آن در غلظت Cu_{400} در منطقه R_4 (۴/۹۳ سانتی‌متر) مشاهده شد (شکل ۲).

تأثیر مستقل و توأم مس و منطقه بر صفات مورفولوژی و محتوای کلروفیل خرفه: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که با افزایش غلظت مس طول اندام هوایی به طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) کاهش پیدا کرد (جدول ۲). همچنین تأثیر متقابل غلظت مس و منطقه بر طول اندام هوایی معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود. غلظت قابل تحمل مس (میلی‌گرم در کیلوگرم) برای طول اندام هوایی گیاهان رشد کرده از بذور مناطق R_1 و R_2 تا ۱۵۰ و R_3 و R_4 تا ۳۰۰ (بدون کاهش قابل توجه نسبت به شاهد) در مقایسه با شاهد بود. میزان کاهش طول اندام هوایی در غلظت‌های Cu_{300} و Cu_{400} به ترتیب ۱۹٪ و ۲۹٪ در مناطق R_1 و R_2 و در غلظت Cu_{400} به میزان ۲۶٪ در مناطق R_3 و R_4 نسبت به شاهد بود (شکل ۲). حداکثر طول اندام هوایی در غلظت Cu_{50} در منطقه R_2

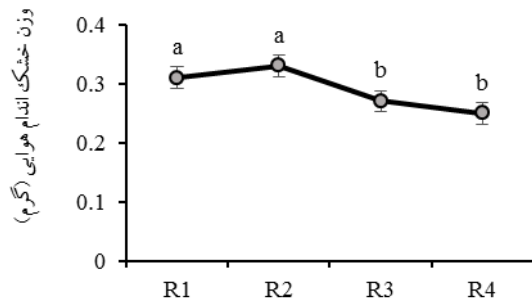
A



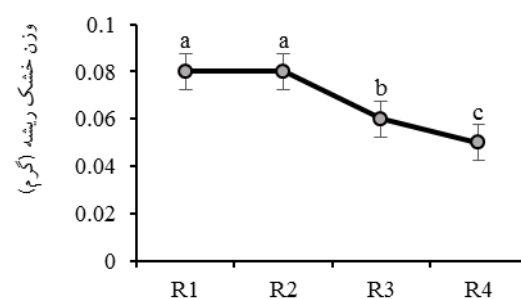
B

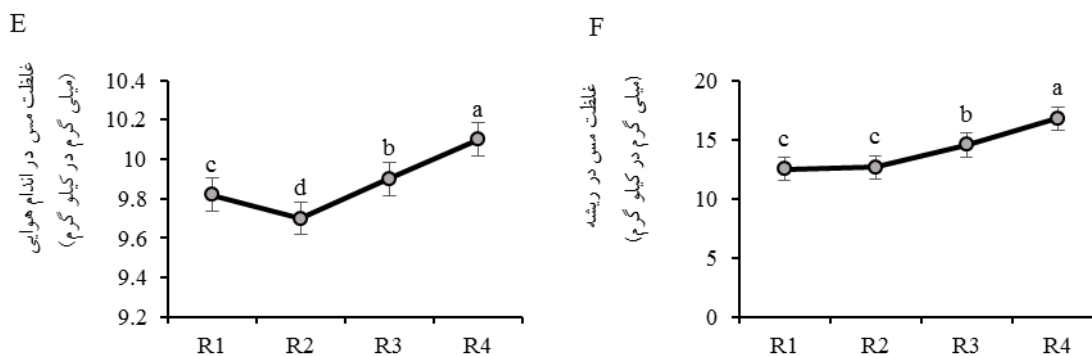


C

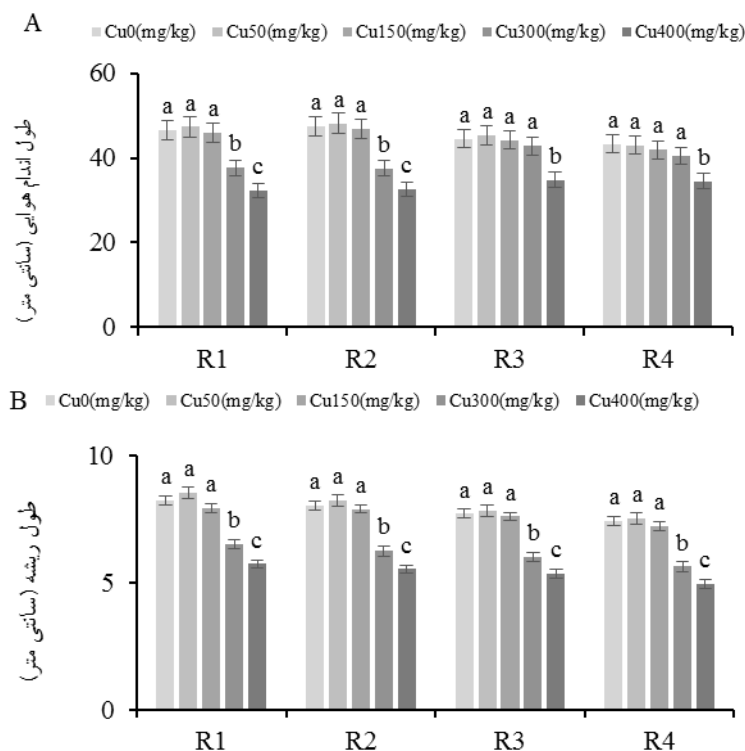


D





شکل ۱: تأثیر منطقه بر طول اندام هوایی (A) و ریشه (B)، وزن خشک اندام هوایی (C) و ریشه (D)، غلظت مس در اندام هوایی (E) و ریشه (F) گیاه خرفه (*P.oleracea*). حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) بین مناطق مختلف (میانگین $\pm$ SE) هستند. R1: منطقه ۱، R2: منطقه ۲، R3: منطقه ۳ و R4: منطقه ۴.



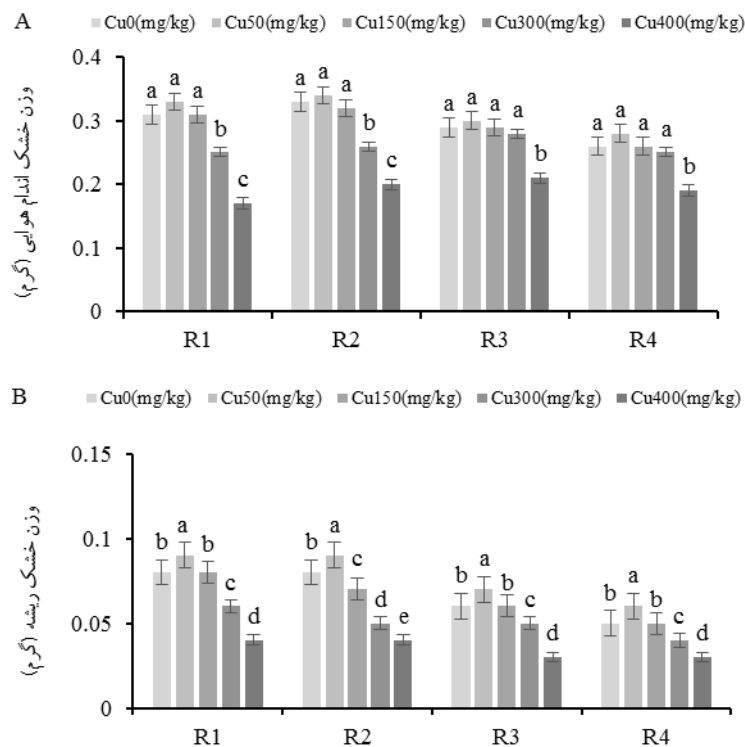
شکل ۲: اثرات متقابل تنش مس و منطقه بر طول اندام هوایی (A) و ریشه (B) گیاه خرفه (*P.oleracea*). R1: منطقه ۱، R2: منطقه ۲، R3: منطقه ۳، R4: منطقه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی دار ($P \geq 0.05$) ندارند.

بین منطقه و غلظت مس بر وزن خشک اندام هوایی نیز معنی دار ($P \leq 0.05$) بود (جدول ۲). غلظت مس قابل تحمل (میلی گرم در کیلوگرم) برای وزن خشک اندام هوایی گیاهان رشد کرده از بذور مناطق R1 و R2 تا ۱۵۰ و R3 و R4 تا ۳۰۰ (بدون کاهش قابل توجه

داده‌های حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که کاهش وزن خشک اندام هوایی همراه با افزایش غلظت مس معنی دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲). با افزایش غلظت مس در همه تیمارها وزن خشک اندام هوایی کاهش پیدا کرد (شکل ۳). رابطه متقابل

کاهش به طور متوسط در همه مناطق در غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم مس به ترتیب ۱۹٪ و ۴۹٪ در مقایسه با شاهد بود (شکل ۳). وزن خشک ریشه در غلظت‌های ۵۰ و ۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم مس در همه مناطق از نظر آماری مشابه با تیمار شاهد بود. حداکثر وزن خشک ریشه در غلظت Cu_{50} در منطقه R_1 و R_2 (۰/۰۹ گرم) و حداقل آن در غلظت Cu_{400} در منطقه R_3 و R_4 (۰/۰۳ گرم) مشاهده شد (شکل ۳). تاثیر متقابل غلظت مس و منطقه بر وزن خشک ریشه معنی دار نبود (جدول ۲).

نسبت به شاهد) در مقایسه با شاهد بود (شکل ۳). با افزایش در غلظت مس، وزن خشک اندام هوایی کاهش یافت که متوسط این کاهش در مناطق با غلظت پایین مس (R_1 و R_2) در Cu_{300} و Cu_{400} به ترتیب ۱۶٪ و ۴۵٪ و در مناطق با غلظت بالای مس (R_3 و R_4) در Cu_{400} ، ۳۲٪ بود. حداکثر وزن خشک اندام هوایی در غلظت Cu_{50} در منطقه R_2 (۰/۳۴ گرم) و حداقل آن در غلظت Cu_{400} در منطقه R_1 (۰/۱۷ گرم) مشاهده شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت مس، وزن خشک ریشه نیز به طور معنی داری ($P \leq 0.01$) کاهش پیدا کرد که درصد این

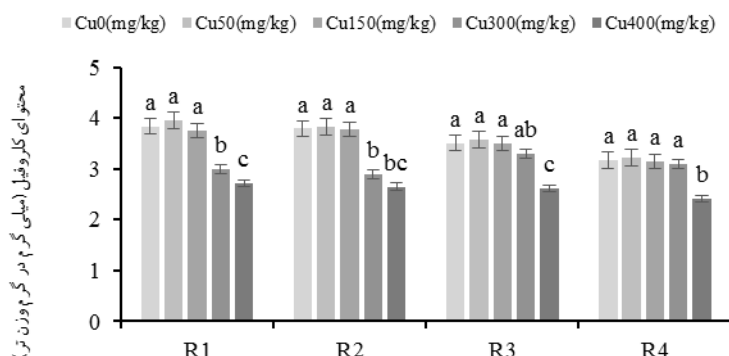


شکل ۳: اثر متقابل تنش مس و منطقه بر وزن خشک اندام هوایی (A) و ریشه (B) گیاه خرفه (*P.oleracea*). R_1 منطقه ۱، R_2 : منطقه ۲، R_3 : منطقه ۳، R_4 : منطقه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی دار ($P \geq 0.05$) ندارند.

همچنین رابطه متقابل بین منطقه و مس نیز بر محتوای کلروفیل معنی دار ($P \leq 0.01$) بود (جدول ۲). نتایج نشان داد که محتوای کلروفیل کل کاهش معنی داری

داده‌های حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که با افزایش غلظت مس محتوای کلروفیل در تمام تیمارها کاهش معنی داری ($P \leq 0.01$) پیدا کرد و

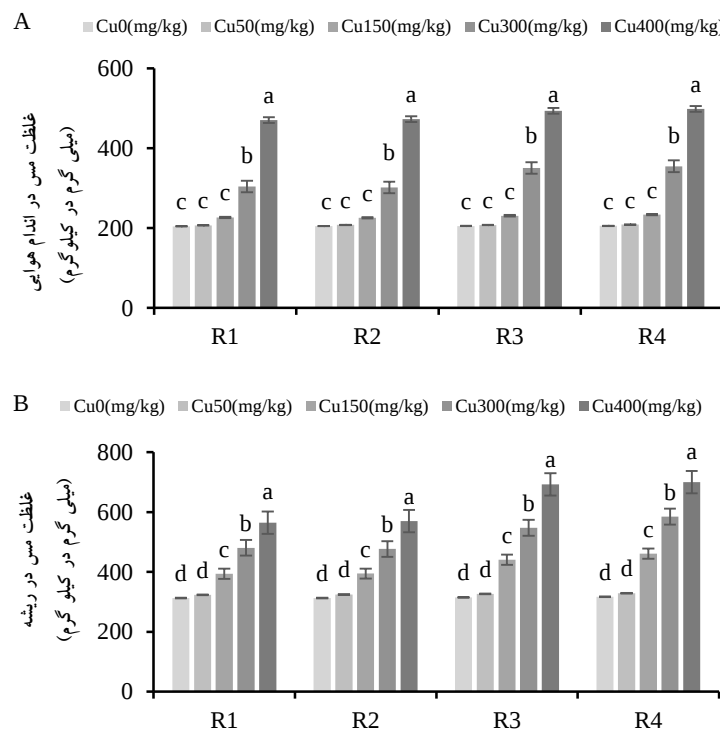
$P \leq 0.01$) در Cu_{300} و Cu_{400} (به ترتیب ۲۱ و ۲۹ درصد) در مناطق R_1 و R_2 و در Cu_{400} (۲۳ درصد) در مناطق R_3 و R_4 در مقایسه با شاهد نشان داد. حداکثر محتوای کلروفیل در غلظت Cu_{50} در منطقه R_1 (۳/۹۶ میلی گرم در گرم وزن تر) و حداقل آن در غلظت Cu_{400} در منطقه R_4 (۲/۴۱ میلی گرم در گرم وزن تر) مشاهده شد (شکل ۴).



شکل ۴: اثر متقابل تنش مس و منطقه بر محتوای کلروفیل گیاه خرفه (*P.oleracea*). R_1 : منطقه ۱، R_2 : منطقه ۲، R_3 : منطقه ۳، R_4 : منطقه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌دار ($P \geq 0.05$) ندارند.

به شاهد از نظر آماری معنی‌دار ($P \leq 0.01$) بود (شکل ۵). میزان افزایش غلظت مس در اندام هوایی در غلظت‌های Cu_{300} و Cu_{400} در مناطق R_3 و R_4 به میزان ۲۲٪ بیشتر از مناطق R_1 و R_2 نسبت به شاهد بود. افزایش محتوای مس در ریشه با بالا رفتن غلظت مس در تیمارهای ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم نسبت به شاهد در تمام تیمارها افزایش معنی‌داری ($P \leq 0.01$) داشت. گیاهان رشد کرده از بذور مناطق بالاتر (R_3 و R_4) توانایی جذب مس بالاتری را در غلظت‌های Cu_{150} (۱۲٪) Cu_{300} (۱۹٪) و Cu_{400} (۲۴٪) نسبت به مناطق پایین‌تر (R_1 و R_2) در بافت ریشه داشتند (شکل ۵).

جذب و توزیع مس در بخش‌های مختلف گیاه خرفه: اثر غلظت‌های مختلف فلز سنگین مس بر جذب فلز توسط ریشه و اندام هوایی بررسی شد. محتوای مس در اندام هوایی و ریشه خرفه همراه با افزایش غلظت مس، به طور معنی‌داری ($P \leq 0.01$) افزایش یافت (جدول ۲). بیشترین مقدار مس (میلی گرم در کیلوگرم) در ریشه و در غلظت ۴۰۰ و کمترین آن در اندام هوایی در تیمار شاهد در تمام مناطق بود. در اندام هوایی هیچ تفاوت آماری معنی‌داری بین تیمارهای ۵۰ و ۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم در چهار منطقه نسبت به شاهد مشاهده نشد اما افزایش محتوای مس در اندام هوایی در غلظت‌های بالای مس (۳۰۰ و ۴۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) نسبت



شکل ۵: اثر تنش مس و منطقه بر غلظت مس در اندام هوایی (A) و ریشه (B) گیاه خرفه (*P. oleracea*). R1 منطقه ۱، R2 منطقه ۲، R3 منطقه ۳، R4 منطقه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی‌دار ($P \geq 0.05$) ندارند.

منطقه با مقدار ثابتی تسبب به غلظت این عنصر در خاک، تجمع می‌دهد. اما در غلظت‌های Cu_{300} و Cu_{400} ، مناطق R_3 و R_4 غلظت بالاتری از مس را نسبت به مناطق R_1 و R_2 در اندام‌های هوایی و زیرزمینی خود جمع کردند (جدول ۳).

در این مطالعه، فاکتور TF برای ارزیابی انتقال مس از منطقه ریشه خرفه به اندام هوایی محاسبه شد (جدول ۳). نتایج حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که رابطه بین غلظت مس و فاکتور انتقال بیولوژیکی معنی‌دار نبود (جدول ۲). فاکتور انتقال بیولوژیکی در محدوده ۰/۵۶ در غلظت Cu_{150} در منطقه R_2 و R_3 تا ۰/۷۳ در غلظت Cu_{300} در منطقه R_3 تعیین شد (جدول ۳). تاثیر متقابل محیط بر فاکتور انتقال نیز معنی‌دار نبود.

فاکتورهای انتقال و تجمع بیولوژیکی گیاه خرفه:

تجزیه واریانس فاکتور تجمع بیولوژیکی در سطوح مختلف مس در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های مربوط مشاهده شد که گیاه خرفه برای تجمع فلز سنگین مس در اندام‌های هوایی و زیرزمینی خود ظرفیت بالایی دارد (جدول ۳). با افزایش غلظت مس، تجمع بیولوژیکی هم در ریشه و هم در اندام هوایی کاهش یافت و در محدوده ۱/۶ در Cu_0 تا ۹/۴۱ در ریشه و در محدوده ۱/۰۷ در Cu_0 تا ۶/۸ در اندام هوایی متغیر بود (شکل ۷). در ارزیابی تاثیر متقابل غلظت مس و منطقه بر تجمع بیولوژیکی، مشاهده شد که این فاکتور در ریشه و اندام هوایی در غلظت‌های Cu_{150} و Cu_{50} در مناطق مختلف تفاوت معنی‌داری نداشت که نشان دهنده این است که گیاه خرفه عنصر مس را در چهار

جدول ۳: اثر تنش مس و منطقه بر فاکتورهای انتقال (TF) و تجمع بیولوژیکی (BAF) اندام هوایی و ریشه گیاه خرفه (*P.oleracea*). R₁ منطقه ۱، R₂: منطقه ۲، R₃: منطقه ۳، R₄: منطقه ۴. گروه‌های واجد حروف یکسان، با توجه به آزمون دانکن، تفاوت معنی دار ($P \geq 0.05$) ندارند.

TF				ریشه BAF				BAF اندام هوایی				مس (mg/kg)
R ₄	R ₃	R ₂	R ₁	R ₄	R ₃	R ₂	R ₁	R ₄	R ₃	R ₂	R ₁	شاهد
۰/۶۴ ^b	۰/۶۵ ^b	۰/۶۵ ^b	۰/۶۵ ^b	۹/۵۵ ^a	۹/۴۸ ^a	۹/۴۲ ^a	۹/۴۱ ^a	۶/۴ ^a	۶/۷ ^a	۶/۶ ^a	۶/۸ ^a	۵۰
۰/۶۹ ^a	۰/۶۳ ^b	۰/۶۲ ^b	۰/۶۳ ^b	۶/۵۷ ^b	۶/۵۳ ^b	۶/۴۹ ^b	۶/۴۶ ^b	۴/۱۶ ^b	۴/۱۴ ^b	۴/۱۵ ^b	۴/۱۲ ^b	۱۵۰
۰/۵۷ ^c	۰/۵۶ ^c	۰/۵۶ ^c	۰/۵۷ ^c	۳/۹ ^c	۳/۹۶ ^c	۲/۶۳ ^c	۲/۶۲ ^c	۱/۵۵ ^c	۱/۵۳ ^c	۱/۵ ^c	۱/۵ ^c	۳۰۰
۰/۷۲ ^a	۰/۷۳ ^a	۰/۶۹ ^a	۰/۶۵ ^b	۲/۹۴ ^d	۲/۷۳ ^d	۱/۶۲ ^e	۱/۶۹ ^e	۲/۱۸ ^d	۱/۹۶ ^d	۱/۱۲ ^e	۱/۰۹ ^e	۴۰۰
۰/۷۱ ^a	۰/۷۱ ^a	۰/۶۹ ^a	۰/۷ ^a	۲/۸۲ ^d	۲/۷ ^d	۱/۵۸ ^e	۱/۶ ^e	۲/۲۴ ^d	۱/۹۳ ^d	۱/۰۸ ^e	۱/۰۷ ^e	

بحث

آلودگی اراضی مرتعی به فلزات سنگین و ورود آنها به شبکه غذایی، به یک مسئله زیست‌محیطی جدی در سراسر جهان تبدیل شده است (Nagajyoti et al., 2010). غلظت بالای فلزات سنگین به طور قابل توجهی باعث کاهش بهره‌وری گیاه و عملکرد محصول می‌شود (Nagajyoti et al., 2010). استفاده از گونه‌های گیاهی متحمل به فلزات سنگین می‌تواند راه موثری برای پاکسازی خاک‌های آلوده باشد (Chaney et al., 1997). سمیت فلزات سنگین در گیاهان بسته به نوع گونه‌های گیاهی، نوع و غلظت فلز، ترکیب و میزان pH خاک متفاوت است (Nagajyoti et al., 2010). غلظت بالای مس برای رشد طبیعی گیاهان بسیار سمی است. در مطالعه حاضر، مس در غلظت‌های (میلی‌گرم در کیلوگرم) ۳۰۰ و ۴۰۰ در مناطق R₁ و R₂ و در غلظت ۴۰۰ در مناطق R₃ و R₄ برای اندام هوایی و در غلظت ۳۰۰ و ۴۰۰ در تمام مناطق برای ریشه، موجب اثرات نامطلوب قابل توجهی بر صفات رشد گیاه خرفه شد. کاهش زیست توده گیاهی یک واکنش رایج در گیاهانی است که در معرض مس بیش از حد قرار دارند (Thounaojam et al., 2012). گزارش شده است که کاربرد مس زیاد بر طول ریشه و اندام هوایی تأثیر می‌گذارد، به سلول‌های ریشه و غشاها آسیب

می‌رساند و باعث عدم تعادل در جذب مواد مغذی گیاه می‌شود (Lothe et al., 2016). سمیت مس همچنین به عنوان مختل کننده فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند سنتز پروتئین، فتوسنتز، تنفس، جذب یون و ثبات غشای سلولی شناخته شده است (Alaoui-Sossé et al., 2004). Tu (۱۹۹۲) در مطالعه خود، کاهش ۱۵ درصدی عملکرد برنج را با اضافه شدن مس به میزان ۶۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک به ترتیب در خاک‌های اسیدی، خنثی و آهکی گزارش کرد. در طی یک مطالعه، اثرات کاربرد CuSO₄ در ۹ گونه مختلف خرفه بررسی شد و مشاهده شد که زیست توده گیاهی بسته به تنوع ژنتیکی گونه‌های خرفه تغییر می‌کند (Ren & White, 2019). مطالعه حاضر نشان داد که سطح بحرانی مس (میلی‌گرم در کیلوگرم) برای کاهش عملکرد در خرفه در مقایسه با رشد بهینه، غلظت ۳۰۰ برای مناطق R₁ و R₂ و ۴۰۰ برای مناطق R₃ و R₄ است. از آنجا که با افزایش بیشتر غلظت مس، کاهش تدریجی رشد از نظر زیست توده خشک و ارتفاع گیاه وجود داشت این نتایج نشان می‌دهد که گیاه خرفه غلظت مس ≥ 150 میلی‌گرم در کیلوگرم در مناطق R₁ و R₂ و مس ≥ 300 میلی‌گرم در کیلوگرم در مناطق R₃ و R₄ را با تولید زیست توده بالاتر، بهتر می‌تواند تحمل کند.

غلظت‌های زیاد مس را بهتر تحمل کنند (Tashakorizadeh et al., 2022).

در مطالعه حاضر، تجمع بیشتر مس در ریشه‌های گیاه خرفه در مقایسه با اندام هوایی در چهار منطقه مشاهده شد که نشان دهنده تحمل این گونه به فلز سنگین مس است. محدودیت حرکت فلزات از ریشه‌ها به سمت شاخه‌ها را می‌توان به عنوان مکانیزم تحملی که توسط گیاهان انجام می‌شود در نظر گرفت (Verkleij and Schat, 1990). در تجمع مس در ریشه و حرکت کمتر آن به سمت اندام‌های هوایی، در انبوهی از تحقیقات با گیاهان مختلف از جمله *Cucumis sativus* (Alaoui-Sossé et al., 2004)، *Chloris gayana* (Sheldon and Menzies, 2005)، *Oryza sativa* (Thounaojam et al., 2012)، *Amaranthus spinosus* (Elleuch et al., 2013)، *Triticum* (Shahriar Mahmud et al., 2013) و *Phyllostachys pubescens aestivum* (Chen et al., 2015) گزارش شده است.

Sekabira و همکاران (۲۰۱۱) گیاهان را بر اساس شاخص BAF به چهار گروه تقسیم کرده‌اند و گزارش کرده‌اند که گیاهان غیر بیش‌اندوز BAF کمتر از ۰/۰۱، کم بیش‌اندوز بین ۰/۰۱ تا ۰/۱، متوسط بیش‌اندوز بین ۰/۱ تا ۱ و فوق بیش‌اندوز بیش از ۱ دارند (Sekabira et al., 2010). بر اساس داده‌های به دست آمده از BAF، درصد مس جذب شده از خاک توسط ریشه و اندام هوایی در غلظت‌های مختلف مس، در چهار منطقه به طور متوسط در محدوده ۱/۶ در Cu_{400} تا ۹/۴۱ در Cu_0 در ریشه و در محدوده ۱/۰۷ در Cu_{400} تا ۶/۸ در Cu_0 در اندام هوایی متغیر بود که این ارقام گیاه خرفه را در محدوده گیاهان فوق بیش‌اندوز در این مطالعه طبقه بندی می‌کند. همچنین گونه‌های گیاهی با TF کوچکتر از یک به عنوان گونه‌های حذف کننده هستند در حالی که انباشتگرها و

غلظت کلروفیل یک پارامتر مهم برای ارزیابی تنش گیاهی است (Pinheiro et al., 2013). در این مطالعه، محتوای کلروفیل به دلیل سمیت مس به طور قابل توجهی در غلظت‌های بالای مس (Cu_{300} و Cu_{400} برای R_1 و R_2 و Cu_{400} برای R_3 و R_4) کاهش یافت. این کاهش در محتوای کلروفیل ممکن است به دلیل فعالیت‌های مهار شده آنزیم‌های مرتبط با بیوسنتز کلروفیل باشد (Aggarwal et al., 2011). تجمع فلزات سنگین در گیاهان می‌تواند به کلروپلاست آسیب برساند، به عنوان مثال، مسمومیت مس باعث کاهش محتوای کلروفیل و تغییر غشاهای تیلاکوئید می‌شود (Aggarwal et al., 2011). Tang و همکاران (۲۰۱۵) کاهش محتویات کلروفیل در برگ‌های *Boehmeria nivea* را تحت تنش فلز سنگین مس گزارش کردند (Tang et al., 2015). در مطالعه‌ای دیگر کاهش محتویات کلروفیل در برگ‌های گیاه شاهتره تحت تنش غلظت‌های بالای فلز مس گزارش شد (Tashakorizadeh et al., 2022).

گیاهان رشد یافته از بذور جمع‌آوری شده از مناطق R_3 و R_4 ، سطوح بالاتری از غلظت مس را توانستند تحمل کنند و صفات مورفولوژی و محتوای کلروفیل بیشتری را در غلظت‌های بالای مس نشان دادند. مشابه این نتایج بر روی گیاه شاهتره (*Fumaria parviflora*) توسط Tashakorizadeh و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است. رشد و عملکرد گیاهان در اکوسیستم‌ها، تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر نوع گونه، اقلیم منطقه، محیط خاک و موقعیت جغرافیایی قرار دارد (Habibi et al., 2006) و از آنجا که بذور گیاهان مناطق R_3 و R_4 از مناطق با غلظت زیاد مس جمع‌آوری شده‌اند لذا می‌توان انتظار داشت که در طول زمان گیاهان رشد کرده در مناطق R_3 و R_4 که مقاومت کمتری داشتند از بین رفته و به تدریج گیاهان مقاوم یک اکوتیپ تشکیل داده‌اند که می‌توانند

در خاک‌های آلوده به کروم معرفی شد (Azizi et al., 2016).

نتیجه‌گیری نهایی

گیاه خرفه قادر است درصد بالایی از مس قابل جذب از خاک را در اندام‌های مختلف خود به خصوص ریشه‌ها انباشته کند و به عنوان یک گیاه تجمع دهنده برای حذف آلودگی‌های ناشی از مس در منطقه مورد مطالعه استفاده شود. همچنین با توجه به اینکه ضریب انتقال بیولوژیکی در این گیاه کمتر از یک و ضریب تجمع زیستی بالاتر از یک بود می‌توان این گونه را به عنوان تثبیت کننده زیستی مناسب در منطقه مورد مطالعه معرفی کرد. با این حال، اعتقاد بر این است که تجمع فلزات سنگین ممکن است با توجه به تنوع ژنتیکی گونه‌های گیاهی خرفه تغییر کند. بنابراین، مطالعه دقیق توانایی تجمع فلزات سنگین این گیاه پرمصرف در انواع گونه‌های ژنتیکی این گیاه توصیه می‌شود. گیاهان رشد یافته از بذور جمع‌آوری شده از مناطق باغلظت بالای مس (R_3 و R_4) قادر به رشد طولی اندام هوایی و تولید کلروفیل بیشتر و تجمع مس بالاتری در ریشه نسبت به مناطق پایین‌تر (R_1 و R_2) در غلظت‌های بالای مس بودند. بنابراین توصیه می‌شود جهت کشت گیاه خرفه در خاک‌های آلوده به مس، بذر گیاه خرفه از مناطق با غلظت بالای مس جمع‌آوری شود.

بیش‌انباشتگرها TF بزرگتر از یک دارند (Yin et al., 2015). در مطالعه حاضر فاکتور انتقال بیولوژیکی در گیاه خرفه در محدوده ۰/۵۶ تا ۰/۷۳ تعیین شد. کمتر از یک بودن TF در گیاه خرفه، نشان‌دهنده محدودیت توانایی انتقال مس از ریشه به اندام هوایی این گیاه و تجمع بیشتر عنصر مس جذب شده از خاک در ریشه گیاه می‌باشد و گیاه خرفه، انباشتگر مس در ریشه‌های خود می‌تواند باشد و به عنوان یک گیاه حذف کننده در منطقه مورد مطالعه طبقه بندی می‌شود. تجمع بیشتر مس در ریشه گیاه و انتقال کمتر آن به اندام هوایی را می‌توان به گیاهان دافع نسبت داد که در خاک‌هایی با غلظت زیاد فلزات سنگین، فقط فلزات را در ریشه‌های خود نگه داشته و از انتقال آن به بخش‌های هوایی جلوگیری می‌کنند (Salehi, 2019). محققین یکی از دلایل عدم تحرک برخی فلزات در گیاهان را اتصال این فلزات به سلول‌های ریشه دانسته‌اند که می‌تواند نوعی مکانیسم تحمل گیاه محسوب شود (Peng et al., 2015). از طرفی گیاهان با ضریب تجمع بیولوژیکی در ریشه بزرگتر از یک و فاکتور انتقال کوچکتر از یک، برای تثبیت گیاهی مناسب هستند (Zacchini et al., 2009) پس گیاه خرفه به عنوان یک گیاه تثبیت کننده زیستی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. مشابه این نتایج در مطالعه تاثیر کروم بر گیاه خرفه توسط Azizi و همکاران (۲۰۱۶) گزارش شد و این گیاه به عنوان یک گیاه تثبیت کننده

References

- Aggarwal, A., Sharma, I., Tripathi, B. N., Munjal, A. K., Baunthiyal, M. and Sharma, V. (2012). Metal toxicity and photosynthesis. *Photosynthesis: Overviews on recent progress and future Perspectives*. 229-236. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45975-8_17
- Alaoui-Sossé, B., Genet, P., Vinit-Dunand, F., Toussaint, M. L., Epron, D. and Badot, P. M. (2004). Effect of copper on growth in cucumber plants (*Cucumis sativus*) and its relationships with carbohydrate accumulation and changes in ion contents. *Plant Science*. 166(5): 1213-1218. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.12.032>
- Azizi, E., Rahbarian, R. and Mirbolook, A. (2016). Phytoremediation of Cr^{+6} in contaminated soil using *Portulaca oleracea*. *Iranian Journal of Soil Research*. 30(2): 161-172. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2016.106718>

- Chaney, R. L., Malik, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Brewer, E. P., Angle, J. S. and Baker, A. J. (1997). Phytoremediation of soil metals. *Current opinion in Biotechnology*. 8(3): 279-284. [https://doi.org/10.1016/s0958-1669\(97\)80004-3](https://doi.org/10.1016/s0958-1669(97)80004-3)
- Chen, J., Shafi, M., Li, S., Wang, Y., Wu, J., Ye, Z. ... and Liu, D. (2015). Copper induced oxidative stresses, antioxidant responses and phytoremediation potential of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*). *Scientific Reports*. 5(1): 13554. <https://doi.org/10.3390/su15065238>
- Cros, V., Martínez-Sánchez, J. J., Fernández, J. A., Conesa, E., Vicente, M. J., Franco, J. A. and Carreno, S. (2006, February). Salinity effects on germination and yield of purslane (*Portulaca oleracea* L.) in a hydroponic floating system. In VIII International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Advances in Soil and Soilless Cultivation. 747: 571-579. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.747.74>
- Elleuch, A., Chaâbene, Z., Grubb, D. C., Drira, N., Mejdoub, H. and Khemakhem, B. (2013). Morphological and biochemical behavior of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) under copper stress. *Ecotoxicology and environmental safety*. 98: 46-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.09.028>
- Farooq, A., Nadeem, M., Abbas, G., Shabbir, A., Khalid, M. S., Javeed, H. M. R. ... and Akhtar, G. (2020). Cadmium partitioning, physiological and oxidative stress responses in marigold (*Calendula calypso*) grown on contaminated soil: Implications for phytoremediation. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 105: 270-276. Doi: 10.1007/s00128-020-02934-6
- Gong, Q., Li, Z. H., Wang, L., Zhou, J. Y., Kang, Q. and Niu, D. D. (2021). Gibberellic acid application on biomass, oxidative stress response, and photosynthesis in spinach (*Spinacia oleracea* L.) seedlings under copper stress. *Environmental Science and Pollution Research*. 28(38): 53594-53604. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13745-5>
- Habibi, H.; Mazaheri, D.; Majnoon Hosseini, N.; Chai Chi, M.R.; Fakhr Tabatabai, M. and Bigdley, M. (2006). Effect of altitude on essential oil and medicinal compounds of wild thyme (*Thymus kotschymanus* Boiss.) Taleghan region. *Italian Journal of Research and Construction in Agriculture and Horticulture*. 73: 2-10.
- Lichtenthaler, H. K. and Wellburn, A. R. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transaction*. 11 (5): 591-592. <https://doi.org/10.1042/bst0110591>
- Lothe, A. G., Hansda, A. and Kumar, V. (2016). Phytoremediation of Copper-Contaminated Soil Using *Helianthus annuus*, *Brassica nigra*, and *Lycopersicon esculentum* Mill. A Pot Scale Study. *Environmental Quality Management*. 25(4): 63-70. <https://doi.org/10.1002/tqem.21463>
- Masoodi, M. H., Ahmad, B., Mir, S. R., Zargar, B. A. and Tabasum, N. (2011). *Portulaca oleracea* L. a review. *Journal of Pharmacy Research*. 4(9): 3044-3048. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080353>
- Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. and Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental chemistry letters*. 8: 199-216. <http://dx.doi.org/10.1007/s10311-010-0297-8>
- Negi, S. (2018). Heavy metal accumulation in *Portulaca oleracea* Linn. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 7(3): 2978-2982. DOI: 10.15832/ankutbd.1346861
- Peng, D., Shafi, M., Wang, Y., Li, S., Yan, W., Chen, J. and Ye, Liu. (2015). Effect of Zn stresses on physiology, growth, Zn accumulation, and chlorophyll of *Phyllostachys pubescens*. *Environmental Science and Pollution Research International*. 22(19): 14983-14992. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4692-3>
- Pinhoiro, J. C., Marques, C. R., Pinto, G., Bouguerra, S., Mendo, S., Gomes, N. C. ... and Pereira, R. (2013). The performance of *Fraxinus angustifolia* as a helper for metal phytoremediation programs and its relation to the endophytic bacterial communities. *Geoderma*. 202: 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.014>

- Ramteke, S., Sahu, B. L., Dahariya, N. S., Patel, K. S., Blazhev, B. and Matini, L. (2016). Heavy metal contamination of vegetables. *Journal of Environmental Protection*. 7(7): 996-1004. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2016.77088>
- 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(1): 29-38. <https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0786>
- Ren, S. and White, L. (2019). Genetic variation of copper stress tolerance and shoot copper accumulation in Purslane (*Portulaca oleracea*). *Journal of Biotech Research*. 10: 213-222. DOI: 10.15832/ankutbd.1346861
- Salehi, A. (2019). Phytoremediation: A remediation technology of heavy metal contaminated soils. *Iranian Journal of Human and Environment*. 49: 27-42.
- Sekabira, K., Oryem-Origa, H., Mutumba, G. B. and Basamba, T. A. (2011). Heavy metal phytoremediation by *Commelina benghalensis* (L) and *Cynodon dactylon* (L) growing in urban stream sediments. *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry*. 3(8): 133-142. <http://hdl.handle.net/20.500.12306/375>
- Shahriar Mahmud, S. M., Hassan, M. M., Moniruzzaman, M., Nirupam Biswas, N. B., Rahman, M. M. and Haque, M. E. (2013). Study on the accumulation of copper from soil by shoots and roots of some selective plant species. *International Journal of Biosciences*. 3(6): 68-75. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/3.6.68-75>
- Sheldon, A. R. and Menzies, N. W. (2005). The effect of copper toxicity on the growth and root morphology of Rhodes grass (*Chloris gayana* Knuth.) in resin buffered solution culture. *Plant and Soil*. 278: 341-349. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8815-3>
- Talukder, K. H., Ahmed, I. U., Islam, M. S., Asaduzzaman, M. and Hossain, M. D. (2011). Incubation Studies on Exchangeable Z n for Varying Levels of added Z n Under Aerobic and Anaerobic Conditions in Grey Terrace Soils, Non Calcarious Floodplain Soils and Calcarious Floodplain Soils. *Journal of science Foundation*. 9(1-2): 9-15. <https://doi.org/10.3329/JSF.V9I1-2.14643>
- Tang, H., Liu, Y., Gong, X., Zeng, G., Zheng, B., Wang, D. ... and Zeng, X. (2015). Effects of selenium and silicon on enhancing antioxidative capacity in ramie (*Boehmeria nivea* L. Gaud.) Under cadmium stress. *Environmental Science and Pollution Research*. 22: 9999-10008. Doi: 10.1007/s11356-015-4187-2
- Tashakorizadeh, M., Vahabi, M. R., Golkar, P. and Mahdavian, K. (2022). The singular and combined effects of drought and copper stresses on the morphological traits, photosynthetic pigments, essential oils yield and copper concentration of *Fumaria parviflora* Lam. *Industrial Crops and Products*. 177: 114517. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114517>
- Thounaojam, T. C., Panda, P., Mazumdar, P., Kumar, D., Sharma, G. D., Sahoo, L. and Sanjib, P. (2012). Excess copper induced oxidative stress and response of antioxidants in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*. 53: 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.01.006>
- Tu, C. (1992). Copper forms in purple soils and their toxicity to rice. *Cabidigitallibrary*. 33: 54-31
- Verkleij, J. A. C. and Schat, H. (1990). Mechanisms of metal tolerance in higher plants. *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*. 2: 179-194.
- Yang, S., Zhang, J. and Chen, L. (2021). Growth and physiological responses of *Pennisetum* sp. to cadmium stress under three different soils. *Environmental Science and Pollution Research*. 28: 14867-14881. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11701-3>
- Yin, Y., Wang, Y., Liu, Y., Zeng, G., Hu, X., Hu, X. and Li, J. (2015). Cadmium accumulation and apoplastic and symplastic transport in *Boehmeria nivea* L. Gaudich on cadmium-contaminated soil with the addition of EDTA or NTA. *RSC Advances*. 5(59): 47584-47591.
- Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q. and Ma, L. Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*. 368(2-3): 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016>

- Zacchini, M., Pietrini, F., Scarascia Mugnozza, G., Iori, V., Pietrosanti, L. and Massacci, A. (2009). Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics. *Water Air and Soil Pollution*. 197(1-4): 23-34.
- Zargari, A. (1997). *Medicinal Plants* University of Tehran Press. Tehran. 3: 80-8. (In Persian).
- Zhang, D., Liu, X., Ma, J., Yang, H., Zhang, W. and Li, C. (2019). Genotypic differences and glutathione metabolism response in wheat exposed to copper. *Environmental and Experimental Botany*. 157: 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.032>