J. Soil and Plant Interactions, Vol. 15, No. 3, Fall 2024, pp. 53-69. **Research Article**

https://jspi.iut.ac.ir EISSN: 2783-5286 https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21451

The Interaction Effect of Salinity Stress and Copper on The Growth and Phytoremediation Potential of *Bassia scoparia* L.

Z. Khodadadi[1], M. Moudi[2], S.M. Mousavi-Kuohi[2]* and M.S. Hosseinzadeh[2]

(Received: 23 July 2024; Accepted: 8 September 2024)

Abstract

In some saline areas, pollutants such as heavy metals have been spread due to industrial activities. Halophyte plants can be useful for phytoremediation of such areas. To investigate the effect of salinity and heavy metal copper and their interaction effect on the halophyte plant *Bassia scoparia* L., two factorial experiments were conducted in a completely randomized design in hydroponics laboratory of Birjand University. In the first experiment, interaction effects of five levels of salinity (0, 100, 200, 300, and 400 mM) and five levels of copper (0, 50, 100, 200, and 300 mg/L) on the germination characteristics of *B. scoparia* seeds were measured. Results of this experiment showed that the increase in salinity and copper concentration had a significant negative effect on the germination and growth of seedlings. In the second experiment, the effects of three levels of salinity (0, 100, and 300 mM) and three levels of copper (0, 50, and 100 mg/L) on the traits related to growth and sodium and copper contents in root and shoot were investigated in pot culture. Salinity significantly increased the amount of sodium in root and shoot but did not affect the amount of copper in root and shoot. In the copper treated conditions, amount of this metal increased in root and shoot of *B. scoparia*. However, by having accumulation factors of less than one, *B. scoparia* does not seem suitable for plant extraction of copper, although it can be used to stabilize this metal by having a suitable biomass and considerable absorption of copper in root.

Keywords: *Bassia scoparia*, Germination, Heavy metal, Sodium chloride, Stress.

Background and Objective: One of the serious environmental pollutants is heavy metals, which have been rapidly increasing over the years due to industrial processes and human activities. Copper (Cu) is one of the heavy metals that causes toxicity in many plant species. Screening different plants is very important to know their capability for phytoremediation of heavy metals, especially under stressful environmental conditions such as salt stress. This research examines the phytoremediation capability of *Bassia scoparia* L. for copper under salt stress.

Methods: To investigate the effect of different levels of salinity and Cu and their interaction on *B. scoparia*, two factorial experiments were conducted in a completely randomized design with three replications. In the

1- Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran.
2- Department of Biology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran.
* Corresponding author, Email: smmousavi@birjand.ac.ir

first experiment, the interaction effects of five levels of salinity (0, 100, 200, 300, and 400 mM NaCl) and five levels of Cu (0, 50, 100, 200, and 300 mg/L) on the germination characteristics of *B. scoparia* seeds were measured. In the second experiment, the effects of three levels of salinity (0, 100, and 300 mM) and three levels of Cu (0, 50, and 100 mg/L) on the lengths and dry weights of root and shoot, the amounts of chlorophyll a, b, and carotenoid, the amounts of Na and Cu in the root and shoot were investigated. After measuring the concentrations of Na and Cu in the roots and shoots, the accumulation coefficients of these elements, including bioconcentration factor (BCF), accumulation factor (AF), and translocation factor (AF) were also calculated.

Results: The results of the first experiment showed that the increase in salinity and Cu had a significant effect on the percentage, index, and speed of germination, lengths of shoot and root, and dry weights of shoot and root of seedlings so that both treatments and their combination reduced these germination traits. Germination almost stopped under the simultaneous treatment of Cu and salinity at high concentrations. According to the results of the second experiment, salt and Cu at high concentrations caused a decrease in the growth and development of the plant, and this decrease was greater under their combined stressful conditions. Salinity significantly increased the amounts of sodium in the root and shoot but did not affect the amounts of Cu in the root and shoot. In the copper treated conditions, the amount of this metal was increased in the root and shoot of plants.

Conclusions: Although *B. scoparia* shows high resistance to salinity and tolerates moderate concentrations of Cu, it is unable to tolerate the simultaneous treatment of Cu and salinity. It is also sensitive to high concentrations of Cu. Moreover, considering that the accumulation coefficients (AF, BCF, and TF) for Cu in *B. scoparia* were less than one, this plant does not seem to be suitable for plant extraction of Cu, although it can be used to stabilize this metal by having suitable biomass and significant absorption of Cu in the root.

References:

1. Al Defferi, M. E., AL-Janabi, Q. A., Mustafa, S. A., AL-Muttarri, A. K., 2019. Phytoremediation of lead and nickel by *Bassia scoparia*. Plant Arch. 19(2), 3830–3834. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22142.13128.
2. Mousavi Kouhi, S. M., Moudi, M., 2020. Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted saline–sodic soil. Environ. Sci. Pollut. Res. 27(9), 10027–10038. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-07578-6.
3. Usman, A. R. A., Kuzyakov, Y., Stahr, K., 2018. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil. Soil Sediment Contam. 14(4), 329–344. https://doi.org/10.1080/15320380590954051.

روابط خاک و گیاه/ سال پانزدهم / شماره سوم / پاییز ۱۴۰۳ / صفحات ۶۹-۵۳
https://doi.org/10.47176/jspi.15.3.21451 EISSN: 2783-5286 https://jspi.iut.ac.ir
مقاله پژوهشی

اثر برهمکنش تنش شوری و مس بر رشد و توان گیاه‌پالایی گیاه جارو (*Bassia scoparia* L.)

زهرا خدادادی[۱]، مریم مودی[۲]، سید موسی موسوی کوهی[۲*] و محبوبه سادات حسین‌زاده[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۸)

چکیده

در برخی از نواحی شور به دلیل فعالیت‌های صنعتی، آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین گسترش یافته است. گیاهان شورزی می‌توانند برای گیاه‌پالایی این نواحی مفید باشند. به‌منظور بررسی اثر شوری و فلز سنگین مس و اثر برهمکنش آن‌ها بر گیاه شورزی جارو (*Bassia scoparia* L.)، دو آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه هیدروپونیک دانشگاه بیرجند انجام شد. در آزمایش اول، آثار اصلی و برهمکنش پنج سطح شوری (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار) و پنج غلظت فلز سنگین مس (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر ویژگی‌های جوانه‌زنی بذر جارو مورد سنجش قرار گرفت. نتایج این آزمایش نشان داد که افزایش شوری و غلظت مس تأثیر منفی معنی‌داری بر جوانه‌زنی و رشد گیاهچه‌های جارو دارد. در آزمایش دوم، در کشت گلدانی اثر سه سطح شوری (صفر، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار) و سه غلظت مس (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر صفات رشدی و غلظت سدیم و مس در ریشه و شاخساره مورد بررسی قرار گرفت. شوری به‌طور معنی‌داری غلظت سدیم را در ریشه و شاخساره افزایش داد اما تأثیری بر غلظت مس در ریشه و شاخساره نداشت. تحت تأثیر غلظت مس در محیط ریشه، غلظت این فلز در ریشه و شاخساره افزایش یافت. با این وجود، گیاه جارو به دلیل داشتن ضرایب انباشتگی کم‌تر از یک، برای استخراج گیاهی فلز سنگین مس مناسب به‌نظر نمی‌رسد، هر چند با دارا بودن زی‌توده مناسب و جذب قابل توجه مس در ریشه می‌تواند برای تثبیت این فلز مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تنش، جوانه‌زنی، فلز سنگین، کلرید سدیم، گیاه جارو.

مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و صنایع مختلف در جهان، موجبات به خطر افتادن منابع طبیعی و آلودگی محیط زیست شده است (Pirzadah et al., 2019). آلودگی محیطی آثار نامطلوبی بر حیات گیاهان، جانوران و انسان‌ها می‌گذارد. ماده‌ای که باعث آلودگی محیط زیست می‌شود به‌عنوان آلاینده شناخته می‌شود. آلاینده‌ها می‌توانند مواد جامد، مایع یا گازی باشند که به‌دلیل فعالیت‌های انسانی یا رخدادهای طبیعی تولید شوند. گروهی از آلاینده‌ها به‌سرعت توسط فرآیندهای طبیعی تجزیه می‌شوند، درحالی‌که گروهی دیگر از آلاینده‌ها به آهستگی

۱- گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع‌طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: smmousavi@birjand.ac.ir

تجزیه شده و برای چندین دهه بدون تغییر در محیط‌زیست باقی می‌مانند (Li et al., 2017).

یکی از آلودگی‌های جدی زیست‌محیطی فلزات سنگین است که در طی سال‌ها به دلیل فرآیندهای صنعتی و فعالیت‌های انسانی به‌سرعت در حال افزایش می‌باشند. اگرچه آثار مضر فلزات سنگین مدت زیادی است که شناخته شده است، اما قرار گرفتن در معرض این فلزات همچنان در برخی مناطق ادامه دارد و حتی در حال افزایش است. تأثیر فلزات سنگین بر سلامتی انسان حتی می‌تواند منجر به مرگ شود (Pehlivan et al., 2009). این نوع آلودگی باعث کاهش بازدهی کشاورزی می‌شود. جذب فلزات سنگین در گیاهان از مهم‌ترین راه‌های قرار گرفتن انسان در معرض آلودگی فلزات سنگین است (Alengebawy et al., 2021). آلودگی زیست‌کره توسط فلزات سنگین پس از انقلاب صنعتی به‌شدت تسریع شده است. منابع طبیعی، کشاورزی و صنعتی از متداول‌ترین منابع آلوده‌کننده محیط زیست به فلزات سنگین به‌شمار می‌روند (Roy et al, 2005).

از انواع فلزات سنگین می‌توان به آرسنیک، کادمیوم، کروم، مس، جیوه، نیکل و سرب اشاره کرد. در بین فلزات سنگین، مس به‌عنوان یک عنصر ضروری و یک عنصر غذایی کم‌مصرف برای گیاه است (Nouri et al., 2011). در بسیاری از گونه‌های گیاهی مقدار زیاد مس موجب سمیّت می‌شود (Margesin et al., 2000). غلظت آستانه سمیّت مس برای محصولات کشاورزی تقریباً برابر ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه است. افزایش غلظت مس در گیاهان باعث کاهش رشد و باعث مختل‌شدن فرآیندهای سلولی مانند تنفس و فتوسنتز می‌شود. جذب مس از خاک توسط گیاه، به توانایی گیاه در انتقال فلز مس از خاک به ریشه و همچنین به کل مقدار مس موجود در خاک بستگی دارد (Couto et al., 2010).

تنش شوری از تنش‌های مهم غیرزیستی است، که آثار زیان‌باری بر عملکرد و کیفیت محصولات زراعی دارد. شوری در بسیاری از مناطق کشاورزی دنیا به‌ویژه در آب و هوای خشک و نیمه‌خشک از عوامل مهم محدودکننده رشد گیاهان زراعی به‌شمار می‌رود (Flowers, 2004). شوری در گیاهان زراعی، رشد و نمو گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان نمونه شوری موجب کاهش و به تأخیرافتادن جوانه‌زنی بذر، کاهش رشد شاخساره و کاهش تولید ماده خشک می‌شود. کاهش سطح برگ سریع‌ترین پاسخ گیاه به شوری است و با افزایش سطح شوری توسعه برگ‌ها متوقف می‌شود (Mostafazadeh Fard et al., 2021).

روش‌های مختلفی برای حذف یا کاهش فلزات سنگین ارائه شده است که شامل روش‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک است. از روش‌های مهم برای بهسازی مناطق آلوده که نسبت به سایر روش‌ها دارای معایب کم‌تری است، می‌توان به گیاه‌پالایی اشاره کرد. در مناطق آلوده به فلزات سنگین، انتخاب گیاهانی با تحمل زیاد نسبت به فلزات سنگین، برای حذف و کاهش آلاینده‌ها می‌تواند یک راهبرد مناسب برای مدیریت زمین‌ها باشد (Kummerova et al., 2010). گیاه‌پالایی روشی است که در آن گیاهان با مکانیسم‌هایی مانند پالایش ریشه‌ای، تثبیت گیاهی، استخراج گیاهی، تبخیر گیاهی و تغییرشکل گیاهی، آلاینده‌ها را از اکوسیستم آبی و خاکی حذف یا بی‌اثر می‌کنند (Paganova et al., 2022). گیاهان زیادی به‌منظور گیاه‌پالایی توسط پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته‌اند. توانایی ذاتی در سازگاری با محیط‌زیست و شرایط اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در گیاه‌پالایی دارد (Mousavi et al., 2014).

گیاهان بسته به نوع مقاومت در مواجهه با آلودگی فلز سنگین به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱) گیاهان معرف[1] که فلزات را در بافت‌های هوایی خود انباشته می‌کنند و آثار ناشی از سمیّت فلز مانند زردشدن، چروکیدگی و پیری زودرس برگ‌ها با توجه به غلظت محیطی فلز در این گیاهان پدیدار می‌شود و ملاک شناسایی این گیاهان است. در گیاهان معرف، غلظت فلز جذب‌شده در گیاه بیانگر غلظت فلز در خاک است (Niu et al., 2023)، ۲) گیاهان دوری‌گزین[2] که به‌طور مؤثر از

1. Metal indicator
2. Metal excluders

ورود فلز به بخش‌های هوایی خود علی‌رغم حضور غلظت‌های زیاد فلزات سنگین در خاک جلوگیری می‌کنند؛ این گیاهان ممکن است دارای مقادیر زیادی از فلزات در ریشه‌های خود باشند (Rahman et al., 2024)، و ۳) گیاهان انباشته‌کننده[1] که توانایی جذب و تجمع فلز در آلودگی‌های کم تا زیاد را دارند. در واقع غلظت فلز در این گیاهان در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۰۰ برابر بیش‌تر از غلظت فلز در سایر گیاهانی است که در خاک‌های آلوده رشد می‌یابند (Asare et al., 2023).

نتایج پژوهش‌های انجام‌شده حاکی از آن هستند که برخی از گیاهان می‌توانند برای پاک‌سازی فلزات سمّی مؤثر باشند. از آنجایی‌که زی‌توده زیاد و سازگاری مناسب با شرایط محیطی از جمله ویژگی‌های گیاهان مناسب برای اهداف گیاه‌پالایی است (Mousavi-Kouhi and Moudi, 2020)، غربال‌گری گیاهان مختلف به‌منظور بررسی توانایی آن‌ها برای گیاه‌پالایی فلزات سنگین به‌ویژه در شرایط محیطی تنش‌زا مانند تنش شوری، اهمیت زیادی دارد. بنابراین در این پژوهش، توان گیاه‌پالایی گیاه جارو برای عنصر مس تحت تنش شوری بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش اول: بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های جوانه‌زنی

در این آزمایش، بذرهای گیاه جارو تحت تیمارهای شوری (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار)، مس (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و همچنین تیمارهای ترکیبی آن‌ها با غلظت‌های ذکرشده قرار گرفت. برای این منظور، ۲۰ عدد بذر به‌طور تصادفی و به یک اندازه انتخاب شده و با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم چهار درصد به مدت پنج دقیقه ضدعفونی شده و سپس سه بار با آب مقطر شستشو شدند. سپس بذرهای ضدعفونی‌شده بر روی کاغذ صافی در پتری‌دیش‌های استریل که حاوی ۷ سی‌سی از محلول‌های تهیه‌شده از تیمارهای ذکرشده بود، کشت شدند و هر پتری به‌عنوان یک واحد آزمایشی در نظر گرفته شد. برای تیمار شوری از کلرید سدیم (NaCl) و برای تیمار مس از سولفات مس ($CuSO_4$) استفاده شد. در مرحله بعدی پتری‌دیش‌ها در انکوباتور با دما ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۷۰ درصد، در تاریکی قرار داده شد و هر روز تعداد بذرهای جوانه‌زده شمارش شد. پس از یک هفته، سرعت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی و شاخص جوانه‌زنی به‌کمک فرمول‌های زیر محاسبه شدند (Kulkarni et al., 2007):

$$\text{درصد جوانه‌زنی} = \sum \frac{n}{S} \times 100 \quad (۱)$$

$$\text{سرعت جوانه‌زنی} = \sum_{1}^{j} \frac{n_i}{D_i} \quad (۲)$$

$$\text{شاخص جوانه‌زنی} = \frac{\sum T_i N_i}{S} \quad (۳)$$

که در این روابط، T_i زمان شمارش پس از کاشت، N_i تعداد بذرهای جوانه‌زده در هر شمارش، D_i تعداد روز پس از شروع آزمایش، S کل بذرهای کشت‌شده و N تعداد بذر جوانه‌زده در روزهای شمارش است.

آزمایش دوم: بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک در کشت گلدانی

کشت گلدانی و اعمال تیمارها

پس از بررسی آثار تیمارهای مختلف شوری و مس بر گیاه در مرحله جوانه‌زنی، غلظت‌های مناسبی از این تیمارها برای آزمایش دوم انتخاب شدند. تیمارها با استفاده از محلول غذایی هوگلند تهیه شد تا به‌طور همزمان گیاهان مورد تغذیه قرار گیرند. بذرهای مورد نیاز برای انجام این آزمایش مشابه آزمایش اول ضدعفونی شد. برای کشت، ۹ گلدان به قطر ۱۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر تهیه شده و تعداد ۲۰ بذر با فواصل مشخص در هر گلدان با بستر پرلیت کشت داده شد. سپس گلدان‌ها به درون یک محفظه نوری با دوره نور/تاریکی ۸/۱۶ ساعت انتقال داده شد. پس از جوانه‌زنی بذرها، گلدان‌ها با غلظت‌های مختلفی از مس (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و شوری (صفر، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار) و ترکیبی از این

1. Metal accumulators

تیمارها تیمار شدند. گلدان‌ها بر حسب نوع تیمار در چهار گروه دسته‌بندی شدند:

۱) گلدان‌های شاهد که با محلول غذایی هوگلند ۵۰ درصد تیمار شدند.

۲) گلدان‌هایی که با غلظت‌های مشخص NaCl (۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار) تیمار شدند.

۳) گلدان‌هایی که با غلظت‌های مشخص مس (۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) تیمار شدند.

۴) گلدان‌هایی که با ترکیب غلظت‌های ذکرشده مس و NaCl تیمار شدند.

چهل روز پس از کشت اولیه، گیاهان برداشت شده و سنجش‌های مختلف مورفولوژیک و فیزیولوژیک روی آن‌ها انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت) قرار داده شد و سپس به وسیله ترازوی دیجیتال توزین شد.

سنجش کلروفیل و کاروتنوئید برگ

برای سنجش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید برگ، ابتدا مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم بافت تازه برگ با استون ۸۰٪ در هاون چینی هموژنیزه شد. سپس عصاره هموژنیزه‌شده به حجم ۱۵ میلی‌لیتر رسانده شد. عصاره استونی استخراج‌شده به مدت ۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور سانتریفیوژ شد. در نهایت جذب روشناور استونی با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۴۷ و ۶۶۳ و ۴۷۰ نانومتر ثبت شد و مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید با روابط زیر محاسبه شد (Beyk-Khormizi et al., 2023):

میلی‌گرم کروفیل a در گرم بافت تازه برگ

$$= [12.21(A_{663})-2.79(A_{647})]\times V/(W\times 1000) \quad (۴)$$

میلی‌گرم کلروفیل b در گرم بافت تازه برگ

$$= [21.21(A_{647})-5.1(A_{663})]\times V/(W\times 1000) \quad (۵)$$

= میلی‌گرم کاروتنوئید در گرم بافت تازه برگ

$$[1000(A470)-1.8(Chl\ a)-85.02(Chl\ b)] /198\times V/(W\times 1000) \quad (۶)$$

سنجش انباشتگی عناصر مس و سدیم در ریشه و برگ

نخست نمونه‌های خشک‌شده ریشه و برگ با آسیاب برقی پودر شدند. مقدار ۲۰۰ میلی‌گرم از پودر تهیه‌شده ریشه یا برگ با دقت وزن شده و به‌صورت جداگانه به هر کدام ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱۵/۸ نرمال افزوده شد تا عمل هضم بافت در ارلن‌هایی که درب آنها مسدود شده بود به مدت یک شب ادامه یابد. پس از این مدت، ارلن‌ها به مدت یک ساعت در آون تحت دمای ۹۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا به‌شدت هضم بافت‌ها افزوده شود. پس از سردشدن نمونه‌های خارج‌شده از آون، برای تسریع هضم بافت‌ها، یک میلی‌لیتر محلول پراکسید هیدروژن ۳۰٪ به مخلوط واکنش افزوده شد. سپس برای هضم کامل بافت‌ها، ارلن‌ها بر روی اجاق برقی قرار داده شدند و گرمادهی تا خشک‌شدن تقریبی مخلوط واکنش ادامه یافت. در ادامه، ارلن‌ها از روی اجاق برقی برداشته شده و پس از سردشدن، با استفاده از آب دیونیزه حجم اندک محلول باقی‌مانده برای نمونه‌های ریشه به ۱۰۰ میلی‌لیتر و برای نمونه‌های برگ به ۲۵ میلی‌لیتر رسانده شد (Mousavi-Kouhi et al. 2015). در انتها، غلظت عناصر با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS, AA-6300, Shimadzu, Japan) سنجش شد و غلظت نهایی عناصر در نمونه‌ها بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه از رابطه زیر به‌دست آمد:

غلظت نهایی عنصر = [(قرائت AAS × حجم نمونه (میلی‌لیتر)) / وزن اولیه نمونه (گرم)] (۷)

محاسبه ضرایب انباشتگی سدیم و مس

پس از اندازه‌گیری غلظت سدیم و مس در ریشه و شاخساره، ضرایب انباشتگی این عناصر با رابطه‌های زیر مورد محاسبه قرار گرفت:

ضریب انباشتگی زیستی[1] = (غلظت عنصر در ریشه) / (غلظت عنصر در محیط) (۸)

1. Bioconcentration factor

=ضریب انباشت[1]

(۹) (غلظت عنصر در محیط) / (غلظت عنصر در شاخساره)

= ضریب انتقال[2]

(۱۰) (غلظت عنصر در ریشه) / (غلظت عنصر در شاخساره)

تحلیل آماری: آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شدند. برای تجزیه واریانس و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار R و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج

بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های جوانه‌زنی

آثار اصلی و برهمکنش شوری و مس تأثیر معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بر درصد جوانه‌زنی بذرهای گیاه جارو داشت. شوری در غلظت‌های ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار منجر به کاهش درصد جوانه‌زنی این گیاه شد به‌طوری‌که درصد جوانه‌زنی در شوری ۴۰۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد حدود ۷۸ درصد کاهش یافت. با افزایش سطح شوری، سرعت جوانه‌زنی گیاه جارو نیز به میزان۹۰ درصد کاهش یافت. کم‌ترین مقدار سرعت جوانه‌زنی در سطح شوری ۴۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد (۳/۲۶ درصد در روز).

کاهش معنی‌دار درصد و سرعت جوانه‌زنی در غلظت‌های زیاد مس نیز مشاهده شد. شاخص جوانه‌زنی گیاه جارو در تیمارهای غلظت مس ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت. بیش‌ترین کاهش شاخص جوانه‌زنی در غلظت مس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد و حدود ۴۳ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. مقادیر زیاد شوری نیز منجر به کاهش معنی‌دار شاخص جوانه‌زنی شد که این کاهش در تیمارهای شوری ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود (جدول ۱). در تیمار همزمان مس و شوری در غلظت‌های زیاد، جوانه‌زنی تقریباً موقف شد به‌طوری‌که در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مس و سطح شوری ۴۰۰ میلی‌مولار، درصد جوانه‌زنی ۹۶ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت. کاهش سرعت جوانه‌زنی و شاخص جوانه‌زنی با کاربرد مس در حضور سطوح بالای شوری حدود ۹۷ درصد بود (جدول ۱).

نتایج نشان داد که گرچه شوری اثر معنی‌داری بر طول شاخساره و ریشه‌چه نداشت اما وزن خشک اندام‌ها را به‌صورت معنی‌داری کاهش داد. وزن خشک شاخساره در بالاترین سطح شوری نسبت به شاهد حدود ۷۶ درصد کاهش یافت. همچنین کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه‌چه در شوری‌های بیش‌تر از ۱۰۰ میلی‌مولار نیز مشاهده شد به‌طوری‌که در بالاترین سطح شوری، وزن خشک ریشه‌چه گیاه جارو نسبت به شاهد بیش از ۹۵ درصد کاهش یافت (جدول ۱).

تنش مس هم بر طول و هم بر وزن خشک شاخساره و ریشه‌چه اثر منفی معنی‌دار داشت. به‌کارگیری مس به‌تنهایی موجب کاهش طول شاخساره و ریشه‌چه در گیاه جارو شد که این کاهش در تمامی تیمارهای مس معنی‌دار بود. کاربرد مس به‌تنهایی همچنین منجر به کاهش وزن خشک شاخساره و ریشه‌چه شد که این کاهش وابسته به غلظت بود و با افزایش غلظت مس وزن خشک نیز کاهش پیدا کرد.

تیمار همزمان مس و شوری اثر منفی فزاینده‌ای بر طول و وزن خشک شاخساره و ریشه‌چه داشت به‌طوری‌که تیمار با سطح مس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و شوری ۴۰۰ میلی‌مولار موجب کاهش بیش از ۹۰ درصد طول شاخساره و ریشه‌چه و همچنین باعث کاهش بیش از ۹۵ درصد وزن خشک ریشه‌چه در مقایسه با شاهد شد (جدول ۱).

بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک

نتایج نشان داد که تیمار شوری منجر به کاهش طول ریشه و شاخساره در گیاه جارو شد که این کاهش، پاسخی وابسته به غلظت بوده و با افزایش شوری، کاهش بیش‌تری در طول ریشه و شاخساره مشاهده شد. شوری ۳۰۰ میلی‌مولار، طول

1. Accumulation factor
2. Translocation factor

جدول ۱. مقایسه میانگین صفات مربوط به جوانه‌زنی در گیاه جارو تحت سطوح مختلف شوری و غلظت‌های مختلف مس

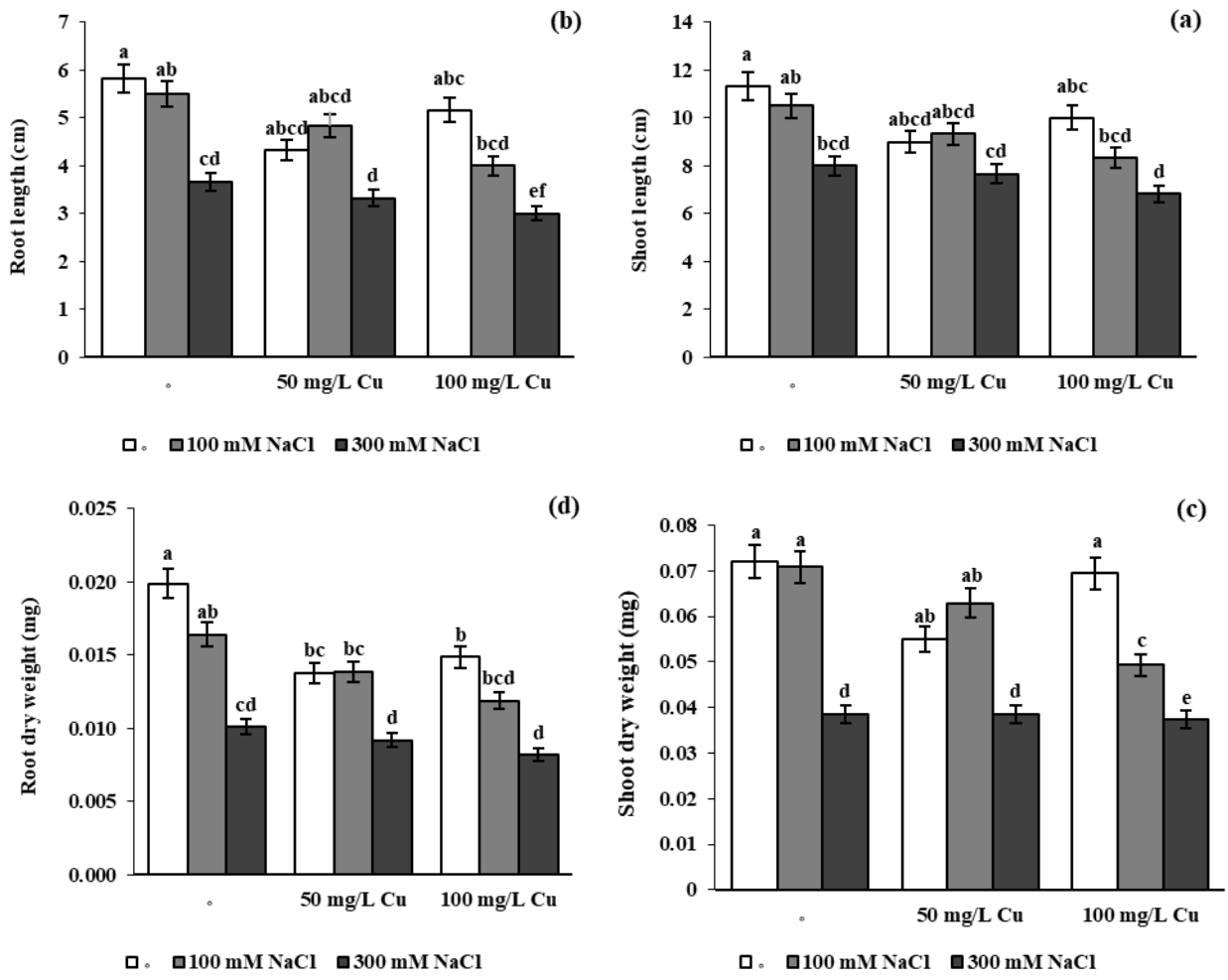
Table 1. Mean's comparison of traits related to germination in the *B. scoparia* under different salinity levels and copper concentrations

Treatment NaCl (mM)	Cu (mg/L)	Germination percentage درصد جوانه‌زنی (%)	Germination speed سرعت جوانه‌زنی (day^{-1})	Germination index شاخص جوانه‌زنی	Shoot length طول شاخساره (cm)	Radicle length طول ریشه (cm)	Shoot dry weight per seedling وزن خشک شاخساره به‌ازای هر دانه‌رست (g)	Radicle dry weight per seedling وزن خشک ریشه‌چه به‌ازای هر دانه‌رست (g)
0	0	85^{a}	34.5^{a}	3.40^{a}	2.85^{a}	2.05^{a}	0.0046^{b}	0.0010^{b}
	50	67.8^{a}	29.2^{a}	3.07^{a}	1.34^{b}	0.21^{b}	0.0035^{c}	0.0003^{c}
	100	67.8^{a}	33.1^{a}	3.27^{a}	0.55^{c}	0.19^{b}	0.0032^{c}	0.0003^{c}
	200	73.3^{a}	25.1^{b}	1.20^{c}	0.29^{c}	0^{c}	0.0007^{d}	0^{d}
	300	55^{b}	24.2^{b}	1.93^{c}	0.27^{c}	0^{c}	0.0013^{d}	0^{d}
100	0	81.7^{a}	29.4^{a}	3.27^{a}	2.62^{a}	2.69^{a}	0.0057^{a}	0.0010^{b}
	50	81.7^{a}	28.3^{ab}	3.27^{a}	0.73^{c}	0.19^{b}	0.0037^{c}	0^{d}
	100	83.3^{a}	31.8^{a}	3.33^{a}	0.35^{c}	0^{c}	0.0023^{cd}	0^{d}
	200	70^{b}	25.4^{a}	2.67^{b}	0.27^{c}	0^{c}	0.0011^{d}	0^{d}
	300	66.7^{b}	27.1^{ab}	2.80^{b}	0.25^{c}	0^{c}	0.0010^{d}	0^{d}
200	0	85^{a}	29.7^{a}	3.40^{a}	2.59^{a}	2.02^{a}	0.0070^{a}	0.0009^{a}
	50	81.7^{a}	21.5^{b}	3.27^{a}	0.71^{c}	0.11^{b}	0.0046^{b}	0.0001^{c}
	100	73.3^{a}	22.8^{b}	2.93^{b}	0.34^{c}	0.10^{b}	0.0024^{cd}	0^{d}
	200	60^{b}	19.3^{b}	2.40^{b}	0.28^{c}	0^{c}	0.0012^{d}	0^{d}
	300	31.7^{d}	10.3^{c}	1.27^{c}	0.23^{c}	0^{c}	0.0002^{d}	0^{d}
300	0	45^{c}	12.2^{c}	1.80^{c}	1.90^{ab}	1.52^{a}	0.0026^{cd}	0.0002^{c}
	50	28.3^{d}	7.7^{d}	1.13^{c}	0.41^{c}	0.03^{b}	0.0005^{d}	0^{d}
	100	45^{c}	12.2^{c}	1.80^{c}	0.36^{c}	0^{c}	0.0005^{d}	0^{d}
	200	30^{d}	8.3^{d}	1.20^{c}	0.26^{c}	0^{c}	0.0004^{d}	0^{d}
	300	26.7^{d}	7.3^{d}	1.07^{c}	0.25^{c}	0^{c}	0^{ef}	0^{d}
400	0	18.3^{e}	3.3^{d}	0.71^{d}	0.95^{ab}	1.50^{a}	0.0011^{d}	0.0001^{c}
	50	10^{fg}	1.9^{d}	0.40^{d}	0.42^{c}	0^{c}	0.0001^{ef}	0^{d}
	100	15^{fg}	4.9^{d}	0.60^{d}	0.25^{c}	0^{c}	0.0001^{ef}	0^{d}
	200	5^{h}	1.8^{d}	0.20^{d}	0.13^{c}	0^{c}	0.0001^{ef}	0^{d}
	300	3.3^{h}	0.7^{d}	0.13^{d}	0.17^{c}	0^{c}	0.0001^{ef}	0^{d}

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ دارند.

In each column, means with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

شاخساره را به مقدار ۲۹ درصد نسبت به شاهد کاهش داد. سطوح مختلف شوری همچنین تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک شاخساره و ریشه گیاه جارو داشت به‌طوری‌که کاهش وزن خشک در شوری ۳۰۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود (شکل ۱ a و b).



شکل ۱. اثر سطوح شوری (میلی‌مولار، mM) و غلظت‌های مختلف مس (میلی‌گرم در لیتر، mg/L) بر طول شاخساره (a)، طول ریشه (b)، وزن خشک شاخساره بوته (c) و وزن خشک ریشه بوته (d) گیاه جارو. میانگین‌های دارای حروف متفاوت، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ دارند.

Fig. 1. The effect of different salinity levels (millimolar, mM) and copper concentrations (milligram per liter, mg/L) on shoot length (a), root length (b), shoot dry weight of plant (c) and root dry weight of plant (d) in *B. scoparia*. Means with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

استفاده از تیمار مس به تنهایی اثر معنی‌داری بر طول ریشه نداشت، هر چند در بیش‌ترین غلظت مس (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) طول ریشه گیاه نسبت به شاهد حدود ۲۰ درصد کاهش یافته بود. تیمار مس موجب کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه شد، اما بر طول و وزن خشک شاخساره اثری نداشت (شکل ۱ a-d).

نتایج نشان داد که اثر همزمان شوری و مس بر صفات مربوط به رشد رویشی معنی‌دار بود. به عبارت دیگر کاربرد همزمان این دو تیمار منجر به کاهش بیش‌تر رشد نسبت به تیمارهای مجزا شد، به‌طوری‌که بیش‌ترین کاهش در طول و وزن خشک ریشه و همچنین طول و وزن خشک شاخساره تحت تیمار همزمان ۳۰۰ میلی‌مولار شوری و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مس مشاهده شد (شکل ۱ a-d).

مقدار کلروفیل a و b و کاروتنوئید

غلظت‌های مختلف مس تأثیر معنی‌داری بر مقدار کلروفیل a و کاروتنوئید در گیاه جارو داشت به‌طوری‌که مقدار کلروفیل و

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر سطوح شوری و غلظت‌های مختلف مس بر مقادیر کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید در گیاه جارو

Table 2. Means' comparison of the effect of different salinity levels and copper concentrations on the amounts of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids in *B. scoparia*.

Treatment		Concentration of photosynthetic pigments (mg/fresh weight)		
NaCl (Mm)	Cu (mg/L)	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Carotenoid
0	0	11.17±0.007[a]	3.02±0.013[ab]	2.48±0.005[a]
	50	10.29±0.007[a]	2.67±0.004[ab]	1.08±0.011[b]
	100	6.22±0.013[d]	2.61±0.009[ab]	0.60±0.020[c]
100	0	5.85±0.009[e]	2.07±0.015[ab]	1.11±0.025[b]
	50	6.94±0.004[d]	2.78±0.015[ab]	0.98±0.011[c]
	100	6.80±0.012[cd]	2.68±0.011[ab]	0.88±0.008[c]
300	0	7.34±0.006[cd]	2.97±0.020[ab]	1.79±0.011[b]
	50	8.09±0.018[b]	3.00±0.015[ab]	1.69±0.022[b]
	100	8.15±0.003[b]	3.17±0.011[ab]	1.57±0.017[b]

میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ دارند.

In each column, means with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

کاروتنوئید این گیاه در سطح مس ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به شاهد به‌ترتیب به مقدار ۴۴ و ۷۵ درصد کاهش یافت (جدول ۲). همچنین نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن بود که سطوح مختلف شوری نیز مقدار کلروفیل a و کاروتنوئید را در گیاه جارو تحت تأثیر قرار داد؛ شوری ۳۰۰ میلی‌مولار منجر به کاهش معنی‌دار ۵۵ درصدی مقدار کاروتنوئید نسبت به شاهد شد. مقدار کلروفیل a و کاروتنوئید تحت تیمارهای شوری و مس و نیز تحت اثر برهمکنش آنها به طور معنی‌داری نسبت به شاهد کاهش یافت. اثر هیچ کدام از تیمارها بر مقدار کلروفیل b معنی‌دار نبود (جدول ۲).

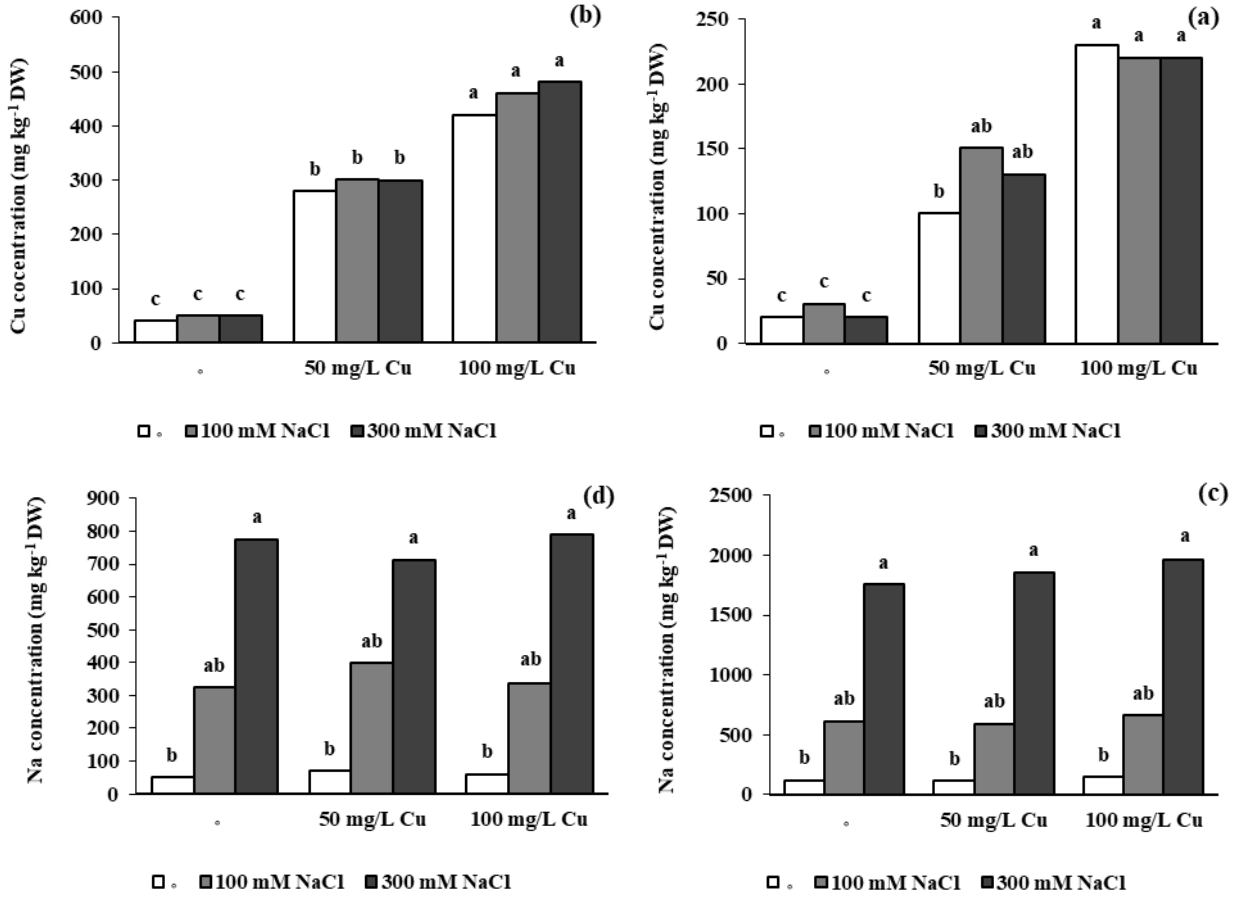
مقدار مس و سدیم جذب‌شده در شاخساره و ریشه

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت مس، انباشت مس در شاخساره و ریشه گیاه جارو به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که این افزایش وابسته به غلظت بود؛ به‌طوری‌که در سطح مس ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بیش‌ترین مقادیر مس جذب‌شده توسط شاخساره و ریشه به‌ترتیب برابر ۲۳۰/۳ و ۴۸۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. تیمارهای شوری ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار تأثیری بر انباشت مس در شاخساره و ریشه این گیاه نداشتند (شکل ۲ a و d).

در بالاترین سطح شوری، مقدار سدیم جذب‌شده توسط شاخساره گیاه جارو نسبت به شاهد حدود ۱۵ برابر افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که سطوح مختلف شوری تأثیر معنی‌داری بر مقدار سدیم جذب‌شده در ریشه گیاه جارو داشت. علاوه بر این مشخص شد که تیمار مس در سطوح مختلف شوری تأثیر معنی‌داری بر مقدار جذب سدیم در ریشه و شاخساره نداشت (شکل ۲ c و d).

ضرایب انباشتگی سدیم و مس

با بررسی ضریب انباشتگی زیستی (BCF) در ریشه، ضریب انتقال (TF) از ریشه به شاخساره و ضریب انباشتگی (AF) در شاخساره گیاه جارو مشخص شد که مقادیر هیچ یک از ضرایب برای عناصر مس و سدیم بیش‌تر از یک نبود. با این وجود، با افزایش غظت تیمار مس، مقادیر AF، TF و BCF برای مس در این گیاه افزایش یافت. تیمارهای مس ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تأثیری بر ضرایب AF، TF و BCF برای سدیم نداشت ولی با افزایش شوری ضرایب AF، TF و BCF سدیم افزایش یافت که این افزایش وابسته به غلظت بود (جدول ۳).



شکل ۲. اثر سطوح شوری (میلی‌مولار، mM) و غلظت‌های مختلف مس (میلی‌گرم در لیتر، mg/L) بر غلظت مس در شاخساره (a) و ریشه (b)، و غلظت سدیم در ریشه (c) و شاخساره (d) گیاه جارو. میانگین‌های دارای حروف متفاوت، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۵ دارند.

Fig. 2. The effect of different salinity levels (millimolar, mM) and copper concentrations (milligram per liter, mg/L) on Cu concentration in the shoot (a) and root (b), and Na concentration in the root (c) and shoot (d) of the *B. scoparia*. Means with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

جدول ۳. اثر سطوح شوری و غلظت‌های مختلف مس بر ضریب انباشت (AF)، ضرب انتقال (TF) و ضریب انباشتگی زیستی (BCF) برای عناصر مس و سدیم در گیاه جارو.

Table 3. The effect of different salinity levels and copper concentrations on the accumulation factor (AF), translocation factor (TF), and bioconcentration factor (BCF) for Cu and Na elements in *B. scoparia*.

Treatment		BCF		TF		AF	
NaCl (mM)	Cu (mg/L)	Na	Cu	Na	Cu	Na	Cu
	0	0.31	0.23	0.32	0.25	0.17	0.16
0	50	0.29	0.54	0.35	0.36	0.15	0.23
	100	0.29	0.64	0.30	0.55	0.14	0.32
	0	0.61	0.22	0.45	0.23	0.32	0.18
100	50	0.59	0.55	0.42	0.35	0.36	0.29
	100	0.66	0.61	0.41	0.59	0.34	0.35
	0	0.58	0.20	0.52	0.21	0.52	0.15
300	50	0.62	0.53	0.53	0.23	0.54	0.33
	100	0.65	0.65	0.49	0.53	0.49	0.40

بحث

یکی از شایع‌ترین علایم ناشی از آلودگی فلزات سنگین، تغییر در جوانه‌زنی و رشد گیاهان است. کاهش رشد در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان اولین علامت مسمومیّت در برابر فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شود که ناشی از کاهش بیوسنتز کلروفیل در گیاهان است (Angulo-Bejarano et al., 2021). بر اساس نتایج پژوهش حاضر، تنش‌های شوری و فلز سنگین مس تأثیر منفی معنی‌داری بر جوانه‌زنی و رشد گیاه جارو داشتند (جدول ۱). اگر چه گزارشی در مورد بررسی اثر همزمان تنش شوری و مس بر گیاه جارو وجود ندارد، اما پژوهش‌هایی یافت می‌شود که اثر جداگانه این دو تیمار یا تیمارهای مشابه بر گیاه جارو یا سایر گیاهان را گزارش کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، حمیدیان و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی تأثیر برخی فلزات سنگین (کادمیوم، نیکل، سرب و مس) در غلظت‌های مختلف (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر شاخص‌های جوانه‌زنی و بنیه بذر جارو (*Bassia scoparia* L.) نشان دادند که افزایش غلظت کادمیوم و سرب باعث کاهش جوانه‌زنی و توقف رشد ریشه‌چه و ساقه‌چه جارو شد. همچنین سرعت و درصد جوانه‌زنی بذر جارو و وزن خشک ریشه‌چه و ساقه‌چه نیز با افزایش غلظت سرب روند کاهشی نشان داد. اما در تیمار نیکل و مس روند خاصی مشاهده نشد. از سوی دیگر، غلظت‌های مختلف مس در مقایسه با نیکل، اثر منفی بیش‌تری بر صفات سرعت جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و ساقه‌چه داشت (Hamidian et al., 2016).

بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، کاهش رشد ریشه ممکن است نتیجه آسیب به دیواره سلولی تحت تنش فلز سنگین یا تأثیر مستقیم تنش مذکور بر هسته سلولی باشد (Keyster et al., 2020). به علاوه، Mathur et al. (2022) بیان کردند که تیمار فلزات سنگین، اختلال در کارکرد هورمون‌هایی مانند اکسین و کاهش رشد را در پی دارد. کاهش رشد شاخساره نمونه‌های گیاهی تحت تیمار ممکن است به دلیل کاهش فتوسنتز در مواجهه با آلودگی فلزات سنگین باشد (Mathur et al., 2022). کاهش فتوسنتز می‌تواند پیامد کاهش رنگدانه‌های فتوسنتزی باشد که در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد. به‌طور مشابه، Menon et al. (2007) به این نتیجه رسیدند که آلودگی مس باعث کاهش مقدار کلروفیل در برگ‌های گیاه لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) شد. Meyers et al. (2008) نیز به نتیجه مشابهی رسیدند و کاهش فتوسنتز در برگ‌های کلم (*Brassica oleracea L.*) تحت تنش مس را گزارش دادند. برهمکنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل و غیرفعال‌کردن پروتئین‌های گیاهی نیز می‌تواند از عوامل کاهش رشد ریشه و شاخساره باشد (Mathur et al., 2022).

کاهش شاخص‌های رشد رویشی مانند طول ساقه، وزن خشک شاخساره و ریشه در شرایط تنش شوری به دلیل کاهش پتانسیل آب در محیط ریشه و تأثیر ویژه یون‌ها در فرآیندهای متابولیکی است. میزان کاهش رشد گیاهان مختلف در خاک‌های شور برحسب درجه مقاومت آن‌ها به شوری متفاوت است (Atta et al., 2023). تیمار شوری به دلیل کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی مانند کلروفیل a و b و همچنین کاهش سطح فتوسنتز باعث کاهش وزن خشک گیاه و کاهش رشد رویشی می‌شود و همچنین جذب خالص دی‌اکسید کربن را افزایش داده و سبب بسته‌شدن روزنه‌ها می‌شود. مقدار کلروفیل برگ در گیاهان حساس بیش‌تر از گیاهان مقاوم تأثیر می‌پذیرد (Sooksawat et al., 2013). در پژوهشی مشخص شد که شوری با توقف فعالیت آنزیم‌هایی که مسئول سنتز رنگدانه‌های سبز در گیاه خرفه (*Portulaca oleracea L.*) می‌باشند تأثیر زیادی بر مقدار کلروفیل دارد (Sheidaei et al., 2011). غلظت‌های زیاد نمک، کمپلکس‌های پروتئین رنگیزه را نیز ناپایدار کرده و فعالیت آنزیم کلروفیلاز را تحریک می‌کند. همه این پاسخ‌ها می‌تواند موجب کاهش مقدار رنگیزه‌های فتوسنتزی در گیاه شود (Stefanov et al., 2023). تغییرات میزان کلروفیل یکی از شاخص‌هایی است که در برخی از پژوهش‌ها به‌عنوان شاخص تحمل گیاه به تنش نمک ذکر شده است. Khan et al. (2020) با بررسی تأثیر سطوح مختلف شوری بر جوانه‌زنی گیاه جارو

(*Bassia scoparia* L.)، دریافتند که جوانه‌زنی تحت تأثیر سطوح بالای شوری قرار می‌گیرد و با افزایش غلظت نمک، کاهش جوانه‌زنی مشاهده می‌شود.

کاروتنوئیدها علاوه بر این‌که رنگیزه کمکی در فتوسنتز هستند، به‌عنوان یکی از اجزای سیستم دفاع آنتی‌اکسیدان سلول شناخته می‌شوند. کاروتنوئیدها می‌توانند از طریق چرخه گزانتوفیل و با مصرف اکسیژن باعث محافظت از کلروفیل در برابر فتواکسیداسیون شوند؛ بنابراین نقش مهمی در محافظت نوری به‌ویژه در شرایط تنش دارند (Moaka, 2020). بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، محتوای کاروتنوئیدها در شرایط تنش تغییرات متفاوتی را نشان داده است. کاهش کاروتنوئیدها در گیاه تحت تنش فلز سنگین و شوری در گیاه نیشکر (*Saccharum officinarum* L.) و در مقابل، افزایش محتوای کاروتنوئیدها در برگ‌های انگور (*Vitis vinifera* L.) گزارش شده است (Mohammadkhani et al., 2013). آنچه‌که در پژوهش حاضر مشاهده شد، کاهش مقدار کاروتنوئیدها در شرایط تنش بود که ممکن است به دلیل عبور شدت تنش از آستانه تحمل گیاه باشد (جدول ۲). در پژوهشی مشاهده شد که تحت تنش روی و سرب، فتوسنتز گیاه ذرت (*Zea mays* L.) کاهش می‌یابد و همچنین کاهش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید در این گیاه تحت تنش فلزات سنگین رخ داد (Horta et al.,2015).

به‌نظر می‌رسد که مس و سایر فلزات سنگین، انتقال آب از ریشه به شاخساره را کاهش می‌دهند؛ به همین دلیل بخش ناچیزی از این فلزات به شاخساره منتقل شده و بیش‌تر تجمع آن‌ها در ریشه رخ می‌دهد (Alalwan et al., 2020). در حقیقت تثبیت و تجمع فلزات سنگین در ریشه و انتقال کم‌تر به شاخساره در مقایسه با ریشه‌ها، که ممکن است به دلیل ذخیره آلاینده‌های فلزی در واکوئل ریشه و سلول‌ها باشد، روشی است که برخی از گیاهان برای مقابله با سمیّت فلزات سنگین اتخاذ می‌کنند (Alsherif et al., 2022). علاوه بر این، توانایی کم‌تر گیاهان برای انتقال فلزات سنگین از ریشه به شاخساره، ممکن است به دلیل اتصال فلزات به سلول‌های ریشه باشد، که می‌تواند نوعی مکانیسم تحمل گیاه محسوب شود (Rajendran et al., 2022). در پژوهش حاضر مشخص شد که با افزایش مقدار مس و سدیم در محیط، غلظت این عناصر در ریشه و شاخساره گیاه جارو افزایش پیدا کرد. با این وجود مقادیر هیچ‌یک از ضرایب انباشتگی (BCF، TF و AF) برای عناصر مس و سدیم بیش‌تر از یک نبود (جدول ۳). مقادیر ضرایب بیش از یک نشان‌دهنده آن است که گیاه نسبت به محیط و همچنین شاخساره گیاه نسبت به ریشه فلز بیش‌تری انباشته کرده است و از این‌رو برای گیاه‌پالایی بسیار مناسب است. با این‌حال، گیاهانی وجود دارند که علی‌رغم این‌که ضرایب انباشتگی فلز در آن‌ها بیش از یک نیست اما با جذب قابل توجه فلز و تولید زیست‌توده زیاد می‌توانند برای گیاه‌پالایی مناسب باشند (Mousavi-Kouhi and Moudi, 2020). نتایج نشان می‌دهد که گیاه جارو در غلظت‌های کم مس و سدیم می‌تواند از جمله این گیاهان باشد زیرا علاوه بر تولید زیست‌توده قابل توجه، مقادیر مناسبی از مس و سدیم را در ریشه و شاخساره انباشته می‌کند. با این وجود، با توجه به نتایج پژوهش حاضر، گیاه جارو در غلظت‌های زیاد مس و سدیم برای گیاه‌پالایی کارایی ندارد.

سایر پژوهش‌ها نیز انباشت مس و سدیم در گیاه جارو را مورد بررسی قرار داده‌اند. در پژوهشی توسط Ghosh et al. (2017) برای حذف فلزات سنگین از آب رودخانه یامونا توسط گیاه جارو، غلظت فلزات سنگین در بخش‌هایی از گیاه مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که می‌توان از گیاه جارو برای حذف فلزات سنگین از آب آلوده استفاده کرد. Al Defferi et al. (2014) نیز برای بررسی توانایی گیاه‌پالایی گیاه جارو پژوهشی انجام دادند. برای این منظور آن‌ها خاک‌های جمع‌آوری‌شده را با افزودن مقدار مشخص سرب و نیکل به‌طور مصنوعی آلوده کردند. سپس ۳۵۰ گرم از خاک را به گلدان انتقال داده و بذر گیاه را در آن کشت دادند و غلظت سرب و نیکل را در دو بخش شاخساره و سیستم ریشه مورد بررسی

قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین غلظت فلز سنگین در ریشه بوده و گیاه جارو توانایی زیادی در جذب فلز سنگین دارد.

افزایش غلظت لیگاندهای کلرید محلول و همچنین افزایش شوری تاثیر زیادی بر جذب فلز سنگین دارد و همچنین حلالیت و جذب فلز سنگین توسط گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Inan et al., 2004). شوری حلالیت و زیست‌فراهمی فلزات برای گیاه را افزایش می‌دهد. گزارش‌های متعدد در این زمینه حاکی از آن است که تأثیر شوری بر افزایش حلالیت فلزات سنگین، علاوه بر مقدار و نوع فلز به منبع شوری مورد استفاده نیز بستگی زیادی دارد (Singh et al., 2021). با این وجود، در پژوهش حاضر مشخص شد که شوری تأثیری بر مقدار مس جذب‌شده در اندام‌های گیاه نداشت. در مقابل، پژوهش‌هایی وجود دارند که نشان می‌دهند شوری قادر به تغییر تحرک عناصر سنگین و تغییر انباشت آن‌ها در بافت‌های گیاه است. به‌عنوان مثال، Alyazouri et al. (2020) آزمایشی را برای بررسی تأثیر کلرید سدیم (NaCl) بر رشد گیاه خرفه (*Portulaca oleracea* L.) و همچنین جذب مس توسط این گیاه تحت تنش شوری انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش کلرید سدیم، جذب فلز توسط گیاه خرفه بیش‌تر شد و ضریب انتقال یون مس از ریشه به شاخساره نیز افزایش یافت. همچنین کلرید سدیم سبب افزایش سمیّت گیاه توسط فلز سنگین مس و همچنین کاهش تولید زیست‌توده و ارتفاع گیاه شد. گزارشات دیگری نیز وجود دارند که نشان می‌دهد با افزایش شوری، تحرک فلزات سنگین افزایش می‌یابد. Kadulova and Kalogerakis (2020) نشان دادند که شوری خاک باعث کاهش غلظت سرب در ریشه و افزایش غلظت آن در شاخساره گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) می‌شود و غلظت سرب نیز صرف‌نظر از سطح شوری در ریشه بیش‌تر از شاخساره بود.

آزمایشی به‌منظور بررسی جذب مس توسط گیاه تاج خروس وحشی (*Celosia .argentea* Var: Cristata) در شرایط تنش شوری در دو بافت مختلف خاک انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش شوری و غلظت مس خاک، غلظت مس در شاخساره و ریشه تاج خروس وحشی و ضریب انتقال مس از ریشه به شاخساره افزایش یافته و وزن تازه و خشک ریشه و شاخساره و غلظت مس در شاخساره کاهش پیدا کرد (Nawabzadeh, 2012). Bani Hashemi (2014) پژوهشی در رابطه با جذب مس توسط گیاه سالیکورنیا (*Salicornia europaea* L.) در شرایط شوری انجام داد. نتایج این پژوهش نشان داد که مس بیش‌تر در ریشه گیاه سالیکورنیا تجمع پیدا کرده ولی با افزایش آلودگی مس در خاک، مقدار مس انتقال‌یافته به شاخساره نیز افزایش یافت. با افزایش مقدار مس در خاک، ضریب انتقال مس در گیاه نیز افزایش یافت. تا پیش از آستانه شوری، با افزایش هر واحد شوری خاک، ضریب انتقال کاهش یافته ولی پس از آستانه شوری با افزایش هر واحد شوری خاک، ضریب انتقال افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش شوری خاک، مقدار جذب مس تا ۸۸٪ در شاخساره و تا ۳۹٪ در ریشه سالیکورنیا افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده توانایی این گیاه برای جذب فلز سنگین مس در خاک‌های شور است (Bani Hashemi, 2014). همچنین Usman et al. (2018) نتیجه مشابهی گزارش کردند که افزایش کلرید سدیم مقدار یون مس را در بافت‌های مختلف گیاه چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) که گیاهی مقاوم به شوری است، افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

اگرچه گیاه جارو مقاومت زیادی نسبت به شوری نشان می‌دهد و نیز به‌صورت جداگانه غلظت‌های کم و متوسط مس را تحمل می‌کند اما قادر به تحمل غلظت‌های زیاد مس و نیز تیمار همزمان مس و شوری نیست. بنابراین این گیاه می‌تواند برای شوری‌زدایی خاک‌های شور مفید باشد اما برای گیاه‌پالایی غلظت‌های زیاد فلز سنگین مس در خاک‌های شور و غیرشور مناسب به نظر نمی‌رسد. فارغ از میزان آلودگی محیط به مس،

گیاه جارو به دلیل داشتن ضرایب انباشتگی کم‌تر از یک، برای استخراج گیاهی فلز سنگین مس مناسب نیست. با این وجود، این گیاه با دارابودن زی‌توده مناسب و جذب قابل توجه مس در ریشه می‌تواند برای تثبیت این فلز در خاک‌های آلوده به غلظت‌های کم و متوسط این فلز سنگین مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر می‌توان این گیاه را در مواجهه با مس در دسته گیاهان دوری‌گزین به حساب آورد که به‌طور مؤثر از ورود مس به بخش‌های هوایی خود علی‌رغم حضور غلظت‌های زیاد آن در محیط جلوگیری می‌کند ولی مقادیر قابل‌توجهی از آن را در ریشه‌های خود انباشته می‌نماید. پژوهش‌های دیگر درباره آثار برهمکنش شوری و سایر فلزات سنگین بر این گیاه ممکن است توان آن را برای گیاه‌پالایی فلزات دیگر در شرایط شور مشخص نماید.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه بیرجند در انجام این پژوهش قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

1. Alalwan, H. A., Kadhom, M. A., Alminshid, A. H., 2020. Removal of heavy metals from wastewater using agricultural byproducts. J. Water Supply Res. Tech. 69(2), 99–112. https://doi.org/10.3390%2Ftoxics90302.
2. Al Defferi, M. E., AL-Janabi, Q. A., Mustafa, S. A., AL-Muttarri, A. K., 2019. Phytoremediation of lead and nickel by *Bassia scoparia*. Plant Arch. 19(2), 3830–3834. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.22142.13128.
3. Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., Wang, M. Q., 2021. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. Toxicity 9(3), 42–49. https://doi.org/10.3390%2Ftoxics9030042.
4. Alsherif, E. A., Al-Shaikh, T. M., Abd Elgawad, H., 2022. Heavy metal effects on biodiversity and stress responses of plants inhabiting contaminated soil in Khulais. Biology 11(2), 164–170. https://doi.org/10.3390/biology11020164.
5. Alyazouri, A., Jewsbury, R., Tayim, H., Humphreys, P., Al-Sayah, M. H., 2020. Uptake of chromium by *Portulaca oleracea* from soil: Effects of organic content, pH, and sulphate concentration. Appl. Environ. Soil Sci. 2020(1), 3620726. https://doi.org/10.1155/2020/3620726.
6. Angulo-Bejarano, P. I., Puente-Rivera, J., Cruz-Ortega, R., 2021. Metal and metalloid toxicity in plants: An overview on molecular aspects. Plant 10(4), 635–642. https://doi.org/10.3390/plants10040635.
7. Asare, M. O., Szakova, J., Tlustos, P., 2023. Mechanisms of As, Cd, Pb, and Zn hyperaccumulation by plants and their effects on soil microbiome in the rhizosphere. Fron. Environ. Sci. 11, 1157415. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1157415.
8. Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A. P., Kumari, A., Ghosh, T., Jespersen, D., 2023. Impacts of salinity stress on crop plants: Improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. Fron. Plant Sci. 14, 1241736. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736.
9. Bani Hashemi, M. R., 2014. Modeling of Copper absorption in *Salicornia* Plant under Saline Conditions. MSc Thesis, University of Tehran, Iran.
10. Beyk-Khormizi, A., Hosseini Sarghein, S., Sarafraz-Ardakani, M. R., Moshtaghioun, S. M., Mousavi-Kouhi, S. M., Ganjeali, A., 2023. Ameliorating effect of vermicompost on *Foeniculum vulgare* under saline condition. J. Plant Nut. 46(8), 1601–1615. https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2092513.
11. Couto, M.N.P.F.S., Monteiro, E., Vasconcelos, M.T.S.D., 2010. Mesocosm trials of bioremediation of contaminated soil of a petroleum refinery: comparison of natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 17, 1339–1346. https://doi.org/10.1007/s11356-010-0318-y.
12. Flowers, T. J., 2004. Improving crop salt tolerance. J. Exp. Bot. 55(396), 307–319. https://doi.org/10.1093/jxb/erh003.
13. Ghosh, A., Manchanda, N., 2019. Phytoremediation of heavy metals from water of Yamuna River by *Tagetes patula*, *Bassica scoparia*, *Portulaca grandiflora*. Mercury 1, 0–3. 10.9734/APRJ/2019/v2i230042.
14. Hamidian, A. H., Norouznia, H., Mirzaei, R., 2016. Phytoremediation efficiency of *Nelumbo nucifera* in removing heavy metals (Cu, Cr, Pb, As and Cd) from water of Anzali wetland. J. Natur. Environ. 69(3), 633–643.

https://doi.org/10.22059/jne.2016.61869.
15. Horta, A., Malone, B., Stockmann, U., Minasny, B., Bishop, T. F. A., McBratney, A. B., Pallasser, R., Pozza, L., 2015. Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review. Geoderma 241, 180–209. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.024.
16. Huang, H., Gupta, D. K., Tian, S., Yang, X. E., Li, T., 2012. Lead tolerance and physiological adaptation mechanism in roots of accumulating and non-accumulating ecotypes of *Sedum alfredii*. Environ. Sci. Pollut. Res. 19, 1640–1651. https://doi.org/10.1007/s11356-011-0675-1.
17. Inan, G., Zhang, Q., Li, P., Wang, Z., Cao, Z., Zhang, H., Zhang, C., Quist, T.M., Goodwin, S.M., Zhu, J., Zhu, J. Shi, H., 2004. Salt cress. A halophyte and cryophyte *Arabidopsis* relative model system and its applicability to molecular genetic analyses of growth and development of extremophiles. Plant Physiol. 135(3), 1718–1737. https://doi.org/10.1104/pp.104.041723.
18. Kadukova, J., Kalogerakis, N., 2020. Lead accumulation from non-saline and saline environment by *Tamarix smyrnensis* Bunge. Eur. J. Soil Biol. 43(4), 216–223. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2007.02.004.
19. Keyster, M., Niekerk, L. A., Basson, G., Carelse, M., Bakare, O., Ludidi, N., Gokul, A., 2020. Decoding heavy metal stress signalling in plants: towards improved food security and safety. Plant 9(12), 1781. https://doi.org/10.3390/plants9121781.
20. Khan, M. A., Gul, B., Weber, D. J., 2020. Influence of salinity and temperature on the germination of *Kochia scoparia*. Wet. Ecol. Manag. 9(6), 483–489. https://doi.org/10.22067/jag.v1i2.2679.
21. Kulkarni, M.G., Street, R.A., Staden J.V., 2007. Germination and seedling growth requirements for propagation of *Diosscorea dregeana* (Kunth) et Schinz-A tuberous medicinal plant. S. Afric. J. Bot, 73(1),131–137. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2006.09.002.
22. Kummerova, M., Zezulka, S., Kralova, K., Masarovicova, E., 2010. Effect of zinc and cadmium on physiological and production characteristics in *Matricaria recutita*. Biol. Plant 54, 308–314. http://dx.doi.org/10.1007/s10535-010-0053-8.
23. Li, Y. M., Chaney, R., Brewer, E., Roseberg, R., Angle, J. S., Baker, A., 2003. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations. Plant Soil 249, 107–115. https://doi.org/10.1023/A%3A1022527330401.
24. Maoka, T., 2020. Carotenoids as natural functional pigments. J. Natu. Medic. 74(1), 1–16. https://doi.org/10.1007/s11418-019-01364-x.
25. Margesin, R., Zimmerbauer, A., Schinner, F., 2000. Monitoring of bioremediation by soil biological activities. Chemosphere 40(4), 339–346. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00218-0.
26. Mathur, P., Tripathi, D. K., Baluška, F., Mukherjee, S., 2022. Auxin-mediated molecular mechanisms of heavy metal and metalloid stress regulation in plants. Environ. Exp. Bot. 196, 104796. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104796.
27. Menon, M., Hermle, S., Gunthardt-Goerg, M. S., Schulin, R., 2007. Effects of heavy metal soil pollution and acid rain on growth and water use efficiency of a young model forest ecosystem. Plant Soil 297(1-2), 171–183. http://dx.doi.org/10.1007/s11104-007-9331-4.
28. Meyers, D. E., Auchterlonie, G. J., Webb, R. I., Wood, B., 2008. Uptake and localisation of lead in the root system of Brassica oleracea. Environ Pollut. 153(2), 323–332. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.08.029.
29. Mohammadkhani, N., Heidari, R., Abbaspour, N., 2013. Effects of salinity on antioxidant system in four grape (*Vitis vinifera* L.) genotypes. Vitis 52(3), 105–110. http://dx.doi.org/10.21859/acadpub.nbr.2.1.64.
30. Mostafazadeh-Fard, S., Samani, Z., Bandini, P., Shukla, M., 2021. Effect of liquid organic fertilizer and zeolite on plant available water content of sand and growth of perennial Ryegrass (*Lolium perenne*). J. Soil Sci. Plant Nutr. 21, 513–522. http://dx.doi.org/10.1007/s42729-020-00379-8.
31. Mousavi Kouhi, S. M., Moudi, M., 2020. Assessment of phytoremediation potential of native plant species naturally growing in a heavy metal-polluted saline–sodic soil. Environ. Sci. Pollut. Res. 27(9), 10027–10038. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-07578-6.
32. Mousavi Kouhi, S. M., Lahouti, M., Ganjeali, A., Entezari, M. H., 2015. Comparative effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk particles, and Zn^{2+} on *Brassica napus* after long-term exposure: changes in growth, biochemical compounds, antioxidant enzyme activities, and Zn bioaccumulation. Water Air Soil Pollut. 226, 1–11. https://doi.org/10.1007/s11270-015-2628-7.
33. Mousavi, Z., Ziarati, P., Esmaeli Dehaghi, M., Qomi, M., 2014. Heavy metals (lead and cadmium) in some medicinal herbal products in Iranian market. Iran J. Toxicol. 8(24), 1004–1010.
34. Nawabzadeh, M., 2012. Plant Uptake of Copper under Salinity Stress Conditions in Two Different Soil Textures. MSc Thesis, University of Tehran, Iran.
35. Niu, L., Li, C., Wang, W., Zhang, J., Scali, M., Li, W., Wu, X., 2023. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in plants–A proteomic perspective of phytoremediation. Ecotoxicol. Environ. Saf. 256, 114882.

https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114882.
36. Nouri, J., Lorestani, B., Yousefi, N., Khorasani, N., Hasani, A. H., Seif, F., Cheraghi, M., 2011. Phytoremediation potential of native plants grown in the vicinity of Ahangaran lead–zinc mine (Hamedan, Iran). Environ Earth Sci. 62(3), 639–644. http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0553-z.
37. Paganova, V., Hus, M., Lichtnerova, H., 2022. Effect of salt treatment on the growth, water status, and gas exchange of *Pyrus pyraster* L. (Burgsd.) and *Tilia cordata* Mill. seedlings. Horticulturae 8(6), 519. https://doi.org/10.3390/horticulturae8060519.
38. Pehlivan, E., Ozkan, A. M., Dinc, S., Parlayici, S., 2009. Adsorption of Cu^{+2} and Pb^{+2} ion on dolomite powder. J. Hazard. Mater. 167(1-3), 1044–1049. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.096.
39. Pirzadah, T. B., Malik, B., and Dar, F. A., 2019. Phytoremediation potential of aromatic and medicinal plants: A way forward for green economy. J. Stress Physiol. Biochem. 15(3), 174–182. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-58975-2_29.
40. Rahman, S. U., Qin, A., Zain, M., Mushtaq, Z., Mehmood, F., Riaz, L., Shehzad, M., 2024. Pb uptake, accumulation, and translocation in plants: Plant physiological, biochemical, and molecular response: A review. Heliyon 10(6), e27724. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27724.
41. Rajendran, S., Priya, A. K., Kumar, P. S., Hoang, T. K., Sekar, K., Chong, K. Y., Show, P. L., 2022. A critical and recent developments on adsorption technique for removal of heavy metals from wastewater-A review. Chemosphere 303, 135146. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135146.
42. Roy, S. B., Bera, A., 2002. Individual and combined effect of mercury and manganese on phenol and proline content in leaf and stem of mungbean seedlings. J. Environ Biol. 23(4), 433–435.
43. Sheidaei, S., Zahedi, M., Mir Mohammadi Meibodo, S. A. M., 2011. Effect of salinity stress on dry matter accumulation and ion distribution pattern in five safflowers (*Carthamus tinctorius* L.) genotypes. Iran. J. Field Crop Sci. 41(4), 811–819. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084811.1389.41.4.17.2.
44. Singh, S., Kapoor, D., Khasnabis, S., Singh, J., Ramamurthy, P. C., 2021. Mechanism and kinetics of adsorption and removal of heavy metals from wastewater using nanomaterials. Environ. Chem. Lett. 19(3), 2351–2381. http://dx.doi.org/10.1007/s10311-021-01196.
45. Singla, R. Garg, N., 2005. Influence of salinity on growth and yield attributes in chickpea cultivars. Turk. J. Agric For. 29(4), 231–235.
46. Sooksawat, N., Meetam, M., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., Nathalang, K., 2013. Phytoremediation potential of charophytes: Bioaccumulation and toxicity studies of cadmium, lead and zinc. J. Environ Sci. 25(3), 596–604. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60036-9.
47. Stefanov, M. A., Rashkov, G. D., Yotsova, E. K., Dobrikova, A. G., Apostolova, E. L., 2023. Impact of salinity on the energy transfer between pigment–protein complexes in photosynthetic apparatus, functions of the oxygen-evolving complex and photochemical activities of photosystem II and photosystem I in two Paulownia lines. Intern. J. Mol. Sci. 24(4), 3108. https://doi.org/10.3390/ijms24043108.
48. Tavakkoli, E., Rengasamy, P., McDonald, G.K., 2010. High concentrations of Na^{+} and Cl^{-} ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. J. Exp. Bot. 61(15), 4449–4459. https://doi.org/10.1093/jxb/erq251.
49. Usman, A. R. A., Kuzyakov, Y., Stahr, K., 2018. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil. Soil Sediment Contam. 14(4), 329–344. https://doi.org/10.1080/15320380590954051.