

Investigating the interaction effect of salinity stress and heavy metal copper on the growth and phytoremediation potential of *Bassia Scoparia* L.

Z. Khodadadi¹, M. Moudi², S.M. Mousavi-Kuohi^{2*}  and M.S. Hosseinzadeh²

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, separate and 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 has a significant negative effect on the germination and growth of seedlings. In the second experiment, effect of three levels of salinity (0, 100, and 300 mM) and three levels of copper (0, 50, and 100 mg/L) in pot culture on the traits related to growth and amount of sodium and copper in roots and shoot was investigated. Salinity significantly increased the amount of sodium in roots and shoots but did not affect the amount of copper in roots and shoots. Under treatment of copper, amount of this metal increased in roots and shoots 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 Objectives: 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 as a heavy metal under salt stress.

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

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 first experiment, the separate and 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/liter) 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/liter) on the length and dry weight of roots and shoots, the amount of chlorophyll a, b, and carotenoid, the amount of Na and Cu in the roots and shoot were investigated.

Results: The results of the first experiment showed that the increase in salinity and Cu has a significant effect on the percentage, index, and speed of germination, length of shoot and root, and dry weight 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 in high concentrations. According to the results of the second experiment, salt and Cu in high concentrations caused a decrease in the growth and development of the plant, and this decrease was more under their combination. Salinity significantly increased the amount of sodium in roots and shoots but did not affect the amount of Cu in roots and shoots. Under the treatment of Cu, the amount of this metal was increased in the roots and shoots 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, it 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 roots.

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. Contamin.* 14(4), 329–344. <https://doi.org/10.1080/15320380590954051>.

بررسی اثر متقابل تنش شوری و فلز سنگین مس بر رشد و قابلیت گیاه پالایی گیاه جارو (*Bassia Scoparia* L.)

زهرا خدادادی^۱، مریم مودی^۲، سید موسی موسوی کوهی^{۲*} و محبوبه سادات حسین زاده^۲

چکیده

در برخی از نواحی شور به دلیل فعالیت‌های صنعتی، آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین گسترش یافته است. گیاهان شورزی می‌توانند برای گیاه پالایی این نواحی مفید باشند. به منظور بررسی اثر شوری و فلز سنگین مس و اثر متقابل آن‌ها بر گیاه شورزی جارو (*Bassia Scoparia* L.)، دو آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه هیدروپونیک دانشگاه بیرجند انجام شد. در آزمایش اول، اثر مجزا و متقابل پنج سطح شوری (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار) و پنج سطح 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 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 سطح مس (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) بر صفات مربوط به رشد و مقدار سدیم و مس در ریشه و اندام‌هوایی مورد بررسی قرار گرفت. شوری به‌طور معنی‌داری مقدار سدیم را در ریشه و اندام‌هوایی افزایش داد اما تأثیری بر مقدار مس در ریشه و اندام‌هوایی نداشت. تحت تأثیر مس، مقدار این فلز در ریشه و اندام‌هوایی افزایش یافت. با این وجود، گیاه جارو به دلیل داشتن ضرایب انباشتگی کم‌تر از یک، برای استخراج گیاهی فلز سنگین مس مناسب به نظر 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

نامطلوبی بر حیات گیاهان، حیوانات 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 اتفاقات طبیعی تولید شوند. گروهی

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 تأثیرات

۱- گروه علوم و مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: smmousavi@birjand.ac.ir

از آلاینده‌ها به سرعت توسط فرآیندهای طبیعی تجزیه می‌شوند، در حالی که گروهی دیگر از آلاینده‌ها به آهستگی تجزیه می‌شوند و برای چندین دهه بدون تغییر در محیط زیست باقی می‌مانند (Li et al., 2017).

یکی از آلودگی‌های جدی زیست‌محیطی فلزات سنگین می‌باشد که در طی سال‌ها به دلیل فرآیندهای صنعتی و فعالیت‌های انسانی به سرعت در حال افزایش می‌باشند. اگرچه اثرات 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 از آلودگی باعث کاهش بازدهی کشاورزی می‌شود. جذب فلزات سنگین در گیاهان از قابل توجه‌ترین راه‌های قرار گرفتن انسان در معرض آلودگی از طریق فلزات سنگین است (Alengebawy et al., 2021). آلودگی زیست‌کره توسط فلزات سنگین بعد از انقلاب صنعتی به سرعت 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 می‌باشد (Nouri et al., 2011). در بسیاری از گونه‌های گیاهی مقدار زیاد مس موجب ایجاد سمیت می‌شود (Margesin et al., 2000). غلظت آستانه سمیت مس برای محصولات کشاورزی تقریباً ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه می‌باشد. افزایش غلظت مس در گیاهان باعث کاهش رشد و باعث مختل شدن فرآیندهای سلولی از قبیل 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 اثرات

زیانباری بر عملکرد و کیفیت محصولات زراعی دارد. شوری در بسیاری از مناطق کشاورزی دنیا به‌ویژه در آب و هوای خشک و نیمه خشک 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 مثال شوری موجب کاهش و به تأخیر افتادن جوله‌زنی بذر، کاهش رشد اندام‌های هوایی 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، روش‌های شیمیایی و روش‌های بیولوژیکی می‌باشد. 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 بالا نسبت به فلزات سنگین، جهت حذف و کاهش آلاینده‌ها می‌تواند یک استراتژی مناسب برای مدیریت اراضی باشد (Kummerova et al., 2010). گیاه‌پالایی روشی است که در آن گیاهان با مکانیسم‌هایی نظیر پالایش ریشه‌ای، تثبیت گیاهی، استخراج گیاهی، تبخیر گیاهی و تغییر شکل گیاهی، آلاینده‌ها را از اکوسیستم آبی و خاکی حذف یا بی‌اثر می‌کنند (Paganova et al., 2022). گیاهان زیادی به‌منظور گیاه‌پالایی توسط محققان 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 (metal indicator) که فلزات را در بافت‌های هوایی خود انباشته می‌کنند و آثار ناشی از سمیت فلز مانند زرد شدن، چروکیدگی و پیری زودرس برگ‌ها با توجه به غلظت محیطی فلز در این گیاهان پدیدار می‌شود که ملاک شناسایی این گیاهان است. در گیاهان معرف غلظت فلز جذب شده در گیاه بیانگر غلظت فلز در خاک

هر پتری به‌عنوان یک واحد آزمایشی در نظر گرفته شد. برای تیمار شوری از کلرید سدیم (NaCl) و برای تیمار مس از سولفات مس (CuSO₄) استفاده شد. برای تیمار مس در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بعد از انجام محاسبات به‌ترتیب مقادیر ۱۲۵/۵۸، ۲۵۱/۱۶، ۵۰۲/۳۱ و ۷۵۳/۴۷ میلی‌گرم از ترکیب CuSO₄ برداشته شد. آب مقطر نیز به‌عنوان تیمار شاهد استفاده شد. در مرحله بعدی پتری‌دیش‌ها در انکوباتور با دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۷۰ درصد، در تاریکی قرار داده شد و هر روز تعداد بذره‌های جوانه‌زده شمارش شد. پس از یک هفته، سرعت جوانه‌زنی، درصد جوانه‌زنی و شاخص جوانه‌زنی از طریق فرمول‌های زیر محاسبه شدند (Kulkarni et al., 2007).

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

$$(۲) \quad \text{سرعت جوانه‌زنی} = \sum \frac{j \cdot n_j}{D_i}$$

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

T_i : زمان شمارش پس از کاشت؛ N_i : تعداد بذره‌های جوانه‌زده در هر شمارش؛ D_i : تعداد روز پس از شروع آزمایش
 S : کل بذره‌های کشت شده؛ N : تعداد بذر جوانه‌زده در روزهای شمارش

آزمایش دوم: بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی در کشت گلدانی
کشت گلدانی و اعمال تیمارها

پس از بررسی اثرات 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 هوگلدن تهیه شد تا به‌طور همزمان گیاهان مورد تغذیه قرار گیرند. بذره‌های مورد نیاز برای انجام این آزمایش مشابه آزمایش اول ضدعفونی شد. جهت کشت، ۹ گلدان به قطر ۱۳ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر تهیه و تعداد ۲۰ بذر با فواصل مشخص در داخل گلدان با بستر پرلیت کشت داده شد. سپس گلدان‌ها به داخل

است (Niu et al., 2023). ۲- گیاهان دوری‌گزین (metal excluders) که به‌طور مؤثر از ورود فلز به بخش‌های هوایی خود علی‌رغم حضور غلظت‌های بالای فلزات سنگین در خاک جلوگیری می‌کنند. این گیاهان ممکن است حاوی مقادیر بالایی از فلزات در ریشه‌های خود باشند (Rahman et al., 2024). ۳- گیاهان انباشته‌کننده (metal accumulator) که توانایی جذب و تجمع فلز در آلودگی‌های کم تا زیاد را دارند. در واقع غلظت فلز در این گیاهان در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر بیش‌تر از غلظت فلز در سایر گیاهانی است که در خاک‌های آلوده رشد می‌یابند (Asare et al., 2023). نتایجی که تا به امروز حاصل شده‌اند، حاکی از آن هستند که بعضی از گیاهان می‌توانند برای پاکسازی فلزات سمی مؤثر باشند. از آنجایی‌که زی‌توده بالا و سازگاری مناسب با شرایط محیطی از جمله ویژگی‌های گیاهان مناسب برای اهداف گیاه‌پالایی است (Mousavi-Kouhi & Moudi, 2020)، غربالگری گیاهان مختلف برای بررسی قابلیت آن‌ها برای گیاه‌پالایی فلزات سنگین به‌ویژه تحت شرایط محیطی تنش‌زا مانند تنش شوری، اهمیت زیادی دارد. بنابراین این پژوهش به بررسی قابلیت گیاه‌پالایی گیاه جارو برای عنصر سنگین مس تحت تنش شوری پرداخته است.

مواد و روش‌ها

آزمایش اول: بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های جوانه‌زنی

در این آزمایش، بذره‌های گیاه جارو تحت تیمار شوری (صفر، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار)، تیمار مس (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و همچنین تیمارهای ترکیبی آن‌ها قرار گرفت. برای این منظور، ۲۰ عدد بذر به‌طور تصادفی و به یک اندازه انتخاب و با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم چهار درصد به مدت پنج دقیقه ضدعفونی و سپس سه بار با آب مقطر شستشو شدند. سپس بذره‌های ضدعفونی شده بر روی کاغذ صافی در پتری‌دیش‌های استریل که حاوی ۷ سی‌سی از محلول‌های تهیه شده از تیمارهای ذکر شده بود، کشت شدند و

= میلی گرم کاروتنوئید در گرم بافت تر برگ
 $[1000(A_{470})-1.8(Chl\ a)-85.02(Chl\ b)]/198 \times V/(W \times 1000)$

سنجش انباشتگی عناصر مس و سدیم در ریشه و برگ

نخست نمونه‌های خشک شده ریشه و برگ با آسیاب برقی پودر شدند. مقدار ۲۰۰ میلی گرم از پودر تهیه شده ریشه یا برگ با دقت وزن شده و به صورت جداگانه به هر کدام ۵ میلی لیتر اسید نیتریک اضافه 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 سانتی گراد قرار گرفتند تا به شدت هضم بافت‌ها افزوده شود. پس از سرد شدن نمونه‌های خارج شده از آون، جهت تسریع هضم بافت‌ها، یک میلی لیتر محلول پراکسید هیدروژن ۳۰٪ به مخلوط واکنش افزوده شد. سپس جهت هضم کامل بافت‌ها، ارلن‌ها بر روی اجاق برقی قرار داده شدند و حرارت دهی تا خشک شدن تقریبی مخلوط واکنش ادامه یافت. در ادامه، ارلن‌ها از روی اجاق برقی برداشته شده و پس از سرد شدن، با استفاده از آب دیونیزه حجم اندک محلول باقی مانده برای نمونه‌های ریشه به ۱۰۰ میلی لیتر و برای نمونه‌های برگ به ۲۵ میلی لیتر 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 میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه از رابطه زیر به دست آمد.
 $\times (\text{میلی لیتر حجم نمونه} \times \text{نتیجه AAS}) = \text{عنصر نهایی غلظت}$
 وزن اولیه نمونه (گرم)

محاسبه ضرایب انباشتگی سدیم و مس

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

(Bioconcentration factor: BCF) = ضریب انباشتگی زیستی
 (مقدار عنصر در محیط) / (مقدار عنصر در ریشه)

محفظه نوری با دوره نور/تاریکی ۸/۱۶ ساعت انتقال داده شد. بعد از جولنه‌زنی بذرها، گلدان‌ها با غلظت‌های مختلفی از مس (صفر، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) و شوری (صفر، ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی مولار) و ترکیبی از این 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 میلی مولار) تیمار شدند.

۳- گلدان‌هایی که با غلظت‌های مشخص مس (۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر) تیمار شدند.

۴- گلدان‌هایی که با ترکیب غلظت‌هایی مشخصی از مس و NaCl تیمار شدند.

چهل روز پس از کشت اولیه، گیاهان برداشت شدند و سنجش‌های مختلف مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی روی آن‌ها انجام شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها در آون (۷۰ درجه سانتی گراد 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 میلی گرم بافت تر برگ با استون ۸۰٪ با استفاده از هاون چینی هموژنیزه شد. سپس عصاره هموژنیزه شده به حجم ۱۵ میلی لیتر رسانده شد. عصاره استونی استخراج شده به مدت ۵ دقیقه در ۴۰۰۰ دور سانتیفریوژ 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 طبق روابط ذیل محاسبه شد (Beyk-Khormizi et al., 2023).

میلی گرم کرووفیل a در گرم بافت تر برگ
 $= [12.21(A_{663})-2.79(A_{647})] \times V/(W \times 1000)$

میلی گرم کلروفیل b در گرم بافت تر برگ
 $= [21.21(A_{647})-5.1(A_{663})] \times V/(W \times 1000)$

(مقدار عنصر در محیط) / (مقدار عنصر در اندام هوایی) = Accumulation factor: AF) = ضریب انباشت

(مقدار عنصر در ریشه) / (مقدار عنصر در اندام هوایی) =

(مقدار عنصر در ریشه) / (مقدار عنصر در اندام هوایی) = Translocation factor: TF) = ضریب انتقال

(مقدار عنصر در ریشه) / (مقدار عنصر در اندام هوایی) =

تحلیل آماری: آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شدند. برای تجزیه واریانس و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار R و برای مقایسه میانگین مشاهدات از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. تفاوت‌های معنی‌دار در سطح $P \geq 0.05$ در نظر گرفته شد.

نتایج

بررسی اثر تیمارها بر ویژگی‌های جوانه‌زنی

شوری، مس و اثر متقابل 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 به طوری که درصد جوانه‌زنی در تیمار با سطح شوری ۴۰۰ میلی‌مولار نسبت به شاهد حدود ۷۸ درصد کاهش یافت. با افزایش غلظت شوری سرعت جوانه‌زنی گیاه جارو نیز به میزان ۹۰ درصد کاهش یافت. کم‌ترین مقدار سرعت جوانه‌زنی در تیمار با سطح شوری ۴۰۰ میلی‌مولار مشاهده شد (۳/۲۶ درصد در روز).

کاهش معنی‌دار درصد و سرعت جوانه‌زنی در غلظت‌های بالای مس نیز مشاهده شد. شاخص جوانه‌زنی گیاه جارو در تیمار با سطح مس ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به صورت معنی‌داری کاهش یافت که بیش‌ترین کاهش در تیمار با سطح مس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد که حدود ۴۳ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. غلظت‌های بالای شوری نیز منجر به کاهش معنی‌دار شاخص جوانه‌زنی شد که این کاهش در تیمار با سطح شوری ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود (جدول ۱). در تیمار همزمان مس و شوری در غلظت‌های زیاد، جوانه‌زنی تقریباً موقوف شد به طوری که در سطح ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مس و سطح ۴۰۰ میلی‌مولار مس مقدار درصد جوانه‌زنی

در گیاه جارو 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 ساقه‌چه و ریشه‌چه نداشت اما وزن خشک اندام‌ها را به صورت معنی‌داری کاهش داد. وزن خشک ساقه‌چه در بالاترین سطح شوری نسبت به شاهد حدود ۷۶ درصد کاهش یافت. همچنین کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه‌چه در غلظت‌های بالای ۱۰۰ میلی‌مولار شوری نیز مشاهده شد به طوری که در بالاترین غلظت شوری، وزن خشک ریشه‌چه گیاه جارو نسبت به شاهد بیش از ۹۵ درصد کاهش یافت (جدول ۱).

تثیش مس هم بر طول و هم بر وزن خشک ساقه‌چه و ریشه‌چه اثر معنی‌دار منفی داشت. به کارگیری مس به تنهایی موجب کاهش طول ساقه‌چه و ریشه‌چه در گیاه جارو شد که این کاهش در تمامی تیمارهای مس معنی‌دار بود. کاربرد مس به تنهایی همچنین منجر به کاهش وزن خشک ساقه‌چه 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 ساقه‌چه و ریشه‌چه داشت به طوری که تیمار با سطح مس ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و شوری ۴۰۰ میلی‌مولار موجب کاهش بیش از ۹۰ درصد طول ساقه‌چه 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 مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی صفات مربوط به رشد رویشی

نتایج نشان داد که تیمار شوری منجر به کاهش طول ریشه و اندام هوایی در گیاه جارو شد که این کاهش، پاسخی وابسته به غلظت بوده و با افزایش غلظت تیمارها کاهش بیش‌تری در طول ریشه و اندام هوایی مشاهده شد. شوری ۳۰۰ میلی‌مولار، طول اندام هوایی را به مقدار ۲۹ درصد نسبت به شاهد کاهش

جدول ۱. مقایسه میانگین صفات مربوط به جوانه‌زنی در گیاه جaro تحت غلظت‌های مختلف شوری و عنصر سنگین مس

Table 1. Comparison of the average traits related to germination in the *B. Scoparia* under different concentrations of salinity and the heavy element of copper

Treatment		Germination percentage (%)	Germination speed (1.day ⁻¹)	Germination index	Shoot length (cm)	Root length (cm)	Shoot dry weight (mg)	Root dry weight (mg)
NaCl (mM)	Cu (mg/L)							
0	0	85 ^a	34.46 ^a	3.4 ^a	2.85 ^a	2.05 ^a	0/0046 ^b	0/0010 ^b
	50	67.76 ^a	29.23 ^a	3.07 ^a	1.34 ^b	0.21 ^b	0/0035 ^c	0/0003 ^c
	100	67.81 ^a	33.13 ^a	3.27 ^a	0.55 ^c	0.19 ^b	0/0032 ^c	0/0003 ^c
	200	73.33 ^a	25.12 ^b	1.20 ^c	0.29 ^c	0 ^c	0/0007 ^d	0 ^d
	300	55 ^b	24.24 ^b	1.93 ^c	0.27 ^c	0 ^c	0/0013 ^d	0 ^d
100	0	81.67 ^a	29.43 ^a	3.27 ^a	2.62 ^a	2.69 ^a	0.0057 ^a	0.0010 ^b
	50	81.67 ^a	28.27 ^{ab}	3.27 ^a	0.73 ^c	0.19 ^b	0.0037 ^c	0 ^d
	100	83.33 ^a	31.81 ^a	3.33 ^a	0.35 ^c	0 ^c	0.0023 ^{cd}	0 ^d
	200	70 ^b	25.44 ^a	2.67 ^b	0.27 ^c	0 ^c	0.0011 ^d	0 ^d
	300	66.67 ^b	27.11 ^{ab}	2.80 ^b	0.25 ^c	0 ^c	0.0010 ^d	0 ^d
200	0	85 ^a	29.71 ^a	3.40 ^a	2.59 ^a	2.02 ^a	0.0070 ^a	0.0009 ^a
	50	81.67 ^a	21.46 ^b	3.27 ^a	0.71 ^c	0.11 ^b	0.0046 ^b	0.0001 ^c
	100	73.33 ^a	22.82 ^b	2.93 ^b	0.34 ^c	0.10 ^b	0.0024 ^{cd}	0 ^d
	200	60 ^b	19.34 ^b	2.40 ^b	0.28 ^c	0 ^c	0.0012 ^d	0 ^d
	300	31.67 ^d	10.29 ^c	1.27 ^c	0.23 ^c	0 ^c	0.0002 ^d	0 ^d
300	0	45 ^c	12.19 ^c	1.80 ^c	1.90 ^{ab}	1.52 ^a	0.0026 ^{cd}	0.0002 ^c
	50	28.33 ^d	7.66 ^d	1.13 ^c	0.41 ^c	0.03 ^b	0.0005 ^d	0 ^d
	100	45 ^c	12.24 ^c	1.80 ^c	0.36 ^c	0 ^c	0.0005 ^d	0 ^d
	200	30 ^d	8.34 ^d	1.20 ^c	0.26 ^c	0 ^c	0.0004 ^d	0 ^d
	300	26.67 ^d	7.26 ^d	1.07 ^c	0.25 ^c	0 ^c	0 ^{ef}	0 ^d
400	0	18.33 ^e	3.26 ^d	0.71 ^d	0.95 ^{ab}	1.50 ^a	0.0011 ^d	0.0001 ^c
	50	10 ^{fg}	1.82 ^d	0.40 ^d	0.42 ^c	0 ^c	0.0001 ^{ef}	0 ^d
	100	15 ^{fg}	4.85 ^d	0.60 ^d	0.25 ^c	0 ^c	0.0001 ^{ef}	0 ^d
	200	5 ^h	1.81 ^d	0.20 ^d	0.13 ^c	0 ^c	0.0001 ^{ef}	0 ^d
	300	3.33 ^h	0.69 ^d	0.13 ^d	0.17 ^c	0 ^c	0.0001 ^{ef}	0 ^d

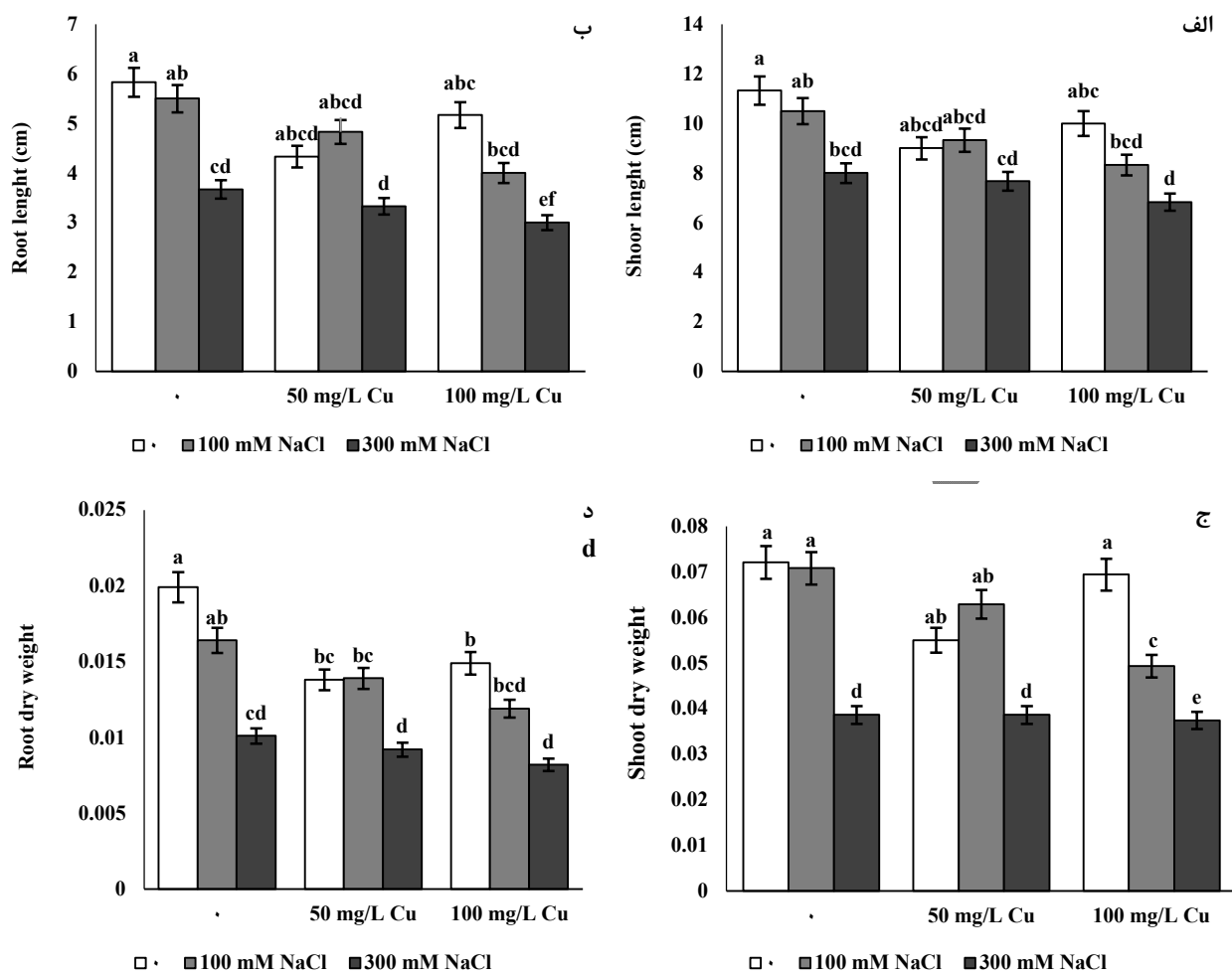
میانگین‌های دارای حروف متفاوت در هر ستون، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ دارند.

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

الف-د).

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 می‌شود، به‌طوری‌که بیش‌ترین کاهش در طول و وزن خشک ریشه و همچنین طول و وزن خشک اندام هوایی تحت تیمار همزمان ۳۰۰ میلی‌مولار شوری و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مس مشاهده شد (شکل ۱ الف-د).

داد. سطوح مختلف شوری همچنین تأثیر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاه جaro داشت به‌طوری‌که کاهش وزن خشک در شوری ۳۰۰ میلی‌مولار معنی‌دار بود (شکل ۱ الف و ب). استفاده از تیمار مس به تنهایی اثر معنی‌داری بر طول ریشه نداشت، هر چند در بالاترین 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 اندام هوایی اثری نداشت (شکل ۱



شکل ۱. اثر غلظت‌های مختلف تیمارهای شوری و مس بر طول اندام هوایی (الف)، طول ریشه (ب)، وزن خشک اندام هوایی (ج) و وزن خشک ریشه (د)، گیاه جارو. غلظت‌های شوری بر حسب میلی مولار و غلظت‌های مس بر حسب میلی گرم بر لیتر ذکر شده است. میانگین‌های دارای حروف متفاوت، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ دارند.

Fig. 1. The effect of different concentrations of salinity and copper treatments on shoot length (a), root length (b), shoot dry weight (c) and root dry weight (d) of *B. Scoparia*. Salinity concentrations are given in mM and copper concentrations are given in mg/L. Means with different letters are significantly different ($p < 0.05$).

میلی مولار منجر به کاهش معنی‌دار ۵۵ درصدی مقدار کاروتنوئید نسبت به شاهد شد. بیش‌ترین مقدار معنی‌دار کلروفیل a و کاروتنوئید در گیاه جارو به ترتیب به مقدار ۱۱/۱۷ و ۲/۴۸ در گیاه شاهد مشاهده شد. مقدار کلروفیل b در هیچ یک از تیمارها اثر معنی‌داری نپذیرفت (جدول ۲).

مقدار مس و سدیم جذب شده در اندام هوایی و ریشه نتایج نشان داد که با افزایش غلظت تیمارهای مس، انباشت مس

مقدار کلروفیل a, b و کاروتنوئید

غلظت‌های تیمار مس تأثیر معنی‌داری بر مقدار کلروفیل a و کاروتنوئید در گیاه جارو داشت به طوری که مقدار کلروفیل و کاروتنوئید این گیاه در تیمار با سطح مس ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نسبت به شاهد به ترتیب به مقدار ۴۴ و ۷۵ درصد کاهش یافت (جدول ۲). همچنین نتایج حاصل از 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

جدول ۲. اثر غلظت‌های مختلف تیمارهای شوری و مس بر روی مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید در گیاه جارو

Table 2. The effect of different concentrations of salinity and Cu treatments on the amount 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 ۰/۰۵ دارند.

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

ضرایب برای عناصر مس و سدیم بیش‌تر از یک نبود. با این وجود، با افزایش غلظت تیمار مس، مقدار AF، TF و BCF عنصر مس در این گیاه افزایش پیدا کرد. تیمار با سطح مس ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر تأثیری بر مقدار AF، TF و BCF عنصر سدیم نداشت ولی با افزایش شوری مقدار AF، TF و BCF عنصر سدیم در این گیاه افزایش یافت که این افزایش وابسته به غلظت بود (جدول ۳).

بحث

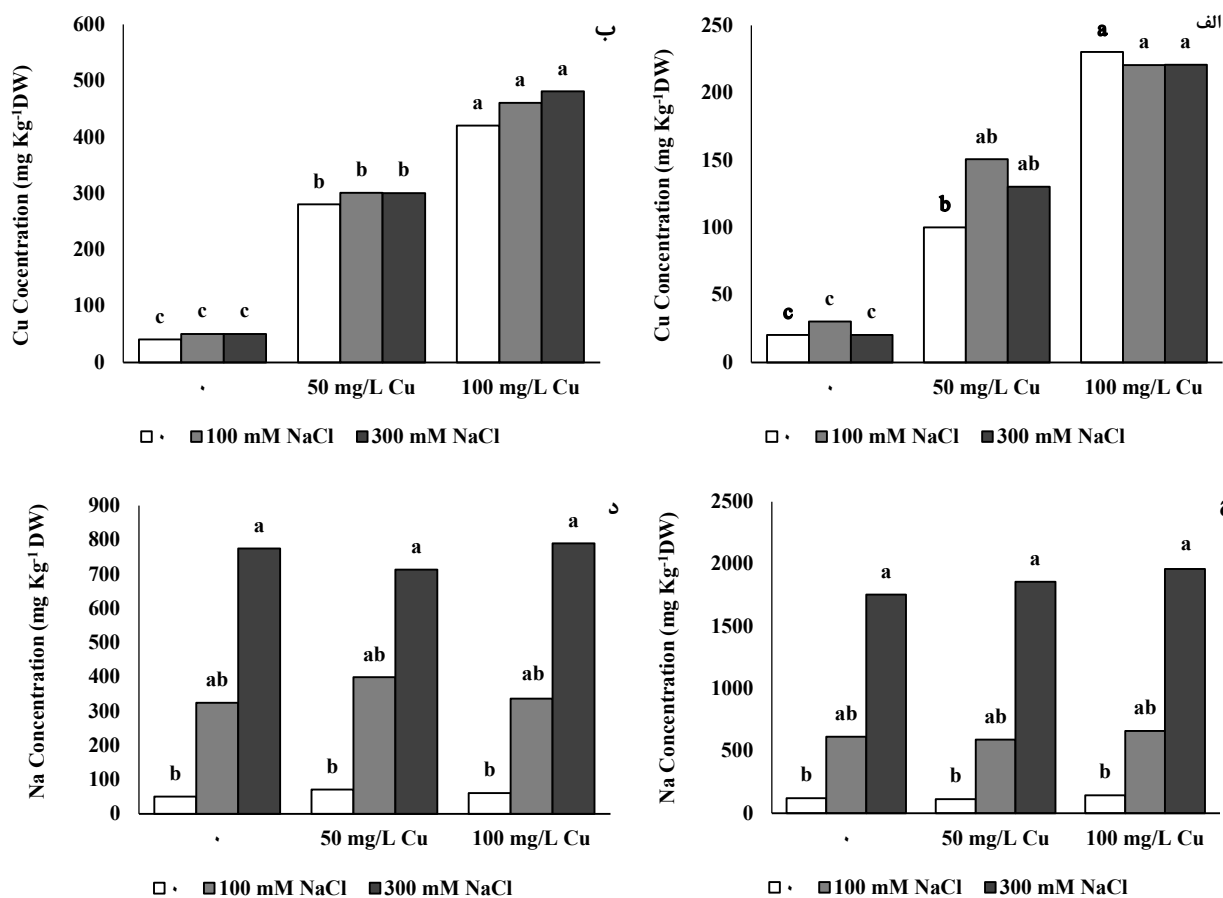
یکی از شایع‌ترین علایم ناشی از آلودگی فلزات سنگین، تغییر در جوانه‌زنی و رشد گیاهان است. کاهش رشد در بسیاری از مطالعات به‌عنوان اولین علامت مسمومیت در برابر فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شود که ناشی از کاهش بیوسنتز کلروفیل در گیاهان است (Angulo-Bejarano et al., 2021). بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، تنش شوری و فلز سنگین مس تأثیر منفی معنی‌داری بر جوانه‌زنی و رشد گیاه جارو داشتند. اگر چه گزارشی در مورد مطالعه اثر همزمان شوری و مس بر روی گیاه جارو وجود ندارد، اما پژوهش‌هایی یافت می‌شود که اثر جداگانه این دو تیمار یا تیمارهای مشابه بر روی

در اندام هوایی و ریشه گیاه جارو به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که این افزایش وابسته به غلظت بود؛ به‌طوری‌که در تیمار با سطح مس ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، بیش‌ترین مقدار مس جذب شده در اندام هوایی و ریشه به‌ترتیب به مقدار ۲۳۰/۲۵ و ۴۸۰/۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد. تیمارها با سطح شوری ۱۰۰ و ۳۰۰ میلی‌مولار تأثیری بر انباشت مس در اندام هوایی و ریشه این گیاه نداشت (شکل ۲ الف و ب).

در بالاترین سطح شوری، مقدار سدیم جذب شده در اندام هوایی گیاه جارو نسبت به شاهد حدود ۱۵ برابر افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که سطوح مختلف شوری تأثیر معنی‌داری بر مقدار سدیم جذب شده 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 اندام هوایی نداشت (شکل ۲ ج و د).

ضرایب انباشتگی سدیم و مس

با بررسی ضرایب انباشتگی زیستی (BCF) در ریشه، ضریب انتقال (TF) از ریشه به اندام هوایی و ضریب انباشتگی (AF) در اندام‌هوایی گیاه جارو مشخص شد که مقادیر هیچ یک از



شکل ۲. اثر غلظت‌های مختلف تیمارهای شوری و مس بر مقدار مس اندام هوایی (الف)، مقدار مس ریشه (ب)، سدیم ریشه (ج) و مقدار سدیم اندام هوایی (د) گیاه جارو. غلظت‌های شوری بر حسب میلی‌مولار و غلظت‌های مس بر حسب میلی‌گرم بر لیتر ذکر شده است. میانگین‌های دارای حروف متفاوت، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ دارند.

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

جدول ۳. اثر غلظت‌های مختلف تیمارهای شوری و مس بر روی ضریب انباشتگی AF، TF و BCF برای عناصر مس و سدیم در گیاه جارو.

Table 3. The effect of different concentrations of salinity and Cu treatments on the accumulation coefficient of AF, TF, and 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	0.31	0.23	0.32	0.25	0.17	0.16
	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
100	0	0.61	0.22	0.45	0.23	0.32	0.18
	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
300	0	0.58	0.20	0.52	0.21	0.52	0.15
	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

گیاه حاضر یا سایر گیاهان را نشان داده‌اند. به‌عنوان مثال حمیدیان و همکاران (۱۳۹۵)، با بررسی تأثیر غلظت‌های مختلف 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 نزولی 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 مطالعات انجام شده، کاهش رشد ریشه ممکن است نتیجه آسیب دیواره سلولی تحت تنش فلز سنگین یا تأثیر مستقیم تنش مذکور بر هسته سلولی باشد (Keyster et al., 2020). به علاوه، Mathur و همکاران در سال ۲۰۲۲ بیان کردند که تیمار فلزات سنگین، اختلال در عمل هورمون‌هایی مانند اکسین و کاهش در رشد را در پی دارد. کاهش رشد اندام‌هوایی 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 مطالعه حاضر نیز مشاهده شد. به‌طور مشابه، Menon و همکاران (۲۰۰۷) به این نتیجه رسیدند که آلودگی مس باعث کاهش مقدار کلروفیل در برگ‌های گیاه لوبیا (*Phaseolus vulgaris L.*) شد (Menon et al., 2007). Meyers و همکاران (۲۰۰۸) نیز به نتیجه مشابهی رسیدند و کاهش فتوسنتز در برگ‌های کلم (*Brassica oleracea L.*) تحت تنش مس را گزارش دادند (Meyers et al., 2008). برهمکنش فلزات سنگین با گروه‌های سولفیدریل و غیرفعال کردن پروتئین‌های گیاهی نیز می‌تواند از عوامل کاهش رشد ریشه و اندام‌هوایی باشد (Mathur et al., 2022).

کاهش شاخص‌های رشد رویشی مانند طول ساقه، وزن خشک اندام‌هوایی و ریشه در شرایط تنش شوری به دلیل کاهش پتانسیل آب در محیط ریشه و تأثیر ویژه یون‌ها در فرآیند متابولیسم 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 نظیر 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 بسته شدن روزنه‌ها می‌شود. مقدار کلروفیل برگ در گیاهان حساس بیش‌تر از گیاهان مقاوم تأثیر می‌پذیرد (Sooksawat et al., 2013). در آزمایش شیدائی و همکاران در سال (۱۳۹۷) 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 بالای نمک، کمپلکس‌های پروتئین رنگیزه را نیز بی‌ثبات می‌کند 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 مطالعه‌ها به‌عنوان شاخص تحمل گیاه به تنش نمک ذکر شده است. در مطالعه Khan و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تأثیر سطوح مختلف شوری بر جوانه‌زنی گیاه جارو (*Bassia Scoparia L.*) مشخص شد که جوله‌زنی تحت تأثیر غلظت‌های بالای شوری قرار می‌گیرد و با افزایش غلظت نمک، کاهش جوانه‌زنی مشاهده می‌شود (Khan et al., 2020).

کاروتنوئیدها علاوه بر این که 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 مقابل فتواکسیداسیون شوند، بنابراین نقش مهمی در محافظت نوری به‌خصوص در شرایط تنش دارند (Moaka, 2020). طبق

مطالعه‌های انجام شده توسط محققان، 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). آنچه که در مطالعه حاضر مشاهده شد، کاهش مقدار کاروتنوئیدها در شرایط تنش بود که ممکن است به دلیل عبور شدت تنش از آستانه تحمل گیاه باشد. Horta و همکاران (۲۰۱۸) نیز با بررسی اثر فلز روی و سرب بر گیاه ذرت (*Zea mays* L.) نشان دادند که تحت تنش روی و سرب فتوسنتز کاهش می‌یابد و همچنین کاهش مقدار کلروفیل و کاروتنوئید در این گیاه تحت تنش فلزات سنگین مشاهده شد (Horta et al., 2015).

به نظر می‌رسد که مس و سایر فلزات سنگین، انتقال آب از ریشه به اندام هوایی را کاهش می‌دهند به همین دلیل بخش ناچیزی از این فلزات به اندام هوایی منتقل می‌شود و بیش‌تر تجمع آن‌ها در ریشه اتفاق می‌افتد (Alalwan et al., 2020). در حقیقت تثبیت و تجمع فلزات سنگین در ریشه و انتقال کم‌تر به اندام هوایی در مقایسه با ریشه‌ها، که ممکن است به دلیل ذخیره شدن آلاینده‌های فلزی در واکنش ریشه و سلول‌ها باشد، روشی است که برخی از گیاهان برای مقابله با سمیت فلزات سنگین اتخاذ می‌کنند (Alsherif et al., 2022). علاوه بر این، توانایی کم‌تر گیاهان برای انتقال فلزات سنگین از ریشه به اندام هوایی، ممکن است به دلیل اتصال فلزات به سلول‌های ریشه باشد، که می‌تواند نوعی مکانیسم تحمل گیاه محسوب شود (Rajendran et al., 2022). در تحقیق حاضر مشخص شد که با افزایش مقدار مس و سدیم، مقدار این عناصر در ریشه و اندام هوایی 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. چنانچه این ضرایب بیش از یک باشد نشان‌دهنده آن است که گیاه نسبت به محیط و همچنین اندام‌هوایی گیاه نسبت به ریشه فلز بیش‌تری انباشته کرده است

و از این‌رو برای گیاه‌پالایی بسیار مناسب است. با این حال، گیاهانی وجود دارند که علی‌رغم این‌که ضرایب انباشتگی فلز در آن‌ها بیش از یک نیست اما با جذب قابل توجه فلز و تولید زیست توده زیاد می‌توانند برای گیاه‌پالایی مناسب باشند (Mousavi-Kouhi & Moudi 2020). نتایج نشان می‌دهد که گیاه جارو در غلظت‌های کم مس و سدیم می‌تواند از جمله این گیاهان باشد زیرا علاوه بر تولید زیست توده قابل توجه، مقادیر مناسبی از مس و سدیم را در ریشه و اندام‌هوایی انباشته می‌کند. با این وجود، مطابق نتایج، 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 مطالعه‌ای توسط Ghosh و همکاران (۲۰۱۷) جهت 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 (Ghosh et al., 2019). Al Defferi و همکاران (۲۰۱۴) نیز برای بررسی توانایی گیاه‌پالایی گیاه جارو مطالعه‌ای را انجام دادند. برای این منظور آن‌ها خاک‌های جمع‌آوری شده را با افزودن مقدار مشخص سرب و نیکل به‌طور مصنوعی آلوده کردند. سپس ۳۵۰ گرم از خاک را به داخل گلدان انتقال داده و بذر گیاه را داخل آن کشت دادند و غلظت سرب و نیکل را در دو بخش اندام هوایی و سیستم ریشه مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که بیش‌ترین غلظت فلز سنگین در سیستم ریشه بوده و گیاه جارو توانایی بالایی در جذب فلز سنگین دارد (Al Defferi et al., 2019).

افزایش غلظت لیگنندهای 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 زیست فراهمی 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 قلز به منبع شوری مورد استفاده نیز بستگی زیادی دارد (Singh et al., 2021). با این وجود، در مطالعه حاضر مشخص شد که شوری تأثیری بر مقدار مس جذب شده 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 می‌باشد. به‌عنوان مثال، Alyazouri و همکاران (۲۰۲۰) آزمایشی را برای بررسی تأثیر سدیم کلراید (NaCl) بر روی رشد گیاه خرفه (*Portulaca oleracea* L.) و همچنین جذب مس توسط این گیاه تحت شوری انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش سدیم کلراید، جذب فلز توسط گیاه خرفه بیش‌تر شد و ضریب انتقال یون مس از ریشه به اندام هوایی نیز افزایش پیدا کرد. همچنین سدیم کلراید سبب افزایش سمیت گیاه توسط فلز سنگین مس و همچنین کاهش تولید زیست‌توده و ارتفاع گیاه شد (Alyazouri et al., 2020). گزارشات دیگری نیز وجود دارند که نشان می‌دهد با افزایش شوری، تحرک فلزات سنگین افزایش می‌یابد. Kalogerakis و Kadulova (۲۰۲۰) نشان دادند که شوری خاک باعث کاهش غلظت سرب در ریشه و افزایش غلظت آن در اندام هوایی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) می‌شود و غلظت سرب نیز صرف‌نظر از سطح شوری در ریشه بیش‌تر از اندام هوایی بود.

نواب زاده در سال ۱۳۹۲ آزمایشی را به‌منظور بررسی جذب مس توسط گیاه در شرایط تنش شوری در دو بافت مختلف خاک در گیاه تاج خروس وحشی (*Celosia argentea* Var: *Cristata*) انجام داد. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش شوری و غلظت مس خاک، غلظت مس در اندام هوایی و ریشه تاج خروس وحشی و ضریب انتقال مس از ریشه به اندام هوایی افزایش و وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی و غلظت مس در اندام هوایی کاهش پیدا کرد (Nawabzadeh, 2012). بنی‌هاشمی در سال ۱۳۹۶ تحقیقی در رابطه با جذب مس در گیاه سالیکورنیا (*Salicornia europaea* L.) در شرایط شوری پرداخت و 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 اندام هوایی نیز افزایش یافت. با افزایش مقدار مس در خاک، ضریب انتقال مس در گیاه نیز افزایش می‌یابد. تا قبل از آستانه شوری، با افزایش هر واحد شوری خاک، ضریب انتقال کاهش‌یافته 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 اندام هوایی و تا ۳۹٪ در ریشه سالیکورنیا افزایش پیدا کرد که نشان‌دهنده توانایی گیاه سالیکورنیا برای جذب فلز سنگین مس در خاک‌های شور می‌باشد (Bani Hashemi, 2014). همچنین Usman و همکاران (۲۰۱۸) به نتیجه مشابهی رسیدند و نشان دادند که افزایش سدیم کلراید مقدار یون مس را در بافت‌های مختلف گیاه چغندر قند (*Beta vulgaris* L.) که گیاهی مقاوم به شوری است، افزایش می‌دهد (Usman et al., 2018).

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 غیر شور 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 دارا بودن 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 بالای آن در محیط جلوگیری می‌کند ولی مقادیر قابل‌توجهی از آن را

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

در ریشه‌های خود انباشته می‌نماید. مطالعات دیگر بر روی اثرات متقابل شوری و سایر فلزات سنگین بر روی این گیاه ممکن است قابلیت آن را برای گیاه‌پالایی فلزات دیگر در شرایط شور مشخص نماید.

تضاد منافع

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

سپاسگزاری

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. *Toxic.* 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. *Biol.* 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. Scie.* 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., ... 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., ... Zhu, J. K., 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 *Dioscorea 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](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 metalloids 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 Zn²⁺ 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. Safety* 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->

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](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 Sediments Contamin.* 14(4), 329–344. <https://doi.org/10.1080/15320380590954051>.