

Investigating soil contamination with heavy metals and the phytoremediation potential of several halophyte species in the lands around the Miduk copper mine in Shahr Babak

A. Sharafi¹, S. A. Javadi², E. Zandi Esfahan^{3*}, M. Jaffari⁴ and M. Souri⁵

- 1-PhD Student in Rangeland Science, College of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Associate Professor, College of Natural Resource and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3*-Corresponding author, Associate Professor, Rangeland Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, Email: zandiesfahan@gmail.com
4- Professor, Faculty of Natural Resources, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
5- Assistant Professor, Rangeland Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Received: 02/10/2024

Accepted: 09/16/2024

Extended Abstract

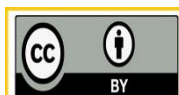
Background and objectives

Halophyte plants grow and produce in very saline water and soil conditions; however, they do not compete with agricultural products for quality soil and water as the main sources of production. Halophytes can tolerate high salinity for various reasons such as morphological characteristics, vegetative form, physiology and mechanisms of salinity tolerance. Although there have been good studies on the growth and salinity tolerance of halophyte species, there is little information about the absorption of heavy elements and the phytoremediation ability of different halophyte species. Heavy metal pollution is a serious problem in the lands adjacent to mines, which can be remedied by methods such as phytoremediation, while more studies are needed in this field. The present study aimed to evaluate the potential of several species of saltwort in the phytoremediation of mineral-contaminated soils.

Methodology

For this purpose, the ability of five halophyte species, *Haloxylon persicum*, *Tamarix ramossissima*, and *Halocnemum strobilaceum*, in phytoremediation of heavy metals arsenic (As), copper (Cu), lead (Pb), and nickel (Ni) was investigated at the Miduk mining site. Miduk copper mine is located 42 km northeast of Babak city in Kerman Province.

The vegetation of this area includes short bushes and scattered forest trees such as *Buxus hyrcana*, *Prunus antarctica*, *Pistacia atlantica*, *Calligonum comosum*, *Tamarix spp.*, and *Astragalus spp.* and bush plants such as *Artemisia sieberi*, *Salsola richteri*, *Rheum ribes*, *Cirsium vulgare*, *Ferula communis* and *Ziziphora clinopodioides*. Sampling was done from the five halophyte species at distances of 1000, 1500, 2000, and 5000 m from the Miduk copper



mine, which included 4 repetitions and each repetition included 20 bases. The total number of plant and soil samples was 400 and 120, respectively. Sampling was done by harvesting the plant and then separating the shoot (aerial organs) and root (underground organ) at the flowering stage. As, Cu, Ni, and Pb elements were measured using the inductively coupled plasma ICP-OES device.

Results

The results showed significant differences between *H. strobilaceum*, *H. persicum*, and *T. ramossisima* species regarding the amounts of arsenic, copper, and lead in different components of plants and soil. *Ha. persicum* has the highest amounts of arsenic and copper in the shoot, roots, and soil. At a distance of 1000 m, the highest concentration of arsenic is observed in the shoot, roots, and soil, as well as copper values in the shoot and soil. At a distance of 5000 m, a lower concentration of copper in the soil and a higher concentration of arsenic can be seen in the soil. In the case of *Ta. ramossisima* species, the highest concentration of arsenic is observed in the root and the highest amount of lead is also observed in the shoot. The results confirmed the phytoremediation potential of all five halophyte species for the remediation of contaminated soils at a distance of 1000 m from the copper mine, while the species *H. strobilaceum* had a higher potential for phytoremediation of contaminated soils. Furthermore, environmental pollution was not observed in the area without pollution to moderate pollution; which probably indicated the lack of transfer of heavy metals to agricultural products in lands further away from the mine.

Conclusion

Significant differences in the distribution and concentration of elements have been observed between these species and at different distances, and these results can contribute to a better understanding of the environmental effects on the concentration and distribution of elements in plants. The results of this research showed the phytoremediation potential of plant species *H. persicum*, *H. salicornica*, *S. rosmarinus*, *T. ramossisima*, and *H. strobilaceum*, which indicated the acceptable ability of saline species to improve mineral-contaminated soils. The phytoremediation potential of *H. strobilaceum* species was higher than other species. Also, based on the indicators of the accumulation of elements and the low amount of contamination of the examined species in the points with a greater distance from the mine (more than 1500 m), it showed that agriculture in the area around the mine is observed with caution and periodic examination of the area in terms of concentration heavy metals are possible.

Keywords: Arsenic, heavy metals, halophyte, mineral pollution, phytoremediation, soil reclamation.

بررسی آلودگی خاک به فلزات سنگین و ظرفیت گیاه پالایی چند گونه شورروی در اراضی پیرامون معدن مس میدوک شهر بابک

آذین شرفی^۱، سیداکبر جوادی^۲، احسان زندی اصفهان^{۳*}، محمد جعفری^۴ و مهشید سوری^۵

۱- دانشجوی دکتری علوم مرتع، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

۲- دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

۳- نویسنده مسئول، دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

پست الکترونیک: zandiesfahan@gmail.com

۴- استاد، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

چکیده

سابقه و هدف

گیاهان شورروی گیاهانی هستند که در شرایط آب و خاک بسیار شور رشد کرده و تولید دارند؛ ولی با محصولات کشاورزی بر سر خاک و آب با کیفیت به عنوان منابع اصلی تولید رقابتی ندارند. گیاهان شورروی به دلایل مختلف مانند ویژگی‌های ظاهری، شکل رویشی، فیزیولوژی و سازوکارهای تحمل به شوری قادرند شوری بالا را تحمل کنند. اگرچه مطالعات خوبی در مورد رشد و تحمل به شوری گونه‌های هالوفیت انجام شده است، ولی اطلاعات در مورد جذب عناصر سنگین و توان گیاه پالایی گونه‌های مختلف هالوفیت اندک است. آلودگی به فلزات سنگین یک مشکل جدی در اراضی مجاور معدن است که می‌توان به روش‌هایی از جمله گیاه پالایی برای اصلاح خاک‌های آلوده اقدام کرد، ولی مطالعات بیشتری در این زمینه مورد نیاز است. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی ظرفیت چند گونه شورروی در گیاه پالایی خاک‌های آلوده معدنی بود.

مواد و روش‌ها

بدین منظور توان چند گونه گیاهی *Haloxylon persicum*، *Tamarix ramossisima* و *Halocnemum strobilaceum* در گیاه پالایی فلزات سنگین آرسنیک، مس، سرب و نیکل در سایت معدن کاری میدوک بررسی شد. معدن مس میدوک در ۴۲ کیلومتری شمال شرقی شهر بابک قرار گرفته است. پوشش گیاهی این منطقه شامل بوته‌های کوتاه و درختان جنگلی پراکنده مانند درختان ارژن (*Buxus hyrcana*)، بادام کوهی (*Prunus antarctica*)، بنه (*Pistacia atlantica*)، اسکنیبل (*Calligonum comosum*)، گز (*Tamarix spp.*)، قیچ (*Astragalus spp.*) و گیاهان بوته‌ای مانند جاز (*Artemisia sieberi*)، جفنه (*Salsola richteri*)، ریواس (*Rheum ribes*)، کنگر (*Cirsium vulgare*)، جاشیر (*Ferula communis*) و کاه کوتی (*Ziziphora clinopodioides*) می‌باشد. از پنج گونه شورروی مذکور در فاصله‌های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری از معدن مس میدوک نمونه برداری انجام شد که شامل ۴ تکرار و هر تکرار شامل ۲۰ پایه بود. نمونه‌گیری با برداشت گیاه و بعد جداسازی شاخساره (اندام‌های هوایی) و ریشه (اندام زیرزمینی) در زمان گل‌دهی گیاه انجام گردید. اندازه‌گیری عناصر مس، نیکل، آرسنیک و سرب با استفاده از دستگاه پلاسما جفت شده القایی ICP-OES انجام شد.

نتایج

نتایج نشان داد که تفاوت‌های معنادار بین گونه‌های *Ha.persicum*، *Ha.strobilaceum* و *Ta.ramossisima* در مورد مقادیر آرسنیک، مس و سرب در اجزای مختلف گیاهان و خاک مشاهده شده است. گونه *Ha.persicum* بیشترین مقادیر آرسنیک و مس را در

شاخساره، ریشه و خاک داشت. در فاصله ۱۰۰۰ متری، بیشترین غلظت آرسنیک در شاخساره، ریشه و خاک و مقادیر مس در شاخساره و خاک مشاهده می‌شود. در حالی که در فاصله ۵۰۰۰ متری، غلظت کمتری از مس در خاک و غلظت بیشتری از آرسنیک در شاخساره و خاک دیده می‌شود. در حالی که در گونه *Ta.ramosissima* بیشترین غلظت آرسنیک در ریشه و بیشترین مقدار سرب نیز در شاخساره مشاهده می‌شود. نتایج تأییدکننده ظرفیت گیاه‌پالایی هر پنج گونه شورروی برای اصلاح خاک‌های آلوده در فاصله ۱۰۰۰ متری معدن مس بود، در صورتی که گونه *Halocnemum strobilaceum* توان بالاتری برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده داشت. همچنین، آلودگی‌های زیست‌محیطی در منطقه فاقد آلودگی تا آلودگی متوسط مشاهده نشد که احتمالاً نشان‌دهنده عدم انتقال فلزات سنگین به محصولات کشاورزی در زمین‌های با فاصله بیشتر از معدن بود.

نتیجه‌گیری

تفاوت‌های معناداری در توزیع و غلظت عناصر بین این گونه‌ها و در فواصل مختلف مشاهده شده است که این نتایج می‌تواند به درک بهتری از تأثیرات محیطی بر تراکم و توزیع عناصر در گیاهان کمک کند. نتایج این پژوهش ظرفیت گیاه‌پالایی گونه‌های گیاهی *Haloxylon persicum*، *Tamarix ramosissima* و *Halocnemum strobilaceum* را نشان داد که بیانگر توان قابل قبول گونه‌های شورروی برای اصلاح خاک‌های آلوده معدنی بود. ظرفیت گیاه‌پالایی گونه *Halocnemum strobilaceum* بالاتر از سایر گونه‌ها بود. همچنین، براساس شاخص‌های تجمع عناصر و مقدار پایین آلودگی گونه‌های مورد بررسی در نقاط با فاصله بیشتر از معدن (بیشتر از ۱۵۰۰ متر) نشان داد که به نظر می‌رسد کشاورزی در منطقه اطراف معدن با رعایت احتیاط و بررسی متناوب منطقه از نظر غلظت فلزات سنگین امکان‌پذیر باشد.

واژه‌های کلیدی: آرسنیک، آلودگی‌های معدنی، پاکسازی خاک، فلزات سنگین، گونه‌های شورروی، گیاه‌پالایی.

مقدمه

گیاهان، براساس توان رشدی در شرایط شور، در دسته‌های گلایکوفیت و هالوفیت طبقه‌بندی می‌شوند. گلایکوفیت‌ها یا گیاهان غیرمتحمل به شوری بیشتر شامل گیاهان زراعی هستند و قادر نیستند به مدت زیادی در معرض شوری قرار بگیرند (Munns et al., 2008). در طرف مقابل، هالوفیت‌ها یا گیاهان شورروی گیاهانی متحمل به شوری هستند که تحت شرایط آب و خاک شور رشد می‌کنند. به بیان دیگر، این گیاهان رقابتی با محصولات کشاورزی بر سر خاک و آب با کیفیت ندارند، از این رو به منابع پایه که برای تولید محصولات غذایی نیاز است، دست‌اندازی نمی‌شود (Khan et al., 2006). گیاهان شورروی به دلایل مختلف مانند ویژگی‌های ظاهری، شکل رویشی، فیزیولوژی، سازوکارهای تحمل به شوری و غیره قادرند شوری بالا (حتی بیش از ۲۰۰ دسی‌زیمنس بر متر) را تحمل کرده و به همین دلیل در طیف وسیعی از شرایط اکولوژیک مانند خاک‌های بسیار خشک، شور و گچی و

اراضی ساحلی و حتی آب دریا رشد کنند (Akhan, 2006). هالوفیت‌ها گیاهانی هستند که می‌توانند چرخه زندگی خود را در بستری غنی از سدیم کلرید که برای سایر گیاهان به‌طور عادی سمی است کامل کنند. به‌علاوه بعضی از هالوفیت‌ها به غلظت خاصی از سدیم کلرید در محیط کشت خود نیاز دارند که به‌عنوان هالوفیت اجباری یا حقیقی محسوب می‌شوند. صرف‌نظر از رشد گیاهان هالوفیت در محیط با شوری بالا، بعضی از آنها قابلیت این را دارند که در خاک‌های با یا بدون شوری با عنوان هالوفیت اختیاری به زندگی خود ادامه دهند (Olsson et al., 1999). تعداد زیادی از گیاهان هالوفیت ارزش اقتصادی بالایی دارند و در بسیاری از نقاط دنیا به‌عنوان غذای انسان، تغذیه دام، دارو، سوخت، فیبر، روغن‌های اتری، تولید چسب و اصلاح خاک از طریق توانایی گیاه‌پالایی (Phytoremediation) به‌کار می‌روند (Pirasteh-Anosheh et al., 2023a). در گیاه‌پالایی، با استفاده از گیاهان، آلودگی زیست‌محیطی آلی و غیرآلی خاک و آب و هوا پالایش می‌گردد. از انواع

گیاه‌پالایی می‌توان به (۱) جذب سطحی، تغلیظ و ترسیب فلزات سنگین به وسیله ریشه گیاه، (۲) استخراج و انباشتن آلودگی‌ها در بافت‌های گیاه شامل ریشه و ساقه، (۳) تجزیه ترکیبات آلی به مولکول‌های ساده‌تر و به هم پیوستن این مولکول‌ها در بافت گیاه، (۴) برانگیزش تجزیه میکروبی و قارچی به وسیله آزاد کردن آنزیم‌ها در محدوده ریزوسفر و (۵) جذب سطحی و ترسیب آلاینده‌ها به ویژه فلزات و نیترات به وسیله گیاه، کاهش تحرک و در نتیجه جلوگیری از حرکت آنها به آب‌های زیرزمینی یا ورود به زنجیره غذایی اشاره کرد (Hamidian *et al.*, 2014).

بهترین رهیافت گیاه‌پالایی، جذب و انتقال آلاینده‌ها از خاک به گیاه بدون تخریب ساختمان خاک و تغییر در باروری آن است. گیاهان هالوفیت به دلیل ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک مانند ورود محدود فلزات سنگین از طریق سیستم ریشه، سنتز و ذخیره‌سازی اسمولیت‌هایی مانند پرولین و کمپلکس درون سلولی/کلاسیون/تقسیم‌بندی یون‌های فلزی، قادر به مقابله با فلزات سنگین هستند (Caparrós *et al.*, 2022). آلودگی خاک با فلزات سنگین ناشی از معادن سبب کاهش کیفیت و سلامت خاک می‌شود که این موضوع برای سلامت گیاه و به دنبال آن انسان مضر است (Jarup, 2003). فلزات سنگین که شامل سرب، جیوه، مس، کادمیوم، نیکل و آرسنیک می‌شوند ابتدا توسط فیتوپلانکتون‌ها، باکتری‌ها، قارچ‌ها و ارگانیسم‌های کوچک دیگر جذب شده و بعد به ترتیب توسط موجودات بزرگ‌تر، خورده و در نهایت به راحتی از طریق مصرف محصولات کشت‌شده در خاک‌های آلوده به زنجیره غذایی مصرف‌کنندگان وارد شده و سلامت انسان‌ها و حیوانات را به خطر می‌اندازند. ایراد اصلی فلزات سنگین این می‌باشد که در بدن متابولیزه نمی‌شوند و در بافت‌های بدن انباشته می‌گردند (Caparrós *et al.*, 2022) و موجب بروز بیماری‌ها و عوارض متعددی در بدن می‌شود. استان کرمان یکی از مهمترین مناطق معدنی کشور است که همین باعث بروز آلودگی‌های مختلفی در نقاط مختلف این استان شده است. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای (Shafiei *et al.*,

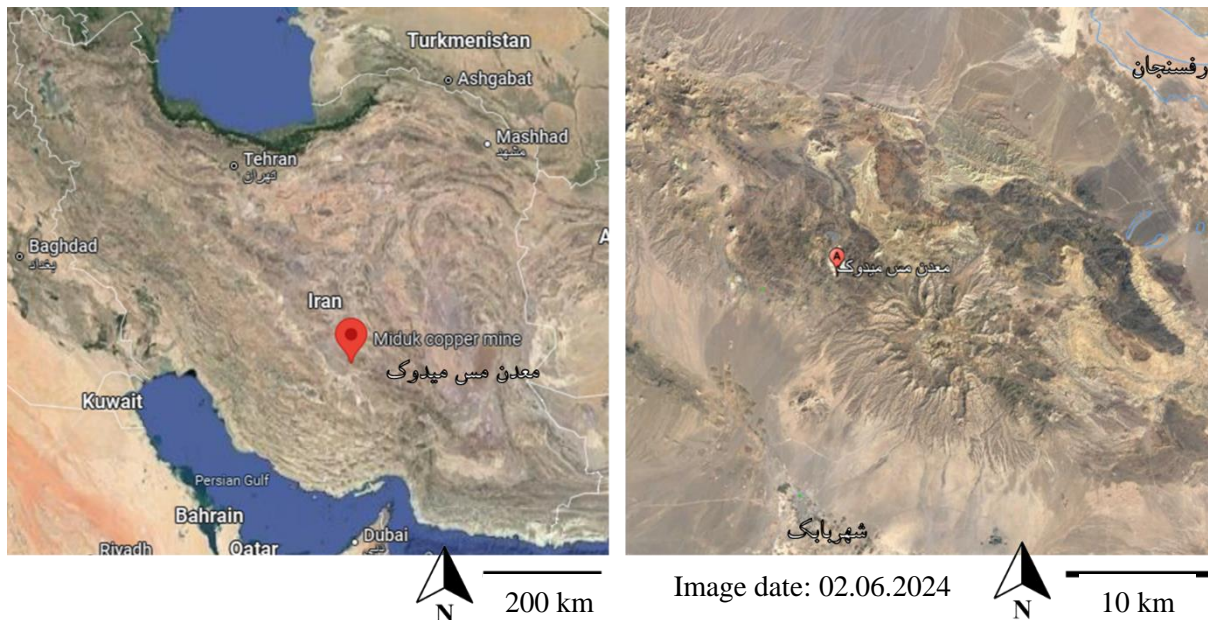
2012) با اندازه‌گیری غلظت آرسنیک و سلنیم در ۶۰ نمونه از خاک‌های اطراف معدن مس سرچشمه گزارش شد که غلظت این عناصر در نزدیکی معدن بیشتر بوده و با فاصله گرفتن از معدن، غلظت آنها کاهش می‌یابد؛ همچنین عنصر سلنیم در محدوده غیرآلوده و عنصر آرسنیک در محدوده کمی آلوده تا شدیداً آلوده قرار می‌گیرد. در پژوهش دیگری (Ghazanfari Moghadam and Orai, 2019) نشان داده شد که آلودگی عنصر مس در مسیر نمونه‌برداری جنوب معدن مس میدوک تا ۶۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز مشاهده شده است که می‌تواند به دلیل قرار گرفتن این مسیر در راستای معدن و بر روی شیب در جهت باد غالب جنوبی باشد. آنان نتیجه گرفتند که با فاصله گرفتن از معدن از درجه آلودگی مس در هر دو مسیر کاسته می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده نقش معدن در ایجاد آلودگی عنصر مس در خاک‌های منطقه باشد. گیاه‌پالایی فلزات سنگین یکی از بهترین روش‌های کاربردی، پایدار و کم‌هزینه برای حذف فلزات سنگین از مناطق آلوده در محیط‌های خشکی مانند معدن‌ها است (Favas *et al.*, 2012). به همین منظور فناوری گیاه‌پالایی برای پالایش آلودگی‌ها به دلایل کم‌هزینه بودن و پایین بودن فناوری مورد نیاز در دنیا بسیار مورد توجه قرار گرفته است (Hamidian *et al.*, 2014). بنابراین، هدف از این مطالعه، بررسی ظرفیت گیاه‌پالایی پنج گونه شورروی برای اصلاح خاک‌های آلوده معدن مس میدوک در استان کرمان بود تا از این طریق امکان‌سنجی کاربرد آنها در سامانه‌های شورورزی یا کشاورزی شورزیست مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

معدن مس میدوک در ۴۲ کیلومتری شمال شرقی شهر بابک از توابع استان کرمان و در فاصله ۱۳۲ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه قرار گرفته‌اند. این معدن بخشی از کمربند جهانی مس است که از صربستان شروع شده و تا پاکستان امتداد می‌یابد. شیب نهایی معدن ۳۸

میانگین سرعت ۵ متر بر ثانیه است. پوشش گیاهی شهرستان بیشتر از نوع استپ کوهپایه‌ای است. در این منطقه، بوته‌های کوتاه و درختان جنگلی پراکنده مانند درختان ارژن (*Buxus hyrcana*)، بادام کوهی (*Prunus antarctica*)، بته (*Pistacia atlantica*)، اسکنبیل (*Calligonum comosum*)، گز (*Tamarix spp.*)، قیج (*Astragalus spp.*) و گیاهان بوته‌ای مانند جاز (*Artemisia sieberi*)، جفته (*Salsola richteri*)، ریواس (*Rheum ribes*)، کنگر (*Cirsium vulgare*)، جاشیر (*Ferula communis*) و کاه کوتی (*Ziziphora clinopodioides*) مشاهده می‌شوند. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

درجه، ارتفاع پله‌ها ۱۵ متر و شیب پله‌ها ۶۴ درجه می‌باشد. شهربایک با مساحت بیش از ۲۶ کیلومترمربع در جنوب‌شرق ایران - ۵۵ درجه و ۸ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۳۰ درجه و ۸ دقیقه عرض شمالی قرار دارد و دارای اقلیم معتدل خشک است. تابستان‌های نسبتاً گرم و با دوره گرمای کوتاه و شب‌های تابستانی خنک دارد، اما در زمستان‌ها بسیار سرد است. شهربایک در دشتی مرتفع با ارتفاع ۱۸۴۵ متر از سطح دریا قرار گرفته است. میانگین دمای سالانه ۱۵/۱ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۱۶۳/۸ میلی‌متر، تعداد روزهای یخبندان سالانه ۹۰ روز می‌باشد. جهت غالب باد ۲۷۰ درجه با



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد تحقیق
Figure 1- Location of the research area

منطقه را پوشش دهد در نقاط مختلف در نظر گرفته شد. علاوه بر نمونه گیاهی، نمونه خاک نیز جمع‌آوری گردید. نمونه‌گیری با برداشت شاخساره (اندام‌های هوایی) و ریشه (اندام زیرزمینی) در زمان گل‌دهی گیاه انجام شد. با توجه به اینکه یکی از متداولترین و راحت‌ترین کاربردهای گیاهان هالوفیت، استفاده به عنوان علوفه است و بهترین کیفیت علوفه در زمان گلدهی به دست می‌آید، این مرحله برای

از پنج گونه گیاهی *Haloxylon persicum*، *Tamarix ramossisima* و *Halocnemum strobilaceum* در سایت معدن‌کاری نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌برداری شامل ۴ تکرار بود که در هر تکرار ۲۰ بوته گیاهی برداشت گردید. تکرارها با در نظر گرفتن تیمار فاصله‌های مختلف از معدن (فاصله ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری از معدن) به صورت تصادفی، به طوری که همه پوشش گیاهی

Bio-Concentration) (Coefficient: BAC)، تغلیظ زیستی (Translocation Factor: BCF)، فاکتور انتقال (TF)، شاخص زمین انباشت (Geoaccumulation Index: Igeo)، ضریب غنی‌شدگی (Enrichment Factor: EF) و فاکتور آلودگی (Contamination Factor: CF) تعیین شد. برای تعیین فاکتور جذب زیستی از نسبت غلظت فلزات در بخش هوایی خشک گیاه به غلظت این فلزات در خاک استفاده شد و برای تعیین فاکتور تغلیظ زیستی از نسبت غلظت فلزات در بخش خشک گیاه به غلظت این فلزات در خاک استفاده شد (Ali et al., 2013). معمولاً فاکتور تغلیظ زیستی بیشتر از هزار، نشان‌دهنده قابلیت تجمع بالایی گیاه در جذب فلزات می‌باشد (Boonyapookana, 2002). برای تعیین فاکتور انتقال که توانایی گیاه در انتقال فلز از ریشه به اندام‌های هوایی را نشان می‌دهد، از تقسیم غلظت عنصر در اندام هوایی به غلظت عنصر در ریشه استفاده شد (Kabata & Pendias, 2001). فاکتور انتقال بالاتر از یک، توانایی بالایی گیاه در انتقال فلزات در بافت‌های گیاه را نشان می‌دهد. شاخص زمین انباشت برای تعیین و توصیف آلودگی فلز در محیط، توسط Muller (۱۹۷۹) ارائه و بعد توسط سایر پژوهشگران تکمیل شد. این ضریب با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5 B_n} \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، C_n غلظت عنصر در نمونه خاک و B_n غلظت عنصر در نمونه زمینه یا مرجع می‌باشد.

در این پژوهش، میانگین خاک‌های جهانی به عنوان نمونه زمینه یا مرجع در نظر گرفته شد و پس از محاسبه، با استفاده از رده‌بندی ارائه شده کیفیت خاک تعیین گردید (جدول ۱).

برداشت انتخاب شد. نمونه‌های برداشت‌شده به آزمایشگاه منتقل و به مدت ۲۴ ساعت در آون و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. برای نمونه‌برداری از خاک در هر تکرار، تعداد ۳ نقطه به صورت تصادفی با در نظر گرفتن تیمار فاصله‌های مختلف از معدن انتخاب شد و در هر پروفیل از دو عمق ۰-۳۰ (لایه سطحی) و ۳۰-۶۰ (عمق متوسط ریشه‌دوانی) سانتی‌متر نمونه‌برداری انجام شد. نمونه‌های خاک عاری از خرده‌سنگ، دورریز، تکه‌های چوب، سایر گونه‌های گیاهی علف‌های هرز، یا ریشه گیاهان مختلف بود. برای رعایت دقیق تیمار فاصله از معدن، مختصات جغرافیایی هریک از نمونه‌های گیاهی و پروفیل‌های خاک با GPS برداشت و ثبت شد. به منظور بررسی غلظت عناصر جذب شده از خاک، هضم اسیدی نمونه‌های خشک و آسیاب شده برگ، ساقه و ریشه انجام شد و بعد با استفاده از دستگاه پلاسما جفت شده القایی (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy: ICP-OES) مدل PerkinElmer, USA در آزمایشگاه پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران غلظت فلزات مس، نیکل، آرسنیک و سرب اندازه‌گیری گردید. نمونه‌های گیاه پس از برداشت با آب مقطر شست‌وشو شد و پس از شست‌وشوی گیاهان و همگن‌سازی، نمونه‌ها در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. سپس نمونه‌های خشک‌شده توسط آسیاب پودر شده و از صافی ۰/۱۵ میلی‌متری گذرانده شد. به دنبال آن هضم اسیدی انجام شد و بعد با استفاده از دستگاه ICP-OES غلظت فلزات اندازه‌گیری گردید. همچنین، مقایسه داده‌های بدست آمده با مقادیر استاندارد برای تعیین میزان سمیت عناصر در گیاهان مذکور انجام شد. به منظور ارزیابی و بررسی توانایی گیاه انتخاب شده در پاکسازی محیط از فلزات مختلف، فاکتورهای جذب زیستی (Biological Absorption)

جدول ۱- رده بندی کیفیت خاک بر مبنای مقدار شاخص زمین انباشت

Table 1- Classification of soil quality based on the value of geoaccumulation index (Igeo)

Igeo rank	6	5	4	3	2	1	0
Igeo value	5<	4-5	3-4	2-3	1-2	0-1	-
Pollution	Very high	High-very high	High	Moderate - high	Moderate	Unpolluted-Moderate	Unpolluted

در این رابطه، CF فاکتور آلودگی، [C]sample غلظت عنصر مورد بررسی و [C]background غلظت عنصر مینا در نمونه مرجع است. خاکها از نظر آلودگی به فلزات سنگین براساس فاکتور آلودگی به ۴ گروه $CF < 1$ (آلودگی کم)، $1 < CF < 3$ (آلودگی متوسط)، $3 \leq CF < 6$ (آلودگی بالا) و $CF \geq 6$ (آلودگی بسیار بالا) تقسیم می شوند. داده های به دست آمده پس از انجام آزمون یکنواختی واریانس ها، مورد تجزیه واریانس (ANOVA) قرار گرفت و میانگین ها با استفاده از آزمون چنددامنه ای دانکن (Duncan) یا برآورد خطای استاندارد ($\pm SE$) در سطح احتمال یک درصد مقایسه شدند. برای انجام تجزیه های آماری از نرم افزار (SAS ver. SAS 9.4 M8) استفاده شد.

نتایج

نتایج نشان داد که اختلاف معنی داری بین گونه های *Haloxylon persicum*, *Haloxylon strobilaceum* و *Tamarix ramossissima* از نظر صفات غلظت آرسنیک شاخساره، غلظت آرسنیک ریشه، غلظت آرسنیک خاک، TF (آرسنیک)، BCF (آرسنیک)، Igeo (آرسنیک)، EF (آرسنیک) و CF (آرسنیک) وجود داشت (جدول ۲). به گونه ای که بیشترین مقادیر آرسنیک شاخساره و ریشه، TF، BCF و BAC در گونه *Ha.persicum* و بیشترین مقادیر آرسنیک خاک و EF در گونه *Ha.strobilaceum* مشاهده شد (جدول ۲ و شکل ۲). نتایج مقایسه میانگین ویژگی های مرتبط با آرسنیک در فاصله از منطقه مس میدوک نشان داد که اختلاف معنی داری بین فواصل ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری از نظر ویژگی های تحت بررسی وجود دارد (جدول ۲). به طوری که بیشترین مقادیر آرسنیک شاخساره،

ضریب غنی شدگی روشی مؤثر برای ارزیابی غلظت آلاینده های فلزی در خاک است. این ضریب از رابطه زیر به دست می آید.

$$EF = \frac{\left(\frac{X}{RE}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{X}{RE}\right)_{\text{baseline}}}$$

در رابطه بالا، $\left(\frac{X}{RE}\right)_{\text{sample}}$ نسبت غلظت عنصر مورد نظر به عنصر مرجع در نمونه خاک و $\left(\frac{X}{RE}\right)_{\text{baseline}}$ نسبت غلظت عنصر مورد نظر به عنصر مرجع در نمونه زمینه است. در محاسبه ضریب غنی شدگی، غلظت فلزات سنگین با استفاده از یک عنصر مرجع بهنجار می شود. پرکاربردترین عناصر مرجع در محاسبه ضریب غنی شدگی شامل آهن، آلومینیم، اسکاندیم و تیتانیم می باشند. برای نمونه مرجع نیز از غلظت های زمینه زمین شیمیایی منطقه و یا از مقادیر شیل میانگین، خاک های جهانی و یا پوسته بالایی استفاده می شود (Merian et al., 2004). در این پژوهش اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع و میانگین خاک های جهانی به عنوان محیط مرجع در نظر گرفته شد. بر مبنای ضریب غنی شدگی، ۵ رده آلودگی تعریف می شود: کمبود (کمتر از ۲)، متوسط (۲-۵)، قابل توجه (۵-۲۰)، بسیار زیاد (۲۰-۴۰) و بیش از حد بالا (بیشتر از ۴۰). براساس فاکتور آلودگی، می توان مقدار فلزات را نسبت به مقدار طبیعی آنها سنجید و میزان آلودگی خاک را تعیین کرد. رابطه فاکتور آلودگی مطابق رابطه زیر است.

$$CF = \frac{[C]_{\text{sample}}}{[C]_{\text{background}}}$$

نظر ویژگی‌های تحت بررسی وجود دارد. به طوری که بیشترین مقادیر ویژگی‌های آرسنیک شاخساره و خاک به همراه شاخص‌های BCF و BAC در فاصله ۱۰۰۰ متری گونه *Ha.persicum* مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار آرسنیک ریشه در فاصله ۱۰۰۰ متری گونه *Ta.ramosissima* مشاهده گردید (جدول ۳).

ریشه و خاک به همراه شاخص‌های Igeo, BAC, BCF و CF در فاصله ۱۰۰۰ متری مشاهده شد. همچنین کمترین مقادیر آرسنیک خاک و شاخص‌های Igeo و CF در فاصله ۵۰۰۰ متری مشاهده گردید (جدول ۲ و شکل‌های ۲ و ۳). نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با آرسنیک در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ترکیبات مختلف فواصل و گونه‌ها از

جدول ۲- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با آرسنیک معدن مس میدوک در گونه‌های مورد مطالعه در فواصل مختلف

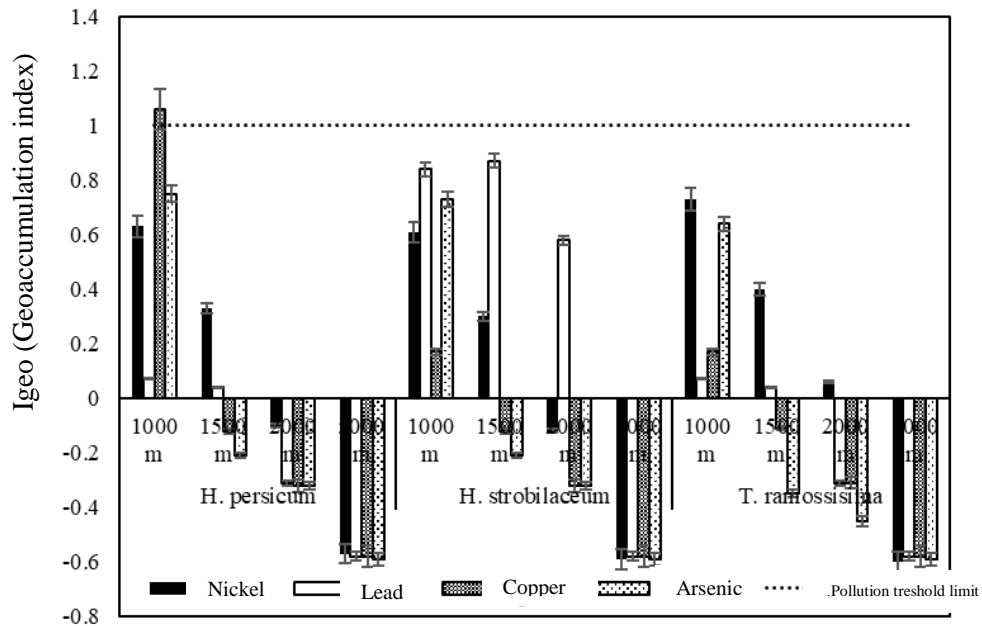
Table 2- Mean comparison of indicators related to arsenic in Midok copper mine in the studied species at different distances

Species	Shoot (mg kg ⁻¹)		Root (mg kg ⁻¹)		Soil (mg kg ⁻¹)		TF	BCF	BAC	Igeo	EF	CF						
<i>H. persicum</i>	7.83	a	8.52	a	13.77	ab	0.88	a	0.56	a	-0.09	a	2.95	ab	1.50	a		
<i>H. strobilaceum</i>	4.20	b	5.26	c	14.11	a	0.75	b	0.32	c	0.24	b	-0.09	a	3.13	a	1.49	a
<i>T. ramosissima</i>	3.78	c	7.81	b	13.53	b	0.48	c	0.46	b	0.22	b	-0.18	b	2.80	b	1.40	b
Distance																		
1000 m	13.39	a	17.79	a	23.14	a	0.78	a	0.77	a	0.58	a	0.71	a	3.25	a	2.46	a
1500 m	3.50	b	5.07	b	11.74	b	0.67	b	0.43	b	0.30	b	-0.26	b	2.70	b	1.25	b
2000 m	2.20	c	2.98	c	10.96	c	0.77	a	0.27	d	0.20	c	-0.36	c	2.76	b	1.17	c
5000 m	2.02	c	2.97	c	9.40	d	0.61	b	0.32	c	0.22	c	-0.59	d	3.15	a	1.00	d

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

اختلاف معنی‌داری بین گونه‌های *Ha.strobilaceum*، *Ha.persicum* و *Ta.ramosissima* از نظر ویژگی‌های تحت بررسی داشت (جدول ۴). به گونه‌ای که بیشترین مقادیر مس شاخساره، ریشه و خاک و شاخص‌های BAC, BCF, Igeo, EF و CF در گونه *Ha.persicum* و کمترین مقادیر مس شاخساره و ریشه، BCF و BAC در گونه *Ta.ramosissima* مشاهده شد.

نتایج نشان داد ویژگی‌های غلظت مس شاخساره، مس ریشه، مس خاک، TF (مس)، BCF (مس)، Igeo (مس)، EF (مس) و CF (مس) بر گونه‌های *Haloxylon persicum*، *Halocnemum strobilaceum* و *Tamarix ramosissima* در گونه گیاهی، اثر متقابل گونه و فاصله از معدن میدوک دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند (جدول ۴ و شکل‌های ۲ و ۳). نتایج مقایسه میانگین نیز حکایت از



شکل ۲- شاخص زمین انباشت چهار عنصر سنگین در سه گونه هالوفیت مورد بررسی در چهار فاصله از معدن حد آستانه آلودگی استاندارد به وسیله خط نقطه چین مشخص شده است. ستون‌های با همپوشانی یکسان براساس برآورد خطای استاندارد ($\pm SE$) تفاوت معنی دار ندارند.

Figure 2-Geoaccumulation index of four heavy elements in three investigated halophyte species at four distances from the mine. The standard contamination threshold is indicated by the dotted line. Columns with the same overlap are not significantly different based on standard error ($\pm SE$)

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با آرسنیک معدن مس میدوک در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف

Table 3- Mean comparison of indicators related to arsenic in Midok copper mine in the interaction effect of different distances and species

Species	Distance	Shoot (mg kg ⁻¹)	Root (mg kg ⁻¹)	Soil (mg kg ⁻¹)	TF	BCF	BAC	EF
<i>H. persicum</i>	1000 m	18.21 a	18.49 b	23.18 a	0.98 a	0.79 a	0.78 a	3.25 ab
	1500 m	5.44 c	6.22 d	11.77 bc	0.88 ab	0.52 b	0.46 b	2.70 de
	2000 m	3.73 d	4.96 e	10.99 bc	0.76 bc	0.45 cd	0.34 c	2.80 de
	5000 m	3.93 d	4.42 e	9.14 e	0.89 ab	0.48 bc	0.44 b	3.06 cd
<i>H. strobilaceum</i>	1000 m	11.29 b	12.88 c	23.58 a	0.87 ab	0.54 b	0.47 b	3.41 a
	1500 m	2.91 e	4.37 e	12.13 b	0.66 cd	0.36 de	0.24 d	2.87 de
	2000 m	1.54 fg	1.51 f	11.32 bc	1.02 a	0.13 g	0.13 e	2.97 cd
	5000 m	1.06 g	2.29 f	9.41 de	0.46 e	0.24 f	0.11 e	3.25 ab
<i>T. ramossissima</i>	1000 m	10.66 b	22 a	22.66 a	0.48 de		0.47 b	3.07 cd
	1500 m	2.12 f	4.60 e	11.30 bc	0.46 e	0.40 de	0.18 de	2.51 e
	2000 m	1.31 g	2.47 f	10.55 cd	0.53 de	0.23 f	0.12 e	2.49 e
	5000 m	1.04 g	2.18 f	9.63 de	0.46 e	0.22 f	0.10 e	3.13 bc

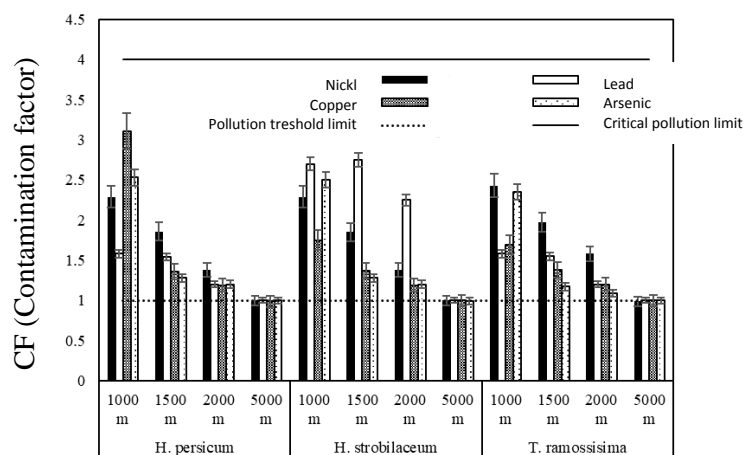
میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۴- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با مس معدن میدوک در گونه‌های مورد مطالعه در فواصل مختلف

Table 4- Mean comparison of the indicators related to Midok mine copper in the studied species at different distances

Species	Shoot (mg kg ⁻¹)	Root (mg kg ⁻¹)	Soil (mg kg ⁻¹)	TF	BCF	BAC	Igeo	EF	CF
<i>Haloxylon persicum</i>	487.08 a	508.92 a	497.72 a	0.93 a	1.11 a	1.04 a	0.01 a	3.19 a	1.67 a
<i>Halocnemum strobilaceum</i>	379.85 b	420.23 b	423.69 b	0.87 a	0.94 b	0.83 b	-0.21 b	2.92 b	1.33 b
<i>Tamarix ramossisima</i>	229.81 c	298.50 c	409.77 b	0.61 b	0.69 c	0.50 c	-0.21 b	2.76 b	1.32 b
Distances									
1000 m	719.97 a	727.19 a	671.65 a	1.03 a	1.24 a	1.23 a	0.46 a	2.87 ab	2.19 a
1500 m	462.39 b	455.20 b	424.27 b	1.02 a	1.06 a	1.08 a	-0.12 b	2.96 ab	1.37 b
2000 m	150.35 c	234.81 c	369.96 c	0.66 b	0.64 b	0.41 b	-0.32 c	2.83 b	1.19 c
5000 m	129.62 c	219.66 c	309.03 d	0.51 b	0.71 b	0.43 b	-0.58 d	3.16 a	1.00 d

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.



شکل ۳- فاکتور آلودگی چهار عنصر سنگین در سه گونه هالوفیت مورد بررسی در چهار فاصله از معدن

حد آستانه آلودگی استاندارد به وسیله خط نقطه‌چین مشخص شده است. ستون‌های با همپوشانی یکسان براساس برآورد خطای استاندارد ($\pm SE$) تفاوت معنی‌دار ندارند.

Figure 3- Contamination factor of four heavy elements in three investigated halophyte species at four distances from the mine. The standard pollution threshold limit and the critical pollution limit are indicated by dotted line and dashed line, respectively. Columns with the same overlap are not significantly different based on standard error ($\pm SE$)

(شکل ۳) در فاصله ۱۰۰۰ متری مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار شاخص EF و کمترین مقادیر مس خاک، Igeo و CF در فاصله ۵۰۰۰ متری مشاهده گردید.

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با مس در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ترکیبات مختلف فواصل و گونه‌ها از

نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با مس در فواصل مختلف از معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین فواصل ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری از نظر شاخص‌های تحت بررسی وجود دارد (جدول ۴). به طوری که بیشترین مقادیر مس شاخساره، ریشه و خاک (جدول ۴) به همراه شاخص‌های Igeo (شکل ۲) و CF

نظر ویژگی‌های تحت بررسی وجود دارد. به طوری که بیشترین مقادیر مس شاخساره و خاک (جدول ۵) به همراه شاخص‌های Igeo، EF و CF (شکل‌های ۲ و ۳) در فاصله ۱۰۰۰ متری گونه *Ha.persicum* مشاهده شد.

جدول ۵- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با مس معدن میدوک در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف

Table 5- Mean comparison of the average indices related to Midok mine copper in the interaction of distances and different species

Species	Distance	Shoot (mg kg ⁻¹)	Root (mg kg ⁻¹)	Soil (mg kg ⁻¹)	TF	BCF	BAC	EF
<i>H. persicum</i>	1000 m	837.68 a	853.7 a	929.5 a	0.98 bc	1.11 bc	1.11 bc	4.01 a
	1500 m	585.41 c	457.8 cd	407.95 cd	1.26 ab	1.12 bc	1.42 ab	2.88 bc
	2000 m	255.59 d	388.15 cd	355.73 de	0.66 de	1.09 bc	0.72 cd	2.78 bc
	5000 m	269.66 d	336.05 d	297.72 e	0.80 cd	1.12 bc	0.91 cd	3.07 b
<i>H. strobilaceum</i>	1000 m	684.26 b	812.49 a	559.06 b	0.84 c	1.58 a	1.31 ab	2.38 cd
	1500 m	656.26 bc	564.71 b	436.51 c	1.39 a	1.28 ab	1.50 a	3.06 b
	2000 m	105.73 ef	124.2 e	380.63 de	0.85 c	0.32 e	0.27 e	2.96 b
<i>T. ramossisima</i>	5000 m	73.14 ef	179.53 e	318.56 de	0.40 e	0.56 de	0.22 e	3.27 b
	1000 m	637.96 bc	515.40 bc	526.41 b	1.26 ab	1.01 bc	1.27 ab	2.21 d
	1500 m	145.5 e	343.10 d	428.35 c	0.42 e	0.79 cd	0.33 e	2.958 b
	2000 m	89.72 ef	192.10 e	373.51 de	0.46 de	0.51 de	0.23 e	2.74 bc
	5000 m	46.07 f	143.40 e	310.80 de	0.32 e	0.46 de	0.14 e	3.14 b

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

نتایج نشان داد غلظت سرب شاخساره، سرب ریشه، سرب خاک و شاخص‌های TF (سرب) و BCF (سرب)، Igeo (سرب)، EF (سرب) و CF (سرب) بر گونه‌های *Halocnemum strobilaceum*، *Haloxylon persicum* و *Tamarix ramossisima* در گونه گیاهی، اثر متقابل گونه و فاصله از معدن میدوک دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند. مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با سرب در گونه‌های مورد مطالعه معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین گونه‌های *Ha.strobilaceum*، *Ha.persicum* و *Ta.ramossisima* از نظر ویژگی‌های تحت بررسی وجود دارد (جدول ۶). به گونه‌ای که بیشترین مقادیر ویژگی‌های سرب شاخساره، سرب خاک، TF، BCF و BAC در گونه *Ha.persicum* و بیشترین مقادیر سرب ریشه، Igeo، EF و CF در گونه *Ha.strobilaceum* مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین

ویژگی‌های مرتبط با سرب در فواصل مختلف از معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین فواصل ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری از نظر شاخص‌های تحت بررسی وجود دارد. به طوری که بیشترین مقادیر ویژگی‌های سرب شاخساره، ریشه و خاک به همراه شاخص‌های BCF و BAC در فاصله ۱۰۰۰ متری مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار شاخص EF و کمترین مقدار شاخص BCF در فاصله ۱۵۰۰ متری مشاهده گردید (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با سرب در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ترکیبات مختلف فواصل و گونه‌ها از نظر ویژگی‌های تحت بررسی وجود دارد. به طوری که بیشترین مقدار سرب شاخساره در فاصله ۱۰۰۰ متری گونه *Ha.persicum* مشاهده شد (جدول ۷).

جدول ۶- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با سرب معدن میدوک در گونه‌های مورد مطالعه در فواصل مختلف

Table 6- Mean comparison of the indices related to Midok mine lead in the studied species at different distances

Species	Shoot (mg kg ⁻¹)	Root (mg kg ⁻¹)	Soil (mg kg ⁻¹)	TF	BCF	BAC	Igeo	EF	CF
<i>Haloxylon persicum</i>	249.93 a	79.52 c	388.58 a	1.52 a	0.41 a	0.63 a	-0.19 b	2.79 b	1.33 b
<i>Halocnemum strobilaceum</i>	104.00 b	160.87 a	276.67 c	1.32 b	0.29 b	0.40 b	0.43 a	4.68 a	2.17 a
<i>Tamarix ramossissima</i>	81.97 c	87.48 b	368.68 b	0.88 c	0.23 c	0.22 c	-0.19 b	2.82 b	1.33 B
Distance									
1000 m	260.39 a	173.38 a	413.91 a	1.44 a	0.41 a	0.61 a	0.33 a	2.59 d	1.95 a
1500 m	80.88 c	68.94 c	409.92 b	1.02 c	0.16 d	0.19 c	0.32 a	4.24 a	1.95 a
2000 m	148.14 b	123.35 b	322.99 c	1.16 b	0.38 b	0.45 b	-0.06 b	3.70 b	1.55 b
5000 m	91.80 c	71.48 c	231.74 d	1.34 a	0.30 c	0.41 b	-0.58 c	3.18 c	1.00 c

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۷- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با سرب معدن میدوک در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف

Table 7- Mean comparison of the indicators related to Midok mine lead in the mutual effect of distances and

Species	Distance	Shoot (mg kg ⁻¹)	Root (mg kg ⁻¹)	Soil (mg kg ⁻¹)	TF	BCF	BAC	EF
<i>H. persicum</i>	1000 m	444.0 a	-	-	1.69 ab	-	-	2.03 g
	1500 m	166.8 c	107.80 cd	-	1.55 ab	0.23 e	0.37 c	3.25 de
	2000 m	230.83 b	151.52 a	350.28 b	1.53 ab	0.43 a	-	2.80 ef
	5000 m	158.10 c	120.72 c	291.75 d	1.33 bc	0.41 a	0.54 a	3.09 ef
<i>H. strobilaceum</i>	1000 m	181.77 c	118.93 cd	343.28 b	1.52 ab	0.34 bc	0.52 ab	3.68 c
	1500 m	45.24 f	55.87 e	350.28 b	0.80 de	0.15 f	0.12 fg	6.16 a
	2000 m	123.60 cd	106.45 d	285.92 d	1.16 cd	0.37 b	0.43 bc	5.57 b
	5000 m	65.4 ef	36.85 f	127.20 f	1.78 a	0.29 cd	0.51 ab	3.30 cd
<i>T. ramossissima</i>	1000 m	155.4 cd	137.77 b	437.21 a	1.12 cd	0.31 cd	0.35 cd	2.07 g
	1500 m	30.6 f	43.17 f	428.47 a	0.70 e	0.10 g	0.07 g	3.32 cd
	2000 m	90.0 e	112.09 cd	332.77 c	0.80 de	0.33 bc	0.27 de	2.74 f
	5000 m	51.9 f	56.89 e	276.27 e	0.91 de	0.20 e	0.18 ef	3.15 ef

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین گونه‌های *Ta.ramossissima* و *Ha.persicum* *Ha.strobilaceum* از نظر ویژگی‌های تحت بررسی وجود دارد (جدول ۸). به گونه‌ای که بیشترین مقادیر ویژگی‌های نیکل شاخساره و ریشه، TF، BCF و BAC در گونه *Ha.persicum* و بیشترین مقادیر نیکل خاک، Igeo و CF در گونه *Ta.ramossissima* مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار

نتایج نشان داد ویژگی‌های غلظت نیکل شاخساره، نیکل ریشه، نیکل خاک، TF (نیکل)، BCF (نیکل)، Igeo (نیکل)، EF (نیکل) و CF (نیکل) بر گونه‌های *Haloxylon ramossissima* و *Halocnemum strobilaceum* *persicum* در گونه گیاهی، اثر متقابل گونه و فاصله از معدن میدوک دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند. نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با نیکل در گونه‌های مورد مطالعه

کمترین مقادیر نیکل خاک (جدول ۸) و شاخص‌های Igeo (شکل ۲) و CF (شکل ۳) در فاصله ۵۰۰۰ متری مشاهده شد. نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با نیکل در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین ترکیبات مختلف فواصل و گونه‌ها از نظر ویژگی‌های تحت بررسی وجود دارد. به طوری که بیشترین مقدار نیکل شاخساره و BAC در فاصله ۱۰۰۰ متری گونه *Ha.persicum* مشاهده شد (جدول ۹).

شاخص EF نیز در گونه *Ha.strobilaceum* مشاهده گردید. نتایج مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با نیکل در فواصل مختلف از معدن میدوک نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین فواصل ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ متری از نظر شاخص‌های تحت بررسی وجود دارد (جدول ۸). به طوری که بیشترین مقادیر ویژگی‌های نیکل شاخساره، ریشه و خاک به همراه شاخص‌های Igeo، BAC، BCF و CF در فاصله ۱۰۰۰ متری مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار شاخص EF در فاصله ۱۵۰۰ متری مشاهده گردید. همچنین

جدول ۸- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با نیکل معدن میدوک در گونه‌های مورد مطالعه در فواصل مختلف

Table 8- Mean comparison of indices related to Midok mine nickel in the studied species at different distances

Species	Shoot (mg kg ⁻¹)		Root (mg kg ⁻¹)		Soil (mg kg ⁻¹)		TF	BCF	BAC	Igeo	EF	CF						
<i>Haloxylon persicum</i>	1.48	a	13.75	a	26.52	b	0.10	a	0.49	a	0.05	a	0.07	ab	3.32	b	1.63	b
<i>Halocnemum strobilaceum</i>	0.94	b	10.30	b	27.27	b	0.08	b	0.32	b	0.02	b	0.04	b	3.63	a	1.63	b
<i>Tamarix ramosissima</i>	0.53	c	8.45	b	29.91	a	0.05	c	0.25	c	0.01	c	0.15	a	3.54	ab	1.74	a
Distance																		
1000 m	2.17	a	21.16	a	39.10	a	0.09	a	0.54	a	0.05	a	0.65	a	3.15	b	2.34	a
1500 m	0.94	b	11.83	b	31.64	b	0.07	b	0.37	b	0.03	b	0.34	b	4.17	a	1.89	b
2000 m	0.49	c	5.99	c	24.22	c	0.09	a	0.24	c	0.02	c	-0.05	c	3.48	b	1.45	c
5000 m	0.33	c	4.36	c	16.65	d	0.06	c	0.26	c	0.02	c	-0.58	d	3.20	b	0.99	d

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

جدول ۹- مقایسه میانگین ویژگی‌های مرتبط با نیکل معدن میدوک در اثر متقابل فواصل و گونه‌های مختلف

Table 9- Mean comparison indices related to Midok mine nickel in the interaction effect of different distances and types

Species	Distance	Shoot (mg kg ⁻¹)		Root (mg kg ⁻¹)		Soil (mg kg ⁻¹)		TF	BCF	BAC	EF				
<i>H. persicum</i>	1000 m	3.08	a	25.71	a	37.23	bc	0.12	a	0.68	a	0.08	a	2.98	d
	1500 m	1.33	c	13.02	bc	30.19	de	0.10	bc	0.43	b	0.04	c	3.95	ab
	2000 m	0.81	de	9.343	cd	22.44	f	0.09	cd	0.41	b	0.03	cd	3.26	cd
	5000 m	0.70	ef	6.94	de	16.23	g	0.10	ab	0.42	b	0.04	c	3.10	cd
<i>H. strobilaceum</i>	1000 m	2.31	b	23.01	a	38.35	ab	0.10	bc	0.60	a	0.06	b	3.27	cd
	1500 m	0.95	de	12.19	bc	30.90	de	0.07	de	0.39	b	0.03	cd	4.30	a
	2000 m	0.31	fg	2.59	e	23.11	f	0.12	a	0.11	d	0.01	ef	3.57	bc
	5000 m	0.18	g	3.39	e	16.71	g	0.05	fg	0.20	cd	0.01	f	3.39	cd
<i>T. ramosissima</i>	1000 m	1.12	cd	14.76	b	41.70	a	0.07	ef	0.35	b	0.026	de	3.21	cd
	1500 m	0.55	fg	10.27	cd	33.82	cd	0.05	fg	0.30	bc	0.01	ef	4.25	a
	2000 m	0.35	fg	6.03	de	27.12	de	0.06	fg	0.21	cd	0.01	ef	3.61	bc
	5000 m	0.12	g	2.75	e	17.00	g	0.04	g	0.16	cd	0.01	f	3.10	cd

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون براساس آزمون دانکن در سطح احتمال یک درصد تفاوت معنی‌داری با هم ندارند.

بحث

با بررسی تحقیقات انجام شده در مورد رابطه پوشش گیاهی و خاک در ایران، می توان اذعان نمود، با وجود تفاوت هایی که در نوع اقلیم مناطق مختلف با پوشش های گیاهی هالوفیت دیده می شود، تشابهات زیادی بین پوشش های هالوفیت از نظر تیره، جنس و گونه به چشم می خورد (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2023b). این موضوع در مورد پوشش گیاهی مناطق شهر بابک (معدن مس میدوک با ارتفاع ۱۸۵۲ متر از سطح دریا) نیز مصداق دارد. این مسئله نشانگر آن است که در استقرار گیاهان هالوفیت در مناطق شور و کفه های نمکی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و عمق سفره های آب زیرزمینی اثر مهمی بر استقرار و پراکنش گونه های گیاهی دارد. نکته قابل تأمل اینکه پوشش گیاهی خاک های شور و کفه های نمکی، وضعیت نسبتاً خاصی داشته و فاقد تنوع گونه های گیاهی می باشد. این بدان معنی است که با فاصله گرفتن از مرکز شوری یا مرکز کفه نمکی و با کم شدن میزان شوری خاک، تنوع گونه های گیاهی افزایش یافته و خلوص گونه ها در تیپ های گیاهی کمتر می شود (Ghorbanian *et al.*, 2019). بررسی مقدار BCF در معدن میدوک نشان داد که گیاه *Halocnemum strobilaceum* با مقدار ۱/۵۸۴۶ در فاصله ۱۰۰۰ متری معدن از ظرفیت بالایی در تغلیظ مس در بخش هوایی خود برخوردار است. بنابراین، به عنوان یک گیاه انباشتگر مس برای گیاه پالایی خاک های آلوده به مس قابل استفاده است که با پژوهش انجام شده توسط Martinez-Sanchez (۲۰۱۲) همسو است. ایشان در مطالعه ای با بررسی غلظت عنصر کمیاب در ریشه و برگ پنج گونه گیاهی (*Limonium carthagenens*, *Dittrichia*, *Arthrocnemum macrostachyum*, *Zygophyllum* و *Glaucium flavum viscosa*) در خاک های آلوده معدنی گزارش کرد که غلظت فلزات در گونه های گیاهی متفاوت بود؛ به طوری که *Z. fabago* توانست به عنوان یک تجمع کننده برای آهن

عمل کند، ولی عناصر آهن، آرسنیک و منگنز در A. *macrostachyum* تجمع داشت. با توجه به اینکه گونه *Halocnemum strobilaceum* در تمامی سطوح مورد بررسی غلظت های سرب، مس و آرسنیک دارای فاکتور انتقال بیشتر از یک است، برای پالایش به روش استخراج گیاهی (Phytoextraction) مناسب می باشد. طبق نتایج Mattina و همکاران (۲۰۰۳) نیز در روش گیاه پالایی، فاکتور انتقال عناصر از اندام زیرزمینی به هوایی را بسیار مهم بیان نمودند و اظهار داشتند که از آن بیشتر به منظور شناسایی گونه های فرا انباشت کننده استفاده می شود، در نتیجه این گونه ها توانایی تجمع سرب، مس و آرسنیک را در بافت های خود دارند و بیشترین تجمع میزان در برگ این گیاهان می باشد. همچنین، محاسبه مقدار تغلیظ زیستی و فاکتور انتقال بیانگر آن بود که این گیاهان از ظرفیت بالایی در تغلیظ سرب، مس و آرسنیک در بخش هوایی خود برخوردار است. در بررسی CF (Contaminatio factor) که عامل آلودگی نسبتی است و از تقسیم غلظت فلز سنگین در خاک به غلظت پس زمینه (غلظت در خاک غیر آلوده) به دست می آید (Hakanson, 1980)، میزان آلودگی ممکن است بر اساس شدت آن به شش کلاس طبقه بندی شود: صفر = بدون آلودگی، ۱ = هیچ تا متوسط، ۲ = متوسط، ۳ = متوسط تا شدید، ۴ = شدید، ۵ = شدید تا بسیار شدید، ۶ = بسیار شدید. بالاترین عدد نشان می دهد که غلظت فلز ۱۰۰ برابر بیشتر از آن چیزی است که در پوسته انتظار می رود. بنابراین، خاک پیرامون گونه *Tamarix ramosissima* در تمامی سطوح مورد بررسی غلظت های آرسنیک، نیکل و مس دارای آلودگی بین کلاس یک و دو می باشند، در نتیجه خاکی که این گونه های گیاهی رشد کرده بودند، دارای غلظت پایین تر از حد بحرانی فلزات سنگین هستند (شکل ۳). مطالعات انجام شده در مورد روابط متقابل خاک با پوشش در مورد ارتباط پراکنش گونه ها یا جوامع گیاهی با پارامترهای خاک می باشد. از شاخص های BCF و TF به عنوان ابزاری مناسب برای شناسایی

فواصل مختلف مشاهده شد. این نتایج می‌توانند به ما در درک بهتر تأثیرات محیطی بر تراکم و توزیع عناصر در گیاهان کمک کنند. مطالعات نشان داد که گونه‌های گیاهی مانند *Tamarix rosmarinus*, *Haloxylon persicum* و *Halocnemum strobilaceum* ظرفیت قابل توجهی برای گیاه‌پالایی دارند. این به این معنی است که این گونه‌ها می‌توانند در اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات استفاده شوند. گرچه نحوه استفاده از گیاهانی که به این شکل آلوده می‌شوند، دغدغه مهمی در زمینه گیاه‌پالایی است، اما راهکار تولید انرژی در پیچه دیگری را برای محققان باز کرده است. سوزاندن و تولید گاز از روش‌های مهم برای تولید انرژی گرمایی و الکتریکی است که می‌توان از گیاهان آلوده استخراج کرد. بازیافت این انرژی از بیومس به وسیله سوزاندن یا تولید گاز می‌تواند ارزش اقتصادی داشته باشد. سوزاندن روش ساده‌ای است اما باید تحت موقعبت‌های کنترل شده باشد. در هر صورت، گیاهی که در فرایند گیاه‌پالایی استفاده شده است، باید از محل خارج شود. در بین این گونه‌ها، *Halocnemum strobilaceum* بالاترین ظرفیت را از خود نشان داد. نتایج حاصل از تجزیه خاک‌های اطراف معدن نشان داد، منطقه با فاصله بیشتر از معدن فاقد آلودگی تا آلودگی متوسط فلزات سنگین ذکر شده در تحقیق نشان‌دهنده عدم بروز آلودگی‌های زیست‌محیطی در منطقه و عدم انتقال فلزات سنگین به محصولات کشاورزی زمین‌های اطراف معدن است. بنابراین، براساس شاخص‌های تجمع عناصر و مشاهده مقدار کم آلودگی در نقاطی که بیش از ۱۵۰۰ متر با معدن فاصله داشتند، به نظر می‌رسد که امکان کشاورزی در مناطق نزدیک به معدن وجود دارد؛ در صورتی که احتیاط لازم رعایت گردد و بررسی‌های مستمری درباره غلظت فلزات سنگین انجام شود.

توانایی گیاهان در حال رشد برای جذب یون‌های فلزی استفاده شده است (Zandi Esfahan et al., 2015). فاکتور انتقال (TF) بالاتر از یک، توانایی بالای گیاه در انتقال فلزات به بافت‌های گیاه را نشان می‌دهد و فاکتور تغلیظ زیستی (BCF) بیانگر میزان انتقال فلزات از خاک به اندام‌های هوایی می‌باشد و همین‌طور مقدار تغلیظ زیستی بزرگ‌تر از یک توانایی بالقوه گیاهان برای تجمع فلزات را نشان می‌دهد (Alaboudi et al., 2018). براساس شاخص زمین‌انباشت (Muller, 1979)، خاک پیرامون گونه *Tamarix ramossisima* در تمامی سطوح مورد بررسی غلظت‌های آرسنیک، نیکل، مس و غلظت سرب گونه *Halocnemum strobilaceum* در معدن میدوک دارای کلاس یک غیرآلوده تا آلودگی متوسط می‌باشد (شکل ۲). این دسته‌بندی براساس تعریف Muller (۱۹۷۹) بدین ترتیب است: کلاس صفر: عمدتاً غیرآلوده ($I_{geo} \geq 0$)، کلاس یک: غیرآلوده تا آلودگی متوسط ($0 < I_{geo} < 1$)، کلاس دو: آلودگی متوسط ($1 < I_{geo} < 2$)، کلاس ۳: آلودگی متوسط تا زیاد ($2 < I_{geo} < 3$)، کلاس ۴: آلودگی زیاد ($3 < I_{geo} < 4$)، کلاس ۵: آلودگی زیاد تا شدید ($4 < I_{geo} < 5$)، کلاس ۶: شدیداً آلوده ($I_{geo} > 5$)، کلاس ۷ شاخص بالاتر از کلاس ۵. در صورت افزایش غلظت فلزات سنگین، این فلزات می‌توانند با تغییر در قابلیت جذب عناصر غذایی توسط محصولات زراعی موجب کاهش کیفیت این محصولات شده، یا سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی از جمله آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه شوند. به‌علاوه آب‌های آلوده به این فلزات سنگین حتی با غلظت کمتر از حد مجاز می‌توانند در مدت زمان طولانی سبب انباشته شدن این عناصر در خاک و گیاه شوند که با برخی گزارش‌های پیشین (Ahmadian & Motasharezadeh, 2016) همخوانی دارد. به عنوان نتیجه‌گیری می‌توان گفت که در این تحقیق، تفاوت‌های قابل توجهی در توزیع و غلظت عناصر مختلف بین گونه‌های بررسی شده و در

References

- Ahmadian, E. and Motasharezadeh, B., 2016. Study heavy metals concentration changes and ecological index pollution soils around charcoal mine Gelandroud Mazandaran Province. *Land Management Journal*, 3(2): 73-81. <https://doi.org/10.22092/lmj.2016.106051>
- Akhiani, H., 2006. Biodiversity of halophytic and sabkha ecosystems in Iran. *Sabkha Ecosystems In: Series Tasks for Vegetation Science*, 42: 71-88. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5072-5_6
- Alaboudi, K.A., Ahmed, B., Brodie, G., 2018. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63:123-127. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2018.05.007>
- Ali, H., Khan, E. and Sajad, M.A., 2013. Phytoextraction of heavy metals–Concepts and applications. *Chemosphere*, 91: 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Boonyapookana, B., Upatham, E.S., Kruatrachne, M., Pokethitiyook, P. and Singhakaew, S., 2002. Phytoaccumulation and phytotoxicity of cadmium and chromium in Duckweed *Wolffia globosa*. *International Journal of Phytoremediation*, 4: 87-100. <https://doi.org/10.1080/15226510208500075>
- Caparrós, P.G., Ozturk, M., Gul, A., Batool, T.S., Pirasteh-Anosheh, H., Unal, B.T., Altay, V. and Toderich, K.N. 2022. Halophytes have potential as heavy metal phytoremediators: A comprehensive review. *Environmental Environmental and Experimental Botany*, 193, 104666. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104666>
- Favas, P.J.C., Pratas, J. and Prasad, M.N.V., 2012. Accumulation of arsenic by aquatic plants in large-scale field conditions: Opportunities for phytoremediation and bioindication. *Science of the Total Environment*, 433: 390-397. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.091>
- Ghazanfari Moghadam, M.S. and Orai, J., 2018. Investigating the distribution of copper element in soil under the influence of Midok copper mining activities (Shahrababak). *Environmental Science and Technology*, 21(2): 101-110. <https://doi.org/10.22034/jest.2019.13955>
- Ghorbanian, D., Zandi Esfahan, E. and Bahadori, F., 2019. Investigation and comparison of bioethanol production potential from biomass and structural and non-structural carbohydrate reserves of species *Suaeda vermiculata*, *Halocnemum strobilaceum* and *Seidlitzia rosmarinus*. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(2): 340-351. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.119356>
- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological Approach, *Water Research*, 14(8): 975– 1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Hamidian, A.H., Atashgahi, M. and Khorasani, N., 2014. Phytoremediation of heavy metals (Cd, Pd and V) in gas refinery wastewater using common reed (*Phragmites australis*). *International Journal of Aquatic Biology*, 2: 29-35. <https://doi.org/10.22034/ijab.v2i1.21>
- Jarup, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination. *British Medical Bulletin*, 68: 167–182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H., 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press, LLC, Boca Raton, 413 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- Khan, M.A., Ansari, R., Gul, B. and Qadir, M., 2006. Crop diversification through halophyte production on salt prone land resources. *CAB Rev. Perspect. Agric. Vet. Sci. Nutri. Nat. Resour.*, 48: 1–8. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20061048>
- Martinez-Sanchez, M., Garcia-Lorenzo, M., Perez-Sirvent, C. and Bench J. 2012. Trace element accumulation in plants from an aridic area affected by mining activities. *Journal of Geochemical Exploration*, 123: 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.01.007>
- Mattina, M.J.I., Lannucci-Berger, W., Musante, C. and White, J.C., 2003. Concurrent plant uptake of heavy metal and persistent organic pollutants from soil. *Environmental Pollution*, 124: 375-378. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00060-5)
- Merian, E., Anke, M., Ihnat, M. and Stoeppler, M., 2004. Elements and their compounds in the environment, occurrence, analysis and biological relevance. Wiley- VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 1773 p. <https://doi.org/10.1002/9783527619634>
- Muller, G., 1979. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal*, 2: 108–118.
- Munns, R. and Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59: 651-681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- Olsson, P.A., Thingstrup, I., Jakobsen, I. and Baath, E., 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(13): 1879-1887. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4)
- Pirasteh-Anosheh, H., Piernik, A., Łuczak, K., Mendyk, Ł. and Hulisz, P., 2023a. The behavior of potentially toxic elements in the technogenic soil-

- plant system: A study of *Salicornia europaea* L. from sites affected by the soda industry. *Ecological Modelling*, 486, 110517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110517>
- Pirasteh-Anosheh, H., Ranjbar, G., Akram, N. A., Ghafar, M. A. and Panico, A., 2023b. Forage potential of several halophytic species grown on saline soil in arid environments. *Environmental Research*, 219: 114954. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114954>
- Shafiei, N., Shirani, H. and Esfandiarpour, A., 2012. The enrichment of arsenic and selenium in the soils around the Sarcheshmeh copper mine. *Journal of Soil Management*, 2 (2): 1-10.
- Zandi Esfahan, E., Jafari, A.A. and Mohebbi, A., 2015. A comparison on potential of ligno-cellulosic biomass for ethanol production from halophyte species in desert regions Case study: *Atriplex leuoclada* and *Suaeda vermiculata*. *Desert Ecosystem Engineering*, 4(8): 25-34.