

Electrophytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals Using Innovative Methods

Leyla Mosayyebi^{1*}; Zeynep Zaimoglu²; Nihal Bektash³

- *1. Doctor, Environmental Engineering of Cukurova University in Adana, Turkey.
2. Professor, Experience in extensive teaching at the Department of Environmental Engineering of Cukurova University in Adana, Turkey.
3. Professor, teaching at the Department of Environmental Engineering of Gebze Technical University in Istanbul, Turkey.

*Email Address: leyla19001@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper Article History: Received Date: 2026/05/25 Revised Date: 2026/06/24 Accepted Date: 2026/07/08 Published Date: 2026/07/18 Keywords: Phytoremediation, Electro-phytoremediation, Contaminated Soil.	Heavy metals in soil, due to their high density and strong toxicity, are considered among the most dangerous environmental pollutants. Because conventional physical and chemical remediation methods are often expensive, there is growing interest in alternative, low-cost approaches for improving contaminated soils. Among these methods, phytoremediation, electrophytoremediation, and electrokinetic techniques have been widely applied for heavy metal removal. In this experimental study, soils contaminated with lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), and boron (B) were investigated under controlled conditions using 12 pots, including four control groups representing phytoremediation, electrophytoremediation, electrokinetic treatment, and reference samples. Mung bean, sunflower, and rapeseed were grown in the contaminated soils and exposed to a direct current (DC) voltage of 30 volts for 4 hours per cycle over a 30-day period. The results showed that graphite electrodes enhanced the efficiency of heavy metal removal, while electrical stimulation in the phytoremediation system increased the average soil pH. In the electrophytoremediation treatment, sunflower achieved the highest uptake of Cr, Cu, and B, whereas rapeseed accumulated the highest levels of Cd and Pb. In the phytoremediation treatment, mung bean showed the greatest uptake of Cr, Cu, and B, while sunflower recorded higher accumulation of Cd and B. Overall, the findings indicate that electric current has a stronger influence on metal uptake in sunflower compared to the other plants. The concentrations of heavy metals absorbed by plants per unit of dry biomass were measured using ICP analysis. The study concludes that electrophytoremediation is an efficient and promising approach for the remediation of soils contaminated with heavy metals.
Cite this article:	Leyla Mosayyebi, Zeynep Zaimoglu, Nihal Bektash (2026) Electrophytoremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals Using Innovative Methods, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(1), Pages 11132-11149.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Soil contamination with heavy metals is recognized as one of the major environmental challenges worldwide. The accumulation of heavy metals in soil through industrial activities, agricultural practices, solid waste disposal, and the excessive use of chemical fertilizers can significantly reduce soil quality and threaten the health of humans and other living organisms. Heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), and boron (B) are considered among the most hazardous soil pollutants due to their high toxicity, persistence, and potential for bioaccumulation within the food chain. Phytoremediation is a plant-based approach used to absorb, stabilize, or remove contaminants from soil. Because of its low cost, environmental friendliness, and suitability for large-scale applications, it has been widely recognized as an effective method for the remediation of contaminated soils. Nevertheless, the efficiency of phytoremediation may be limited under certain conditions and is influenced by factors such as plant species, contaminant concentration, and soil properties. In this context, the application of electric fields through electro-phytoremediation can enhance the mobility and uptake of contaminants, thereby improving the ability of plants to remove heavy metals from polluted soils. In the present study, the effectiveness of phytoremediation, electro-phytoremediation, and electrokinetic techniques in removing Pb, Cd, Cr, Cu, and B from contaminated soils was investigated. In addition, the uptake capacity of mung bean, sunflower, and canola plants for these elements was evaluated.

Materials and Methods

This study was carried out under greenhouse conditions using a pot experiment. A total of 12 pots, each containing 3 kg of soil, were prepared, and the soils were artificially contaminated with lead, cadmium, chromium, copper, and boron. The contaminants were introduced into the soil using $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, CdCl_2 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, CuSO_4 , and H_3BO_3 after the required amounts had been accurately calculated. Twelve seeds of sunflower, mung bean, and canola were sown in each pot. In addition, several uncontaminated pots were used as control treatments. For the electro-phytoremediation experiment, graphite electrodes measuring 13 cm in length and 4 cm in width were employed. A direct current (DC) with a voltage of 30 V and a current intensity of 2–3 A was applied for 4 hours at predetermined intervals. The electric field treatment began on the tenth day after seed germination to allow sufficient time for the initial establishment of the plants. The investigated parameters included germination rate, plant growth, biomass production, and the efficiency of heavy metal removal. At the end of the growth period, soil samples and plant tissues, including roots, stems, leaves, and flowers, were harvested. The samples were thoroughly washed, dried, and prepared for analysis, and the elemental concentrations were determined using inductively coupled plasma (ICP) analysis. In the electrokinetic section of the experiment, soil samples were collected from the anode zone, cathode zone, and the central region of the pots at different time intervals, and the concentrations of the elements were subsequently measured.

Results and Discussion

The results indicated that the addition of heavy metals did not significantly affect seed germination; however, it led to a noticeable reduction in vegetative growth. At elevated boron concentrations, plants showed growth inhibition and eventual wilting, which necessitated adjustment of the boron levels. The findings from the electro-phytoremediation experiments revealed that the application of an electric current enhanced the uptake efficiency of heavy metals by the plants. In addition, the use of graphite electrodes significantly improved the overall removal efficiency of the target elements. A comparison between phytoremediation and electro-phytoremediation showed that applying an electric current enhanced the transport and uptake of elements in plants. In most cases, element accumulation under electro-phytoremediation was higher than that observed under conventional phytoremediation. The electrokinetic results also revealed a progressive decrease in heavy metal concentrations across different soil zones over time. In the anode region, the concentrations of Cr, Cd, Pb, Cu, and B showed a clear downward trend, while a reduction in elemental levels was also observed in the cathode region. Furthermore, measurements of pH and electrical conductivity (EC) indicated that the electric field altered soil chemical conditions and facilitated ion mobility. The results further demonstrated that plant species and the specific characteristics of each element significantly influence the patterns of uptake and accumulation of heavy metals. Overall, sunflower exhibited the highest efficiency in accumulating Cr, Cu, and B, whereas canola showed greater effectiveness in the uptake of Cd and Pb. In addition, the

application of an electric field increased elemental mobility in the soil and improved the overall efficiency of plant uptake.

Conclusion

The results of this study indicate that the simultaneous use of appropriate plant species and an applied electric field can serve as an effective, cost-efficient, and environmentally friendly strategy for the remediation of soils contaminated with heavy metals.



الکتروفیتوترمیم خاک‌های آلوده به فلزات سنگین با استفاده از روش‌های نوآورانه

لیلا مصیبی^{۱*}، زینب زایم اوغلو^۲، نهال بکتاش^۳^{۱*} - دکتر، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه دولتی چوکوراوا، آدانا، ترکیه.^۲ - پرفسور، استاد تمام، رئیس دانشکده گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دولتی چوکوراوا، آدانا، ترکیه.^۳ - پرفسور، رئیس گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دولتی قبضه تکنیک، استانبول، ترکیه.

*ایمیل نویسنده مسئول: leyla19001@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷ کلید واژه ها: فیتورمداسیون، الکتروفیتورمداسیون، خاک آلوده.	در این مطالعه، خاک‌های آلوده به عناصر سرب (Pb)، کادمیم (Cd)، کروم (Cr)، مس (Cu) و بور (B) تحت شرایط آزمایشی متفاوت در چهار نوع گلدان قرار گرفتند. مجموعاً ۱۲ گلدان در نظر گرفته شد که چهار گلدان آن نماینده‌ی گروه‌های کنترل مختلف بودند. فیتورمداسیون، الکتروفیتورمداسیون، الکتروکینتیک و نمونه‌های مرجع. در این راستا، گیاهان ماش، آفتابگردان و کلزا به خاک‌های حاوی عناصر مذکور اضافه شدند و طی مدت ۳۰ روز با اعمال ولتاژ ۳۰ ولت و جریان مستقیم (DC) به مدت ۴ ساعت در هر دوره، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از الکترودهای گرافیتی موجب بهبود کارایی حذف فلزات سنگین شد. همچنین، تحریک الکتریکی در سیستم فیتورمداسیون باعث افزایش متوسط pH خاک گردید. در آزمایش الکتروفیتورمداسیون، بیشترین میزان جذب Cu، Cr و B توسط گیاه آفتابگردان و بیشترین جذب Pb و Cd توسط گیاه ماش و کلزا مشاهده شد، در حالی که در آزمایش فیتورمداسیون بیشترین جذب Cu، Cr و B توسط گیاه ماش و Cd و B توسط گیاه آفتابگردان ثبت شد. این نتایج نشان می‌دهد که جریان الکتریکی تأثیر بیشتری بر جذب عناصر توسط گیاه آفتابگردان دارد. میزان فلزات سنگین جذب‌شده توسط گیاهان بر اساس هر کیلوگرم وزن خشک با استفاده از دستگاه ICP تعیین شد. یافته‌ها نشان می‌دهد که تکنیک الکتروفیتورمداسیون در تصفیه خاک‌های آلوده به فلزات سنگین روشی مؤثر و امیدبخش است.

آلودگی خاک می‌تواند به صورت طبیعی یا ناشی از اضافه شدن مواد خارجی و یا به علت اعمال کشاورزی نادرست ایجاد شود و منجر به تغییرات در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک گردد (Khan et al., 2020). عمده آلودگی‌های ناشی از فلزات سنگین از طریق پسماندهای جامد وارد محیط زیست می‌شود. در پسماندها، آلاینده‌های اصلی شامل کروم و مقادیر کمی مس، بور، سرب و روی هستند. فلزات سنگین، به عنوان گروهی از آلاینده‌های خطرناک، می‌توانند اثرات منفی ذهنی و هورمونی بر انسان داشته باشند و علاوه بر آن، باعث واکنش‌های آلرژیک، جهش‌های ژنتیکی و مرگ باکتری‌های مفید بدن شوند (Sattari et al., 2019). آلودگی‌های ناشی از مناطق کشاورزی به‌ویژه، تهدید جدی برای سلامت انسان محسوب می‌شوند. افزایش میزان کادمیوم در خاک و آب به دلیل استفاده از کودهای فسفاته و آبیاری با پساب‌های صنعتی می‌تواند در صورت عبور از حد مجاز، منجر به بیماری‌های بافت همبند، سرطان، بیماری‌های مزمن و مشکلات گوارشی مانند اسهال گردد (Saleem et al., 2022). فیترومداسیون به معنای استفاده از گیاهان سبز برای تجزیه، تجمع یا تثبیت آلاینده‌ها است. این روش یک فناوری بی‌ضرر محسوب می‌شود که کیفیت زیستی خاک را افزایش می‌دهد و برای استفاده در مقیاس وسیع، ارزان و مناسب است. تکنولوژی‌های فیترومداسیون بر اساس نوع آلاینده‌ها دسته‌بندی می‌شوند. اگر آلاینده‌ها فلزی باشند، روش‌ها شامل فیواکستراکشن (فیواکومولاسیون)، فیتواستابیلیزاسیون و ریزوفیلتراسیون هستند. اگر آلاینده‌ها آلی باشند، روش‌ها شامل فیتودگراسیون، ریزودگراسیون و فیتوولاتیلیزاسیون می‌شوند (Dai et al., 2020). موفقیت روش فیواکستراکشن به سرعت تولید زیست‌توده گیاه و توانایی جذب مقادیر زیاد فلزات در بافت‌های ساقه و برگ گیاه بستگی دارد (Blaylock & Huang, 2000). انتخاب گیاهان هایپراکیومولاتور مناسب، اصلاح ژنتیکی گیاه و استفاده از روش‌های پیشرفته، از استراتژی‌های مهم در توسعه فناوری فیترومداسیون محسوب می‌شود. در مطالعه‌ای با استفاده از گیاه *Thlaspi caerulescens*، تأثیر pH خاک و نوع خاک بر جذب کادمیم (Cd) بررسی شد. نتایج نشان داد که ویژگی‌های خاک تأثیر قابل توجهی بر میزان جذب Cd توسط گیاه دارند. محدوده pH بهینه برای دستیابی به حداکثر جذب کادمیم، ۵ تا ۶ تعیین شد. اضافه کردن کادمیم در محدوده ۰/۶ تا ۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، تأثیر منفی بر بیوماس گیاه داشت. بیشترین غلظت Cd در گیاه در pH 5.1 مشاهده شد و میزان جذب آن برابر با ۲۲۸ میلی‌گرم در هر گلدان گزارش گردید (Bhati & Singh, 2003). در مطالعه‌ای دیگر که با سه گونه گیاهی انجام شد، غلظت سرب (Pb) در برگ‌ها و ساقه‌ها در گیاهان کنترل و گیاهان ابرجمع‌کننده (hyperaccumulator) مقایسه گردید. نتایج نشان داد که گیاه آفتابگردان بهترین عملکرد را در حذف سرب از خاک‌های آلوده و بازسازی مناطق معادن متروکه و نواحی صنعتی دارد (Bert et al., 2005). برخی گیاهان ابرجمع‌کننده، با وجود جذب بالای فلزات، تغییراتی در ساختارهای رویشی خود نشان می‌دهند. برای مثال، گیاه خردل هندی قادر است روی (Zn) و کادمیم (Cd) را در مقادیر بالا ذخیره کند بدون آنکه علائم فتوتوکسیسیته بروز دهد. با این حال، غلظت‌های بالای Zn و Cd می‌تواند منجر به تغییرات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی در ریشه، ساقه و برگ این گیاه گردد (Dudai et al., 2006). مطالعه‌ای دیگر نشان داد که عوامل مؤثر بر رشد گیاه شامل کمبود و یا مازاد عناصر (سمیت آن‌ها) است. در شرایطی که قابلیت زیستی جذب عناصر توسط گیاه بالا باشد، عناصر ریزمغذی ضروری مانند Cu، Zn، Mn، Fe، Mo و B اثرات مفید دارند، اما عناصر غیرمفید و سمی مانند Cd، Pb، Hg و Cr می‌توانند اثرات زیان‌آور بر گیاه ایجاد کنند (Clemens, 2006). همچنین، بسیاری از گیاهان قادرند مقادیر بالای Pb را ذخیره کنند. به عنوان نمونه، *Brassica juncea* می‌تواند در خاک‌های آلوده تا ۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم Pb ذخیره نماید. آفتابگردان و ذرت نیز قادرند در خاک‌هایی با غلظت Pb تا ۱۶۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم رشد کنند (Annam & Singla 2021). فلزات مورد مطالعه در این پژوهش شامل کادمیم (Cd)، کروم (Cr)، مس (Cu)، سرب (Pb) و بور (B) هستند که احتمال حضور آن‌ها در خاک‌های ترکیه بسیار بالا است. به طور مثال، سرب عمدتاً در نواحی با ترافیک سنگین جاده‌ای یافت می‌شود، کادمیم منشأ کشاورزی دارد و از کودهای فسفاته وارد خاک می‌شود و بور به دلیل وفور آن در خاک ترکیه، به طور شایع یافت می‌شود. به همین منظور، در این تحقیق ظرفیت جذب عناصر توسط برخی از مهم‌ترین گیاهان کشت‌شده در ترکیه، شامل ذرت، کلزا و آفتابگردان، مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، فیترومداسیون، الکتروفیترومداسیون و روش الکتروکینتیک برای تصفیه خاک‌های آلوده به Pb، Cd، Cr، Cu و B مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، پس از افزودن این عناصر به خاک، از گیاهان ماش، آفتابگردان و کلزا استفاده شد و فرآیندهای فیترومداسیون مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، با استفاده از سه نوع گیاه، شامل آفتابگردان از خانواده Compositae، ماش که قادر به رشد در انواع شرایط خاک و اقلیم است و کانولا از خانواده Cruciferae، بررسی شد که عناصر رایج در خاک‌های ترکیه شامل Cu, Cd, Pb و Cr و B چگونه در شرایط گلدانی و محیط گلخانه‌ای توسط این گیاهان جذب می‌شوند. عناصر مورد آزمایش شامل سرب، کادمیوم، کروم، مس و بور بودند که به ترتیب به صورت CuSO_4 , K_2CrO_7 , CdCl_2 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ و H_3BO_3 تهیه شدند. این ترکیبات پس از انجام محاسبات لازم، به صورت جامد به خاک اضافه گردید. بذرها، کانولا، ماش و آفتابگردان در گلدان‌هایی حاوی ۳ کیلوگرم خاک با افزودن Cd, B, Cu و Pb کاشته شدند. گیاهان با فواصل مناسب آبیاری و مراقبت‌های لازم انجام شد. پس از برداشت، نمونه‌های خاک و اندام‌های مختلف گیاه شامل ریشه، ساقه، برگ و گل برای تعیین غلظت عناصر با دستگاه ICP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این آزمایش‌ها، سنگ‌ها و ذرات درشت خاک جدا شده و نمونه‌ها با استفاده از الک ۴ میلی‌متری الک شده و برای خشک شدن قرار گرفتند. سپس برای هر گلدان، ۳ کیلوگرم خاک با دقت توسط ترازوهای حساس وزن‌کشی شده و برای استفاده آماده گردید. به ازای هر کیلوگرم خاک، ۴۳ میلی‌گرم بور (B)، ۲۵۰ میلی‌گرم سرب (Pb)، ۴۰۰ میلی‌گرم کادمیوم (Cd)، ۲۲۶ میلی‌گرم کروم (Cr) و ۱۸۵ میلی‌گرم مس (Cu). پس از محاسبه دقیق این مقادیر و وزن‌کشی ترکیبات، هر ماده به گلدان‌ها افزوده و تا رسیدن به مخلوطی یکنواخت، به‌خوبی هم زده شد (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج تحلیل خاک

ویژگی‌ها	خاک رس‌آلود
pH (1:1)	pH: 8 ± 0.1
شن: $2-0.02$ میلی‌متر (%)	شن: $2/3 \pm 6/84$ (%)
سیلت $0.02-0.002$ میلی‌متر (%)	سیلت: $0.5 \pm 8/4$ (%)
رس (<0.002 میلی‌متر) (%)	رس: 0.6 ± 7 (%)
طبقه‌بندی بافت	طبقه‌بندی بافت CL: (رسی-لومی)
کربنات کلسیم (%) CaCO_3	کربنات کلسیم: $0.41 \pm 7/26$ (%) CaCO_3
مواد آلی (%)	مواد آلی: $0.24 \pm 5/27$ (%)
کربن آلی * (%)	کربن آلی: $1/41$ (%)

در این مطالعه، تعداد ۱۲ گلدان انتخاب شد. هر گلدان با ۳ کیلوگرم خاک پر شده و با فلزات سنگین آلوده گردید. به ازای هر گلدان، ۳۶ بذر به‌طور مساوی توزیع شد؛ به این صورت که ۱۲ بذر هر یک از گیاهان آفتابگردان، ماش و کانولا به‌صورت جداگانه کاشته شدند. سه گلدان نیز به عنوان شاهد انتخاب شدند. برای پایش روند رشد، در هر گلدان خط‌کش قرار داده شد و رشد گیاهان به‌طور منظم مشاهده شد. در طول مشاهده، مشخص شد که گیاه کانولا تحت تأثیر غلظت بور (B) اضافه شده به خاک قرار گرفته و شروع به خشکی کرده است؛ بنابراین، دوز بور به ۲۵ میلی‌گرم کاهش یافت و آزمایش‌ها با این میزان اصلاح شده مجدداً تکرار شد. این گونه تنظیمات برای افزایش اعتبار نتایج و فهم بهتر تعامل بین گیاه و عناصر ضروری است. همچنین، در سه گلدان شفاف بزرگ، الکترودهایی از جنس گرافیت با طول ۱۳ سانتی‌متر و عرض ۴ سانتی‌متر نصب شد. بذرها در این گلدان‌ها نیز به همان صورت کاشته شدند و پس از ۱۰ روز از جوانه‌زنی، جریان ۳۰ ولت هر ۴ ساعت به آن‌ها اعمال گردید. رشد گیاهان در طول این فرآیند به‌طور منظم مشاهده و ثبت شد. پس از اتمام دوره سه‌ماهه، مراحل برداشت انجام شد و نمونه‌ها برای تحلیل مجدد جمع‌آوری و ارزیابی شدند. نمونه‌های گیاهی از سطح خاک به ارتفاع حدود ۲ سانتی‌متر با قیچی جمع‌آوری شدند. ریشه‌ها از برگ‌ها و ساقه‌ها جدا شدند و تمامی نمونه‌ها با آب دیونیزه و خالص شسته شده و برای خشک شدن آماده گردید. آزمایش‌های فیتورمیدیاسیون در گلدان‌هایی با ۳ کیلوگرم خاک خشک و رطوبت ۴۱٪ (خاک اشباع) انجام شد. در نمونه‌های دارای جریان الکتریکی، از الکترودهای گرافیتی قرار گرفته در راکتور برای اعمال گرادیان ثابت ۱ ولت بر سانتی‌متر استفاده شد. فاصله بین الکترودها ۱۰ سانتی‌متر و ابعاد هر الکترودها ۱۳ سانتی‌متر طول و ۴ سانتی‌متر عرض بود. اثر جریان متناوب (AC) و جریان مستقیم (DC) به مدت ۴ ساعت بررسی شد. در آزمایش‌های DC-P، جریان مستقیم به صورت دوره‌ای و با همان بازه زمانی ۴ ساعت (۳۰ ولت و جریان بین ۲ تا ۳ آمپر) اعمال شد. میدان الکتریکی از روز دهم پس از کاشت اعمال شد تا به جوانه‌ها فرصت کافی برای جوانه‌زنی و رشد داده شود. شاخص‌های مورد بررسی شامل نرخ جوانه‌زنی، رشد گیاه، تولید بیوماس و حذف آلاینده‌ها (فلزات سنگین) بود. انتظار می‌رود در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، به دلیل تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان، کاهش رشد مشاهده شود. آزمایش‌های فیتورمیدیاسیون در گلدان‌هایی با ۳۰۰ گرم خاک خشک و رطوبت ۴۱٪ (خاک اشباع) انجام شد. در نمونه‌های دارای جریان الکتریکی، از الکترودهای گرافیتی قرار گرفته در راکتور برای اعمال گرادیان ثابت ۱ ولت بر سانتی‌متر استفاده گردید. فاصله بین الکترودها

۱۰ سانتی متر و ابعاد هر الکتروود ۱۰ سانتی متر طول و ۴ سانتی متر عرض بود. تأثیر جریان متناوب (AC) و جریان مستقیم (DC) به صورت پیوسته بررسی شد. در آزمایش های DC-P، جریان مستقیم به صورت دوره ای و به مدت ۴ ساعت اعمال گردید.

• تحلیل خاک و بخش های گیاهی

نمونه های خاک به مدت ۲ روز در آزمایشگاه با دمای ۷۵ درجه سانتیگراد خشک شدند، سپس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. نمونه های آزمایشگاه سپس برای تجزیه و تحلیل در دسیکاتور نگهداری شدند. در مرحله بعد، نمونه های خاک ۲ گرمی با ترازوی دقیق وزن شدند. نمونه های وزن شده در بشرهای ۲۵۰ میلی لیتری قرار داده شدند، با شیشه ساعت پوشانده شدند و به مدت ۲۴ ساعت روی شیکر قرار داده شدند. سپس دستگاه خاموش شد و به مدت ۱ ساعت استراحت داده شد. سپس نمونه ها از طریق کاغذ صافی واتمن ۴۱ در یک بالن حجمی ۱۰۰ میلی لیتری فیلتر شدند. سپس آب مقطر و یک قطره HCl اضافه شد و نمونه ها با دستگاه ICP تجزیه و تحلیل شدند. همان رویه های مربوط به نمونه های اضافه شده به فلز برای نمونه کنترل نیز دنبال شد و تجزیه و تحلیل خاک تکمیل شد. این روش برای آماده سازی نمونه های خاک در محلول اسیدی و آماده سازی آنها برای تجزیه و تحلیل استفاده شد. قطعات گیاهی در آزمایشگاه با آب مقطر و یونیزه شده کاملاً شسته شدند، سپس وزن شده و به مدت ۴۸ ساعت در دستگاه خشک کن در دمای ۷۸ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. پس از خشک شدن، نمونه ها با هاون چینی خرد شده و برای تجزیه شیمیایی کاملاً آسیاب شدند. ۰/۳ گرم از قطعات گیاهی خشک شده در یک بالن مخروطی شیشه ای ۵۰ میلی لیتری قرار داده شد. ۶ میلی لیتر HNO₃ و ۲ میلی لیتر H₂O₂ اضافه شد. سپس نمونه ها به مدت ۳۰ دقیقه در مایکروویو قرار داده شدند و سپس اجازه داده شد تا خنک شوند. آب مقطر را به نمونه های موجود در یک بالن ۲۵ میلی لیتری اضافه کردیم و آنها را برای دستگاه ICP در یک فالكون ۵۰ میلی لیتری آماده کردیم. نتایج تجزیه و تحلیل از دستگاه ICP به دست آمد (شکل ۱).



شکل ۱. آماده سازی بخش های گیاهی برای تحلیل

محلول های تهیه شده برای بررسی میزان عناصر موجود، با استفاده از دستگاه ICP مورد تحلیل قرار گرفتند. برای تعیین عناصر کروم، کادمیوم، بور، سرب و مس، استانداردهای کالیبراسیون با غلظت های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ ppm تهیه شد. پس از آماده سازی استانداردها و نمونه های گیاهی، تحلیل ها به کمک دستگاه ICP انجام گرفت تا غلظت دقیق عناصر موجود در نمونه ها تعیین شود.

۳- یافته ها

• جذب عناصر توسط گیاهان با روش الکتروفیتورمداسیون

افزودن عناصر به خاک گلدان ها تاثیری بر توانایی جوانه زنی بذرها نداشت. با این حال، پس از جوانه زنی، رشد و ژتاتیو گیاهان کمی کاهش یافت. به ویژه گیاهان آفتابگردان، کانولا و ماش در گلدان هایی که ۴۳ میلی گرم بور به خاک اضافه شده بود، پس از مدتی رشدشان متوقف و شروع به خشک شدن کردند. به همین دلیل میزان بور به ۲۵ میلی گرم کاهش یافت و آزمایش ها مجدداً انجام شد.

جدول ۲. جذب عناصر توسط گیاه آفتابگردان در شرایط جریان الکتریکی

عنصر	تکرار	ریشه		ساقه		برگ + گل		کل گیاه	بخش هوایی خاک
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	mg/kg
کروم (Cr)	T ₁	۱۵۷/۵۹	۷۲/۲۷	۱۳۲/۲	۶۵/۹	۶۱/۴۲	۳۴/۸۳	۳۵۱/۲۱	۳/۹
	T ₂	۱۶۳/۵۲	۷۸/۰۳	۸۸/۲	۵۲/۶	۳۲/۵۳	۲۹/۳۷	۲۴۸/۲۵	۱/۸
	T ₃	۱۴۹/۲۳	۵۴/۷۳	۱۲۱/۲	۶۱/۵۵	۵۵/۱۵	۳۱/۷۲	۳۲۵/۵۸	۲/۶
کادمیوم (Cd)	T ₁	۵۸/۳۳	۲۶/۶	۴۰/۳۸	۱۸/۴۱	۱۲۲/۵۸	۵۴/۹۹	۲۲۱/۲۹	۴/۵۲
	T ₂	۸۳/۰۳	۴۵/۷۶	۳۹/۶۲	۲۱/۸۳	۵۸/۸۱	۳۲/۴۱	۱۸۱/۴۶	۲/۳۲
	T ₃	۶۸/۷۱	۲۹/۴۷	۴۳/۲۲	۱۸/۵۴	۱۲۱/۲۰	۵۱/۹۹	۲۳۳/۱۳	۶/۷۸
سرب (Pb)	T ₁	۳۲/۹۶	۴۲/۸۴	۱۸/۷۵	۲۴/۳۷	۲۵/۲۳	۳۲/۷۹	۷۶/۹۴	۲/۰۵
	T ₂	۳۵/۶۵	۴۵/۹۹	۱۹/۹۷	۲۸	۱۵/۶۹	۲۲/۰۰	۷۱/۳۱	۱/۰۳
	T ₃	۴۲/۲۱	۴۹/۴۶	۳۲/۲۵	۳۶/۱۵	۳۲/۵۱	۳۰/۳۹	۱۰۶/۹۷	۴/۳۳
عنصر Cu	T ₁	۵۵۴/۶۲	۵۷/۲۰	۲۵۳/۴۰	۳۶/۱۰	۱۶۱/۹۰	۳۶/۷۰	۹۶۹/۵۶	۵/۰۷
	T ₂	۶۳۸/۶	۷۲/۶۴	۱۲۲/۵۴	۲۳/۹۴	۱۱۷/۹۸	۲۳/۴۲	۸۷۹/۱۲	۳/۴۵
	T ₃	۶۷۹/۲	۷۴/۱۹	۲۲۳/۴	۳۱/۷۷	۱۲۳/۶۱	۲۲/۰۵	۱۰۲۶/۲۱	۷/۹۶
عنصر B	T ₁	۷۱/۳۶	۳۶/۱۲	۵۹/۲۳	۴۳/۳۸	۳۱۲/۲۲	۷۰/۵۱	۴۴۲/۸۱	۸/۳۹
	T ₂	۳۶/۱۴	۲۶/۰۴	۳۰/۳۵	۲۴/۲۷	۲۶۰/۸۰	۶۹/۶۸	۳۲۷/۲۹	۷/۴۷
	T ₃	۸۲/۵	۵۵/۸۲	۶۳/۲۴	۴۷/۵۹	۴۵۱/۲۳	۷۵/۵۹	۵۹۶/۹۷	۹/۲۳

با بررسی عنصر کروم (Cr) در گیاه آفتابگردان مشاهده شد که در تکرار اول (T₁) بیشترین تجمع در ساقه با درصد ۲۷/۷۲ بوده است. در تکرار دوم (T₂)، بیشترین تجمع در ریشه با درصد ۰۳/۷۸ مشاهده شد. با بررسی عنصر کادمیوم (Cd) در گیاه آفتابگردان، مشاهده شد که در اولین تکرار آزمایش (T₁) بیشترین تجمع در بخش برگ و گل با میزان ۹۹٪/۵۴ رخ داده است. در دومین تکرار (T₂) بیشترین تجمع در ریشه ها با ۷۶٪/۴۵ و در سومین تکرار (T₃) مجدداً در برگ و گل با ۹۹٪/۵۱ مشاهده شده است. با بررسی عنصر سرب (Pb) در گیاه آفتابگردان مشاهده شد که در تمامی تکرارها، بیشترین تجمع در بخش ریشه رخ داده است. نتایج تحلیل نشان داد که عنصر Cu در بخش ریشه گیاه آفتابگردان به ترتیب در تکرار اول (T₁) ۲۰٪/۵۷، در تکرار دوم (T₂) ۶۴٪/۷۲ و در تکرار سوم (T₃) ۱۹٪/۷۴ بوده است. با بررسی عنصر B در گیاه آفتابگردان مشخص شد که تجمع آن در بخش برگ ها و گل ها صورت گرفته است. در تکرار اول ۷۰٪/۵۱، در تکرار دوم ۶۹٪/۶۸ و در تکرار سوم ۷۵٪/۵۹ مشاهده شد (جدول ۲).

جدول ۳. میزان جذب عناصر توسط گیاه کانولا (روش جریان الکتریکی)

عنصر	تکرار	ریشه		ساقه		برگ + گل		کل گیاه	بخش هوایی خاک
		(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	mg/kg
کروم (Cr)	T1	۲۵/۴۶	۸۴/۷	۷/۸۴	۲۶/۰۸	۶/۸۴	۱۸/۴۵	۳۶/۶۸	۲/۳۵
	T2	۲۰/۷۶	۶۷/۸۹	۴/۳۹	۱۴/۳۶	۵/۴۲۷	۱۷/۷۵	۲۰/۵۸	۱/۵۸
	T3	۱۷/۸۵	۶۵/۵۲	۵/۱۶	۱۸/۹۴	۴/۲۳۴	۱۵/۵۴	۲۴/۲۵	۰/۸۷
کادمیم (Cd)	T1	۸۸/۲۳	۲۵/۵۳	۹۸/۴۴	۲۸/۴۸	۱۵۸/۹۵	۴۵/۹۹	۳۴۵/۶۹	۹/۹۶
	T2	۱۴۱/۶۴	۳۶/۹۰	۱۷۶/۱۳	۳۵/۷۸	۱۳۴/۵۳	۲۷/۳۳	۴۵۲/۳	۳/۷۱
	T3	۹۱/۶۷	۵۲/۳۶	۴۱/۴۲	۲۳/۸۳	۴۱/۶۹	۲۳/۸۱	۱۷۵/۰۵	۸/۹۸
سرب (Pb)	T1	۵۸/۸۲	۴۷/۹۲	۲۷/۳۲	۲۳/۰۵	۲۲/۹۴	۲۱/۰۳	۱۰۹/۰۳	۱/۲۳
	T2	۵۳/۳۳	۴۵/۶۶	۳۴/۲۰	۲۴/۶۶	۵۷/۵۶	۳۷/۶۹	۱۴۵/۸۹	۲/۵۴
	T3	۵۸/۵۷	۲۵/۵۱	۳۲/۳۶	۲۴/۵۱	۴۱/۲۳	۲۳/۰۱	۱۱۲/۱۶	۳/۰۶
مس (Cu)	T1	۳۴۰/۶۸	۶۴/۹۷	۱۷۵/۷	۲۷/۲۹	۸۲/۲	۲۵/۷۴	۵۹۸/۵	۳/۲۸
	T2	۲۶۷/۶۹	۵۷/۰۲	۱۵۸/۳۶	۲۴/۶۱	۷۳/۳۵	۱۸/۳۷	۴۹۹/۲۵	۲/۶۳
	T3	۲۶۱/۷۱	۴۷/۲۳	۱۹۷/۲۸	۲۸/۴۱	۸۳/۴۳	۲۴/۳۶	۵۴۲/۲۹	۱/۵۴
بور (B)	T1	۵۱/۶۹	۲۱/۲۸	۵۳/۲۵	۲۲/۶۲	۷۸/۳	۴۵/۱۰	۱۸۳/۳۱	۶/۳۵
	T2	۵۸/۸۲	۲۳/۱۶	۳۵/۲۵	۱۹/۶۸	۸۰/۱	۴۸/۱۶	۱۷۴/۱	۷/۶۵
	T3	۴۳/۱۶	۱۷/۷۹	۵۹/۶۲	۲۳/۷۶	۶۹/۴	۴۲/۴۵	۱۷۲/۱	۳/۷۲

در بررسی عنصر Cr گیاه کانولا، مشاهده شد که در تکرار اول (T1) بیشترین تجمع در ریشه با ۸۴٪/۷ بوده است. در تکرار دوم (T2) و سوم (T3) نیز این تجمع به ترتیب ۶۷٪/۸۹ و ۶۵٪/۵۲ در ریشه ادامه یافته است. با بررسی عنصر کادمیم (Cd) در گیاه کانولا مشاهده شد که در تکرار اول (T1) بیشترین تجمع در قسمت برگ و گل با نسبت ۹۹٪/۴۵ رخ داده است. در تکرار دوم (T2) تجمع بیشتر در ریشه (۹۰٪/۳۶) و ساقه (۷۸٪/۳۵) مشاهده شد. در تکرار سوم (T3) بیشترین تجمع در ریشه با نسبت ۳۶٪/۵۲ ثبت گردید. در بررسی عنصر Pb در گیاه کانولا مشاهده شد که در تکرار اول (T1) بیشترین تجمع در بخش ریشه با نرخ ۴۷٪/۹۲ بوده است. در تکرارهای دوم (T2) و سوم (T3) تجمع بیشتر در بخش ساقه با نرخ‌های ۴۵٪/۶۶ و ۲۵٪/۵۱ مشاهده شده است. با بررسی عنصر مس (Cu) در گیاه کانولا مشخص شد که در هر سه تکرار، تجمع آن در بخش ریشه بوده است. در تکرار اول (T1) میزان تجمع در ریشه ۶۴٪/۹۷، در تکرار دوم (T2) ۵۷٪/۰۲ و در تکرار سوم (T3) ۴۷٪/۲۳ بوده است. در بررسی عنصر بور (B) در گیاه کانولا مشخص شد که در هر سه تکرار، تجمع در بخش برگ و گل رخ داده است. در تکرار اول (T1) میزان تجمع در برگ و گل ۱۰٪/۴۵، در تکرار دوم (T2) ۱۶٪/۴۸ و در تکرار سوم (T3) ۴۵٪/۴۲ بوده است (جدول ۳).

جدول ۴. جذب عناصر توسط گیاه ماش (با جریان الکتریکی)

عنصر	تکرار	ریشه		ساقه		برگ + گل		کل گیاه	بخش هوایی خاک
		(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)
کروم (Cr)	T1	۲۲/۳۳	۱۲/۱۳	۵۷/۳	۲۸/۱۱	۱۵۵/۹۶	۴۲/۷۵	۲۳۵/۵۳	۴/۸۳
	T2	۳۴/۵۵	۲۵/۵۶	۴۷/۹	۲۶/۵۴	۹۵/۸۱	۲۱/۸۹	۱۷۸/۲۶	۱/۲۵
	T3	۱۸/۱۹	۱۸/۹۰	۸۳/۳	۳۰/۶۶	۱۰۳/۷۱	۳۷/۴۴	۲۰۵/۲	۳/۵۴
کادمیوم (Cd)	T1	۶۴/۵	۳۹/۷۳	۲۱/۵۴	۷/۱۱	۸۶/۳	۵۳/۱۶	۱۷۲/۳۴	۴/۵
	T2	۵۵/۳	۳۸/۳۶	۱۹/۴۳	۵/۶۴	۷۹/۴۳	۵۵/۱۰	۱۵۷/۱۶	۲/۳
	T3	۴۳/۲۲	۴۷/۱۶	۳۸/۹۸	۹/۸۰	۳۷/۴۴	۴۳/۰۶	۱۲۰/۶۴	۶/۵
سرب (Pb)	T1	۴۷/۳۳	۲۳/۰۹	۷۱/۴۲	۳۶/۲۱	۷۸/۵	۳۹/۱۰	۱۹۷/۲۵	۱/۶۴
	T2	۴۹/۳۳	۲۳/۹۴	۷۹/۲	۳۶/۹۹	۸۵/۶	۳۹/۹۸	۲۱۴/۱۳	۰/۸۵
	T3	۵۹/۱۳	۲۴/۶۴	۸۵/۵	۳۷/۶۴	۹۵/۳	۴۱/۷۲	۲۳۹/۳۹	۳/۶۶
مس (Cu)	T1	۲۴۳/۰	۴۹/۴۳	۱۲۸/۹۸	۲۹/۲۳	۱۱۹/۶۶	۳۴/۳۴	۴۹۱/۶۴	۵/۰۷
	T2	۱۹۵/۳	۴۷/۵۶	۱۱۹/۵۶	۲۶/۱۱	۹۵/۸	۲۳/۳۳	۴۱۰/۶۶	۳/۴۵
	T3	۱۴۵/۶	۳۴/۴۹	۱۲۳/۳۴	۲۹/۰۲	۱۵۳/۲	۳۶/۲۹	۴۲۲/۱۴	۸/۶۵
بور (B)	T1	۷۳/۰	۲۵/۵۳	۷۶/۶۸	۲۶/۸۲	۱۳۶/۲۵	۴۷/۶۵	۲۸۵/۹۳	۲/۵
	T2	۶۵/۳	۲۴/۷۶	۵۳/۲۲	۲۰/۱۸	۱۴۵/۲۵	۵۲/۰۷	۲۶۳/۷۷	۴/۲
	T3	۸۳/۵	۲۸/۴۳	۸۵/۶۳	۲۹/۰۲	۱۸۷/۳۴	۵۵/۵۵	۳۵۶/۵۲	۲/۳

در بررسی عنصر کروم گیاه ماش مشاهده شد که تجمع در هر سه تکرار در بخش برگ+گل بوده است. در تکرار اول (T1) مقدار تجمع در برگ+گل ۴۲/۷۵٪، در تکرار دوم (T2) ۳۱/۸۹٪ و در تکرار سوم (T3) ۳۷/۴۴٪ بوده است. جذب عنصر زمان بررسی عنصر کروم (Cr) در گیاه ماش، مشاهده شد که در تکرار اول (T1) و دوم (T2) تجمع به ترتیب با مقادیر ۵۳٪/۱۶ و ۵۵٪/۱۰ در بخش برگ+گل رخ داده است. در تکرار سوم (T3) نیز مشاهده شد که تجمع با مقدار ۴۷٪/۱۶ در بخش ریشه اتفاق افتاده است. زمان بررسی عنصر سرب (Pb) در گیاه ماش، مشاهده شد که در تکرارهای اول (T1)، دوم (T2) و سوم (T3) تجمع در بخش ساقه و برگ+گل نسبتاً بیشتر بوده است. بر این اساس، در تکرار اول، تجمع در بخش ساقه ۳۶٪/۲۱ و در بخش برگ+گل ۳۹٪/۸۰ بوده است. در تکرار دوم، بخش ساقه ۳۶٪/۹۹ و برگ+گل ۳۹٪/۹۸ و در تکرار سوم، بخش ساقه ۳۷٪/۶۴ و برگ+گل ۴۱٪/۷۲ تجمع مشاهده شد. با بررسی عنصر مس (Cu) در گیاه ماش مشاهده شد که در تکرار اول (T1) در بخش ریشه ۴۹/۴۳٪ تجمع داشته است. در تکرار دوم (T2) تجمع در بخش ریشه با نسبت ۴۷/۵۶٪ بوده و در تکرار سوم (T3) تجمع در بخش ریشه ۳۴/۴۹٪ و برگ+گل ۳۶/۲۹٪ مشاهده شد. هنگام بررسی عنصر بور در گیاه ماش مشاهده شد که در تکرار اول (T1) تجمع در قسمت برگ+گل ۴۷/۶۵٪ بوده است. در تکرار دوم (T2) تجمع ۵۲/۰۷٪ و در تکرار سوم (T3) تجمع ۵۵/۵۵٪ در قسمت برگ+گل مشاهده شد (جدول ۴).

• عملکرد جذب عناصر توسط گیاهان به روش فیتورمدیاسیون

عناصر افزوده شده به خاک موجود در گلدانها بر ویژگیهای جوانه زنی بذرها تأثیری نداشته اند. با این حال، پس از جوانه زنی، کاهش سرعت در مرحله رشد و ژنتاتیو گیاهان مشاهده شده است. در این چارچوب، تحلیلها با استفاده از روش فیتورمدیاسیون بر روی گیاهان آفتابگردان، کانولا و ماش انجام شده است. همچنین تحلیلها با گیاهان شاهد پشتیبانی شده اند.

عنصر	تکرار	ریشه		ساقه		برگ + گل		کل گیاه	بخش هوایی خاک
		(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)
کروم (Cr)	T1	۱۲۳/۶۹	۶۹/۷۴	۹۷/۳	۵۳/۲۱	۴۶/۲۵	۲۸/۰۵	۲۶۷/۵۱	۲/۱۶
	T2	۹۸/۵۱	۵۷/۹۶	۸۳/۸	۴۷/۵۴	۲۵/۲	۱۵/۵۰	۲۰۷/۸	۱/۲۶
	T3	۱۲۸/۳	۶۹/۱۵	۹۸/۹	۵۴/۰۷	۳۹/۵	۲۷/۷۸	۲۶۶/۶	۳/۲۴
کادمیوم (Cd)	T1	۶۳/۷۵	۳۲/۹۶	۳۳/۹۱	۱۷/۵۳	۹۵/۷۳	۴۰/۵۰	۱۹۳/۳۹	۱/۹۹
	T2	۷۲/۶	۳۸/۰۷	۲۶/۸۹	۱۴/۳۳	۱۲۵/۵	۵۴/۸۰	۲۲۴/۹۹	۲/۲۸
	T3	۶۰/۶۳	۲۸/۸۲	۴۹/۵۸	۱۹/۱۸	۱۲۹/۲۳	۵۵/۰۰	۲۳۹/۳۶	۱/۰۲
سرب (Pb)	T1	۳۳/۰۸	۱۷/۱۴	۶/۸۴	۱۰/۷۸	۲۳/۵۲	۱۷/۰۷	۶۳/۴۴	۱/۷۹
	T2	۲۸/۴۹	۱۵/۱۳	۱۲/۸۲	۱۸/۹۶	۲۶/۳۲	۱۸/۹۲	۹۹/۳۱	۲/۲۸
	T3	۳۱/۰۱	۱۶/۰۲	۷/۴۲	۷/۱۹	۲۴/۸۵	۱۷/۸۰	۶۳/۲۷	۱/۱۲
مس (Cu)	T1	۳۴۲/۵۶	۵۳/۹۹	۶۵/۵۹	۱۰/۳۴	۲۲۶/۳۵	۳۵/۶۷	۶۳۴/۵	۲/۷۳
	T2	۳۰۸/۷	۴۶/۶۲	۱۰۰/۵۸	۱۵/۱۹	۲۵۲/۸۵	۳۶/۱۹	۶۶۲/۱۳	۲/۸۳
	T3	۲۵۶/۶۴	۴۶/۱۷	۱۳۵/۹۷	۱۷/۶۰	۲۷۹/۷۷	۳۸/۲۲	۷۷۲/۳۸	۲/۶۵
بور (B)	T1	۳۱/۱۳	۲۵/۰۲	۲۷/۵۵	۲۲/۹۸	۲۸۶/۴۷	۷۶/۰۰	۳۴۵/۱۵	۶/۶۳
	T2	۷۰/۸۶	۴۷/۴۸	۲۰/۵۹	۲۱/۲۵	۱۶۱/۰۴	۶۹/۲۷	۲۵۲/۴۸	۵/۳۲
	T3	۵۶/۷۵	۴۱/۴۵	۵۹/۶۵	۴۳/۰۳	۳۷۹/۳۶	۷۴/۵۲	۴۹۵/۷۶	۷/۴۶

جدول ۶. جذب عناصر توسط گیاه کانولا (کلزا)

عنصر	تکرار	ریشه		ساقه		برگ + گل		کل گیاه	بخش هوایی خاک
		(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)
کروم (Cr)	T1	۹/۲۱	۲۸/۱۸	۲/۸۱	۱۷/۷۶	۳/۸۰	۱۸/۰۵	۱۵/۸۳	۳/۲۵
	T2	۸/۴۱	۲۲/۵۳	۲/۷۵	۱۷/۱۸	۴/۸۵	۱۹/۹۷	۱۶/۱۰	۲/۵۶
	T3	۸/۹۱	۲۱/۰۹	۴/۶۲	۱۹/۴۹	۳/۹۱	۱۸/۴۲	۱۷/۴۴	۱/۲۴
کادمیوم (Cd)	T1	۲۹/۶	۱۹/۲۱	۲۲/۳۵	۱۹/۳۸	۸۹/۵۰	۲۵/۴۰	۱۴۱/۴۵	۳/۲۵
	T2	۲۸/۵	۱۸/۷۰	۴۲/۳۱	۲۵/۶۰	۷۵/۸۵	۲۴/۷۰	۱۴۶/۶۶	۲/۱۴
	T3	۱۸/۹	۱۶/۸۵	۳۴/۴۱	۲۱/۵۳	۳۱/۲۲	۲۰/۶۲	۸۴/۵۳	۴/۲۳
سرب (Pb)	T1	۳۱/۷۶	۲۶/۲۸	۱۷/۲۴	۱۸/۴۹	۱۶/۴۱	۱۷/۲۳	۶۵/۴۱	۲/۶۵
	T2	۲۸/۰۵	۱۷/۳۴	۲۶/۲۶	۲۱/۰۸	۲۷/۳۳	۱۸/۵۹	۸۱/۶۴	۳/۲۵
	T3	۲۸/۰۹	۱۸/۴۸	۲۵/۳۳	۲۰/۲۰	۲۷/۹۲	۱۹/۳۱	۸۱/۳۴	۳/۲۶
مس (Cu)	T1	۲۰/۱/۸	۵۳/۲۶	۱۱۶/۸	۳۰/۸۳	۶۰/۲۷	۲۵/۹۱	۳۷۸/۸۷	۲/۳۱
	T2	۱۵۹/۸	۵۰/۲۸	۹۵/۷۱	۲۸/۱۲	۶۲/۳۰	۱۹/۶۰	۳۱۷/۸۱	۳/۲۵
	T3	۲۲۱/۸	۵۴/۷۶	۱۱۲/۸۹	۲۹/۸۷	۷۰/۳۳	۲۷/۳۶	۴۰۵/۰۲	۲/۱۲
بور (B)	T1	۴۰/۸۷	۲۹/۳۱	۴۰/۴۸	۲۹/۰۳	۵۸/۰۹	۴۱/۶۶	۱۳۹/۴۴	۱/۵۶
	T2	۳۵/۸۹	۲۳/۹۱	۵۲/۳۳	۳۴/۸۶	۶۱/۹۱	۴۱/۲۴	۱۵۰/۱۳	۲/۳۵
	T3	۲۵/۱۹	۲۳/۳۰	۳۳/۴۱	۳۰/۹۰	۴۹/۵۱	۴۵/۸۰	۱۰۸/۱۱	۲/۲۸

با بررسی عنصر کروم (Cr) در گیاه کانولا مشاهده شد که در تکرار اول (T1) بیشترین تجمع در ریشه با مقدار ۱۸٪/۲۸ بوده است. در تکرار دوم (T2) و سوم (T3) نیز تجمع همچنان در ریشه با مقادیر ۵۳٪/۲۲ و ۲۱٪/۰۹ ثبت شده است. زمان بررسی عنصر Cd در گیاه کانولا مشاهده شد که در تکرار اول (T1) تجمع در بخش ریشه با نسبت ۱۹٪/۲۱ بوده است. در تکرار دوم (T2) تجمع در بخش ساقه با نسبت ۲۵٪/۶۰ و در تکرار اول (T1) نیز تجمع در بخش برگ با نسبت ۲۵٪/۴۰ رخ داده است. عنصر سرب (Pb) در گیاه کانولا بررسی شد و مشاهده گردید که در اولین تکرار (T1) در بخش ریشه با نرخ ۲۸٪/۲۶ تجمع یافته است. در دومین (T2) و سومین (T3) تکرار، تجمع به ترتیب ۲۱٪/۰۸ و ۲۰٪/۲۰ در بخش ساقه مشاهده شده است. عنصر مس (Cu) در گیاه کانولا بررسی شد و مشخص گردید که در هر سه تکرار، تجمع آن در بخش ریشه بوده است. در تکرار اول (T1) مقدار تجمع در ریشه ۵۳٪/۲۶، در تکرار دوم (T2) ۲۸٪/۵۰ و در تکرار سوم (T3) ۵۴٪/۷۶ بوده است. عنصر بور (B) در گیاه کانولا در هر سه تکرار در بخش برگ+گل تجمع یافته است. در تکرار اول (T1) این تجمع ۴۱٪/۶۶، در تکرار دوم (T2) ۴۱٪/۲۴ و در تکرار سوم (T3) ۴۵٪/۸۰ مشاهده شده است (جدول ۶).

جدول ۷. جذب عناصر توسط گیاه ماش

عنصر	تکرار	ریشه		ساقه		برگ + گل		کل گیاه	بخش هوایی خاک
		(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(%)	(mg/kg)	(mg/kg)
کروم (Cr)	T1	۱۴/۸۹	۶/۷۷	۳۱/۲۹	۲۳/۲۶	۱۰۹/۳	۳۸/۹۷	۱۵۶/۰۹	۳/۵۲
	T2	۱۲/۲۱	۵/۸۹	۲۱/۵۱	۲۱/۹۰	۹۵/۳۰	۳۲/۲۱	۱۲۹/۰۲	۱/۲۵
	T3	۱۷/۸۹	۸/۶۹	۳۱/۵۱	۲۴/۲۵	۹۲/۳۵	۲۹/۰۵	۱۴۴/۷۰	۲/۵۱
کادمیوم (Cd)	T1	۶۱/۱۱	۳۹/۴۰	۲۰/۷۲	۲۴/۸۰	۴۶/۶۶	۳۴/۸۰	۱۲۸/۴۲	۰/۲۰
	T2	۴۱/۲۱	۳۱/۹۵	۱۸/۲۲	۱۹/۱۱	۵۲/۲۲	۳۸/۹۴	۱۱۱/۶۲	۱/۲۵
	T3	۳۲/۸۰	۲۵/۳۲	۳۲/۲۵	۲۵/۹۸	۴۸/۵۰	۳۰/۶۸	۱۱۳/۵۵	۰/۹۶
سرب (Pb)	T1	۴۹/۴۶	۳۴/۱۱	۳۳/۵۴	۲۸/۵۵	۳۴/۴۶	۲۹/۳۹	۱۱۷/۴۶	۰/۶۴
	T2	۳۹/۴۱	۳۱/۶۱	۳۴/۲۲	۲۹/۴۰	۲۵/۸۶	۲۵/۹۹	۹۹/۴۹	۲/۲۵
	T3	۴۵/۲۳	۳۲/۱۳	۳۵/۲۳	۳۱/۲۶	۳۲/۲۵	۲۸/۶۱	۱۱۲/۷۱	۱/۴۵
مس (Cu)	T1	۱۰۴/۷	۳۴/۶۸	۱۰۲/۶	۳۳/۰۵	۹۸/۵۶	۲۸/۲۶	۶۰۵/۸۹	۷/۴۶
	T2	۱۲۵/۴	۳۵/۶۰	۹۶/۷	۲۷/۲۶	۶۵/۲۲	۲۳/۱۴	۲۸۷/۳۲	۳/۲۵
	T3	۹۸/۲۴	۲۸/۰۴	۹۸/۲	۲۷/۹۰	۱۲۵/۰۶	۳۵/۵۶	۳۲۱/۵۰	۶/۲۵
بور (B)	T1	۶۸/۵۹	۲۳/۰۰	۵۷/۹۴	۲۱/۶۷	۹۸/۳	۳۵/۳۲	۲۵۱/۹۲	۱/۹۳
	T2	۴۵/۲۲	۲۲/۵۸	۳۷/۲۳	۲۰/۷۸	۱۰۵/۸	۳۶/۶۴	۱۸۸/۲۵	۳/۲۵
	T3	۶۸/۵۶	۲۴/۰۳	۶۵/۲۵	۲۳/۱۷	۱۲۲/۸	۳۸/۸۰	۲۵۶/۶۱	۲/۵۴

با بررسی عنصر کروم در گیاه ماش مشاهده شد که در تکرار اول (T1) میزان تجمع در بخش برگها ۹۷٪/۳۸ بوده است. در تکرار دوم (T2) میزان تجمع ۲۱٪/۳۲ و در تکرار سوم (T3) نیز ۰۵٪/۲۹ در بخش برگ و گل مشاهده شد. عنصر Cd در گیاه ماش نشان داده است که در هر سه تکرار، تجمع در ریشه و برگ مشاهده شده است. بر این اساس، در تکرار اول (T1) مقدار تجمع در ریشه ۳۹/۴۰٪ و در تکرار دوم (T2) ۳۱/۹۵٪ بوده است و در برگها، در تکرار اول (T1) ۳۴/۸۰٪ و در تکرار دوم (T2) ۳۸/۹۴٪ تجمع مشاهده شده است. زمانی که عنصر Pb در گیاه ماش بررسی شد، مشاهده گردید که در تکرارهای اول (T1)، دوم (T2) و سوم (T3) بیشترین تجمع به طور نسبی در ریشه بوده است. بر این اساس، در تکرار اول (T1) میزان تجمع در ریشه ۳۴٪/۱۱، در تکرار دوم (T2) ۳۱٪/۶۱ و در تکرار سوم (T3) ۳۲٪/۱۳ بوده است. زمانی که عنصر مس (Cu) در گیاه ماش مورد بررسی قرار گرفت، مشاهده شد که در تکرار اول (T1) با نرخ ۳۴٪/۶۸ در قسمت ریشه تجمع داشته است. در تکرار دوم (T2) تجمع ۳۵٪/۶۰ و در تکرار سوم (T3) ۳۵٪/۵۰ در قسمت برگ و گل مشاهده شده است. در تکرار دوم (T2) تجمع ۳۵٪/۶۰ و در تکرار سوم (T3) ۳۵٪/۵۰ در قسمت برگ و گل مشاهده شده است. در تکرار اول (T1) میزان تجمع ۳۵٪/۳۲، در تکرار دوم (T2) ۳۶٪/۶۴ و در تکرار سوم (T3) ۳۸٪/۸۰ در بخش برگ+گل مشاهده شد (جدول ۷). مقادیر تجمع عناصر سرب، کادمیوم، کروم، مس و بور در ریشه، ساقه و قسمت برگ+گل گیاهان شاهد بررسی شده است. همان طور که انتظار می رفت، مقادیر در گیاهان شاهد پایین تر مشاهده شده است.

• روش الکتروکینتیک

تحلیل ICP قبل از انجام عملیات روی خاک انجام شد و مقادیر Cr برابر ۰/۲۱۶، Cd برابر ۰، Pb برابر ۰/۰۴، Cu برابر ۰/۰۷ و B برابر ۱/۸۵۵ میلی گرم بر لیتر اندازه گیری شد. همچنین پس از آلوده کردن خاک، نخستین تحلیل ICP انجام شد که مقادیر Cr برابر ۳۳/۵۹، Cd برابر ۰/۳۵، Pb برابر ۰/۶۳، Cu برابر ۰/۱۸ و B برابر ۴/۵۸ میلی گرم بر لیتر تعیین گردید. نمونه های گرفته شده از سه بخش گلدان بین ۷ تا ۹ گرم به صورت گل آلود وزن کشی شده و برای خشک شدن در دمای ۷۲ درجه سانتی گراد قرار داده شدند.

جدول ۸. نتایج تحلیل ICP نمونه گل‌آلود گلدان + قسمت آند

حذف فلزات سنگین (%)					
B	Cu	Pb	Cr	Cd	تاریخ
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	
۱۸/۹۴	۷/۵۹	۳/۰۲۵	۳۲/۲۷	۰/۵۱۸	۱۴ تیر
۱۶/۵۳۸	۵/۰۹	۲/۰۶۶	۲۵/۲۴	۰/۳۴۹	۲۴ تیر
۱۲/۵۷	۳/۳۴۳	۱/۹۶۵	۱۸/۷	۰/۰۴	۰۳ مرداد
۹/۹۱۸	۱/۷۶۵	۰/۱۵۳	۹/۰۶۳	۰/۰۴	۱۴ مرداد
۵/۴۳	۱/۰۴۵	۰/۱۰۱	۲/۹۸۱	۰/۰۰۵۶	۲۴ مرداد

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های گرفته‌شده از بخش آند توسط ICP در طول دوره آزمایش، مشخص شد که مقادیر اندازه‌گیری‌شده کاهش یافته‌اند. در راستای آزمایشی که از تاریخ ۴ ژوئیه آغاز شد، مقدار کروم (Cr) از ۳۲/۲۷ به ۲/۶۹ در تاریخ ۱۴ اوت کاهش یافته است. همچنین مقدار کادمیم (Cd) از ۰/۵۱۸ به ۰/۰۰۵۶، سرب (Pb) از ۳/۰۲۵ به ۰/۱۰۱، مس (Cu) از ۷/۵۹ به ۱/۴۹۸ و بور (B) از ۱۸/۹۴ به ۵/۴۳ کاهش یافته است (جدول ۸).

جدول ۹. نتایج تحلیل ICP بخش کاتد - گلدان گلی

حذف فلزات سنگین (%)					
B	Cu	Pb	Cd	Cr	تاریخ
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	
۱۸/۹۴	۷/۵۹	۳/۰۲۵	۰/۵۱۸	۳۲/۲۷	۱۴ تیر
۱۶/۵۳۸	۵/۰۹	۲/۰۶۶	۰/۳۴۹	۲۵/۲۴	۲۴ تیر
۱۲/۵۷	۳/۳۴۳	۱/۹۶۵	۰/۰۴	۱۸/۷	۰۳ مرداد
۹/۹۱۸	۱/۷۶۵	۰/۱۵۳	۰/۰۴	۹/۰۶۳	۱۴ مرداد
۵/۴۳	۱/۰۴۵	۰/۱۰۱	۰/۰۰۵۶	۲/۹۸۱	۲۴ مرداد

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های گرفته‌شده از بخش کاتد توسط ICP در طول دوره آزمایش، مشخص شد که مقادیر اندازه‌گیری‌شده کاهش یافته‌اند. در راستای آزمایشی که از تاریخ ۴ ژوئیه آغاز شد، مقدار کروم (Cr) از ۳۲/۲۷ به ۱۳/۴۹۳ در تاریخ ۱۴ اوت کاهش یافته است. همچنین مقدار کادمیم (Cd) از ۰/۵۱۸ به ۰/۰۰۵۶، سرب (Pb) از ۳/۰۲۵ به ۰/۱۰۱، مس (Cu) از ۷/۵۹ به ۱/۴۹۸ و بور (B) از ۱۸/۹۴ به ۵/۴۳ کاهش یافته است (جدول ۹).

جدول ۱۰. نتایج تحلیل ICP بخش میانی گلدان گلی

حذف فلزات سنگین (%)					
B	Cu	Pb	Cd	Cr	تاریخ
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	
۸۱/۳۵	۹/۳۴۸	۳/۱۹۱	۰/۵۸۵	۲۳/۸۱	۱۴ تیر
۵۷/۳۴	۴/۰۲۶	۱/۰۸۶	۰/۱۵۵	۱۴/۵۴	۲۴ تیر
۳۲/۱۶۷	۲/۶۴۶	۰/۴۶۳	۰/۰۹	۹/۵۳	۰۳ مرداد
۱۷/۸۹۸	۲/۲۰۵	۰/۳۴۴	۰/۰۹۶	۴/۱۸۷	۱۴ مرداد
۱۰/۵۷۴	۰/۵۴۳	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۲/۲۸۶	۲۴ مرداد

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های گرفته‌شده از بخش میانی توسط ICP در طول دوره آزمایش، مشخص شد که مقادیر اندازه‌گیری‌شده کاهش یافته‌اند. در راستای آزمایشی که از تاریخ ۴ ژوئیه آغاز شد، مقدار کروم (Cr) از ۲۳/۸۱ به ۲/۲۸۶ در تاریخ ۱۴ اوت کاهش یافته است. همچنین مقدار کادمیم (Cd) از ۰/۵۸۵ به ۰/۰۲۹، سرب (Pb) از ۳/۱۹۱ به ۰/۰۲۲، مس (Cu) از ۹/۳۴۸ به ۰/۵۴۳ و بور (B) از ۸۱/۳۵ به ۱۰/۵۷۴ کاهش یافته است (جدول ۱۰).

مقادیر pH و EC لایه‌های سه‌گانه‌ی گل، یعنی بخش‌های کاتد، آند و میانی، در بازه‌های زمانی ۱۰ روزه اندازه‌گیری شدند. در طول دوره‌ی آزمایش مشخص گردید که مقادیر pH در نواحی کاتد و آند روند کاهشی داشته‌اند. نتایج تحلیل آب جمع‌شده در سمت کاتد از گل‌گلدان پس از اعمال جریان برق ۳۰ ولت به‌صورت پیوسته به مدت ۵۰ روز آورده شده است. بر اساس این داده‌ها مشخص شد که غلظت فلزات سنگین در بازه‌های ۱۰ روزه افزایش داشته است. همچنین مشاهده گردید که سرب نسبت به سایر فلزات سنگین، در سمت کاتد تجمع بیشتری داشته است. نتایج تحلیل آب جمع‌شده در سمت آند از گل‌گلدان پس از اعمال جریان برق ۳۰ ولت به‌صورت پیوسته به مدت ۵۰ روز ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها مشخص شد که غلظت فلزات سنگین در بازه‌های ۱۰ روزه افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید که کروم و بور نسبت به سایر فلزات سنگین، در سمت آند تجمع بیشتری داشته‌اند. در این مطالعه، مقادیر pH و EC آب جمع‌شده در سمت کاتد کناره‌های گلدان اندازه‌گیری شد. مشخص گردید که مقدار pH در سمت کاتد روند کاهشی داشته است. همچنین مقادیر pH و EC آب جمع‌شده در سمت آند کناره‌های گلدان اندازه‌گیری شد. مشخص گردید که مقدار pH در سمت آند روند افزایشی داشته است. در تکرار دوم مدت زمان ۵۰ روزه برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد. در طول دوره آزمایش، جریان برق مستقیم ۳۰ ولت به‌صورت پیوسته (۲۴ ساعت شبانه‌روز، ۷ روز هفته) اعمال شد. نمونه‌برداری‌ها هر ۱۰ روز یک‌بار انجام گردید. در فرآیند نمونه‌برداری، از سمت آند و کاتد آب جمع‌آوری شده و مقادیر pH و EC آن اندازه‌گیری و تحلیل ICP انجام شد. علاوه بر این، از سه نقطه مشخص در بخش گل‌گلدان (آند، کاتد و بخش میانی) به‌صورت حفاری نمونه‌برداری شد و مقادیر کروم (Cr)، کادمیم (Cd)، سرب (Pb)، مس (Cu) و بور (B) اندازه‌گیری گردید. نمونه‌های گرفته‌شده از سه بخش گلدان به‌صورت گل با وزن ۹ تا ۱۱ گرم توزین شده و در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. مدت زمان خشک کردن ۶ ساعت تعیین گردید و سپس با ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شدند. پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شیکر قرار گرفتند و در پایان فرآیند، سانتریفیوژ شده و مقادیر pH و EC آن‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل نهایی نمونه‌ها نیز با دستگاه ICP انجام گردید. این فرآیند و مراحل ذکرشده به مدت ۳۰ روز، در بازه‌های ۱۰ روزه تکرار شد.

جدول ۱۱. نتایج تحلیل ICP بخش آند گلدان کلی

حذف فلزات سنگین (%)						
ردیف	تاریخ	Cr	Cd	Pb	Cu	B
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
۱	۲۸ مهر	۳۳.۰۰۰	۱.۳۲۴	۳.۲۵۶	۸.۵۴۰	۱۹.۴۷۶
۲	۱۱ آبان	۲۷.۰۰۰	۱.۱۳۳	۲.۳۹۶	۶.۷۸۹	۱۷.۵۶۷
۳	۲۱ آبان	۱۹.۷۶۰	۱.۳۰۰	۱.۸۶۴	۵.۳۴۰	۱۲.۹۱۴
۴	۰۱ آذر	۸.۰۶۰	۰.۵۸۷	۱.۰۶۰	۵.۰۲۹	۸.۹۹۵
۵	۱۰ دی	۳.۰۷۹	۰.۳۷۶	۰.۶۷۴	۲.۵۳۰	۴.۴۳۰

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های گرفته‌شده از بخش آند توسط ICP در طول دوره آزمایش، مشخص شد که مقادیر اندازه‌گیری‌شده کاهش یافته‌اند. در راستای آزمایشی که از تاریخ ۱۹ اکتبر آغاز شد، مقدار کروم (Cr) از ۳۳ به ۳/۰۷۹ در تاریخ ۳۰ دسامبر کاهش یافته است. مقدار کادمیم (Cd) از ۱/۳۲۴ به ۱/۱۳۳ در تاریخ ۱ نوامبر رسیده و همان‌طور که انتظار می‌رفت تا ۳۰ دسامبر به ۰/۳۷۶ کاهش یافته است. سرب (Pb) از ۳/۲۵۶ به ۰/۶۷۴ کاهش یافته، مس (Cu) از ۸/۵۴ به ۲/۵۳ افزایش یافته و بور (B) از ۱۹/۴۷۶ به ۴/۴۳۰ کاهش یافته است (جدول ۱۱).

جدول ۱۲. نتایج تحلیل ICP بخش کاتد گلدان گلی

حذف فلزات سنگین (%)						
B	Cu	Pb	Cd	Cr	تاریخ	ردیف
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)		
۴۵/۵۰۰	۳۲/۲۶۰	۱۱/۸۱۷	۱۷/۰۴۰	۱۲/۰۵۰	۲۸ مهر	۱
۳۱/۱۲۰	۲۵/۴۰۰	۸/۹۵۰	۱۴/۰۵۰	۸/۵۳۰	۱۱ آبان	۲
۱۸/۲۳۰	۱۸/۱۵۰	۸/۱۲۶۹	۱۰/۷۶۰	۵/۶۳۰	۲۱ آبان	۳
۱۱/۹۸۰	۸/۰۹۰	۳/۱۰۹	۴/۰۵۰	۳/۴۵۰	۰۱ آذر	۴
۴/۸۰۷	۳/۱۰۱	۱/۵۴۳	۱/۴۷۱	۱/۹۶۴	۱۰ دی	۵

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های گرفته‌شده از بخش کاتد توسط ICP در طول دوره آزمایش، مشخص شد که مقادیر اندازه‌گیری شده کاهش یافته‌اند. در راستای آزمایشی که از تاریخ ۱۹ اکتبر آغاز شد، مقدار کروم (Cr) از ۱۲/۰۵ به ۱/۹۶۴ در تاریخ ۳۰ دسامبر کاهش یافته است. مقدار کادمیم (Cd) به ۱/۴۷۱ رسیده، سرب (Pb) از ۱۱/۸۱۷ به ۱/۵۴۳ کاهش یافته، مس (Cu) از ۳۲/۳۹۱ به ۳/۱۰۱ و بور (B) از ۴۵/۰۵ به ۴/۸۰۷ رسیده است (جدول ۱۲).

جدول ۱۳. نتایج تحلیل ICP بخش میانی گلدان گلی

حذف فلزات سنگین (%)						
B	Cu	Pb	Cd	Cr	تاریخ	ردیف
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)		
۸۳/۲۳۶	۷/۳۷۳	۵/۳۵	۰/۶۲۲	۲۱/۹۲	۲۸ مهر	۱
۴۹/۴۸	۳/۱۷	۴/۲۳	۰/۵۲۳	۱۳/۵۹	۱۱ آبان	۲
۲۸/۸۲	۲	۲/۰۲	۰/۱۵	۸/۱۸	۲۱ آبان	۳
۱۹/۷۲	۱/۴۹۸	۰/۲۹۵	۰/۰۹	۴/۲۵	۰۱ آذر	۴
۱۳/۴۷۱	۰/۱۳	۰/۱۶۹	۰/۰۵	۲/۵۸۱	۱۰ دی	۵

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نمونه‌های گرفته‌شده از بخش میانی توسط ICP در طول دوره آزمایش، مشخص شد که مقادیر اندازه‌گیری شده کاهش یافته‌اند. در راستای آزمایشی که از تاریخ ۱۹ اکتبر آغاز شد، مقدار کروم (Cr) از ۲۱/۹۲ به ۲/۵۸۱ در تاریخ ۳۰ دسامبر کاهش یافته است. مقدار کادمیم (Cd) از ۰/۶۲۲ به ۰/۰۵، سرب (Pb) از ۵/۳۵ به ۰/۱۶۹، مس (Cu) از ۷/۳۷۳ به ۰/۱۳ و بور (B) از ۸۳/۲۳۶ به ۱۳/۴۷۱ کاهش یافته است (جدول ۱۳). در جدول (۱۴)، نتایج تحلیل آب جمع‌شده در سمت کاتد از گِل گلدان پس از اعمال جریان برق ۳۰ ولت به‌صورت پیوسته به مدت ۵۰ روز ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها مشخص شد که غلظت فلزات سنگین در بازه‌های ۱۰ روزه افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید که سرب نسبت به سایر فلزات سنگین، در سمت کاتد تجمع بیشتری داشته است.

جدول ۱۴. نتایج تحلیل ICP آب جمع‌شده در کناره‌های گلدان گلی برای حذف فلزات سنگین

ICP آب -						
B	Cu	Pb	Cd	Cr	تاریخ	ردیف
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)		
۰/۴۳۳	۰/۱۶۷	۰/۰۷۵	۰/۰۱۱	۰/۴۵۳	۲۸ مهر	۱
۰/۶۱۵	۰/۱۳۴	۰/۰۳	۰/۰۰۴	۰/۴۵۹	۱۱ آبان	۲
۱/۱۴۹	۰/۱۳۱	۰/۰۶	۰/۰۱۴	۰/۳۳	۲۱ آبان	۳
۱/۷۳۴	۰/۱۳۹	۰/۰۶۹	۰/۰۳۸	۰/۴۳	۰۱ آذر	۴
۱/۸۲۵	۰/۴	۰/۰۹۸	۰/۴۱	۰/۵۲	۱۰ دی	۵

در جدول (۱۵)، نتایج تحلیل آب جمع شده در سمت آند از گل گلدان پس از اعمال جریان برق ۳۰ ولت به صورت پیوسته به مدت ۵۰ روز ارائه شده است. بر اساس این داده‌ها مشخص شد که غلظت فلزات سنگین در بازه‌های ۱۰ روزه افزایش یافته است. همچنین مشاهده گردید که کروم و بور نسبت به سایر فلزات سنگین، در سمت آند تجمع بیشتری داشته‌اند.

جدول ۱۵. نتایج تحلیل ICP آب جمع شده در کناره‌های گلدان گلی برای حذف فلزات سنگین

ICP آب +					
B	Cu	Pb	Cd	Cr	ردیف
(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	
۵/۴۰۴	۳/۸۱۷	۰/۷۸۶	۰/۱۱۹	۲۶/۱۳	۱ ۲۸ مهر
۶/۴۳۱	۵/۲۷۲	۰/۹۸۱	۰/۲۹۸	۲۷/۲۱	۲ ۱۱ آبان
۶/۶۲	۸/۱۴۴	۲/۰۸۹	۰/۴۵۶	۳۶/۹۲	۳ ۲۱ آبان
۷/۲۰۶	۸/۸۸	۳/۷۸۶	۰/۳۶۵	۴۳/۴۳	۴ ۰۱ آذر
۹/۱۲۱	۹/۸۸	۵/۴۲۴	۰/۹۳۵	۹۲/۳۲	۵ ۱۰ دی

۴- بحث

نتایج نشان داد در میان گیاهان مورد استفاده، بیشترین تجمع در آفتابگردان مشاهده شد. این امر عملکرد بالای جذب آفتابگردان را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که این گیاه که به طور گسترده برای الکتروفیتورمیدیشن و گیاه‌پالایی استفاده می‌شود، به عنوان یک گیاه بیش‌انباشتگر شناخته می‌شود. هنگام ارزیابی تجمع عناصر در اندام‌های مختلف گیاه، مشاهده شد که برگ‌های آفتابگردان بیشترین مقدار کروم، مس، کادمیوم و بور را تجمع می‌دهند. فقط عنصر B به طور قابل توجهی به برگ‌های همه گیاهان منتقل شد. ماش و کلزا بهترین عملکرد را برای همه عناصر با ذخیره ریشه بالا نشان دادند. به طور مشابه، کمترین غلظت ذخیره در ریشه‌ها، به ویژه در آفتابگردان مشاهده شد. این تفاوت ناشی از تفاوت در ساختار ریشه بین کلزا و آفتابگردان است. کلزا به دلیل نداشتن ساختار ریشه اصلی مانند آفتابگردان و فراوانی بیشتر ریشه‌های مویرگی متمایز است. این امر باعث شد که گیاه ماش عناصر بیشتری را به ویژه به برگ‌های خود منتقل کند. علاوه بر این، طبق نظریه بیکر که برای ارزیابی عملکرد تجمع عناصر در بخش‌های هوایی استفاده شد، هر سه گیاه با موفقیت عناصر جذب شده را به بخش‌های هوایی خود منتقل کردند؛ بنابراین، این گیاهان طبق نظریه بیکر، گیاهان انباشتگر خوبی در نظر گرفته می‌شدند. هنگامی که زمان مورد نیاز برای جذب عناصر از خاک توسط گیاهان بررسی شد، مشاهده شد که این زمان‌ها به جز بور، بسیار طولانی بودند؛ بنابراین، زمان‌های مشابه مورد نیاز برای حذف خاک توسط گیاهان در محدوده این پژوهش (به ویژه آنهایی که در گیاه B به دست آمده‌اند) یک نتیجه مورد انتظار در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، از آنجایی که زمان مورد نیاز برای کادمیوم، مس و سرب بسیار طولانی بود، مشخص می‌شود که استفاده از این گیاهان در شرایط مشابه برای حذف این عناصر اقتصادی نیست. علاوه بر این، گیاهان مورد استفاده در آزمایش‌ها در پایان یک دوره کشت ۱۰ هفته‌ای، قبل از تکمیل دوره پوشش گیاهی طبیعی خود، برداشت شدند تا شرایط آزمایش حفظ شود، تلفات گیاه به حداقل برسد و محاسبات امکان‌پذیر شود. از آنجا که بازه زمانی طبیعی برای این نوع گیاهان عموماً بین ۱۴ تا ۱۵ هفته است، دوره ۱۰ هفته‌ای کوتاه در نظر گرفته می‌شود. با این حال، محاسبات برای جذب بیشتر کل عناصر پس از این دوره‌ها در جداول مربوطه در پژوهش ارائه شده است. علاوه بر این، باید توجه داشت که زمان مورد نیاز برای گیاه‌پالایی را می‌توان با اجرای روش‌های الکتروفیتورمیدیشن و نگهداری گیاهان که گیاهان را به رشد مقادیر زیادی از قسمت‌های بالای سطح زمین تشویق می‌کنند تا مقدار عناصر انباشته شده توسط گیاهان گیاه‌پالایی شده را افزایش دهند، کاهش داد. هنگام استفاده از الکتروفیتورمیدیشن به عنوان یک فناوری تصفیه، درک این نکته مهم است که عملکرد بالای جذب آلاینده‌ها به تنهایی کافی نیست؛ سایر عوامل فیزیکی، شیمیایی، فیزیولوژیکی و هواشناسی نیز بر کارایی و کاربرد الکتروفیتورمیدیشن تأثیر می‌گذارند. استفاده از گیاهان حاوی فلزات سنگین برای تغذیه حیوانات می‌تواند برای سلامت حیوانات و انسان خطرناک و مضر باشد، بنابراین بهتر است از ابتدا چنین شیوه‌هایی را به دقت رصد کنید یا در صورت امکان از آنها اجتناب کنید؛ بنابراین، هنگام انتخاب گیاهان مناسب برای الکتروفیتورمیدیشن و گیاه‌پالایی، باید همه این عوامل را در نظر گرفت. فرایند تجمع عناصر از خاک با استفاده از گیاهان، با هدف تبدیل عناصر موجود در خاک به شکلی قابل کنترل تر و قابل انتقال تر انجام می‌شود؛ بنابراین، روش‌های الکتروفیتورمیدیشن و گیاه‌پالایی باید به عنوان بخشی از فرایند حذف کامل و نه به عنوان یک روش حذف نهایی در نظر گرفته شوند. حذف یا حذف نهایی از طریق الکتروفیتورمیدیشن و گیاه‌پالایی حاصل می‌شود. گیاهان به دست آمده در نتیجه‌ی پاکسازی را می‌توان سوزاند یا در یک محل ذخیره‌سازی مناسب نگهداری کرد. روش الکتروکیتیک، در اولین تکرار مطالعه، از برق ۳۰ ولت DC برای یک دوره مطالعه ۵۰ روزه استفاده کرد. منبع برق ۲۴ ساعته و ۷ روز هفته تأمین می‌شد. نمونه‌ها در فواصل ۱۰ روزه در طول مطالعه گرفته شدند. در طول نمونه‌برداری، آب مایع از سمت آند و کاتد جمع‌آوری شد، pH و EC

اندازه‌گیری شد و ICP انجام شد. علاوه بر این، از بخش گل گلدان از طریق حفاری در سه نقطه خاص (آند، کاند و مرکز) نمونه‌برداری شد. این نمونه‌ها برای اندازه‌گیری Cu, Pb, Cd, Cr و B استفاده شدند. در نتیجه، طبق نتایج تجزیه و تحلیل روش الکتروکینتیک، مقادیر گل در دستگاه ICP به تدریج در طول آزمایش کاهش یافت.

۵- نتیجه گیری

در نتیجه، حوزه الکتروفیتورمداسیون (گیاه‌پالایی) و الکتروکینتیک یک حوزه اکولوژیکی است و پتانسیل بالایی را ارائه می‌دهد. توسعه بیشتر گیاه‌پالایی نیازمند یک حوزه مطالعاتی میان‌رشته‌ای است که گیاه‌شناسی، بیوتکنولوژی ژنتیک، شیمی خاک و میکروبیولوژی و همچنین کشاورزی و علوم محیطی را با هم ترکیب کند.

منابع

- Annam, S., & Singla, A. 2021. A brief survey of assessment models to predict stress level of heavy metals in soil. Recent Advances Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering), 14, 276-289.
- Bert V., Girondelot B., Quatannens V., & Laboudigue A. 2005. A phytostabilisation of a Mesocosm experiment and field trial, Proceedings of the 9th International FZK/TNO Conference on soil systems remediation concepts and technologies' in İçinde, (Uhlmann O., Annokkée G. J. , Arendt F. eds), Bordeaux, ss.1544-50.
- Bhati, M., & Singh, G. 2003. Growth and mineral accumulation in Eucalyptus camaldulensis seedlings with mixed industrial effluents. Bioresource Technology, 88, 221-228.
- Blaylock M. J., & Huang J.W. 2000. Phytoextraction of Metals, Phytoremediation of Toxic Metals: Clean-up the Environment' in içinde, (Raskin I., Ensley B.D., Ed.), New York, Wiley, ss.53-70.
- Clemens S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants, Biochimie, 88(11), 1707-1719.
- Dai, Z.C., Cai, H., Qi, S.S., Li, J., & Wan, J.S.H. 2020. Cadmium Hyperaccumulation as an Inexpensive Metal Armor against Disease in Crofton Weed. Environ. Pollut, 267, 115649.
- Dudai, N., Putievsky, E., Chaimovitch, D., & Ben-Hur, M. 2006. Growth management of vetiver (Vetiveria zizanioides) under Mediterranean conditions. Journal of Environmental Management, 81, 63-71.
- Khan, M.A., Wani, G.A., Majid, H., Farooq, Z.A., Husaini, A.M., & Shah, M.A. 2020. Differential bioaccumulation of heavy metals from wastewater by Lemna minor. of Environmental Contamination and Toxicology, 105, 777-783.
- Saleem, M.H., Afzal, J., Rizwan, N., & Usman, K. 2022. Chromium Toxicity in Plants: Consequences on Growth, Chromosomal Behavior Nutrient Status. Turkish J. Agric. For, 46, 371-389.
- Sattari, M., Namin, J.I., Bibak, M.F., Hedayati, A., & Mazareiy, M.H. 2019. Morphological comparison of western and eastern populations of Caspian kutum, Rutilus kutum (Kamensky 1901) (Cyprinidae) in the southern Caspian Sea. International Journal of Aquatic Biology, 6, 242-247.