Gonbad Kavous University
Journal of Plant
Ecosystem Conservation
Volume 14, Issu 28
http://pec.gonbad.ac.ir

Assessment of Heavy Metal Bioaccumulation in the Aquatic Plant *Potamogeton filiformis* in the Bahmanshir River

Arzeoo Abbasi[1], Sayyed Sadroddin Ghaemmaghami[*2], Ahmad Savari[3], Kamal Ghanemi[4]

[1]MSc Graduate in Marine pollution, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
[2]Assistant Professor, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran (Corresponding Author)
[3]Professor, Department of Marine Biology, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
[4]Professor, Department of Marine Chmeistry, Faculty of Marine Science and Oceanography, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran

Received: 2026/01/02; Accepted: 2026/05/18

Abstract

Heavy metal pollution in aquatic ecosystems is considered one of the most significant environmental threats because of the high persistence of these elements, their capacity for bioaccumulation, and their transfer through the food chain, which can adversely affect living organisms and human health. Aquatic plants, owing to their ability to absorb and accumulate metals from water and sediments, have been widely recognized as suitable bioindicators for monitoring metal contamination in aquatic environments. The present study aimed to investigate the bioaccumulation patterns of heavy metals, including nickel (Ni), copper (Cu), cobalt (Co), lead (Pb), and cadmium (Cd), in different organs of the aquatic plant *Potamogeton filiformis* in the Bahmanshir River. Sampling was conducted at five stations, with three replicates at each station, along the river during the cold and warm seasons. After collection, different plant organs, including rhizomes, stems, and leaves, were separated, washed, dried, and subjected to acid digestion. Heavy metal concentrations were subsequently determined using atomic absorption spectrometry. The results indicated that heavy metal concentrations were significantly influenced by spatial variation, seasonal variation, and plant organ. The highest metal accumulation was generally observed in the rhizomes, highlighting the important role of this organ in the uptake and storage of metals from bottom sediments.Considerable differences in metal concentrations were also observed among sampling stations, potentially reflecting differences in anthropogenic activities and the inputs of municipal, industrial, and agricultural effluents into different sections of the river. Seasonal variation also reflected the influence of hydrological conditions and fluctuations in river discharge on metal concentrations in the aquatic environment. Overall, the findings indicate that *Potamogeton filiformis* has a considerable capacity to accumulate heavy metals and can therefore be used as an effective bioindicator for assessing and monitoring metal contamination in aquatic ecosystems. These findings may also contribute to environmental management and water-quality monitoring programs in comparable river systems.

Keywords: Potamogeton, Heavy metal bioaccumulation, Aquatic macrophyte, Phytoremediation, Bahmanshir River

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

دانشگاه گنبد کاووس
نشریه "حفاظت زیست بوم گیاهان"
دوره چهاردهم، شماره بیست و هشتم
http://pec.gonbad.ac.ir

علمی-پژوهشی

ارزیابی تجمع زیستی فلزات سنگین در گیاه آبزی *Potamogeton filiformis* در رودخانه بهمنشیر

آرزو عباسی [۱]، سید صدرالدین قائم مقامی [*]، احمد سواری [۳]، کمال غانمی [۴]

[۱] دانش آموخته کارشناسی ارشد آلودگی دریا، گروه زیست شناسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر
[۲] استادیار، گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر
[۳] استاد، گروه زیست شناسی دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر
[۴] استاد، گروه شیمی دریا، دانشکده علوم دریایی و اقیانوسی دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر

تاریخ دریافت:۱۴۰۴/۱۰/۱۲؛ تاریخ پذیرش:۱۴۰۵/۲/۲۸

چکیده

آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تهدیدهای زیست‌محیطی شناخته می‌شود، زیرا این عناصر به دلیل پایداری بالا، قابلیت تجمع زیستی و انتقال در زنجیره غذایی می‌توانند اثرات نامطلوبی بر موجودات زنده و سلامت انسان داشته باشند. در این میان، گیاهان آبزی به دلیل توانایی جذب و انباشت فلزات از آب و رسوبات، به‌عنوان شاخص‌های زیستی مناسب برای پایش آلودگی فلزی در محیط‌های آبی مورد توجه قرار گرفته‌اند. هدف از این پژوهش بررسی الگوی تجمع فلزات سنگین نیکل (Ni)، مس (Cu)، کبالت (Co)، سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) در اندام‌های مختلف گیاه آبزی *Potamogeton filiformis* در رودخانه بهمنشیر بود. نمونه‌برداری از پنج ایستگاه با سه تکرار در طول رودخانه طی دو فصل سرد و گرم انجام شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها، اندام‌های مختلف گیاه شامل ریزوم، ساقه و برگ جداسازی، شستشو، خشک و پس از هضم اسیدی، غلظت فلزات با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که غلظت فلزات سنگین به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عوامل مکانی، فصلی و نوع اندام گیاهی قرار دارد. بیشترین میزان تجمع فلزات عمدتاً در ریزوم مشاهده شد که نشان‌دهنده نقش مهم این اندام در جذب و ذخیره فلزات از رسوبات بستر است. همچنین اختلاف قابل توجهی در غلظت فلزات بین ایستگاه‌های مختلف مشاهده شد که احتمالاً ناشی از تفاوت در میزان فعالیت‌های انسانی، ورود پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی در مناطق مختلف رودخانه است. تغییرات فصلی نیز بیانگر تأثیر شرایط هیدرولوژیکی و نوسانات دبی رودخانه بر غلظت فلزات در محیط آبی است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گونه *Potamogeton filiformis* توانایی قابل توجهی در تجمع فلزات سنگین داشته و می‌تواند به‌عنوان یک شاخص زیستی مؤثر برای ارزیابی و پایش آلودگی فلزی در اکوسیستم‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها می‌توانند در برنامه‌های مدیریت زیست‌محیطی و پایش کیفیت آب در رودخانه‌های مشابه نیز کاربرد داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: **پتاموژتون، تجمع زیستی فلزات سنگین، ماکروفیت آبزی، گیاه‌پالایی، رودخانه بهمنشیر**

مقدمه

آلودگی فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر محسوب می‌شود. این عناصر به دلیل پایداری شیمیایی، تجزیه‌ناپذیری و توانایی تجمع در بافت‌های زیستی، می‌توانند در آب، رسوبات و موجودات زنده انباشته شده و از طریق زنجیره غذایی به سطوح بالاتر منتقل شوند. منابع اصلی ورود فلزات سنگین به رودخانه‌ها شامل پساب‌های صنعتی، فاضلاب‌های شهری، فعالیت‌های کشاورزی، رواناب‌های سطحی و حمل‌ونقل دریایی است. حضور این فلزات حتی در غلظت‌های پایین می‌تواند اثرات زیان‌باری بر موجودات آبزی داشته باشد و باعث اختلال در فرآیندهای

*نویسنده مسئول: s_sadra2003@yahoo.com

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

فیزیولوژیک، کاهش رشد و تغییر ساختار اکوسیستم‌های آبی شود (Ayangbenro And Bahalola, 2017).

در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به نقش گیاهان آبزی در پایش و کنترل آلودگی فلزات سنگین افزایش یافته است. مطالعات جدید نشان می‌دهد که ماکروفیت‌های آبزی قادرند فلزات سنگین را از طریق اندام‌های مختلف خود جذب کرده و در بافت‌های زیرزمینی و هوایی ذخیره کنند. این فرآیند که به عنوان تجمع زیستی شناخته می‌شود، علاوه بر کاهش غلظت آلاینده‌ها در محیط آبی، اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت آلودگی اکوسیستم فراهم می‌کند. به همین دلیل، استفاده از گیاهان آبزی به عنوان ابزار پایش زیستی در بسیاری از برنامه‌های مدیریت منابع آب مورد توجه قرار گرفته است (Singh and Kalamdhad, 2022; Zhang et al., 2024).

توانایی تجمع فلزات در گیاهان آبزی تا حد زیادی به ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، شرایط محیطی و میزان دسترسی زیستی فلزات در آب و رسوب بستگی دارد. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که فلزات سنگین معمولاً در اندام‌های زیرزمینی مانند ریشه و ریزوم با غلظت بیشتری نسبت به اندام‌های هوایی تجمع می‌یابند، زیرا این اندام‌ها در تماس مستقیم با رسوبات آلوده قرار دارند. همچنین تفاوت در ساختار بافتی و میزان انتقال عناصر در گیاه می‌تواند الگوی توزیع فلزات را در اندام‌های مختلف گیاه تحت تأثیر قرار دهد (Wang et al., 2024; Chen et al., 2025).

علاوه بر عوامل زیستی، شرایط فصلی نیز می‌تواند بر جذب و تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبزی تأثیرگذار باشد. تغییراتی مانند دما، دبی آب، میزان مواد معلق و شدت رشد گیاه در طول سال می‌توانند بر دسترسی زیستی فلزات و میزان جذب آن‌ها توسط گیاهان اثر بگذارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در بسیاری از اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، تغییرات فصلی می‌تواند منجر به تفاوت معنی‌دار در میزان تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی شود و بررسی این تغییرات می‌تواند درک بهتری از دینامیک آلودگی در محیط‌های آبی فراهم کند (Liu et al., 2024; 2025).

گیاهان آبزی ماکروفیت نقش مهمی در چرخه عناصر شیمیایی و پویایی آلاینده‌ها در محیط‌های آبی ایفا می‌کنند. این گیاهان به دلیل تماس مستقیم با آب و رسوبات قادرند فلزات سنگین را از محیط جذب کرده و در بافت‌های خود انباشته کنند. به همین دلیل، بسیاری از گونه‌های ماکروفیت به عنوان شاخص‌های زیستی (Bioindicators) برای ارزیابی آلودگی محیط‌های آبی و همچنین به عنوان ابزارهای مؤثر در فرآیند گیاه‌پالایی (Phytoremediation) مورد استفاده قرار می‌گیرند (Asha et al., 2010; Zhang et al., 2021). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که گیاهان غوطه‌ور به دلیل سطح تماس گسترده با ستون آب و رسوبات، توانایی قابل توجهی در جذب و ذخیره فلزات سنگین دارند (Singh and Kalamdhad., 2022).

در میان گیاهان آبزی، جنس *Potamogeton* از خانواده Potamogetonaceae یکی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین جنس‌های ماکروفیت‌های غوطه‌ور در اکوسیستم‌های آب شیرین است. گونه‌های این جنس در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها پراکنش وسیعی دارند و نقش مهمی در پایداری اکولوژیکی زیستگاه‌های آبی ایفا می‌کنند. یکی از گونه‌های این جنس، *Potamogeton filiformis* است که به عنوان گیاهی غوطه‌ور با ساقه‌های باریک و انعطاف‌پذیر در آب‌های کم‌عمق و نسبتاً آرام رشد می‌کند. این گونه به دلیل سطح تماس بالا با آب و رسوبات و نیز توانایی جذب عناصر معدنی، می‌تواند در تجمع و انتقال فلزات سنگین در اکوسیستم‌های آبی نقش مهمی داشته باشد.

پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که گونه‌های مختلف *Potamogeton* قادر به تجمع فلزاتی مانند مس (Cu)، نیکل (Ni)، سرب (Pb) و کادمیم (Cd) در بافت‌های خود هستند و از این رو می‌توانند به عنوان شاخصی مناسب برای ارزیابی آلودگی فلزی در محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرند (Gupta et al., 2020). با این حال، اطلاعات مربوط به توانایی تجمع زیستی فلزات سنگین در گونه *Potamogeton filiformis* در بسیاری از اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، به‌ویژه در مناطق نیمه‌گرمسیری، همچنان محدود است.

رودخانه بهمنشیر در جنوب غرب ایران یکی از شاخه‌های مهم رودخانه کارون محسوب می‌شود که از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی اهمیت زیادی دارد. این رودخانه به دلیل مجاورت با مناطق شهری، فعالیت‌های صنعتی، تردد شناورها و تخلیه پساب‌ها در معرض ورود آلاینده‌های

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

مختلف از جمله فلزات سنگین قرار دارد. بررسی تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبزی بومی این رودخانه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وضعیت آلودگی محیط و توان پالایش طبیعی اکوسیستم فراهم کند. با این حال، تاکنون مطالعات محدودی درباره تجمع فلزات سنگین در ماکروفیت‌های غوطه‌ور این رودخانه، به‌ویژه گونه *Potamogeton filiformis*، انجام شده است.

بر این اساس، هدف از انجام این پژوهش ارزیابی میزان تجمع زیستی فلزات سنگین شامل مس (Cu)، نیکل (Ni)، سرب (Pb) و کادمیم (Cd) در اندام‌های مختلف گیاه آبزی *Potamogeton filiformis* در ایستگاه‌های مختلف رودخانه بهمنشیر و بررسی اثر عوامل مکانی (ایستگاه)، زمانی (فصل) و اندام گیاه بر میزان انباشت این فلزات است. از آنجا که تغییرات فصلی می‌تواند بر شرایط هیدرولوژیکی رودخانه، ورود آلاینده‌ها و همچنین رشد و توان جذب فلزات توسط گیاهان آبزی تأثیرگذار باشد، نمونه‌برداری در فصل سرد و گرم انجام شد تا تفاوت تجمع فلزات بین فصول و ایستگاه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج این مطالعه می‌تواند در درک بهتر وضعیت آلودگی فلزی این رودخانه و همچنین ارزیابی قابلیت این گونه به عنوان شاخص زیستی و ابزار بالقوه در برنامه‌های مدیریت و پایش محیط‌های آبی مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه بهمنشیر یکی از شاخه‌های اصلی رودخانه کارون در منتهی‌الیه جنوب‌غربی ایران و در استان خوزستان است که طول آن حدود ۸۰ کیلومتر بوده و در حد فاصل عرض جغرافیایی ۳۰°۲۵′ تا ۳۰°۰۰′ شمالی و طول جغرافیایی ۴۸°۱۳′ تا ۴۸°۴۳′ شرقی قرار دارد. این رودخانه از نظر اقتصادی و اکولوژیک اهمیت زیادی دارد و در معرض ورود پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی است که می‌تواند منجر به آلودگی فلزات سنگین در ستون آب، رسوبات و زیست‌توده گیاهی شود. برای این پژوهش، پنج ایستگاه نمونه‌برداری در طول رودخانه انتخاب شد که شامل مناطق قبل، داخل و بعد از محدوده‌های شهری بودند (شکل ۱). مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه های مورد مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
کانال ژیان	48°15'28.2"E	30°23'00.4"N
احمدآباد	48°18'43.0"E	30°20'51.9"N
منطقه سده	48°18'58.7"E	30°20'27.3"N
محدوده چوئبده	48°41'12.2"E	30°01'14.7"N
بندر چوئبده	48°41'14.6"E	30°01'15.7"N

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

نمونه‌برداری در دو فصل متضاد سال (تابستان و زمستان ۱۳۹۷) به‌عنوان فصل گرم و سرد انجام شد. در هر فصل و در هر یک از پنج ایستگاه، نمونه‌های گیاه آبزی *Potamogeton filiformis* جمع‌آوری شد. در هر ایستگاه و در هر فصل ابتدا یک سطح تقریباً ۱۰ متر مربعی از بستر رودخانه که پوشش غالب آن *P. filiformis* بود، مشخص شد. از این محدوده، حداقل ۱۰ بوته کامل (شامل ریزوم، ساقه و برگ) به‌صورت تصادفی با بیلچه از بستر برداشت گردید. سپس از این ۱۰ بوته، سه نمونه مرکب (سه تکرار) تهیه شد؛ به این صورت که برای هر تکرار، تعدادی از بوته‌ها با هم ترکیب شده و یک نمونه مرکب تشکیل دادند. بنابراین، برای هر ایستگاه در هر فصل، سه تکرار بیولوژیک مرکب از *P. filiformis* به‌دست آمد (۳ تکرار × ۶ ایستگاه × ۲ فصل). این نکته به‌طور مشخص نشان می‌دهد که نمونه‌ها ترکیبی بوده‌اند و هر تکرار نماینده چند بوته از همان ایستگاه است، مطابق با توصیه مطالعات مشابه (Lan et al., 2010). گونه گیاه آبزی مورد مطالعه با استفاده از کلیدهای شناسایی فلور ایران و منابع تاکسونومیک معتبر شناسایی شد و به‌عنوان *Potamogeton filiformis* تأیید گردید. شناسایی گونه توسط متخصص گیاه‌شناسی انجام و نمونه شاهد نگهداری شد.

نمونه‌ها (ریزم، ساقه و برگ) با بیلچه استیل تمیز از بستر رودخانه برداشت شدند. بوته‌ها در ابتدا با آب رودخانه به‌آرامی شسته شدند تا رسوبات سطحی و ذرات چسبیده جدا شود، سپس در کیسه‌های پلاستیکی تمیز و نشانه‌گذاری‌شده (نام ایستگاه، تاریخ، زمان نمونه‌برداری) قرار گرفتند تا از آلودگی ثانویه جلوگیری شود (Lan et al., 2010). نمونه‌ها در یخدان حاوی یخ به آزمایشگاه منتقل شدند.

در آزمایشگاه، نمونه‌ها مجدداً با آب مقطر شسته شدند تا هرگونه ذرات معلق باقی‌مانده حذف شود. سپس اندام‌های گیاه شامل ریزوم، ساقه و برگ از یکدیگر جدا شده و به قطعات کوچک برش داده شدند.

نمونه‌های گیاهی پس از شست‌وشو با آب مقطر در ظروف شیشه‌ای تمیز قرار داده شدند و برای حذف رطوبت و رسیدن به وزن ثابت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. استفاده از دمای حدود ۱۰۵°C برای تعیین وزن خشک و آماده‌سازی نمونه‌های زیستی پیش از آنالیز شیمیایی در بسیاری از پروتکل‌های استاندارد آزمایشگاهی گزارش شده است (Sparks et al., 1996). از آنجا که فلزات سنگین عناصر غیر فرار هستند، خشک‌کردن در این دما موجب اتلاف یا تغییر در غلظت آن‌ها در بافت گیاهی نمی‌شود و بنابراین تأثیری بر نتایج اندازه‌گیری فلزات ندارد. پس از خشک‌شدن، نمونه‌ها با هاون و آسیاب تمیز پودر شده و از الک با اندازه مش ۶۳ میکرون عبور داده شدند. پودر یکنواخت شده در ظروف پلی‌اتیلنی استریل و دربسته نگهداری شد تا زمان هضم شیمیایی (MacFarlane et al., 2003).

برای هر نمونه، حدود ۱ گرم از پودر خشک‌شده با دقت ۰,۰۰۱ گرم وزن‌کشی و در لوله‌های هضم مقاوم به اسید قرار داده شد. سپس مخلوطی از اسید نیتریک غلیظ ۶۵٪ و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به نسبت حجمی ۱:۳ به نمونه‌ها افزوده شد. پس از یک ساعت هضم مقدماتی در دمای اتاق، لوله‌ها روی هات‌پلیت در دمای حدود ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا محلول شفاف گردد (Perfus-Barbeoch et al., 2002). پس از تکمیل هضم، نمونه‌ها پس از سردشدن از صافی واتمن شماره ۴۲ عبور داده شدند و محلول صاف‌شده با آب دوبار تقطیر به حجم نهایی در بالن ژوژه رسانده شد. محلول‌های استاندارد اولیه با غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر برای هر فلز (Ni، Pb، Cd و در صورت اندازه‌گیری Cu) از نمک‌های با گرید تحلیلی تهیه شده و با رقت‌سازی به غلظت‌های کاری مورد نیاز تبدیل شدند. محلول‌های استاندارد در ظروف تیره در دمای یخچال نگهداری شدند. غلظت فلزات سنگین در محلول‌های نمونه با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) اندازه‌گیری شد. دستگاه ابتدا با محلول‌های استاندارد کالیبره گردید و سپس نمونه‌ها به ترتیب به دستگاه تزریق شدند (Rebak et al., 2013).

برای اطمینان از صحت و دقت اندازه‌گیری‌ها، اقدامات کنترل کیفیت انجام شد. برای هر سری هضم، یک نمونه شاهد بدون ماتریس شامل معرف‌های هضم به‌تنهایی آماده و اندازه‌گیری شد تا از عدم آلودگی زمینه‌ای اطمینان حاصل شود. حدود ۱۰٪ از نمونه‌ها به‌صورت تکراری هضم و اندازه‌گیری شدند. انحراف معیار نسبی (RSD) کمتر از ۵٪ به‌عنوان معیار قابل قبول در نظر گرفته شد. تعدادی از نمونه‌ها با مقدار مشخصی از محلول استاندارد فلزات سنگین

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

اسپایک شدند. درصد بازیابی بین ۸۰–۱۲۰٪ به‌عنوان محدوده قابل قبول در نظر گرفته شد. برای هر فلز حداقل ۵ نقطه استاندارد تهیه شد و ضریب تعیین (R^2) برای منحنی کالیبراسیون بزرگ‌تر از ۰,۹۹۵ بود. این اقدامات نشان‌دهنده صحت و دقت مناسب روش و قابل اتکا بودن نتایج غلظت فلزات در بافت گیاهی است.

در این مطالعه، سه عامل اصلی در نظر گرفته شد: ایستگاه (۶ سطح)، فصل (۲ سطح؛ تابستان و زمستان)، اندام گیاه (۳ سطح؛ ریزوم، ساقه، برگ). برای بررسی اثرات این عوامل و نیز تعامل آن‌ها بر غلظت فلزات سنگین در بافت گیاه *P. filiformis*، از آزمون Three-way ANOVA استفاده شد. این تحلیل امکان ارزیابی:

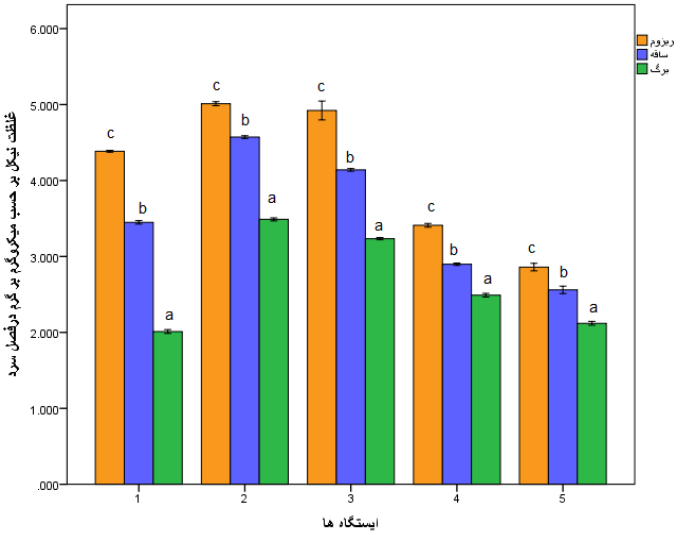
اثرات اصلی هر عامل (ایستگاه، فصل، اندام)، اثرات تعاملی دو به دو (ایستگاه × فصل، ایستگاه × اندام، فصل × اندام)، و در صورت نیاز اثر تعاملی سه‌گانه (ایستگاه × فصل × اندام) را فراهم می‌کند. پیش از انجام ANOVA، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون Shapiro–Wilk بررسی شد، همگنی واریانس‌ها با آزمون Levene آزمون گردید. در صورتی که داده‌ها به تعدیل نیاز داشتند، تبدیل‌های مناسب (مانند تبدیل لگاریتمی) اعمال شد.

در مواردی که اثرات اصلی یا تعاملی در سطح ۰,۰۵ معنی‌دار بودند، برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای Tukey به‌عنوان آزمون تعقیبی (Post-hoc) استفاده شد. سطح معنی‌داری برای همه آزمون‌ها ۰,۰۵ در نظر گرفته شد. کلیه تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ انجام شد. نمودارها با نرم‌افزار Excel (یا نرم‌افزار گرافیکی دیگر، مطابق ژورنال) ترسیم گردیدند.

نتایج

میانگین غلظت فلزات سنگین شامل نیکل (Ni)، مس (Cu)، کبالت (Co)، سرب (Pb) و کادمیوم (Cd) در بافت‌های ریزوم، ساقه و برگ گیاه Potamogeton sp در فصل‌های سرد و گرم رودخانه بهمنشیر در شکل‌های (۲) تا (۱۲) ارائه شده است.

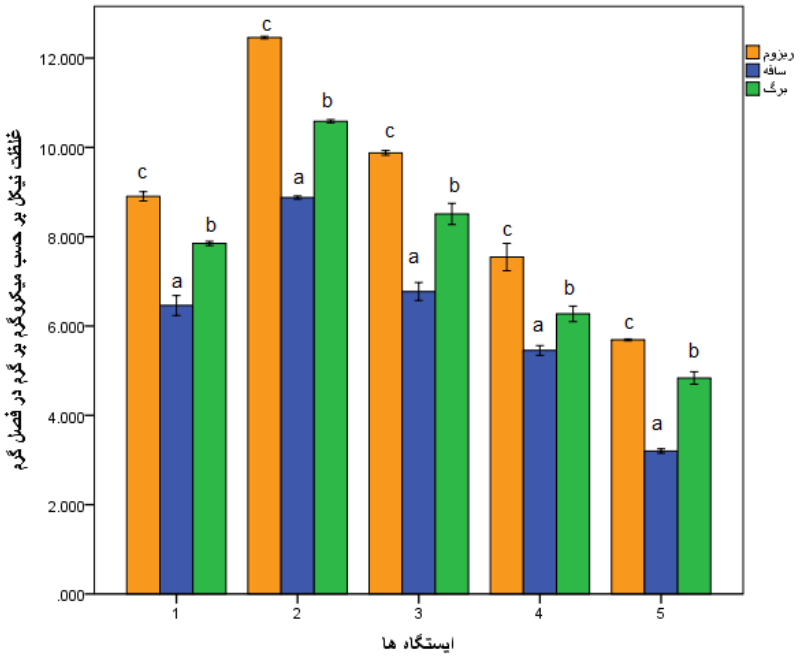
میانگین غلظت نیکل در ریزوم، ساقه و برگ گیاه Potamogeton filiformis در ایستگاه‌اول (کانال ژیان)، به‌ترتیب ۰/۰۰۵ ± ۴/۳۸۵ ، ۰/۰۰۹± ۳/۴۴۸ و ۰/۰۱± ۲/۰۱۱ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بیشترین غلظت نیکل در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) مشاهده شد؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به ترتیب ۰/۰۱± ۵/۰۱۲ ، ۰/۰۰۷± ۴/۵۷۲ و ۰/۰۰۸± ۳/۴۸۸ میکروگرم بر گرم ثبت شد. میانگین غلظت نیکل در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۵± ۴/۹۲۲ ، ۰/۰۰۷± ۴/۱۴ و ۰/۰۰۶± ۳/۲۳۴ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. کمترین مقدار غلظت نیکل در ایستگاه ۴ (محدوده چوئبده) و ایستگاه ۵ (چوئبده) مشاهده شد. میانگین غلظت نیکل در ایستگاه چهارم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱± ۳/۴۱ ، ۰/۰۰۶± ۲/۸۹۷ و ۰/۰۱± ۲/۴۹ و هم‌چنین میانگین آن در ایستگاه‌پنجم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۲± ۲/۸۶ ، ۰/۰۲± ۲/۵۶ و ۰/۰۱± ۲/۱۲۰ میکروگرم بر گرم ثبت شد. نتایج آزمون ANOVA نشان داد که غلظت نیکل در ایستگاه دوم در هر سه اندام گیاهی، اختلاف معنی‌داری با سایر ایستگاه‌ها دارد ($p < ۰,۰۵$) (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه غلظت نیکل در ریزوم، ساقه و برگ گیاه*Potamogeton filiformis* در فصل سرد رودخانه بهمنشیر

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

میانگین غلظت نیکل در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در ایستگاه‌اول (کانال ژیان) در فصل گرم، به‌ترتیب ۰/۰۴۱± ۸/۹۰۳ ، ۰/۰۹± ۶/۴۶۸ و ۰/۰۱۹± ۷/۸۴۹ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بیشترین غلظت نیکل در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) مشاهده شد؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به ترتیب ۰/۰۱۱± ۱۲/۴۶ ، ۰/۰۱۴± ۸/۸۷۲ و ۰/۰۱۵± ۱۰/۵۸۵۴۸۸ میکروگرم بر گرم ثبت شد. میانگین غلظت نیکل در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۲± ۹/۸۷۶ ، ۰/۰۸± ۶/۷۷۳ و ۰/۰۹۶± ۸/۵۰۸ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. کمترین مقدار غلظت نیکل در ایستگاه ۴ (محدوده چوئبده) و ایستگاه ۵ (چوئبده) مشاهده شد. میانگین غلظت نیکل در ایستگاه چهارم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۱۲۲± ۷/۵۴۴ ، ۰/۰۴۴± ۵/۴۵۴ و ۰/۰۷± ۶/۲۷۳ و هم‌چنین میانگین آن در ایستگاه‌پنجم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۰۹± ۵/۶۹ ، ۰/۰۲± ۳/۲ و ۰/۰۵۶± ۴/۸۳۶ میکروگرم بر گرم ثبت شد. بین میانگین غلظت نیکل در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در فصل گرم، در ایستگاه دوم (احمدآباد) با سایر ایستگاه‌ها تفاوت معنی‌داری را نشان داد ($p < 0.05$, ANOVA) (شکل ۳). نتایج Three-way ANOVA نشان داد که اثر ایستگاه، فصل و اندام گیاه بر غلظت نیکل معنی‌دار است (p<۰,۰۵). همچنین، برهم‌کنش ایستگاه × فصل و فصل × اندام نیز در سطح ۰,۰۵ معنی‌دار بود؛ به این معنی که اختلاف بین ایستگاه‌ها وابسته به فصل و اندام گیاه است. در هر دو فصل، ایستگاه دوم به طور معنی‌داری غلظت بالاتری از نیکل را نسبت به سایر ایستگاه‌ها نشان داد (p<۰,۰۵، آزمون تعقیبی Tukey) (شکل ۳)

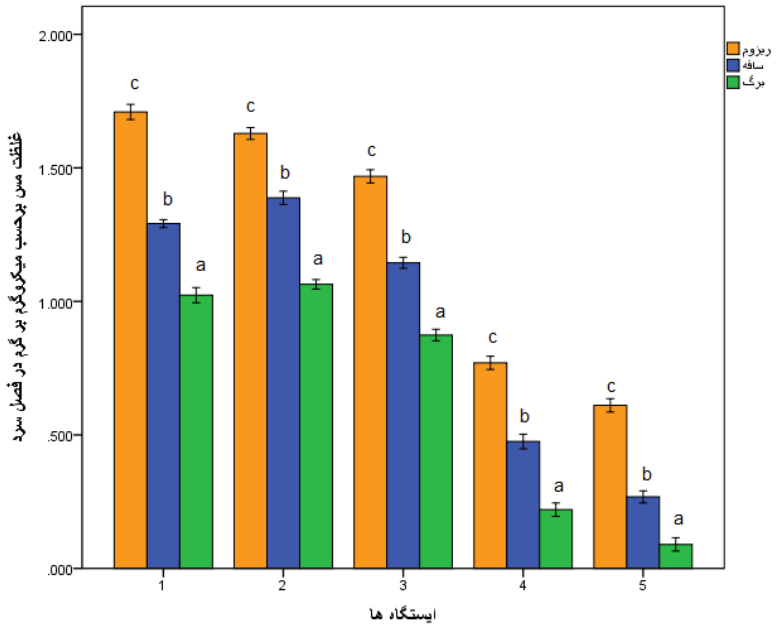


شکل ۳- مقایسه غلظت نیکل در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل گرم رودخانه بهمنشیر

بیشترین غلظت فلز مس، در ایستگاه اول (کانال-ژیان) مشاهده شد. میانگین غلظت مس در ریزوم، ساقه و برگ *Potamogeton filiformis* در ایستگاه‌اول، به‌ترتیب ۰/۰۱۱± ۱/۷۰۹ ، ۰/۰۰۶± ۱/۲۹۱ و ۰/۰۱۱± ۱/۰۲۳ میکروگرم بر گرم ثبت شد. میانگین غلظت مس در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به ترتیب ۰/۰۰۹± ۱/۶۲۸ ، ۰/۰۱± ۱/۳۸۸ و ۰/۰۰۷± ۱/۰۶۴ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. میانگین غلظت مس در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱± ۱/۴۶۸ ، ۰/۰۰۸± ۱/۱۴۴ و ۰/۰۰۸± ۰/۸۷۴ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد، هم‌چنین میانگین غلظت مس در ایستگاه چهارم در ریزوم، ساقه و برگ به-ترتیب ۰/۰۱± ۰/۷۷ ، ۰/۰۱۱± ۰/۴۷۵ و ۰/۰۱± ۰/۲۲ ثبت شد. کمترین غلظت فلز مس در ایستگاه پنجم بوده (شکل ۴)؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱± ۰/۶۱ ، ۰/۰۰۹± ۰/۲۶۸ و ۰/۰۱± ۰/۰۹ میکروگرم بر گرم ثبت شد. بین میانگین غلظت مس در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در ایستگاه اول با

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

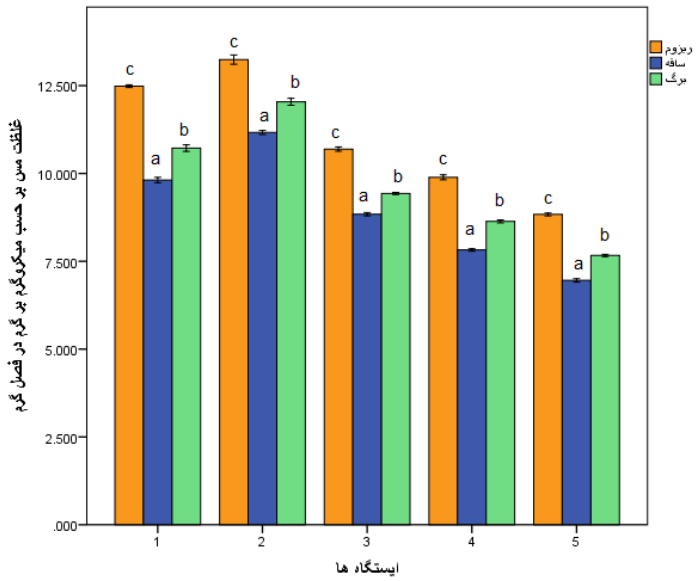
ایستگاه‌های دیگر تفاوت معنی‌داری را نشان داد ($p < 0.05$, ANOVA).



شکل ۴- مقایسه غلظت مس در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل سرد رودخانه بهمنشیر

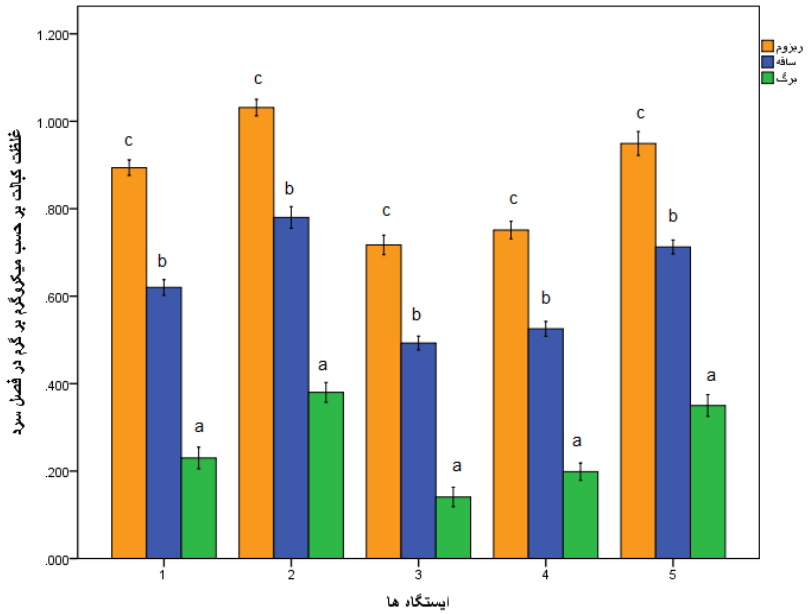
بیشترین غلظت فلز مس، در ایستگاه دوم (احمدآباد) مشاهده شد. میانگین غلظت مس در ریزوم، ساقه و برگ *Potamogeton filiformis* در ایستگاه‌اول (کانال ژیان) در فصل گرم، به‌ترتیب ۰/۰۱۵± ۱۲/۴۸۳ ، ۰/۰۰۶± ۹/۸۱۳ و ۰/۰۳۷± ۱۰/۷۲۱ میکروگرم بر گرم ثبت شد. میانگین غلظت مس در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به ترتیب ۰/۰۵۲± ۱۳/۲۴ ، ۰/۰۲۳± ۱۱/۱۶ و ۰/۰۴± ۱۲/۰۴ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. میانگین غلظت مس در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۲۵± ۱۰/۶۸ ، ۰/۰۱۹± ۸/۸۴ و ۰/۰۱۲± ۹/۴۳ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد، هم‌چنین میانگین غلظت مس در ایستگاه چهارم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۲۷± ۹/۸۹ ، ۰/۰۱۴± ۷/۸۲ و ۰/۰۱۶± ۸/۶۳۵ ثبت شد. کمترین غلظت فلز مس در ایستگاه پنجم بوده (شکل۴-۱۷)؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱۶± ۸/۸۳۸ ، ۰/۰۱۹± ۶/۹۵۸ و ۰/۰۱۳± ۷/۶۶۵ میکروگرم بر گرم ثبت شد. بین میانگین غلظت مس در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در فصل گرم، در ایستگاه دوم با ایستگاه‌های دیگر تفاوت معنی‌داری را نشان داد ($p < 0.05$, ANOVA) (شکل ۵). نتایج تحلیل سه‌عاملی نشان داد که غلظت مس به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر ایستگاه، فصل و اندام گیاه قرار دارد ($p<۰,۰۵$). برهم‌کنش ایستگاه × فصل نیز معنی‌دار بود، به‌گونه‌ای که تفاوت بین ایستگاه‌ها در فصل گرم برجسته‌تر از فصل سرد بود. در فصل سرد، ایستگاه اول به‌طور معنی‌داری غلظت بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها داشت، در حالی‌که در فصل گرم، ایستگاه دوم دارای بیشترین غلظت مس در هر سه اندام بود ($p<۰,۰۵$، آزمون Tukey).

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]



شکل ۵- مقایسه غلظت مس در ریزوم، ساقه و برگ گیاه*Potamogeton filiformis* در فصل گرم رودخانه بهمنشیر

میانگین غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در ایستگاه‌اول (کانال ژیان)، به‌ترتیب ۰/۰۰۷± ۰/۸۹۴ ، ۰/۰۰۷± ۰/۶۲ و ۰/۰۱± ۰/۲۳ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بیشترین غلظت کبالت در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) مشاهده شد؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در ایستگاه دوم ترتیب ۰/۰۰۷± ۱/۰۳۱ ، ۰/۰۱± ۰/۷۸ و ۰/۰۰۹± ۰/۳۸میکروگرم بر گرم ثبت شد. کمترین میانگین غلظت کبالت در ایستگاه‌سوم (سده) و ایستگاه چهارم (محدوده چوئبده) مشاهده شد؛ به‌طوری‌که در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به‌ترتیب ۰/۰۰۹± ۰/۷۱۷ ، ۰/۰۰۶± ۰/۴۹۲ و ۰/۰۰۹± ۰/۱۴ میکروگرم بر گرم و در ایستگاه چهارم به‌ترتیب ۰/۰۰۸± ۰/۷۵۱ ، ۰/۰۰۶± ۰/۵۲۵ و ۰/۰۰۸± ۰/۱۹۸ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بین میانگین غلظت کبالت در ایستگاه سوم و چهارم اختلاف معنی داری مشاهده نشد ($p > 0.05$, ANOVA) (شکل ۶). در ایستگاه‌پنجم میانگین غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱۱± ۰/۹۴۹ ، ۰/۰۰۶± ۰/۷۱۲ و ۰/۰۱± ۰/۳۵ میکروگرم بر گرم ثبت شد.

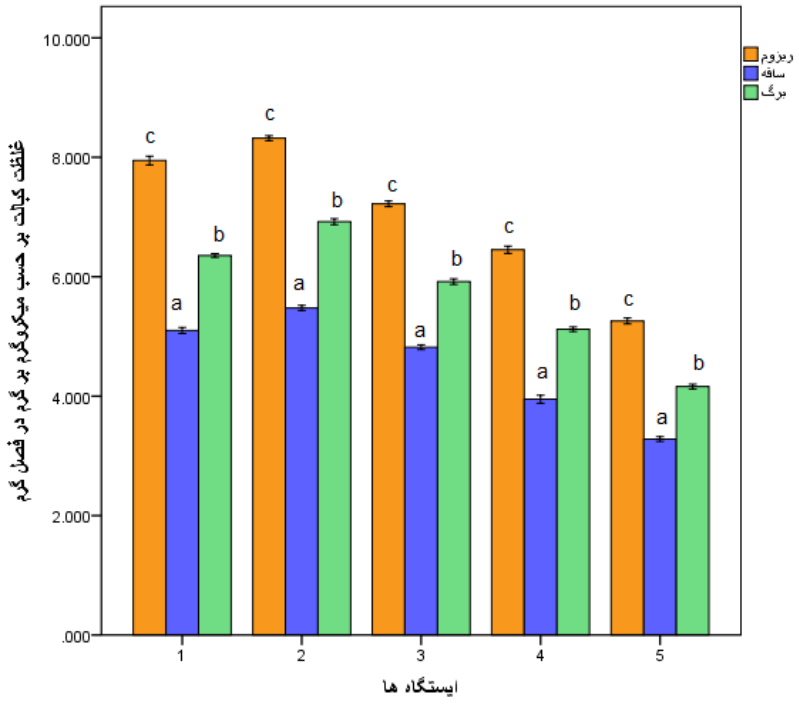


شکل ۶- مقایسه غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل سرد رودخانه بهمنشیر

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

میانگین غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در ایستگاه‌اول (کانال ژیان) در فصل گرم، به‌ترتیب ۰/۰۲۹± ۷/۹۴۶ ، ۰/۰۲± ۵/۱۲ و ۰/۰۱۲± ۶/۳۵۶ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بیشترین غلظت کبالت در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) مشاهده شد؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در ایستگاه دوم ترتیب ۰/۰۱۷± ۸/۳۱۹ ، ۰/۰۱۷± ۵/۴۷۷ و ۰/۰۲± ۶/۹۲۲ میکروگرم بر گرم ثبت شد (شکل ۷).

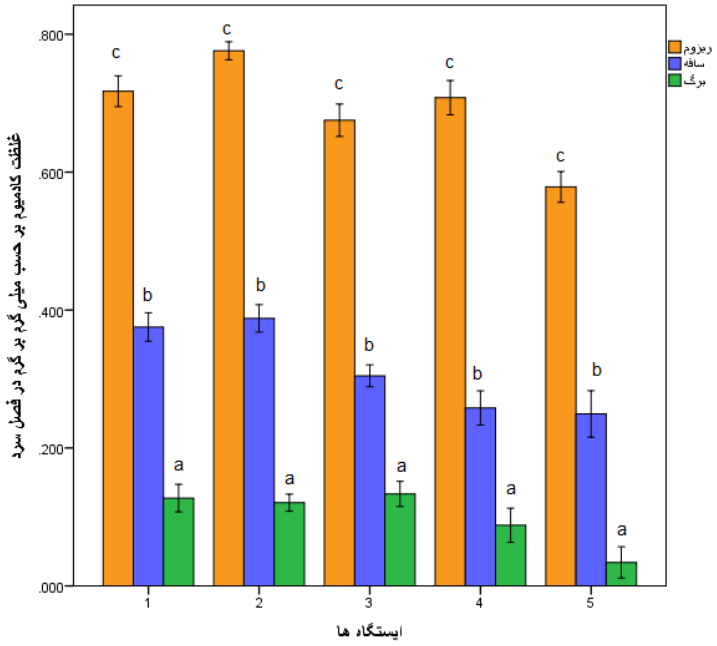
میانگین غلظت کبالت در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به‌ترتیب ۰/۰۱۹± ۷/۲۲ ، ۰/۰۱۶± ۴/۸۲ و ۰/۰۱۹± ۵/۹۱۹ میکروگرم بر گرم و در ایستگاه چهارم (محدوده چوئبده) به‌ترتیب ۰/۰۲۴± ۶/۴۵ ، ۰/۰۲۷± ۳/۹۴۹ و ۰/۰۱۵± ۵/۱۲۱ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. در ایستگاه‌پنجم میانگین غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۲۱± ۵/۲۵۹ ، ۰/۰۱۶± ۳/۲۸۲ و ۰/۰۱۶± ۴/۱۶۱ میکروگرم بر گرم ثبت شد. بین میانگین غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در فصل گرم، در ایستگاه دوم (احمدآباد) با سایر ایستگاه‌ها تفاوت معنی‌داری را نشان داد ($p < 0.05$, ANOVA) (شکل ۷). نتایج ANOVA سه‌عاملی نشان داد که اثر ایستگاه، فصل و اندام بر غلظت کبالت معنی‌دار است ($p<0.05$) و ایستگاه دوم در هر دو فصل به‌طور معنی‌داری غلظت بالاتری نسبت به بیشتر ایستگاه‌ها داشت ($p<0.05$).



شکل ۷- مقایسه غلظت کبالت در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل گرم رودخانه بهمنشیر

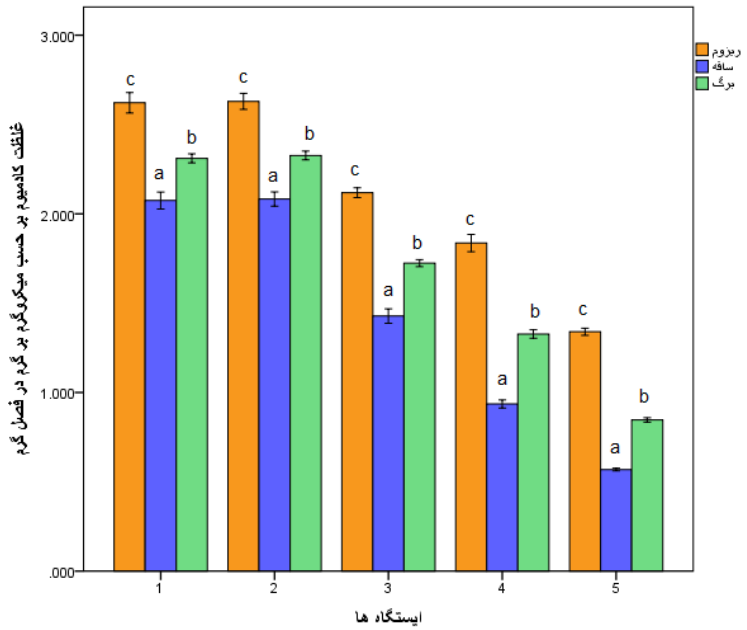
با توجه به شکل (۸) بین میانگین غلظت کادمیوم، در ایستگاه اول (کانال‌ژیان) و چهارم (محدوده چوئبده) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($p > 0.05$, ANOVA). میانگین غلظت کادمیوم در ایستگاه اول در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۰۹± ۰/۷۱۷ ، ۰/۰۰۸± ۰/۳۷۵ و ۰/۰۰۸± ۰/۱۲۷ و هم‌چنین میانگین آن در ایستگاه‌چهارم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱± ۰/۷۰۸ ، ۰/۰۱± ۰/۲۵۸ و ۰/۰۱± ۰/۰۸۸ میکروگرم بر گرم ثبت شد. بیشترین میانگین غلظت کادمیوم مربوط به ایستگاه دوم (احمدآباد) بوده، به طوری‌که میانگین آن در ایستگاه دوم در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis sp* ، به‌ترتیب ۰/۰۰۵± ۰/۷۷۶ ، ۰/۰۰۸± ۰/۳۸۸ و ۰/۰۰۵± ۰/۱۲ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]



شکل ۸- مقایسه غلظت کادمیوم در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل سرد رودخانه بهمنشیر

میانگین غلظت کادمیوم در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ گیاه‌پتاموژتون به‌ترتیب ۰/۰۰۹ ±۰/۶۷۵ ، ۰/۰۰۶ ±۰/۳۰۴ و ۰/۰۰۷ ±۰/۱۳۳ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. کمترین مقدار غلظت کادمیوم ایستگاه ۵ (چوئبده) مشاهده شد؛ که میانگین آن در ایستگاه‌پنجم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۰۳ ±۰/۸۱۶ ، ۰/۰۰۸ ±۰/۴۳۴ و ۰/۰۰۵ ±۰/۱۸۵ میکروگرم بر گرم ثبت شد (شکل ۸). با توجه به شکل (۹) بیشترین میانگین غلظت کادمیوم در گیاه *Potamogeton filiformis sp* در فصل گرم، مربوطه به ایستگاه اول و دوم بوده، بین میانگین غلظت کادمیوم در ایستگاه اول (کانال‌ژیان) و دوم (احمدآباد) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد ($p > 0.05$, ANOVA). میانگین غلظت کادمیوم در ایستگاه اول در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون، به‌ترتیب ۰/۰۲۳ ±۲/۶۲۲ ، ۰/۰۰۸ ±۲/۰۷۴ و ۰/۰۱ ±۲/۳۱ و هم‌چنین میانگین آن در ایستگاه دوم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۱۸ ±۲/۶۲۹ ، ۰/۰۱۶ ±۲/۰۸۲ و ۰/۰۰۹ ±۲/۳۲۴ میکروگرم بر گرم ثبت شد.

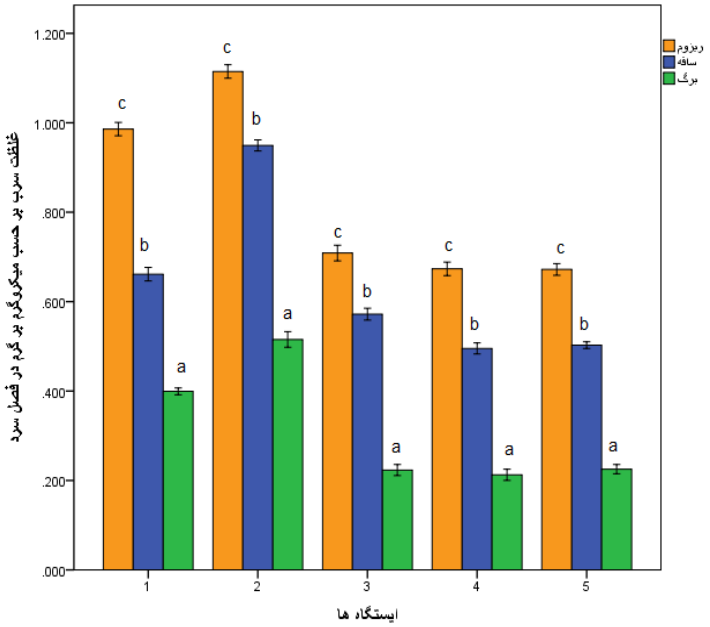


شکل ۹- مقایسه غلظت کادمیوم در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل گرم رودخانه بهمنشیر

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

میانگین غلظت کادمیوم در ایستگاه‌سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ گیاه‌پتاموژتون به‌ترتیب ۰/۰۱۱± ۲/۱۱۸ ، ۰/۰۱۶± ۱/۴۲۸ و ۰/۰۰۸± ۱/۷۲ میکروگرم بر گرم و در ایستگاه چهارم (محدوده چوئبده) به‌ترتیب ۰/۰۱۹± ۱/۸۳۶ ، ۰/۰۰۹± ۰/۹۳۶ و ۰/۰۰۹± ۱/۳۲۷ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. کمترین مقدار غلظت کادمیوم ایستگاه ۵ (چوئبده) مشاهده شد؛ که میانگین آن در ایستگاه‌پنجم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۰۵± ۰/۸۴۶ ، ۰/۰۰۳± ۰/۵۶۸ و ۰/۰۰۸± ۱/۳۴ میکروگرم بر گرم ثبت شد (شکل ۱۰). تحلیل آماری سه‌عاملی نشان داد که اثر فصل بر غلظت کادمیوم معنی‌دار است (p<۰.۰۵)، در حالی‌که برخی برهم‌کنش‌ها مانند ایستگاه × اندام برای کادمیوم در سطح معنی‌داری مرزی قرار داشتند.

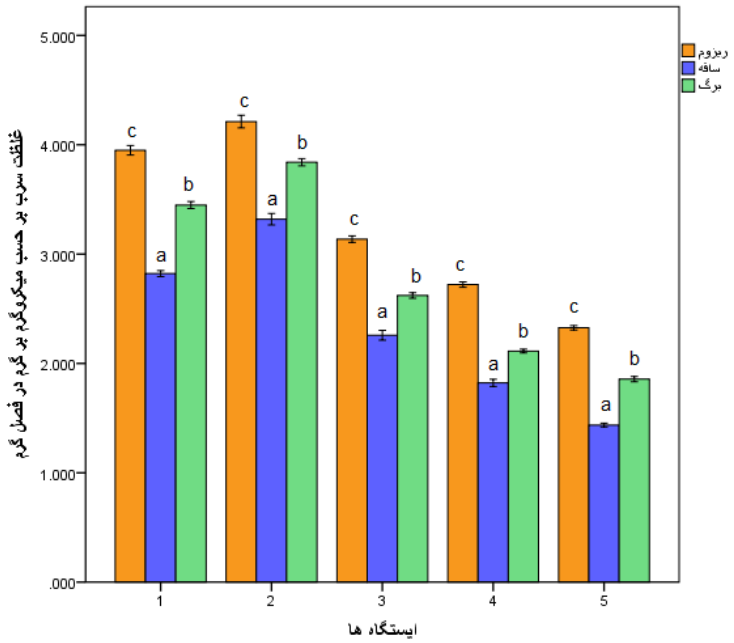
میانگین غلظت سرب در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *P. filiformis* در ایستگاه‌اول (کانال ژیان)، به‌ترتیب ۰/۰۰۶± ۰/۹۸۶ ، ۰/۰۰۶± ۰/۶۶۱ و ۰/۰۰۳± ۰/۳۹۹ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بیشترین غلظت سرب در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) مشاهده شد؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ گیاه‌پتاموژتون به‌ترتیب ۰/۰۰۶± ۱/۱۱۴ ، ۰/۰۰۵± ۰/۹۴۹ و ۰/۰۰۷± ۰/۵۱۵ میکروگرم بر گرم ثبت شد. بین میانگین غلظت سرب در ایستگاه‌سوم (سده) و چهارم (محدوده چوئبده) و پنجم (چوئبده) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد($p > 0.05$, ANOVA) (شکل ۱۰). میانگین غلظت سرب در ایستگاه سوم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۰۷± ۰/۷۰۸ ، ۰/۰۰۵± ۰/۵۷۲ و ۰/۰۰۵± ۰/۲۲۳ ، در ایستگاه چهارم در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۰/۰۰۶± ۰/۶۷۳ ، ۰/۰۰۵± ۰/۴۹۵ و ۰/۰۰۵± ۰/۲۱۲و هم‌چنین میانگین آن در ایستگاه‌پنجم به‌ترتیب ۰/۰۰۵± ۰/۶۷۲ ، ۰/۰۰۳± ۰/۵۰۲ و ۰/۰۰۴± ۰/۲۲۵ میکروگرم بر گرم ثبت شد.



شکل ۱۰- مقایسه غلظت سرب در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل سرد رودخانه بهمنشیر

میانگین غلظت سرب در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *P. filiformis* در فصل گرم، در ایستگاه‌اول (کانال ژیان)، به‌ترتیب ۰/۰۱۷± ۳/۹۴۹ ، ۰/۰۱۱± ۲/۸۲۲ و ۰/۰۱۳± ۳/۴۴۸ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. بیشترین غلظت سرب در ایستگاه‌دوم (احمدآباد) مشاهده شد؛ به طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ گیاه‌پتاموژتون به‌ترتیب ۰/۰۲۳± ۴/۲۱۲ ، ۰/۰۲۱± ۳/۳۱۸ و ۰/۰۱۳± ۳/۸۴ میکروگرم بر گرم ثبت شد (شکل ۱۱).

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]



شکل ۱۱- مقایسه غلظت سرب در ریزوم، ساقه و برگ گیاه *Potamogeton filiformis* در فصل گرم رودخانه بهمنشیر

میانگین غلظت سرب در ایستگاه سوم (سده) در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون به‌ترتیب ۳,۱۳۸±۰,۰۱۲، ۲,۲۵۸±۰,۰۱۸ و ۲,۶۲۱±۰,۰۱۰ میکروگرم بر گرم و در ایستگاه چهارم (محدوده چوئبده) به‌ترتیب ۲,۷۲۱±۰,۰۱۰، ۱,۸۲۰±۰,۰۱۳ و ۲,۱۱۳±۰,۰۰۷ میکروگرم بر گرم به‌دست آمد. کمترین مقدار غلظت کادمیوم در ایستگاه پنجم مشاهده شد؛ به‌طوری‌که میانگین آن در ریزوم، ساقه و برگ به‌ترتیب ۲,۳۲۶±۰,۰۰۸، ۱,۴۳۶±۰,۰۰۷ و ۱,۸۵۶±۰,۰۰۹ میکروگرم بر گرم ثبت گردید. نتایج نشان داد که غلظت سرب و کادمیوم در برخی ایستگاه‌ها بالاتر از حدود طبیعی گزارش‌شده برای گیاهان آبزی و استانداردهای پیشنهادی سازمان جهانی بهداشت (WHO) و FAO بوده است که می‌تواند بیانگر تأثیر فعالیت‌های انسانی و ورود آلاینده‌ها به رودخانه بهمنشیر باشد. همچنین بین میانگین غلظت سرب در ریزوم، ساقه و برگ گیاه پتاموژتون در فصل گرم، در ایستگاه دوم (احمدآباد) با سایر ایستگاه‌ها تفاوت معنی‌داری مشاهده شد (ANOVA, $p < 0,05$) (شکل ۱۱).

بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تجمع فلزات سنگین در گیاه *Potamogeton filiformis* به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر عوامل چندگانه شامل ایستگاه، فصل و اندام گیاهی قرار دارد ($p < 0,05$). این یافته با مطالعات اخیر که بر اثرات هم‌زمان عوامل مکانی و زمانی بر الگوی زیست‌انباشتگی فلزات تأکید دارند، همخوانی دارد (Singh et al., 2025; Bhat et al., 2022; Li et al., 2022). بیشترین غلظت نیکل، مس و سرب در ایستگاه دوم (احمدآباد) ثبت شد. این الگو نشان‌دهنده فشار آلودگی بالاتر در این محدوده است که احتمالاً ناشی از ورود فاضلاب شهری، فعالیت‌های بندری، تعمیر شناورها و رواناب‌های کشاورزی است. مطالعات انجام‌شده در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای مشابه نشان داده‌اند که مناطق پایین‌دست شهری و صنعتی معمولاً غلظت بالاتری از فلزات سنگین را در آب، رسوبات و گیاهان آبزی نشان می‌دهند (Zhang et al, 2020; Zhang et al, 2021). بنابراین، الگوی مشاهده‌شده در رودخانه بهمنشیر با روند جهانی توزیع مکانی فلزات در اکوسیستم‌های تحت فشار انسانی مطابقت دارد.

نتایج نشان داد که غلظت نیکل و مس در فصل گرم افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند ناشی از کاهش دبی رودخانه، افزایش تبخیر و تمرکز بیشتر یون‌های فلزی در ستون آب باشد. مطالعات جدید نیز نشان داده‌اند که در دوره‌های کم‌آبی، غلظت فلزات سنگین در آب و رسوبات افزایش یافته و در نتیجه میزان جذب توسط گیاهان آبزی بیشتر می‌شود (Ebere et al., 2023;). علاوه بر این،

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

افزایش فعالیت متابولیک گیاهان در فصل گرم می‌تواند منجر به افزایش جذب عناصر شود (Fashola et al., 2016; Bhat et al., 2022). در هر دو فصل، بیشترین تجمع فلزات در ریزم مشاهده شد، در حالی که اندام‌های هوایی (ساقه و برگ) مقادیر کمتری را نشان دادند. این الگو با مکانیسم‌های فیزیولوژیک گیاهان آبزی مطابقت دارد؛ به‌طوری‌که ریزوم‌ها به‌دلیل تماس مستقیم با رسوبات و نقش آن‌ها در تبادل یونی، محل اصلی تجمع فلزات محسوب می‌شوند. مطالعات متعددی نیز گزارش کرده‌اند که در گونه‌های مختلف *Potamogeton* و سایر ماکروفیت‌های آبزی، ریشه و ریزوم مهم‌ترین بخش در زیست‌انباشتگی فلزات هستند (Sasmaz et al., 2008; Matache et al., 2013; Li et al., 2022).

تغییر الگوی اندامی نیکل از «ریزم > ساقه > برگ» در فصل سرد به «ریزم > برگ > ساقه» در فصل گرم نشان می‌دهد که عوامل فیزیولوژیک و شرایط محیطی می‌توانند در توزیع درون‌گیاهی فلزات نقش داشته باشند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که در شرایط تنش فلزی، انتقال فلزات به برگ‌ها ممکن است افزایش یابد که می‌تواند با مکانیسم‌های تنظیمی و ذخیره‌سازی در واکوئل‌ها مرتبط باشد (Huang et al., 2024; Bhat et al., 2022; Lan et al., 2010). در میان عناصر بررسی‌شده، نیکل و مس بیشترین میزان تجمع را نشان دادند. مس به‌عنوان یک عنصر ضروری در فرآیندهای آنزیمی و فتوسنتزی نقش دارد، اما در غلظت‌های بالا می‌تواند سمیت ایجاد کند. افزایش تجمع مس در فصل گرم می‌تواند با افزایش فعالیت‌های متابولیکی گیاه مرتبط باشد (Fashola et al., 2016; Norouznia and Hamidian., 2014). کبالت و سرب نیز الگوی تجمع مشابهی با نیکل نشان دادند، در حالی که کادمیوم کمترین مقدار را داشت. پایین بودن غلظت کادمیوم در این مطالعه با یافته‌های سایر پژوهش‌ها در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای همخوانی دارد (Ali et al, 2013; Wang and Chadwik, 2024). با این حال، حتی مقادیر پایین کادمیوم نیز به‌دلیل سمیت بالا از نظر اکولوژیک حائز اهمیت هستند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که *Potamogeton filiformis* دارای ظرفیت بالایی در تجمع فلزات سنگین، به‌ویژه در ریزوم، است و می‌تواند به‌عنوان شاخص زیستی (Bioindicator) مناسب برای پایش آلودگی فلزی در رودخانه بهمنشیر مورد استفاده قرار گیرد. مطالعات جهانی نیز نقش گونه‌های جنس *Potamogeton* و سایر ماکروفیت‌ها را در فرآیند گیاه‌پالایی (*Phytoremediation*) تأیید کرده‌اند (Bai et al., 2018; Rai, 2020; Li et al., 2022). به‌طور کلی، نتایج این مطالعه با روندهای گزارش‌شده در مطالعات بین‌المللی همخوانی دارد و نشان می‌دهد که تغییرات مکانی و فصلی در کنار ویژگی‌های فیزیولوژیک اندام‌های مختلف گیاه، الگوی تجمع فلزات سنگین را کنترل می‌کنند.

نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه *Potamogeton filiformis* توانایی قابل‌توجهی در تجمع فلزات سنگین نیکل، مس، کبالت، سرب و کادمیوم دارد و الگوی زیست‌انباشتگی آن به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر ایستگاه، فصل و اندام گیاهی قرار می‌گیرد. بیشترین تجمع فلزات در ریزم مشاهده شد که بیانگر نقش مهم این اندام در جذب و ذخیره عناصر سنگین و تماس مستقیم آن با رسوبات است. ایستگاه دوم بیشترین میزان آلودگی را نشان داد که به‌احتمال زیاد ناشی از فشارهای انسانی و ورود پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی است. افزایش غلظت برخی فلزات در فصل گرم نیز بیانگر اثر کاهش دبی و افزایش تمرکز املاح در دوره‌های کم‌آبی است. تعیین الگوهای تجمع مکانی، زمانی و اندامی نشان می‌دهد که *Potamogeton filiformis* می‌تواند به‌عنوان یک شاخص زیستی مؤثر برای پایش آلودگی فلزی رودخانه بهمنشیر و اکوسیستم‌های مشابه معرفی شود. توانایی بالای این گونه در انباشت فلزات سنگین، به‌ویژه در بخش‌های زیرزمینی، همچنین قابلیت بالقوه آن را برای استفاده در گیاه‌پالایی تقویت می‌کند. به‌طور کلی، این یافته‌ها تصویری روشن از وضعیت آلودگی فلزی منطقه ارائه می‌دهند و می‌توانند مبنایی کاربردی برای مدیریت زیست‌محیطی و ارزیابی ریسک در اکوسیستم‌های آبی فراهم کنند.

منابع

Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A. 2013. Phytoremediation of heavy metals concepts and applications. Chemosphere, 91(7), 869-881.

Asha, P.S., Krishnakumar, P.K., Kaladharan, P., Prema, D., Diwakar, K.,Valsalaand, K.K.G., 2010. Heavy metal conc-entration in sea water, sediment and bivalves off Tuticorin. Journal Marine Biology Association, 52(1): 48-54.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

ecosystems. Ecotoxicology and Environmental Safety, 155, 160–167.

Liu, Y., Zhang, T., Sun, G. 2025. Seasonal variation of heavy metal accumulation in aquatic macrophytes in river ecosystems. Ecological Indicators.

MacFarlane, G.R., Burchett, M.D. 2020. Toxicity, growth and accumulation relationships of copper, lead and zinc in the grey mangrove Avicennia marina (Forsk.). Environmental Pollution, 266, 115090.

Matache, M.L., Marin, C., Rozylowicz, L., Tudorache, A. 2013. Plants accumulating heavy metals in the Danube River wetlands. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 11(1), 39.

Norouznia, H., Hamidian, A.H. 2014. Phytoremediation efficiency of pondweed (*Potamogeton crispus*) in removing heavy metals (Cu, Cr, Pb, As and Cd) from water of Anzali wetland. International Journal of Aquatic Biology, 2, 107-113.

Perfus-Barbeoch, L., Leonhardt, N., Vavasseur, A., Forestier, C. 2002. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status. The Plant Journal, 32(4), 539-548.

Rai, P. K. 2020. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: An eco-sustainable approach. Environmental Skeptics and Critics, 9(1), 1–8.

Rebak, R.B., Bunker, R. S., Kool, L.B., Lipkin, D. M., McDermott, J. B., Ritter, A. M., Rohling, R. B. 2013. *U.S. Patent No. 8,528,208*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Sasmaz, A., Öbek, E., Hasar, H. 2008. The accumulation of heavy metals in Typha latifolia L. grown in a stream carrying secondary effluent. Ecological Engineering 33(3):278-284

Singh, J., Kalamdhad, A.S. 2022. Bioaccumulation of metals in aquatic plants: Mechanisms and applications for water quality assessment. Journal of Environmental Management, 301, 113816.

Singh, P.,Sharma, A.K., Sardar Khan, A., Verma, J., Srivastava, P. 2025. A review of phytoremediation of heavy metals using macrophytes: mechanisms, efficacy, and future prospects. Ijraset Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology.

Ayangbenro, A.S., Babalola, O.O. 2017. A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents. International journal of environmental research and public health, 14(1), 94.

Bai, L., Liu, X., Hu, J., Liu, C.Q. 2018. Heavy Metal Accumulation in Common Aquatic Plants in Rivers and Lakes in the Taihu Basin. International Journal of Environmental Research and Public Health (IJERPH) 15(12):2857

Bhat, S.A., Bashir, O., Haq, S.A., Amin, T., Rafiq, A., Mudasir., Sher, F. 2022. Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. Chemosphere, 303, 134788.

Chen, Y., Liu, X., Zhang, H. 2025. Uptake and tissue distribution of heavy metals in aquatic macrophytes: Implications for biomonitoring of freshwater ecosystems. Environmental Pollution.

Ebere, E.C., Ohiago, F.C., Obidike, B.M., Isiuku, B. O., Ihenetu, S. C. 2023. Phytoremediation of Heavy Metals and Organic Pollutants using Aquatic Macro-and Microphytes. World

Fashola, M., Ngole-Jeme, V., Babalola, O. 2016. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13, 1047.

Gupta, A., Rico-Medina, A., Caño-Delgado A.I. 2020. The physiology of plant responses to drought. Science, 368:266–269.

Huang, Y., Liu, C., Zhou, W. 2024. Comparative uptake of heavy metals by submerged macrophytes under different hydrological regimes. Science of the Total Environment, 894, 164274.

Lan, X., Zhang, Y., and Li, Z. 2010. Heavy metal accumulation in aquatic macrophytes. Environmental Monitoring and Assessment, volume37,

Lan, Y., Cui, B., Li, X., Han, Z., Dong, W., 2010. The determinants and control measures of the expansion of aquatic macrophytes in wetlands. Procedia Environmental Sciences 2: 1643–1651.

Li, H., Zhang, Q., Zhou, Y. 2022 . Spatial and seasonal variations of heavy metals in water, sediment, and macrophytes of river

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]

Sparks, D.L., Fendorf, S. E., Toner, C. V., Carski, T.H. 1996. Kinetic methods and measurements. Soil Science, 1275-1307.

Wang, L., Zhou, Q., Chen, Y. 2024. Distribution of heavy metals in different tissues of submerged macrophytes. Chemosphere.

Wang, Y., Chadwik, M.A. 2024. The Assessment of Heavy Metal Accumulation and Risks in Urban Rivers and Sediments of China's Nine Major River Systems: A Meta-Analysis. Environmental Processes, 11, 43.

Zhang, T., Liu, Y., Sun, G. 2024. Role of aquatic plants in phytoremediation of heavy metal polluted waters. Journal of Hazardous Materials

Zhang, W., Wang, Y., Yang, H. 2020. Rhizome-based metal accumulation in submerged plants: A key indicator for sediment contamination. Hydrobiologia, 847, 1561–1574.

Zhang, X., Li, S., Wang, Y. 2021. Bioaccumulation and translocation of heavy metals in submerged macrophytes: Implications for biomonitoring. Chemosphere, 262, 127973.

[Downloaded from pec.gonbad.ac.ir on 2026-11-22]