

سنجش فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی در منابع تأمین (رودخانه‌های کارون و دز) و خروجی‌های تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵ اهواز

طیبه باقری لطف‌آباد^{۱*}، نغمه عروجی^۲، غلامرضا رئیسی^۳، افشین حاتمی^۴ و امیرحسین افقری^۵

چکیده

فلزات سنگین تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط‌زیست هستند. این مطالعه، فلزات سنگین در تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵ اهواز، که آب آن‌ها از رودخانه‌های کارون و دز تأمین می‌شود، را مورد ارزیابی قرار داد. نمونه‌برداری در زمستان ۱۴۰۱ و تابستان ۱۴۰۲ از ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌ها و چند نقطه از شبکه توزیع آب اهواز انجام شد. غلظت فلزات با استفاده از دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری و با استانداردهای آب آشامیدنی مقایسه گردید. شاخص‌های کلیدی آلودگی فلزات، برای ارزیابی کیفیت آب برآورد گردیدند. نتایج نشان داد که فلزات Ag، As، Cd، Co، Hg، Pb، Sb و Sn در نمونه‌ها یافت نشد. غلظت Ba، Cr، Cu، Mn، Mo، Ni و Zn زیر حد مجاز بود و غلظت این فلزات با $p < 0.05$ در زمستان بیشتر از تابستان بود. نتایج نشان داد که تصفیه‌خانه‌های آب در حذف Cr، Ni، Mn و Ti مؤثر بودند، اما در حذف Ba و Mo کارایی مناسبی نداشتند. وجود Cu و Fe در برخی نقاط شبکه توزیع احتمالاً به دلیل خوردگی لوله‌ها است، اگرچه غلظت آن‌ها کمتر از مقدار مجاز استاندارد بود ($p < 0.05$). غلظت Al، در آب ورودی یا خروجی برخی از تصفیه‌خانه‌ها بیش از مقدار مجاز استاندارد بود، که می‌تواند مربوط به آزاد شدن زائدات معدنی در اثر بروز رگبارها و منابع غیرنقطه‌ای یا مواد منعقدکننده مصرفی در طی فرایند تصفیه باشد. در بیشتر موارد HPI کمتر از ۱۰۰ (شاخص آلودگی فلزات سنگین) و HEI کوچکتر از ۱۰ (شاخص ارزیابی فلزات سنگین) بود که بیانگر سطوح آلودگی پایین و مناسب بودن فرایند تصفیه‌خانه‌ها است اما HEI آب ورودی تصفیه‌خانه‌های ۳، ۴ و ۵ در زمستان، بالا بود. با توجه به $MI > 1$ (شاخص فلزات) و $C_d > 3$ (درجه آلودگی) در جریان‌های ورودی غالب تصفیه‌خانه‌ها، آب پیش از تصفیه به لحاظ استاندارد وجود فلزات، مناسب نیست. همچنین، مقادیر بزرگتر از یک MI در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها، به Fe و Al که ناشی از مصرف بالای منعقدکننده‌ها در تصفیه‌خانه‌ها است، نسبت داده می‌شود؛ بنابراین بایستی پایش مستمر و بهینه‌سازی فرایندهای تصفیه مورد توجه قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، شاخص‌های آلودگی، کارون، دز، اهواز.

ارجاع: باقری لطف‌آباد ط.، عروجی ن.، رئیسی غ.، حاتمی ا. و افقری ا. ح. ۱۴۰۳. سنجش فلزات سنگین و شاخص‌های آلودگی در منابع تأمین (رودخانه‌های کارون و دز) و خروجی‌های تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵ اهواز. مجله پژوهش آب ایران. ۵۵: ۴۳-۵۱.
<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2024.14889.2625>

۱- دانشیار، پژوهشکده زیست فناوری صنعت و محیط زیست، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری، تهران، ایران.

۲- پژوهشگر پسادکتری، مرکز تحقیقات فن آوری‌های زیست محیطی، انستیتو تحقیقات علوم پایه پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور اهواز، اهواز، ایران.

۳- دکتری، شرکت آب و فاضلاب اهواز، اهواز، ایران.

۴- پژوهشگر کارشناسی ارشد، پژوهشکده زیست فناوری صنعت و محیط زیست، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: bagheril@nigeb.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

مقدمه

با وجود منابع مختلف آب روی کره زمین، تنها کمتر از ۱ درصد از آن برای انسان قابل استفاده است. از طرفی، برای حفظ حیات و رشد فعالیت‌های انسانی، آب سالم و به میزان کافی مورد نیاز است. با این وجود، عوامل متعددی مانند رشد جمعیت، کشاورزی، صنعتی شدن، شهرنشینی و مدیریت نامناسب بر کیفیت آب تأثیر گذاشته و در برخی موارد آن را برای مصرف انسان نامناسب نموده است (Khaoulani et al., 2024).

فلزات سنگین مانند Pb, Zn, Cr, As و Cd در سیستم‌های زیست محیطی تجمع می‌یابند و غلظت آن‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. این فلزات از طریق آب آشامیدنی، هوا و مواد غذایی آلوده وارد بدن انسان می‌شوند. سپس به تدریج در بافت چربی، ماهیچه‌ها، استخوان‌ها و مفاصل رسوب کرده و تجمع می‌یابند. فلزات سنگین باعث تجزیه آنزیم‌ها و از دست دادن قدرت آنزیمی آن‌ها می‌شوند و در نتیجه اثرات نامطلوبی بر اندام‌های زنده می‌گذارند. بر اساس مطالعات اپیدمیولوژیک، بین فلزات سنگین و مسائل بهداشتی مانند پوسیدگی دندان، بیماری‌های قلبی، اختلالات کلیوی و عصبی و انواع مختلف سرطان ارتباط وجود دارد. این فلزات در مقادیر بالا می‌توانند باعث اختلالات مورفولوژیکی، تأخیر در رشد، افزایش مرگ و میر و اثرات ژنتیکی در انسان شوند (ParsiMehri et al., 2020). از این‌رو، اندازه‌گیری دقیق غلظت فلزات سنگین و پایش و نظارت منظم کیفیت آب امری ضروری است، زیرا افزایش غلظت این فلزات در آب رودخانه‌ها تهدیدی جدی برای سلامت انسان و موجودات زنده به شمار می‌رود (Khan et al., 2023).

از آنجا که حوضه رودخانه کارون-دز، قطب پرورش ماهی در جنوب محسوب می‌شود و همچنین آب شرب ده‌ها شهر و روستا را تأمین می‌نماید، توجه به کیفیت آب آن از اهمیت بالایی برخوردار است. به ویژه به دلیل وجود کشتیرانی در این آب‌ها و حضور صنایع متعدد فلزی، پتروشیمی و نفت در کناره‌های آن، دغدغه نظارت بر غلظت فلزات سنگین در این آب‌ها را تشدید می‌نماید (Diagomanolin et al., 2004; Ebadati, 2017). (2007) Savari et al. در مطالعه‌ای وجود فلزات سنگین Pb, Cd, Cu, Zn, Fe و منگنز در نمونه‌های مربوط به شبکه توزیع

آب شهر اهواز را گزارش نموده‌اند. نتایج ایشان نشان داد که شبکه‌های آب شهری اهواز، دارای پتانسیل خوردگی و نشت این فلزات به درون آب آشامیدنی هستند. (2013) Babapour mofrad et al. غلظت فلزات سنگین کبالت، نیکل، کادمیوم، سرب و وانادیوم را در آب رودخانه‌های کارون و دز بررسی و گزارش کردند که بیشترین میزان Pb و Cd در ایستگاه سد گتوند، بیشترین میزان V و Co در ایستگاه کارون- بندقیق وجود دارد؛ ضمن اینکه تغییرات میزان نیکل روند مشخصی در طول ایستگاه‌ها نداشت. (2014) Ghasemi and Moazed طی گزارشی نتایج بررسی غلظت‌های کادمیوم، سرب و روی در رسوبات بستر رودخانه دز و آب اطراف زمین‌های کشاورزی را بررسی کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که سطوح فلزات سنگین برای کادمیوم، سرب و روی در نمونه‌های رسوب و آب، کمتر از استانداردهای بین‌المللی WHO است.

با توجه به اهمیت موضوع، در این مطالعه غلظت فلزات Ag, Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, Ti, V و Zn در رودخانه‌های کارون و دز سنجش شد. همچنین، خروجی‌های تصفیه‌خانه‌ها و شش منطقه توزیع نیز مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، مقایسه سطح فلزات با استانداردهای بهداشتی ملی و جهانی انجام و کیفیت آب به لحاظ آلودگی فلزات سنگین با استفاده از شاخص‌های معتبر جهانی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، رودخانه کارون و دز در استان خوزستان را در برمی‌گیرد. به دلیل وسعت بالای این مجموعه و اهمیت بالایی که کیفیت آب رودخانه برای مصارف مختلف دارد، مقطعی از رودخانه که محل آبگیر تصفیه‌خانه‌های آب شرب شهرستان‌های اهواز است به عنوان محدوده مطالعاتی مد نظر قرار گرفت. برای انجام مطالعه حاضر، تصفیه‌خانه‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ اهواز و شش نقطه از شبکه توزیع آب شهر اهواز بررسی شد که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

کیفیت کلی آب از نظر فلزات سنگین مطرح شده است (Eldaw *et al.*, 2020)، بر اساس معادلات (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود.

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

Q_i زیر شاخص i آمین پارامتر که برای هر پارامتر از معادله (۲) محاسبه می‌شود. n تعداد پارامترهای در نظر گرفته شده است. W_i وزن واحد i آمین پارامتر، که با حداکثر مقدار مجاز S_i پارامتر مربوطه نسبت معکوس دارد و مطابق معادله (۳) تعیین می‌شود.

$$Q_i = \frac{|M_i - I_i|}{(S_i - I_i)} \times 100 \quad (2)$$

M_i مقدار غلظت اندازه‌گیری شده هر پارامتر در نمونه‌های آب است؛ I_i و S_i به ترتیب بالاترین مقدار مطلوب و حداکثر مجاز استاندارد پارامتر i ام را نشان می‌دهند. مقادیر I_i و S_i در محاسبات این پژوهش از استانداردهای ۱۰۵۳ و WHO اقتباس شده است. در مورد فلزات روی و Fe طبق رهنمودهای WHO قابل پذیرش بودن آب آشامیدنی توسط مصرف کننده به لحاظ ظاهر، رنگ و مزه مورد نظر است. بنابراین مقدار I_i و S_i برای فلز Fe به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳ میلی گرم بر لیتر و برای فلز روی، به ترتیب ۰/۵ و ۳ میلی گرم بر لیتر لحاظ می‌گردد. در مطالعه Eldaw (2020) *et al.* نیز، I_i و S_i برای فلزات Fe و Zn مشابه با همین مقادیر لحاظ گردیده است.

$$w_i \propto \frac{1}{S_i} = \frac{k}{S_i} = \frac{1}{S_i} \quad (3)$$

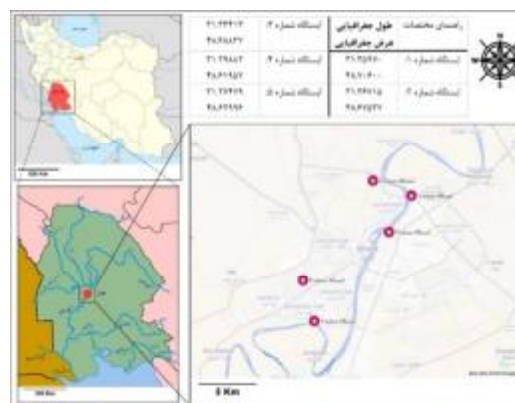
که در آن ضریب تناسب k برای تمام فلزات برابر با یک در نظر گرفته می‌شود.

شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI)

شاخص HEI مانند شاخص HPI کیفیت کلی آب را نسبت به فلزات سنگین نشان می‌دهد و با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود (Edet & Offiong, 2002).

$$HEI = \sum_{i=1}^n H_c / H_{mac} \quad (4)$$

در این معادله، H_c و H_{mac} به ترتیب غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت قابل پذیرش (MAC) پارامتر i ام می‌باشند (Edet & Offiong, 2002; Findik & Aras, 2023). مقادیر H_{mac} از مقالات (Edet *et al.*, 2023) و (Ndjama *et al.*, 2021) و نیز (Findik *et al.*, 2023) اقتباس گردید.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

عملیات نمونه‌برداری

نمونه‌برداری در دو فصل تر (زمستان ۱۴۰۱ و خشک (تابستان ۱۴۰۲) از آب ایستگاه‌های مشخص شده با سه تکرار انجام شد. نمونه‌ها داخل ظروف پلی‌اتیلنی اسیدشویی شده جمع‌آوری و غلظت فلزات در هر نمونه با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES مدل Varian 730-ES) تعیین شد (Reeve, 2006). نتایج با استفاده از نرم‌افزار GraphPad prism نسخه ۹ رسم و با سطوح استاندارد فلزات در آب آشامیدنی مطابق استانداردهای ملی ایران شماره ISIRI1053 (ISIRI 1053, 2010)، سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2008)، آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (US EPA, 2018) و استاندارد بهداشت کانادا (Health Canada, 2022) مقایسه گردید. همچنین، ترکیبات منعقدکننده و کمک منعقدکننده مصرفی در تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه در این تحقیق نیز به لحاظ مقدار فلزات Al و Fe ارزیابی شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

اختلاف غلظت فلزات سنگین در دو فصل تر و خشک با استفاده از آزمون T-test و به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۷ تجزیه و تحلیل شد.

محاسبه شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین

شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)

شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) که اولین بار در سال ۱۹۹۶ توسط Mohan *et al.* (1996) برای ارزیابی

شاخص فلز (MI)

شاخص فلزی (MI) برای ارزیابی تاثیر احتمالی مجموع آلودگی فلزات سنگین بر سلامت عمومی استفاده می‌شود و به تخمین سریع کیفیت کلی آب آشامیدنی کمک می‌کند (Astuti *et al.*, 2021; Tamasi & Cini, 2004). این شاخص به کمک معادله (۵) محاسبه می‌شود.

$$MI = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(MAC)_i} \quad (5)$$

در این معادله C_i غلظت فلز i ام و MAC_i حداکثر غلظت مجاز فلز i ام است (Badeenezhad *et al.*, 2023; Tamasi & Cini, 2004).

درجه آلودگی (C_d)

درجه آلودگی (C_d)، به طور جداگانه برای هر نمونه آب، محاسبه و تجزیه و تحلیل می‌شود و به صورت مجموع عوامل آلودگی اجزای مجزایی که حد بالای مقدار مجاز را رد می‌کنند، ارائه می‌گردد (Backman *et al.*, 1998; Ramadan *et al.*, 2024).

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi} \quad (6)$$

$$C_{fi} = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}} - 1 \quad (7)$$

در این معادله‌ها C_{fi} ضریب آلودگی برای جزء i ام، C_{Ai} مقدار اندازه‌گیری شده برای جزء i ام و C_{Ni} حد بالای غلظت مجاز برای جزء i ام است. N نشان‌دهنده "مقدار هنجاری" است (Backman *et al.*, 1998). عناصر و گونه‌های یونی با مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر از حد بالای غلظت مجاز آن، در محاسبه C_d در نظر گرفته نمی‌شوند (Backman *et al.*, 1998; Edet & Offiong, 2002). زیرا غلظت فلزات سنگین کمتر از این حد، هیچ مشکل خطرناکی برای کیفیت آب‌های زیرزمینی ایجاد نمی‌کند (Edet & Offiong, 2002).

نتایج و بحث

ارزیابی Fe و Al در منعقدکننده‌ها و کمک منعقدکننده‌ها

فلزات Fe و Al در منعقدکننده‌ها و کمک‌منعقدکننده‌های مصرفی در تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه در این تحقیق، سنجش و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که

نتایج نشان می‌دهد، میزان قابل توجهی Al و Fe در ترکیبات منعقدکننده‌ها وجود دارد که بهینه نبودن مقدار مصرفی این ترکیبات در تصفیه‌خانه‌ها می‌تواند منجر به بالا رفتن سطح فلزات Al و Fe در آب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها شود.

جدول ۱- غلظت فلزات Al و Fe در منعقدکننده‌ها و کمک منعقدکننده‌های مصرفی در تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه

Fe	Al	ترکیب منعقدکننده
۹۰۳	۸۹۶۱۹	پلی آلومینیوم کلراید مایع (ppm)
۲۰۱۰۶۵	۸۶	کلروفیک (ppm)
۱۴۰۰	۱۸۷۰۰۰	پلی آلومینیوم کلراید جامد (ppm)

تغییرات فصلی غلظت فلزات سنگین

غلظت فلزات اندازه‌گیری شده در نمونه‌های تهیه شده از آب خام ورودی به تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵ (علامت اختصاری Kh1 تا Kh5)، و آب خروجی از تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵ (علامت اختصاری T1 تا T5) و شش نقطه توزیع ۱ تا ۶ (علامت اختصاری Sh1 تا Sh6) که از آب خروجی از این تصفیه‌خانه‌ها تأمین می‌شوند، در نمودارهای شکل ۲ نمایش داده شده‌است. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که مقدار فلزات Ag, As, Cd, Co, Hg, Pb, Sb و Sn برای کلیه نمونه‌ها اعم از آب خام ورودی به تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه و آب خروجی از این تصفیه‌خانه‌ها و شش نقطه توزیع، در هر دو فصل تر و خشک، صفر بوده است. نتایج مربوط به فلزات Ba, Cr, Cu, Mn, Mo, Ni و Zn نیز نشان داد که مقدار این فلزات در کلیه نمونه‌های آب ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌ها و نقاط توزیع، در هر دو فصل تر و خشک کمتر از مقدار مجاز استاندارد است و غلظت این فلزات با $p < 0.05$ در فصل تر بیشتر از فصل خشک است. با وجود اینکه غلظت Ba و Mo در نمونه‌ها کمتر از مقدار مجاز استاندارد است، نتایج بیانگر این مطلب است که هیچ یک از تصفیه‌خانه‌های مورد مطالعه، توانایی حذف این دو فلز را نداشته‌اند. اما، عدم وجود Cr در آب خروجی از این تصفیه‌خانه‌ها بیانگر عملکرد مؤثر آن‌ها برای حذف فلز Cr بوده است و با توجه به آزمون-t test بین ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌ها با سطح احتمال ۹۵ درصد، اختلاف معنی‌دار ($p < 0.05$) مشاهده شد. نمودار فلز Cu نشان می‌دهد که با وجود عدم حضور Cu

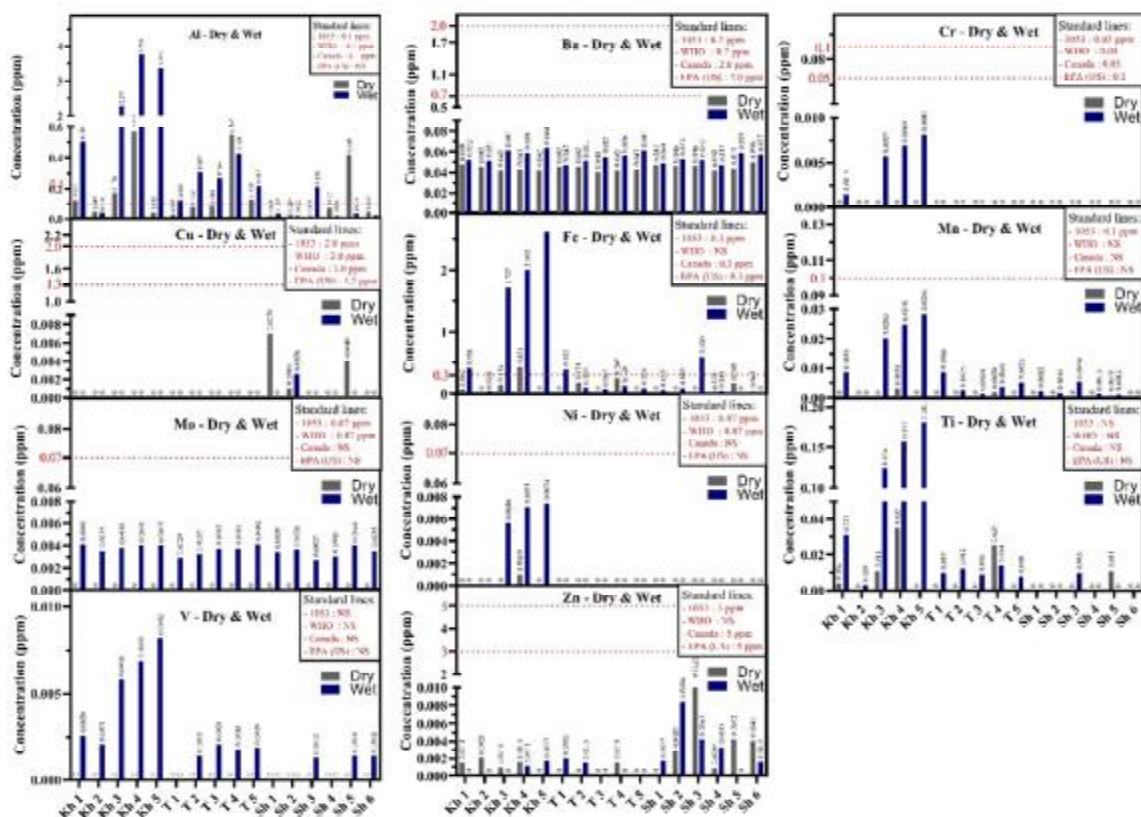
1- Metal index

2- Maximum allowable concentration

3- Contamination degree

از این تصفیه‌خانه‌ها بیانگر عملکرد مؤثر آن‌ها برای حذف فلزات Ti و V بوده است. همچنین، نتایج نشان داده‌اند که مقدار این فلزات در کلیه نمونه‌های آب ورودی و خروجی تصفیه‌خانه‌ها و نقاط توزیع، در هر دو فصل تر و خشک به ترتیب کمتر از ۰/۱۹ ppm و ۰/۰۰۹ ppm است. برای این فلزات در استانداردهای WHO، ۱۰۵۳، Canada و US EPA، مقدار مجاز بیان نشده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار فلز Al در نمونه‌های آب ورودی به تصفیه‌خانه‌های ۱، ۳ و ۴ در هر دو فصل تر و خشک با $p < 0.05$ بیش از مقدار مجاز استاندارد است. اما در آب ورودی تصفیه‌خانه ۵، اگرچه در فصل تر، میزان Al با $p < 0.05$ بیشتر از مقدار مجاز استاندارد است، اما در فصل خشک میزان این فلز کمتر از مقدار مجاز استاندارد می‌باشد. بالاتر بودن میزان Al در نمونه‌های فصل تر عمدتاً مربوط به آزاد شدن زائدات معدنی در اثر بروز رگبارها و منابع غیر نقطه‌ای است.

در آب خام ورودی و نیز آب خروجی از تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵، در نقاط توزیع Sh1، Sh2 و Sh5 که به ترتیب از تصفیه‌خانه‌های ۱، ۲ و ۴ آب می‌گیرند، فلز Cu مشاهده شده است، که البته میزان آن با $p < 0.05$ کمتر از مقدار مجاز استاندارد است. نمودار Mn، وجود منگنز را در آب خام ورودی به تصفیه‌خانه‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهد، اما کاهش منگنز در آب خروجی از این تصفیه‌خانه‌ها بیانگر عملکرد مؤثر آن‌ها برای حذف منگنز بوده است. نمودار Ni، وجود نیکل در آب خام ورودی به تصفیه‌خانه‌های ۱، ۳ و ۴ را نشان می‌دهد، که این امر، بیانگر ورود پساب به رودخانه کارون است که آب ورودی این تصفیه‌خانه‌ها را تأمین می‌نماید. اما، عدم وجود Ni در آب خروجی از این تصفیه‌خانه‌ها بیانگر عملکرد مؤثر آن‌ها برای حذف فلز Ni بوده است. نمودارهای Ti و V وجود تیتانیوم و وانادیوم را در آب ورودی تصفیه‌خانه‌های ۱، ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهد، اما کاهش این فلزات در آب خروجی



شکل ۲- میانگین توزیع فلزات Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Ti, V و Zn در نقاط نمونه‌برداری

و در هر دو فصل تر و خشک مقدار آن کمتر از مقدار مجاز استاندارد است، که بیانگر عملکرد مؤثر تصفیه‌خانه

غلظت Fe در آب خروجی این تصفیه‌خانه نسبت به ورودی آن، با $p < 0.05$ بطور معنی‌داری کاهش یافته است

برای حذف Fe می‌باشد؛ علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که غلظت Fe در آب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها بیشتر از مقدار مجاز استاندارد بوده که مربوط به آزاد شدن زائدات معدنی در اثر بروز رگبارها و منابع غیر نقطه‌ای می‌باشد. همچنین، غلظت Fe در نقاط توزیع کمتر از مقدار مجاز استاندارد است. فقط در نقطه توزیع Sh3 که از آب خروجی تصفیه‌خانه ۲ تغذیه می‌شود، در فصل تر، مقدار Fe بیشتر از مقدار مجاز استاندارد است که می‌تواند به دلیل پتانسیل خوردگی لوله‌های شبکه باشد. وجود Al در نمونه‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌ها به مواد منعقدکننده (پلی آلومینیوم کلراید جامد و مایع) که در طول فرایند تصفیه استفاده و منجر به آزادسازی مقادیری Al می‌شوند، مربوط می‌شود. میزان Al در آب خام ورودی تصفیه‌خانه شماره ۲، هم در فصل خشک و هم در فصل تر کمتر از حد استاندارد است که دلیل آن آگیری این تصفیه‌خانه از رودخانه دز است.

ارزیابی آلودگی ناشی از فلزات سنگین

شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) ابزار قدرتمندی برای ارزیابی سطح کلی آلودگی فلزات سنگین در آب‌های سطحی است (Badamasi et al., 2023). نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که HPI در کلیه ایستگاه‌ها و در هر دو فصل زمستان و تابستان کمتر از ۱۰۰ است. در مورد آب آشامیدنی، حداکثر مقدار مجاز HPI، ۱۰۰ و مقادیر کمتر از ۱۰۰ برای آشامیدن مناسب در نظر گرفته می‌شود (Eldaw et al., 2020).

علاوه بر این، شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI)، برای ایستگاه‌های مختلف محاسبه و در جدول ۲ نمایش داده شد. بر اساس تعریف، آلودگی فلزی برای HEI کمتر از ۱۰ پایین (مناسب برای آشامیدن)، بین ۱۰ تا ۲۰ حد متوسط (نامناسب برای آشامیدن) و بیشتر از ۲۰، بالا (نامناسب برای آشامیدن) در نظر گرفته شده است (Findik & Aras, 2023). بر این مبنا، با توجه به اینکه در کلیه نقاط بررسی شده، مقدار HEI کمتر از ۱۰ برآورد شده، به لحاظ کیفیت فلزات سنگین، آب برای شرب مناسب است. اما در فصل زمستان، آب ورودی به تصفیه‌خانه‌های شماره‌های ۳، ۴ و ۵ که از رودخانه کارون تأمین می‌شود مقدار HEI بالاتر از ۲۰ برآورد گردیده است، که این امر، عمدتاً مربوط به آزاد شدن زائدات

معدنی در اثر بروز رگبارها و منابع غیر نقطه‌ای در این فصل می‌باشد. لازم به توضیح است که در فصل زمستان، وجود سیلاب‌ها و طغیان رودخانه‌ها، سبب برهم خوردن رسوبات و لجن کف رودخانه‌ها شده و علاوه بر این، خاک‌های اطراف رودخانه شسته شده و املاح آن‌ها وارد آب رودخانه‌ها می‌گردد و منجر به بالا رفتن آلودگی فلزی آب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها می‌شوند.

همچنین، مقادیر شاخص فلزی (MI) تعیین و در جدول ۲ ارائه شده است. اگر غلظت یک عنصر خاص از مقدار MAC مربوطه بیشتر باشد، طبق استاندارد نمی‌توان از آب استفاده کرد. وجود چندین عنصر با غلظت‌های کوچک‌تر اما نزدیک به مقادیر MAC مربوطه نیز به دلیل اثر افزایشی، کیفیت کلی آب را کاهش می‌دهد.

بنابراین، مقدار $MI > 1$ یک آستانه هشدار است، حتی در موردی که برای همه عناصر $MAC_i < C_i$ باشد (Tamasi & Cini, 2004). داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که به جز ورودی تصفیه‌خانه شماره ۲، در نقاط توزیع Sh1، Sh2، Sh4 و Sh6 مقدار MI بیشتر از ۱ است. همچنین در بیشتر موارد در فصل زمستان مقدار MI جریان‌های ورودی و خروجی از تصفیه‌خانه بیشتر از فصل تابستان بوده است. بالا بودن MI در نمونه‌های خروجی از تصفیه‌خانه به مواد منعقدکننده‌ای (پلی آلومینیوم کلراید جامد و مایع) که در طول فرایند تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرند و منجر به آزادسازی مقادیری Al و Fe به آب می‌شوند، مربوط است. بالا بودن MI در جریان‌های ورودی در فصل تر می‌تواند به دلیل افزایش بارش‌ها و آزاد شدن زائدات معدنی در اثر بروز رگبارها و منابع غیر نقطه‌ای باشد. بررسی‌های بیشتر در نمودارهای شکل ۲ بیانگر این امر است که در غالب موارد غلظت Al و Fe در جریان‌های ورودی و خروجی از تصفیه‌خانه‌ها بیشتر از حد استاندارد (MAC) است و همین امر سبب بالا رفتن شاخص MI شده است. بالا بودن غلظت Al و Fe در جریان‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌های ۱ تا ۵ می‌تواند به دلیل مصرف ماده منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید باشد. به هر صورت، باید در زمینه کاهش غلظت فلزات Al و Fe در جریان‌های خروجی از تصفیه‌خانه‌ها برای رسیدن شاخص MI کمتر از ۱، تدابیری اندیشیده شود.

شاخص درجه آلودگی (C_d) نیز در نقاط مورد مطالعه ارزیابی شد و نتایج در جدول ۲ نمایش داده شده است.

رد می‌کنند محاسبه می‌شود (Backman *et al.*, 1998; Ramadan *et al.*, 2024)؛ لذا مقادیر C_d که بزرگتر از ۱ است، مربوط به شرایطی است که فلزاتی در آن نمونه وجود دارد که حد مجاز را رد کرده‌اند. طبق بررسی‌های انجام گرفته در شکل ۲، فلزات Al و Fe در برخی نمونه‌های مورد مطالعه حد مجاز استاندارد را رد کرده و سبب بالا رفتن شاخص C_d شده‌اند.

طبق تعریف درجه آلودگی برای مقادیر C_d کمتر از ۱ ($C_d < 1$)، کم، بازه بین ۱ تا ۳، متوسط و بیش از ۳، بالا، طبقه‌بندی می‌شود (Backman *et al.*, 1998; Ramadan *et al.*, 2024). به این ترتیب، بر اساس شاخص C_d جریان‌های ورودی تصفیه‌خانه‌های ۳، ۴ و ۵ با داشتن C_d خیلی بالاتر از ۳، در طبقه آلودگی بالا دسته‌بندی می‌شوند. از آنجا که شاخص C_d به عنوان شاخصی از مجموع عوامل آلودگی اجزای مجزایی که حد بالای مقدار مجاز را

جدول ۲- مقادیر میانگین شاخص‌های HPI، HEI، MI و C_d در ایستگاه‌های مورد مطالعه در فصل‌های زمستان و تابستان

ایستگاه	زمستان				تابستان				میانگین			
	HPI	HEI	MI	C_d	HPI	HEI	MI	C_d	HPI	HEI	MI	C_d
Kh1	۳/۴۵۵	۵/۲	۴/۰۸	۱/۸۷	۰/۴۱۶	۰/۹۸۲	۰/۹۱۱	۰	۱/۹۳۱	۳/۰۹۱	۲/۵۰۰	۰/۹۳۵
Kh2	۰/۸۱۱	۰/۷۰۹	۰/۴۲۲	۰	۰/۶۹۹	۰/۲۷	۰/۳	۰	۰/۷۵۵	۰/۴۹۰	۰/۳۶۱	۰
Kh3	۱۷/۲۱	۲۱/۱۲	۱۷/۴۸۹	۱۵/۰۴۵	۰/۶۹۷	۱/۵۸۳	۱/۳۸۳۷	۰	۸/۹۵۴	۱۱/۳۵۲	۹/۴۴۰	۷/۵۲۰
Kh4	۲۶/۹۳۵	۳۰/۲۱	۲۵/۹۵۱	۲۳/۴۳۸	۳/۷۴۵	۵/۱۶۳۴	۴/۳۸۵۴	۲/۳۰۲	۱۵/۳۴	۱۷/۶۸۷	۱۵/۲۰۰	۱۲/۹۰۰
Kh5	۲۵/۸۸۸	۳۱/۳۴	۲۶/۰۷۸	۲۳/۵۱۷	۰/۷۲۳	۰/۲۴۷	۰/۲۷۵	۰	۱۳/۳۱	۱۵/۷۹۴	۱۳/۲۰۰	۱۱/۸۰۰
T1	۰/۹۸۷	۳/۰۶۴	۲/۰۵۱	۰/۲۹	۰/۸۲۱	۰/۱۷	۰/۱۹۹	۰	۰/۹	۱/۶۱۷	۱/۱۳۰	۰/۱۴۵
T2	۱/۵۴۱	۲/۴۱۵	۱/۹۸۸	۰/۵۳۵	۰/۴۵۲	۱/۳	۱/۰۳۹	۰	۰/۹۷۷	۱/۸۵۸	۱/۵۱۰	۰/۲۶۸
T3	۱/۳۸۲	۲/۱۱۵	۱/۷۱۹	۰/۳۴	۰/۴۷۳	۰/۴۵۱	۰/۴۷۷	۰	۰/۹۲۸	۱/۲۸۳	۱/۱۰۰	۰/۱۷۰
T4	۲/۳۳۸	۳/۲۱۱	۲/۷۱۴	۱/۱۴	۳/۱۹	۴/۰۴۳	۳/۶۲۴	۱/۷۳۵	۲/۷۶۴	۳/۶۲۷	۳/۱۷۰	۱/۴۴۰
T5	۱/۰۵۴	۲/۰۳۸	۱/۵۲۳	۰/۰۸۵	۰/۵۵۹	۰/۶۸۳	۰/۷۱۱	۰	۰/۸۰۷	۱/۳۶۱	۱/۱۲۰	۰/۰۴۳
Sh1	۰/۷۴۷	۰/۸۶۸	۰/۴۷۹	۰	۰/۸۷	۰/۱۳۸	۰/۱۶۶	۰	۰/۸۰۹	۰/۵۰۳	۰/۳۲۳	۰
Sh2	۰/۷۷۵	۰/۹۶۶	۰/۵۲۳	۰	۰/۸۰۹	۰/۱۸۲	۰/۲۱۲	۰	۰/۷۹۲	۰/۵۷۴	۰/۳۶۸	۰
Sh3	۱/۹۴۵	۴/۴۷۵	۳/۱۹۷	۱/۰۵۶	۰/۸۷	۰/۱۳۳	۰/۱۶۵	۰	۱/۴۰۸	۲/۳۰۴	۱/۶۸۰	۰/۵۲۸
Sh4	۰/۸۶۱	۰/۶۵	۰/۳۳۹	۰	۰/۵۲۶	۰/۴۴۲	۰/۴۵۴	۰	۰/۶۹۴	۰/۵۴۶	۰/۳۹۷	۰
Sh5	۰/۹۰۴	۰/۶۳۳	۰/۳۲۲	۰	۲/۲۶۴	۳/۰۰۴	۲/۷۳۴	۱/۱۰۵	۱/۵۸۴	۱/۸۱۹	۱/۵۳۰	۰/۵۵۳
Sh6	۰/۹۴۱	۰/۵۱۹	۰/۲۷۱	۰	۰/۶۲۲	۰/۴۸۹	۰/۴۴۸	۰	۰/۷۸۲	۰/۵۰۴	۰/۳۶۰	۰

نتیجه‌گیری

مقایسه غلظت فلزات سنگین با مقادیر استاندارد مشخص می‌نماید که در مناطق پایین دست رودخانه‌های کارون و دز در بیشتر موارد غلظت فلزات در محدوده استاندارد است، بجز Al و Fe که بالا بودن غلظت آن‌ها می‌تواند ناشی از بالا بودن غلظت این فلزات در آب ورودی به تصفیه‌خانه‌ها و یا استفاده از مقدار نامناسب مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده در مراحل تصفیه باشد. همچنین، اگرچه شاخص HPI نشان داد که آب در مناطق مورد مطالعه در رده آلوده قرار ندارد، اما، شاخص HEI، نشان داد که در فصل زمستان، آب ورودی به

تصفیه‌خانه‌ها که از رودخانه‌های کارون و دز سرچشمه می‌گیرند، پیش از تصفیه از کیفیت مناسب برخوردار نیستند. علاوه براین، بالاتر از ۱ بودن شاخص MI ناشی از بالا بودن غلظت فلزات Al و Fe در جریان‌های ورودی به تصفیه‌خانه‌ها، نامناسب بودن آب رودخانه برای شرب قبل از تصفیه را نشان می‌دهد. همچنین اهمیت نیاز به بهینه‌سازی دُز مصرف مواد منعقدکننده در تصفیه‌خانه‌ها را نشان می‌دهد. شاخص C_d نیز نتیجه‌گیری‌های مربوط به شاخص MI را تایید می‌نماید. به این ترتیب، نظارت بر منابع ورود این آلاینده‌ها و کنترل خطرات بوم شناختی آن‌ها توصیه می‌شود.

سیاسگذاری

این مقاله مربوط به طرح تحقیقاتی مصوب پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری (شماره ۸۲۶) می‌باشد که با حمایت شرکت آب و فاضلاب اهواز اجرا شده است.

منابع

- Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria). *GeoJournal*, 57(4): 295–304.
<https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000007250.92458.de>
9. Eldaw E. Huang T. Elubid B. Khalifa Mahamed A. and Mahama Y. 2020. A Novel Approach for Indexing Heavy Metals Pollution to Assess Groundwater Quality for Drinking Purposes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(4): 1245.
<https://doi.org/10.3390/ijerph17041245>
10. Findik Ö. and Aras S. 2023. Application of the metal pollution indices on surface waters for assessment of environmental risk: A case study for Damsa reservoir (Cappadocia, Türkiye). *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2): 1689-1698.
<https://doi.org/10.1007/s13762-022-04102-1>
11. Ghasemi M. and Moazed H. 2014. Determination of heavy metal in water and sediment of Dez River, Dezful, Khuzestan province, Iran. *International Journal of Biosciences (IJB)*, 232–238.
<https://doi.org/10.12692/ijb/4.2.232-238>
12. Health Canada. 2022. Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Tables. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario.
13. ISIRI 1053. 2010. Drinking water -Physical and chemical specifications (No. ISIRI 1053; Version 5th Revision). Institute of Standards and Industrial Research of Iran.
14. Khan M. Omer T. Ellahi A. Ur Rahman Z. Niaz R. and Ahmad Lone S. 2023. Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water of selected rivers. *Geocarto International*, 38(1): 2256313.
<https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2256313>
15. Khaoulani S. Zerrouki C. and Fourati N. 2024. Recent Progress and Trends in Water Pollutant Monitoring with Smart Devices. In K. Jlassi, M. A. Oturan, A. F. Ismail, & M. M. Chehimi (Eds.), *Clean Water: Next Generation Technologies* (pp. 83–94). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-48228-1_6
16. Mohan S. V. Nithila, P. and Reddy S. J. 1996. Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science and Health . Part A: Environmental Science and Engineering and*
1. Astuti R. D. P. Mallongi A. Amiruddin R. Hatta M. and Rauf A. U. 2021. Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. *Gaceta Sanitaria*, 35: S33–S37.
<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2020.12.010>
2. Babapour mofrad A. Rostami S. Alanezhad M. Maryam F. Khaksar E. and Ramezani Z. 2013. Determination of some heavy metals in Karoon and dez rivers. *Jentashapir Journal Of Cellular and Molecular Biology (Jentashapir Journal of Health Research)*, Supplement, 87–100.
3. Backman B. Bodiš D. Lahermo P. Rapant S. and Tarvainen T. 1998. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental Geology*, 36(1–2): 55–64.
<https://doi.org/10.1007/s002540050320>
4. Badamasi H. Olusola J. Durodola S. Akeremale O. Ore O. and Bayode A. 2023. Contamination Levels Source Apportionments and Health Risks Evaluation of Heavy Metals from the Surface Water of the Riruwai Mining Area North-Western Nigeria. *Pollution*, 9(3).
<https://doi.org/10.22059/poll.2023.352517.1721>
5. Badeenezhad A. Soleimani H. Shahsavani S. Parseh I. Mohammadpour A., Azadbakht O. Javanmardi P. Faraji H. and Babakpur Nalosi K. 2023. Comprehensive health risk analysis of heavy metal pollution using water quality indices and Monte Carlo simulation in R software. *Scientific Reports*, 13(1): 15817.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-43161-3>
6. Diagonanolin V. Farhang M. Ghazi-Khansari M. and Jafarzadeh N. 2004. Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the Karoon waterway river, Iran. *Toxicology Letters*, 151(1): 63–67.
<https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2004.02.018>
7. Ebadati N. 2017. Statistical Analysis of Dez River Water Quality, Southwest of Iran. *Anthropogenic Pollution*, 1(1).
<https://doi.org/10.22034/apj.2017.1.1.4660>
8. Edet A. E. and Offiong O. E. 2002. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-

- Toxicology, 31(2): 283–289.
<https://doi.org/10.1080/10934529609376357>
17. Ndjama J. George Mafany B. E. B. Mewouo, Y. C. M. Tarkang C. Aboubakar A. Dongmo O. L. A. and Bessa A. Z. E. 2021. Evaluation of Surface Water Contamination Using Heavy Metal Pollution Indices in the Mgoua Watershed, Southwestern Cameroon. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 10(11): 142–156.
18. Parsi Mehr M. Hekmati M. and Shayesteh K. 2020. Investigation of heavy metals in drinking water: A systematic review in Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 8(3).
<https://doi.org/10.22102/jaehr.2020.232374>. 1170
19. Ramadan F. Nour H. E. Wahed N. A. Rakha, A. Amuda A. K. and Faisal M. 2024. Heavy metal contamination and environmental risk assessment: A case study of surface water in the Bahr Mouse stream, East Nile Delta, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5): 429.
<https://doi.org/10.1007/s10661-024-12541-1>
20. Reeve R. N. 2006. *Introduction to environmental analysis* (Repr. with corr). Wiley.
21. Savari J. Jaafarzadeh N. Hassani A. H. and Khoramabadi G. S. 2007. Heavy Metals Leakage and Corrosion Potential in Ahvaz Drinking Water Distribution Network. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 18(4): 16–24. (In Persian).
22. Tamasi G. and Cini R. 2004. Heavy metals in drinking waters from Mount Amiata (Tuscany, Italy). Possible risks from arsenic for public health in the Province of Siena. *Science of The Total Environment*, 327(1–3): 41–51.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.011>
23. US EPA. 2018. *Drinking Water Standards and Health Advisories Tables* (No. EPA 822-F-18-001).
24. WHO. 2008. *Guidelines for drinking-water quality* [electronic resource]: Incorporating 1st and 2nd addenda, Vol.1, recommendations (3rd ed). World Health Organization.
<https://iris.who.int/handle/10665/204411>

