



Analysis of heavy metal indexes in the water of the southern shores of the Caspian Sea (monitoring year 2021)

Seyyed Javad Mousavi¹ | Seyede Masoume Banihashemi²

1. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Environmental Research Institute, Jihade Daneshgahi, Rasht, Iran.

E-mail: j.mosavi@acecr.ir

2. Caspian Sea National Research Center, Water Research Institute, Tehran, Iran. E-mail: m.banihashemi@wri.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 1, 2023

Revised: Nov. 25, 2023

Accepted: Jan. 8, 2024

Published online: April. 2024

Keywords:

Caspian Sea,
Correlation Coefficient,
Evaluation Index,
Heavy Metals,
Pollution Degree Index.

ABSTRACT

The Caspian Sea as the largest lake in the world is very important from the different aspects of economic, social, tourist, and environmental. In this regard, monitoring the water quality of the southern shores of the Caspian Sea has a special importance in order to study it according to national and international standards and control the possible pollution of the coastal strip of Iran. Therefore, the National Research Center of Caspian Sea was analyzed and checked the quality of water in terms of amount heavy metal by establishing 14 stations in the coastal strip from Miankala to Astara. In this study, the concentration of heavy and dangerous metallic and non-metallic elements in depth 1 and 7 meters from Farah Abad station to Lisar and at two depths of 1 and 4 meters in Miankala and Astara stations were measured by ICP-MS method and heavy metal evaluation index, pollution degree index, heavy metal pollution index and Spearman's correlation coefficient were calculated according to the concentration data. The obtained results show that the average concentration of heavy and dangerous metals B(2.37ppm), Ba(24.9ppb) and Zn(18.3ppb) at a depth of one meter and B(2.44ppm), Zn(26.5ppb) and As(17.5ppb) at a depth of seven meters are the highest concentrations recorded in the monitoring stations. According to the data, the highest value of the HEI(1.58), the Cd(-5.96) and the HPI(68.49) of heavy metals were obtained at depth of seven meters in Farah-Abad station and one meter Faridoonkanar and Miankale station, respectively.

Cite this article: Mousavi, S. J., & Banihashemi, S. M. (2024) Analysis of heavy metal indexes in the water of the southern shores of the Caspian Sea (monitoring year 2021), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (2), 197-218.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.366067.669586>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.366067.669586>

آنالیز شاخص‌های ارزیابی فلزهای سنگین آب سواحل جنوبی دریای خزر (پایش سال ۱۴۰۰)

سید جواد موسوی^۱، سیده معصومه بنی‌هاشمی^۲^۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط‌زیست، پژوهشکده محیط‌زیست، جهاد دانشگاهی، رشت، ایران. رایانامه: j.mosavi@acecr.ir^۲. مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر، موسسه تحقیقات آب، تهران، ایران. رایانامه: m.banihashemi@wri.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۷/۹	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۹/۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸	
تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: دریای خزر، فلزهای سنگین، شاخص درجه آلودگی، شاخص ارزیابی، ضریب همبستگی.	دریای خزر به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه جهان، از جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی، گردشگری و محیط زیستی دارای اهمیت بسیار است. در همین راستا، پایش کیفیت آب سواحل جنوبی دریای خزر به منظور بررسی آن بر طبق استانداردهای ملی و بین‌المللی و کنترل آلودگی‌های احتمالی نوار ساحلی ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین، کیفیت آب از نظر مقدار فلزهای سنگین توسط مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر با استقرار ۱۴ ایستگاه در نوار ساحلی از میانکاله تا آستارا مطالعه گردید. در این مطالعه غلظت عنصرهای فلزی و غیر فلزی سنگین و خطرناک در عمق‌های یک و هفت متر از ایستگاه فرح‌آباد تا لیسار و در دو عمق یک و چهار متر در ایستگاه‌های میانکاله و آستارا با روش ICP-MS اندازه‌گیری و شاخص‌های ارزیابی فلزات سنگین، شاخص درجه آلودگی، شاخص آلودگی فلزات سنگین و ضریب همبستگی اسپیرمن نیز بر طبق داده‌های غلظت محاسبه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که میانگین غلظت فلزات سنگین و خطرناک (ppb 9/24)Ba، (ppm 37/2)B و (ppb 3/18)Zn در عمق یک متر و (ppm 5/26)Zn، (ppm 44/2)B و (ppb 5/17)As در عمق هفت متر بیشترین غلظت ثبت شده در ایستگاه‌های پایش می‌باشند. با توجه به داده‌ها، بیشترین مقدار شاخص ارزیابی (۱/۵۸)، شاخص درجه آلودگی (۵/۹۶) و شاخص آلودگی (۶۸/۴۹) فلزات سنگین به ترتیب در عمق‌های هفت متر ایستگاه فرح‌آباد، عمق یک متر ایستگاه فریدونکنار و عمق یک متر ایستگاه میانکاله بدست آمد.

استناد: موسوی؛ سیدجواد، بنی‌هاشمی؛ سیده معصومه، (۱۴۰۳) آنالیز شاخص‌های ارزیابی فلزهای سنگین آب سواحل جنوبی دریای خزر (پایش سال ۱۴۰۰)، مجله تحقیقات

آب و خاک ایران، ۵۵ (۲)، ۲۱۸-۱۹۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.366067.669586>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.366067.669586>

مقدمه

مناطق ساحلی به دلیل دسترسی به آب فراوان، منابع منحصر به فرد اکولوژیکی و زیستی و همچنین به دلیل فعالیت‌های متنوع مانند کارهای اقتصادی، اجتماعی، گردشگری و غیره یکی از نقاط مهم و با ارزش جهان به شمار می‌روند. اما به سبب افزایش جمعیت، بهره‌برداری نادرست از سواحل، توسعه فعالیت‌های اقتصادی ناسازگار با محیط زیست منطقه و .. تغییرات برگشت‌ناپذیری بر بعضی از نقاط آن وارد شده که پیامدهای محیط زیستی قابل توجهی دارد. انتقال منابع آلاینده مختلف (فاضلاب‌ها، نفت و پلاستیک) به سواحل و دریا از طریق آب‌های آلوده شده رودخانه‌ها، آب‌های زهکشی و یا انتقال مستقیم صنایع نزدیک به دریا، سبب کاهش کیفیت آب دریا به ویژه در سواحل، کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه‌ها ساحلی می‌شود (Herrera-Silveira and Morales Ojeda, 2009; Shirodkar et al., 2009; باقری و درویش بسطامی، ۱۴۰۱). با توجه به اثرات سوء بعضی از فعالیت‌هایی که به صورت مستقیم یا غیر مستقیم بر کیفیت آب سواحل و دریاهای تأثیر می‌گذارند، پایش منظم کیفیت آب این نقاط می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی برای برنامه‌ریزی حال و آینده سواحل در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد.

یکی از مهم‌ترین مسائل دنیای امروز، آلودگی محیط زیست به فلزهای سنگین و خطرناک می‌باشد (بهنام و فرخیان فیروزی، ۱۴۰۱؛ Mousavi et al., 2018 A; Mousavi et al., 2018 B). فلزهای سنگین از آلاینده‌های پایدار و بادوام محیط زیست بشمار می‌آیند (اعظمی و همکاران، ۱۳۹۶) و به طور معمول از طریق استخراج فلز از معادن و کاربرد آن‌ها در صنایع مختلف (کودها، آفت‌کش‌ها)، فاضلاب‌ها و سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد آب و خاک می‌شوند (Celik et al., 2005). این فلزها به دلیل پایداری، مانند آلوده‌کننده‌های آلی از طریق فرآیندهای شیمیایی یا زیستی در طبیعت تجزیه نمی‌شوند و در زنجیره‌های غذایی و یا در بدن موجودات تجمع می‌یابند. فلزات سنگین عوارض متعددی مانند سرطان‌زایی، آسیب دیدن سیستم اعصاب، خون، قلب و عروق دارند و بعضی از آن‌ها نیز به مرگ منجر می‌شوند (بهنام و فرخیان فیروزی، ۱۴۰۱؛ Mahmud et al., 2016).

دریای خزر، به عنوان بزرگ‌ترین حوضه آبریز بسته‌ی زمین، توسط شرایط طبیعی ویژه‌ای از جمله منابع طبیعی غنی (منابع زیستی و معدنی) متمایز می‌گردد و نقش ژئوپلتیکی مهمی را در منطقه ایفا می‌کند. محیط طبیعی دریای خزر با توجه به بهره‌برداری‌های فراوان انسانی و تخلیه‌ی حجم زیادی از فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، تحت فشار زیادی قرار دارد. فلزهای سنگین، هیدروکربن‌ها، آفت‌کش‌ها، مواد مغذی نظیر فسفات و نترات و سایر زائدات انسانی به دریای خزر وارد شده و پتانسیل آسایش دریا و حیات دریایی را به خطر می‌اندازند (Zaker et al., 2007).

امروزه، با توجه به این‌که در بررسی پدیده‌ها متغیرهای زیادی وجود دارد به منظور تحلیل بهتر آن‌ها از روش‌های آماری استفاده می‌شود (سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸). روش‌های آماری، ضریب همبستگی^۱، تحلیل خوشه‌ای^۲ و تحلیل مؤلفه اصلی^۳ از جمله روش‌های آماری دو یا چند متغیره هستند، که کاربردهای زیادی در بررسی ارتباط داده‌های چند متغیره و تقسیم‌بندی یا طبقه‌بندی مجموعه‌ای از داده‌ها یا نمونه‌ها دارند (محمودی و همکاران، ۱۳۹۲). آزمون‌های همبستگی برای بررسی رابطه بین دو یا چند متغیر به کار می‌روند، که از آن استنباط می‌شود دو متغیر با یکدیگر رابطه مستقیم یا عکس دارند یا مستقل از یکدیگر هستند. رابطه همبستگی می‌تواند در مورد منشأ (انسان‌زاد یا زمین‌زاد) مسیر یا سرنوشت آلاینده‌ها در محیط اطلاعات مفیدی ارائه دهد (Qishlaqi et al., 2009).

شاخص‌های مختلف آلودگی آب یکی از روش‌های ساده و کاربردی در بررسی کیفیت آب است که می‌تواند ابزاری مفید برای مدیران بخش آب، محیط زیست و سایر تصمیم‌گیرندگان در این حوزه باشد (سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸). شاخص‌های کیفی آب روش‌هایی هستند که با ساده‌سازی و کاهش اطلاعات خام، علاوه بر بیان کیفیت آب، روند تغییرات کیفی آب را در طول زمان بررسی کرده و مناطقی را که از نظر آلودگی بیشتر مورد تهدید می‌باشند، مشخص می‌نمایند (Mishra et al., 2018؛ حمزه‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). شاخص‌های فلزهای سنگین مانند شاخص ارزیابی فلزهای سنگین^۴ (HEI)، شاخص آلودگی فلزات سنگین^۵ (HPI) و شاخص درجه آلودگی^۶ (Cd) از جمله شاخص‌های کاربردی، برای دسته‌بندی آلودگی منابع مختلف آب از جنبه فلزهای سنگین است که در مطالعات مرتبط استفاده می‌شود (Panigrahy et al., 2015; Prasad and Bose, 2001; Chabukdhara et al., 2017; Sobhan Ardakani et al., 2017; Singh)

1 Correlation Coefficient

2 Clustral Analysis

3 Principle Component Analysis

4 Heavy metal Evaluation Index

5 Heavy metal Pollution Index

6 Degree of contamination



مطالعه و بررسی مستمر وضعیت دریای خزر و نقش آن در برنامه‌ریزی‌ها و نظارت بر فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و اقدام‌های توسعه‌ای، بسیار حائز اهمیت است. بنابراین، مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر به عنوان زیرمجموعه مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، در جهت وظایف محوله خود، نسبت به پایش و مطالعه خواص کیفی و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب دریای خزر اقدام می‌کند. پایش سواحل جنوبی دریای خزر با توجه به ایستگاه‌های مشخص شده، بیش‌تر از جنبه بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پارامترهای آب بوده که در سال ۱۳۹۳ و ۱۳۹۵ نیز انجام شد. اما با توجه به اینکه اطلاعات این پایش‌ها در زمینه فلزهای سمی و سنگین بسیار محدود بود و همچنین با توجه به افزایش نگرانی‌ها در مورد آلودگی منابع آبی سواحل جنوبی دریای خزر به فلزهای سنگین و تهدید آلودگی اکوسیستم خزر در سواحل ایران توسط آن‌ها، پایش سال ۱۴۰۰ در زمینه ارزیابی آلودگی فلزهای سمی و سنگین و بررسی شاخص‌های آن با جامعیت بیشتری صورت پذیرفت.

این پایش اطلاعات گسترده‌ای را در یک بازه زمانی معین در کل سواحل خزر جنوبی تأمین می‌کند که ارزیابی آن می‌تواند نمای از تحولات کمی و کیفی در بخش‌های آلاینده‌های سطحی ارائه نماید. بنابراین، این پایش به عنوان یک موضوع پژوهشی می‌تواند راهگشای بسیاری از برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها باشد. علاوه بر این، نقاط با پتانسیل و آلاینده‌گی بالا که در نوار ساحلی مشخص گردید، که امکان منشأیابی و یا تصمیم‌گیری را برای کاهش این منابع فراهم می‌کند.

بر این اساس پایش محیطی دریای خزر، در قالب ۱۴ محور شاخص (ایستگاه) در سواحل جنوبی خزر جهت اندازه‌گیری دوره‌ای تغییرات محدوده ساحلی، ارزیابی کیفیت آب و مشخصه‌های رسوبی از بخش خشک ساحلی تا عمق هفت متر دریا صورت می‌پذیرد. همچنین اندازه‌گیری مؤلفه‌های کیفی آب با هدف پایش درازمدت و جمع‌آوری اطلاعات جهت ارزیابی و تخمین تقابل‌های کیفی و شیمیایی دریا و رودخانه و چاره‌اندیشی‌های کاربردی در وزارت نیرو و سازمان‌های ذی‌ربط انجام می‌گیرد.

در راستای وظایف و هدف‌های مرکز و به دلیل اهمیت حفاظت از سواحل، مدیریت منابع آب و کنترل آلاینده‌ها و ضرورت وجود اطلاعات و آگاهی از روند تغییرات محیطی و علت‌های آن، در این مقاله نتایج آنالیز پارامترهای فلزهای سنگین و سمی آب در پایش سال ۱۴۰۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. همچنین نتایج با استفاده از روش‌های آماری بررسی و شاخص‌های فلزهای سنگین، شاخص ارزیابی فلزهای سنگین، شاخص آلودگی فلزهای سنگین و شاخص درجه آلودگی در ایستگاه‌های نمونه‌برداری محاسبه شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری در این پایش‌ها توسط دستگاه نمونه‌بردار آب و در عمق یک و هفت متر انجام شده است. البته در ایستگاه آستارا و میانکاله باتوجه به شرایط ساحل نمونه‌برداری در عمق یک و چهار متر صورت پذیرفت. ایستگاه‌های نمونه‌برداری به ترتیب از شرق به غرب دریای خزر عبارتند از: ایستگاه میانکاله، فرح‌آباد، لاریم، فریدونکنار، محمودآباد، سیسنگان، نمک‌آبرود، تنکابن، رامسر، دستک، بندرانزلی، رضوانشهر، لیسار و آستارا که در شکل (۱) نشان داده شده است.

برای نمونه‌برداری در هر ایستگاه، ابتدا ظرف نمونه‌برداری با آب همان منطقه شستشو داده شد و سپس حجم نمونه‌ها ۱۰۰۰ میلی‌لیتر از عمق به طور تقریبی ۳۵ سانتی‌متری برداشت شد و بر اساس استاندارد مربوطه در همان روز در محفظه خنک برای آنالیز به آزمایشگاه‌ها ارسال گردید. در این پایش غلظت عنصرهای سنگین مولیبدن (Mo)، جیوه (Hg)، مس (Cu)، سلنیوم (Se)، برم (Br)، استرانسیوم (Sr)، سیلیس (Si)، آرسنیک (As)، بور (B)، آلومینیوم (Al)، باریم (Ba)، اورانیوم (U)، روییدوم (Rb)، سرب (Pb)، نیکل (Ni)، روی (Zn)، کبالت (Co)، کادمیم (Cd) و کروم (Cr) با روش پلاسمای جفت شده القایی^۱ و ترکیب آن با طیف سنجی جرمی^۲ مدل DRC9000 شرکت Perkin Elmer ساخت آمریکا و بر طبق استاندارد متد شماره ۳۱۲۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. این پایش در مهر سال ۱۴۰۰ و با سه تکرار در نمونه‌برداری برای هر ایستگاه انجام و در نهایت میانگین نتایج گزارش شد.

1 Inductively Coupled Plasma (ICP)

2 Inductively Coupled Plasma- Mass Spectrometry (ICP-MS)



شکل ۱. ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب

دامنه فلزهای سنگین و سمی بسیار زیاد می‌باشد که هر کدام در جاهای مختلفی کاربرد دارد و یا از منابع مختلفی نشئت می‌گیرد. با توجه به اینکه منابع رودخانه‌ای ورودی به سواحل جنوبی دریای خزر بسیار متنوع می‌باشد گستره‌ی قابل توجهی از آلودگی‌ها نیز به همراه این رودخانه‌ها وارد سواحل دریای خزر می‌شود. همچنین، فاضلاب‌های خانگی و یا صنعتی بسیاری به این رودخانه‌ها در مسیر حرکت اضافه می‌شوند، بنابراین این گونه آلودگی‌ها می‌توانند شواهدی برای علت حضور عناصر گوناگون باشند.

آرسنیک در تولید سموم دفع آفات مختلف کشاورزی، محصولات چوبی پرداخت شده، علف‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها استفاده می‌گردد و کاربرد اصلی آن در باتری خودروها می‌باشد. فلز مولیبدن در آلیاژها، صنایع الکترونیک، کاتالیزورها و فرآیندهای زیستی کاربرد دارد. باریم بیشتر در تولید شمع اتومبیل، وسایل آتش‌بازی، لامپ‌های فلورسنت، فرآیندهای پزشکی و به عنوان گیرنده در لامپ‌های الکترونی مورد استفاده قرار می‌گیرد و جذب مقادیر زیادی از باریم محلول در آب، می‌تواند باعث فلج و در بعضی موارد حتی مرگ شود. بور از سنگ و خاک، از طریق هوازدگی منتشر شده و به کمک خاک وارد آب می‌شود. کاربردهای بور شامل استفاده آن در صنعت شیشه و سرامیک، مواد شوینده، فضاپیماها، راکتورهای هسته‌ای، حشره‌کش‌ها، مصارف پزشکی و دارویی است.

عنصر نیکل به عنوان پنجمین عنصر شایع روی زمین، در صنایع فولاد، تولید آلیاژ، آبکاری، پوششی برای سایر فلزات، باتری و کاتالیزور کاربرد فراوانی دارد و توسط نیروگاه‌ها و زباله‌سوزها در هوا منتشر خواهد شد و بعد از واکنش با قطرات باران می‌تواند به زمین منتقل شود.

فلز روییدیم به نسبت سمی است و به آسانی می‌تواند با رطوبت پوست واکنش دهد و سبب سوختگی شیمیایی چشم و پوست گردد. مسمومیت با این فلز می‌تواند مانع از افزایش وزن، سبب بی‌نظمی، سبب حساسیت بیش از اندازه، زخم شدن پوست، آسیب‌های قلبی و عدم توازن پتاسیم و همچنین عصبانیت بیش از اندازه گردد. هیچ ماده معدنی از روییدیم شناخته نشده است، اما روییدیم به مقدار قابل توجهی در سایر مواد معدنی مانند لپودیت، پولوسیت و کارنالیت وجود دارد و مقدار تولید شده آن در هر سال ناچیز است.

سلنیوم از مواد ضروری و مهم برای متابولیسم و سیستم ایمنی بدن می‌باشد اما مصرف مقدار زیاد آن سمی است. غذاهای دریایی، قلمه، جگر، گوشت و ماکیان، منابع غذایی عمده‌ای از سلنیوم هستند.

اورانیوم یک فلز سنگین، رادیواکتیو و سمی است که در ساخت سلاح‌های هسته‌ای و به عنوان سوخت راکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود و مقدار آن در خزر ۶-۵ برابر دیگر دریاها است.

فلز مس به طور معمول به طور طبیعی و به شکل معدنی یافت می‌شود و در تجهیزات برقی مانند سیم‌کشی و موتور، صنعت ساختمان، پزشکی، کشاورزی و استیل استفاده می‌شود. سازمان محیط زیست (۱۳۹۵) مقدار مجاز مس در دریای خزر را (۱۰ ppb) تعیین کرده است. آلومینیوم در صنایع حمل و نقل، ساختمان‌سازی، برق، ماشین و تجهیزات و ... پرکاربرد است. باران اسیدی مواد معدنی را در خاک حل می‌کند و آن‌ها را به منابع آب می‌ریزد، این امر ممکن است باعث افزایش غلظت آلومینیوم در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها شود.

شاخص‌های ارزیابی فلزهای سنگین

برای تعیین میزان آلودگی منابع آب از جنبه فلزهای سنگین، از شاخص آلودگی فلزات سنگین، شاخص ارزیابی فلزهای سنگین و شاخص درجه آلودگی استفاده می‌شود (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۰؛ سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸؛ Sobhan Ardakani et al., 2016). شاخص ارزیابی فلزات سنگین از رابطه (۱) بدست می‌آید (Ameh and Akpah, 2011; Mohan et al., 1996؛ سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸):

$$HEI = \sum \frac{H_i}{H_{mac}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه H_i غلظت عنصر در محلول و H_{mac} بیش‌ترین حد مجاز غلظت برای آن در حالت استاندارد ۱۰۵۳ می‌باشد. با توجه به رابطه بالا، مقادیر شاخص ارزیابی فلزهای سنگین تقسیم‌بندی‌های مختلفی دارد که یکی از دقیق‌ترین آن‌ها مانند جدول زیر می‌باشد (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۰):

جدول ۱. دسته‌بندی شاخص HEI

HEI	<۰/۳	۰/۳-۱	۱-۲	۲-۳	۳-۶	>۶
شرایط آب	بسیار خالص	خالص	کمی تحت تأثیر	متوسط تحت تأثیر	به شدت تحت تأثیر	به‌طور جدی تحت تأثیر

شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Ameh and Akpah, 2011; Mohan et al., 1996؛ سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸):

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه بالا، HPI بر اساس وزن اختصاص داده شده (W_i) به هر پارامتر محاسبه و ارزیابی می‌شود. این وزن اختصاص داده شده مقدار دلخواهی بین صفر و یک می‌باشد و انتخاب آن به ملاحظات کیفی فردی و مشاهداتی بستگی دارد (Sobhan Ardakani et al., 2016; Prasanna et al., 2012). در این مطالعه، وزن هر پارامتر، نسبت عکس مقدار مجاز استاندارد ۱۰۵۳ برای هر فلز می‌باشد. در رابطه بالا Q_i بیانگر زیرشاخص عنصر i ام می‌باشد که با رابطه زیر بدست می‌آید (Ameh and Akpah, 2011; Mohan et al., 1996؛ سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸):

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{(M_i - I_i)}{(S_i - I_i)} \times 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

M_i و S_i به ترتیب بیانگر غلظت ایده‌آل، غلظت اندازه‌گیری شده و حداکثر غلظت مجاز طبق استاندارد ۱۰۵۳ عنصر i ام می‌باشد. با توجه به مقادیر شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI)، اگر این شاخص کم‌تر از ۱۰۰ باشد آب فاقد آلودگی فلزهای سنگین و اگر بزرگتر از ۱۰۰ باشد آب به فلزهای سنگین آلوده خواهد بود و اگر برابر ۱۰۰ باشد در آستانه آلودگی به فلزهای سنگین قرار دارد (سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸؛ Appiah Opong et al., 2021).

شاخص درجه آلودگی (Cd) یک شاخص تجمعی می‌باشد که حاصل جمع شاخص فاکتور آلودگی برای عناصر مورد ارزیابی (C_{fi})، می‌باشد. بر اساس تحقیقات، مقدار عددی شاخص درجه آلودگی را می‌توان به سه دسته کم ($Cd < 1$)، متوسط ($Cd = 1-3$) و زیاد ($Cd > 3$) (Cd) تقسیم کرد (Ameh and Akpah, 2011; Mohan et al., 1996؛ خلیلی و همکاران، ۱۴۰۰).

$$Cd = \sum_{i=1}^n C_{fi} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$C_{fi} = \frac{M_i}{S_i} - 1 \quad \text{رابطه (۶)}$$

مقادیر استاندارد برخی از فلزهای سنگین در جدول زیر بیان شده است که در محاسبه شاخص‌ها استفاده می‌شود. این مقادیر از طرف سازمان حفاظت محیط زیست و موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران پیشنهاد شده است. (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۵؛ موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۸)

جدول ۲. استانداردهای مختلف غلظت برخی از فلزهای سنگین در آب (میکروگرم بر لیتر) (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۵)

فلزهای سنگین	ایران (گروه ۱)	ایران (گروه ۲)	حداکثر استاندارد ۱۰۵۳		حدود مجاز کیفیت آب دریای خزر در مناطق حفاظت شده
			مطلوب	مجاز	
Cr	۵۰	۵۰	-	۵۰	۵
Co	-	-	-	۱۰۰	۲
Zn	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۳۰۰۰	-	۳۰
Cd	۳	۵	-	۳	۵
Hg	۱	۶	-	۶	۰/۱
Pb	۱۰	۵۰	-	۱۰	۵
As	۱۰	۵۰	-	۱۰	۰/۵
Cu	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰
Se	۱۰	۱۰	-	۱۰	-
Ba	۱۰۰	۱۰۰۰	-	۷۰۰	-
Ni	-	-	-	۷۰	۵
B	۵۰۰	۱۰۰۰	-	۵۰۰	-
Mo	-	-	-	۷۰	-
Al	-	-	-	۲۰۰	-

گروه ۱: برای آبی که پس از تصفیه فیزیکی و گندزدایی ساده مانند فیلتراسیون سریع و گندزدایی قابل شرب باشد.

گروه ۲: برای آبی که پس از تصفیه فیزیکی معمول، تصفیه شیمیایی و گندزدایی قابل شرب باشد.

تجزیه و تحلیل آماری

در این پروژه از نرم‌افزار آماری SPSS ویرایش ۲۳ به منظور تجزیه و تحلیل آماری استفاده شده است. برای انجام آزمون‌های آماری، یکی از مهم‌ترین فرضیات، نرمال بودن داده‌ها می‌باشد که در صورت تأیید نشدن این فرض، نتایج بدست آمده از آزمون‌های آماری پارامتریک نامعتبر است (Chou et al., 1998). بنابراین، برای تعیین نرمال بودن داده‌ها با توجه به اینکه تعداد داده‌ها خیلی زیاد نیست، از آزمون شاپیرو-ویلک در سطح اطمینان ۹۵٪ استفاده گردید. علاوه بر این، با رسم نمودار Q-Q و یا محاسبه چولگی و کشیدگی نیز می‌توان نرمال بودن توزیع داده‌ها را بررسی کرد.

نتایج و بحث

در این پروژه غلظت فلزهای سنگین مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت که در شکل (۲) نشان داده شده است. در جدول (۲) مقادیر مجاز این عناصر در دریای خزر توسط سازمان حفاظت محیط زیست و موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران بیان شده است. هم‌چنین میانگین، انحراف معیار، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار غلظت فلزهای اندازه‌گیری شده در دو عمق یک و هفت متر نیز در جدول (۳) و (۴) بیان شده است. این عناصر از راه‌های مختلف طبیعی (مانند هوازدگی شیمیایی مواد معدنی، مواد آتشفشانی و فرسایش خاک) و انسانی (فاضلاب‌های شهری و صنعتی، رواناب‌ها و سیلاب‌های شهری، فعالیت‌های معدن‌کاری، شیرابه زباله، ته‌نشست‌های اتمسفری و غیره) در محیط انتشار می‌یابند و در نهایت آب، رسوب و بخش زنده این اکوسیستم‌ها، مقصد نهایی فلزهای سنگین است (Marcovecchio and Botté, 2007; Nguyen et al., 2016).

با توجه به نتایج، میانگین غلظت روی در عمق یک متر کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰، (۱۸/۳±۱۳/۱ ppb) و در عمق هفت متر (۲۶/۵±۲۹/۷ ppb) بدست آمد و هیچ روند خاصی در تغییرات غلظت در ایستگاه‌ها مشاهده نمی‌شود. مقدار مجاز این فلز برای دریای خزر طبق استاندارد محیط‌زیست (۳۰ ppb) می‌باشد (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۵) و مقدار آن در رودخانه‌هایی مناطق صنعتی و دارای معدن تا (۲۰ ppm) افزایش می‌یابد. غلظت روی به میزان (۲ ppm) بر مقدار اکسیژن موجود در خون ماهی‌ها تأثیر منفی می‌گذارد. طبق استاندارد سازمان محیط زیست، مقدار مجاز سرب در دریای خزر (۵ ppb) پیشنهاد گردید (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۵). بر اساس داده‌های بدست آمده، میانگین غلظت سرب در عمق یک و هفت متر ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ به ترتیب (۳/۰۴±۳/۸۸ ppb) و (۱/۲۱±۰/۱۷ ppb) بدست آمد. با توجه به نتایج سال ۱۴۰۰ و بر اساس دقت اندازه‌گیری دستگاه (۱ ppb)، در عمق هفت متر بیش‌تر



ایستگاه‌ها فلز سرب مشاهده نشده است. با توجه اینکه تأثیر عوامل انسانی در آلودگی سرب بیشتر است، مقدار آن در عمق یک متر ایستگاه‌های شهرهای توریستی آستارا، تنکابن و سیسنگان بیشتر از سایر ایستگاه‌ها ثبت شد.

آنالیز داده‌های مولیبدن نشان می‌دهد، میانگین غلظت آن در عمق یک متر کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ (۱۵/۳۱ ppb) و در عمق هفت متر (۱۴/۹۷ ppb) می‌باشد و روند تغییرات مولیبدن ایستگاه‌ها از غرب به شرق به طور تقریبی یکنواخت است. بر اساس داده‌ها، انحراف معیار در دو عمق یک و هفت متر به ترتیب (۱/۳۰ ppb) و (۰/۵۹ ppb) گزارش شد، بنابراین تغییرات در عمق هفت متر یکنواخت‌تر است. حداکثر مجاز مولیبدن در آب آشامیدنی بر طبق استاندارد ۱۰۵۳ مقدار (۷۰ ppb) پیشنهاد شد.

آرسنیک از خطرناک‌ترین عناصر جهان است و مقدار آن در ماهی و غذاهای دریایی ممکن است به دلیل جذب از آب‌های آلوده افزایش یابد. با توجه به داده‌ها، میانگین غلظت آرسنیک در دو عمق یک و هفت متر کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ به ترتیب (۱۶/۰±۹/۲۷ ppb)، (۱۷/۵±۱۳/۰ ppb) بدست آمد که بسیار بیش‌تر از مقدار مجاز آن در دریای خزر بر طبق استاندارد سازمان محیط زیست یعنی (۰/۵ ppb) است. همچنین، میانگین غلظت آن هر چقدر به سمت ایستگاه‌های مرکز و شرق حرکت می‌کنیم در بعضی از ایستگاه‌ها افزایش قابل توجهی می‌یابد.

با توجه به نتایج، میانگین غلظت باریم در عمق یک متر کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ (۲۴/۹±۹/۴ ppb) و در عمق هفت متر (۱۴/۳±۳/۲) بدست آمد. بر اساس داده‌های بدست آمده روند خاصی برای غلظت آن در ایستگاه‌های نمونه‌برداری از غرب به شرق مشاهده نمی‌شود، اما، غلظت آن در عمق هفت متر کم‌تر از عمق یک متر گزارش شد که با توجه به ورود باریم از منابع آب‌های سطحی این روند درست است.

آنالیز داده‌های بور نشان می‌دهد که میانگین غلظت آن در عمق یک متر ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ (۲/۳۷±۰/۲۴ ppm) و در عمق هفت متر (۲/۴۴±۰/۱۲ ppm) می‌باشد. بر اساس داده‌های بدست آمده روند تغییرات غلظت آن به طور تقریبی یکنواخت است و در بعضی از ایستگاه‌ها غلظت عمق یک و هفت متر به طور تقریبی یکسان است. حداکثر مقدار مجاز آن در دریای خزر بر طبق استاندارد سازمان محیط زیست (۵ ppb) تعیین شد (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۵).

با توجه به نتایج، میانگین غلظت نیکل در هر دو عمق یک و هفت متر ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ به ترتیب (۱۲/۱۹±۵/۵۲ ppb) و (۱۱/۹۶±۰/۷۰ ppb) بدست آمد و بین مقادیر آن‌ها در عمق‌های اندازه‌گیری اختلاف بسیار کمی وجود دارد و به غیر از ایستگاه آستارا سایر ایستگاه‌ها مقادیرشان نزدیک به هم می‌باشد.

میانگین غلظت روییدوم در عمق یک متر ایستگاه‌ها، در سال ۱۴۰۰ (۹/۷۵ ppb) و در عمق هفت متر (۸/۷۱ ppb) بدست آمد و روند تغییرات آن در ایستگاه‌ها از غرب به شرق به غیر از ایستگاه آستارا به طور تقریبی یکنواخت است. بر اساس داده‌های پایش روییدوم، انحراف معیار آن در عمق یک و هفت متر به ترتیب (۲/۱۴ ppb) و (۰/۳ ppb) بدست آمد.

تغییرات اسکاندیم بر اساس ۱۴ ایستگاه ثابت پایش در ارتفاع میانی عمق یک متر و هفت متر در سال ۱۴۰۰ نشان می‌دهد که میانگین غلظت اسکاندیم در عمق یک متر کل ایستگاه‌ها (۱/۳۰ ppb) و در عمق هفت متر (۱/۳۷ ppb) است و انحراف معیار در عمق یک و هفت متر به ترتیب (۰/۱۶ ppb) و (۰/۰۸ ppb) بدست آمد.

با توجه به نتایج، میانگین غلظت سلنیوم در عمق یک متر کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ (۲/۱۸ ppb) و در عمق هفت متر (۲/۸۳) بدست آمد. روند تغییرات سلنیوم ایستگاه‌ها از غرب به شرق به طور کامل نامنظم است. بیش‌ترین غلظت سلنیوم در ایستگاه میانکاله و در عمق هفت متری (۴/۳ ppb) بدست آمد. انحراف معیار در دو عمق یک و هفت متر به ترتیب (۰/۶۴ ppb) و (۰/۷۰ ppb) بدست آمد؛ بنابراین تغییرات در این دو عمق به طور تقریبی یکسان است.

با توجه به مطالعات انجام شده، میزان غلظت اورانیوم در خزر جنوبی کم‌تر از سایر نقاط می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، میانگین غلظت اورانیوم در عمق یک و هفت متری ایستگاه‌ها به ترتیب از (۴/۰۵ ppb) و (۳/۷۵ ppb) می‌باشد و انحراف معیار آن در عمق یک و هفت متر به ترتیب (۰/۳۳ ppb) و (۰/۱۸ ppb) بدست آمد.

میانگین غلظت مس کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ در عمق یک متر (۱۳/۸۸ ppb) و هفت متر (۱۳/۳۹ ppb) بدست آمد. روند تغییرات آن از غرب به شرق به غیر از ایستگاه آستارا به طور تقریبی یکنواخت است و به جز ایستگاه آستارا در سایر ایستگاه‌ها، غلظت در عمق هفت متر کمی بیشتر است. با توجه به داده‌ها مقدار انحراف معیار مس در دو عمق یک و هفت متر به ترتیب (۶/۷۰ ppb) و (۱/۱۴) بدست آمد، بنابراین تغییرات غلظت در عمق هفت متر یکنواخت‌تر است.

حداکثر مطلوب آلومینیوم در آب آشامیدنی بر طبق استاندارد ۱۰۵۳ مقدار (۰/۱ ppm) پیشنهاد شد. با توجه به نتایج، میانگین غلظت آلومینیوم در دو عمق یک و هفت متر کل ایستگاه‌ها در سال ۱۴۰۰ با هم برابر (۰/۱۵ ppm) هستند. تغییرات غلظت در عمق هفت متر یکنواخت‌تر است.

با توجه به اهمیت بررسی غلظت فلزهای سنگین در آب‌های دریای خزر، این موضوع توسط پژوهشگران مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت. آبادی و همکاران (۱۳۹۷) در پروژه اندازه‌گیری غلظت فلزهای سنگین مس، روی، کادمیم، نیکل، کبالت و سرب در امتداد سواحل جنوبی دریای خزر غلظت این فلزها را در ۱۲ ایستگاه اندازه‌گیری کردند. با توجه به نتایج بدست آمده در این کار حداکثر غلظت روی و کادمیم در سواحل جنوب غربی و به ترتیب (۱۸/۳۸ ppb) و (۰/۶۰ ppb)، سرب (۳/۰۹ ppb) و مس (۱۸/۹۲ ppb) در سواحل جنوب شرقی و نیکل و کبالت نیز به ترتیب (۶/۹۳) و (۲/۳۶) میکروگرم بر لیتر در ناحیه مرکزی سواحل جنوبی دریای خزر ثبت شدند. با توجه نتایج تحقیق ما، بیشترین غلظت سرب (۱۳/۲۳ ppb)، نیکل (۳۱/۶۰ ppb)، کبالت (۲/۴۹ ppb) و مس (۳۷/۱۱ ppb) در عمق یک متر آستارا، روی (۱۱۹/۰ ppb) در عمق هفت متر فرح‌آباد، و کادمیم (۱/۲۸ ppb) در عمق یک متر میانکاله بدست آمد.

در مطالعه‌ای که توسط کریمی و همکاران (۱۳۹۴) بر روی غلظت فلزهای سنگین آهن، سرب، روی و کادمیم، سواحل جنوب شرقی دریای خزر صورت پذیرفت، غلظت تمام فلزها در هر نه ایستگاه بررسی شده بیش‌تر از حداکثر مقدار مجاز استانداردهای جهانی بدست آمد و روند تغییرات غلظت نیز به صورت آهن < سرب < روی < کادمیم ثبت شد. در این کار، میانگین غلظت آهن (۳۵۰۰-۵۸۶۹۰)، سرب (۲۲۰-۱۲۵)، روی (۷۰-۱۶۰) و کادمیم (۷۵-۱۳۶) میکروگرم بر لیتر گزارش شد. در پایش ما که بر روی ۱۴ ایستگاه از میانکاله تا آستارا انجام شد غلظت فلزها آهن، سرب، روی و کادمیم در هر دو عمق یک و هفت متر کمتر از این مطالعه بدست آمد.

علاوه بر این، ساروی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهش بررسی غلظت فلزهای سنگین در ۸ ایستگاه (عمق ۵۰، ۱۰ و ۱۰۰ متر) سواحل جنوبی دریای خزر گزارش کردند که میانگین غلظت فلزهای سنگین جیوه (۳/۳۰±۰/۴۰ ppb) < نیکل (۲/۱۰±۰/۵۹ ppm) < سرب (۱/۶۴±۰/۱۸) < کادمیم (۰/۶۸±۰/۱۰ ppm) < روی (۰/۱۱±۰/۰۱ ppm) می‌باشد و حداکثر مقدار غلظت روی و نیکل در ایستگاه‌های جنوب غربی و سرب و کادمیم در ایستگاه‌های جنوب مرکزی است و غلظت بیش‌تر فلزهای آنالیز شده بیش‌تر از حد مجاز اعلام شده می‌باشد. بر اساس داده‌ها ثبت شده در کار ما، غلظت فلزهای سنگین در عمق یک متر روی (۱۱/۰-۶۳/۸ ppb) < نیکل (۳۱/۶۰-۷/۳۰) < سرب (۱/۰۷-۱۳/۲۳ ppb) < کادمیم (۱/۱۶-۱/۲۸ ppb) و در عمق هفت متر روی (۱۱/۰-۱۱۹/۰ ppb) < نیکل (۱۲/۸-۱۰/۰) < سرب (۱/۰۷-۱/۵۰ ppb) است ولی برای جیوه در هر دو عمق و کادمیم در عمق هفت متر غلظت کمتر از حد تشخیص دستگاه بود.

در پژوهشی توسط زو و همکاران (۲۰۲۰)، داده‌های نمونه‌برداری گذشته در مورد غلظت فلز سنگین منگنز، روی، کبالت، نیکل، آلومینیوم، آهن، مس، کروم، آرسنیک، جیوه، کادمیم و سرب، با هدف، بررسی سطوح و منابع آلودگی فلزات سنگین در طول پنج دهه و پنج قاره جمع‌آوری شده‌است. میانگین غلظت فلزهای سنگین در رودخانه‌های جهانی و آب دریاچه‌ها و تعداد فلزهای سنگین با غلظت‌های بیشتر از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت از محیط‌زیست ایالات متحده (USEPA)، به طور کلی در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ کم‌تر از دهه‌های ۱۹۹۰، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ بود و با گذشت زمان، آلودگی فلزهای سنگین در آب‌های سطحی از آلودگی تک فلزی به آلودگی مخلوط فلزی تغییر کرد. غلظت و تعداد فلزهای سنگین با غلظت‌های بالاتر از حد مجاز استانداردهای سازمان بهداشت جهانی و سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا در کشورهای توسعه‌یافته اروپا و آمریکای شمالی پایین‌تر و در کشورهای در حال توسعه آفریقا، آسیا و آمریکای جنوبی بالاتر بود.

در مطالعه‌ای توسط بویان و همکاران (۲۰۱۹)، غلظت فلزهای سنگین در آب و رسوب رودخانه قدیمی براهماپوترا بنگلادش اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز آب، مقدار غلظت فلزهای اندازه‌گیری شده به ترتیب (Al > Mn > Ni > Co > Cu > Pb > Zn > Cr > Cd > Hg) می‌باشد. هم‌چنین بر اساس بررسی روابط آماری بین نیکل با مس، سرب، آلومینیوم و کادمیم، منگنز با کبالت، کروم با روی، مس و آلومینیوم، مس با کادمیم و کبالت با روی رابطه همبستگی قوی وجود داشت. داده‌های بدست آمده پژوهش ما نشان می‌دهد که غلظتی برای جیوه، کروم و منگنز در نقاط اندازه‌گیری ثبت نشد و در عمق یک متر بین سرب با آلومینیوم، نیکل با مس و در عمق هفت متر بین سرب با نیکل و مس با مولیبدن در سطح اطمینان ۹۹٪ رابطه معنی‌دار وجود دارد.

انزوا و همکاران (۲۰۱۵)، آلودگی فلزهای سنگین در آب‌های سطحی مخزن ماسینگا کنیا را ارزیابی کردند. نتایج بدست آمده نشان داد که محدوده غلظت مس (۰/۰۳-۰/۱۹ ppm)، روی (۰/۰۹۲-۰/۱۳۲ ppm)، سرب (۰/۰۰۴-۰/۰۰۹ ppm)، کروم (۰/۰۰۶-۰/۰۰۶ ppm)



۰/۰۰۳ و منگنز (۰/۱۴۶ ppm - ۰/۰۰۶) می باشد و غلظتی برای فلز روی ثبت نشد. با توجه به نتایج بدست آمده در پژوهش ما بازه غلظت این عناصر در عمق یک متر برای مس (۳۷/۱۱ - ۷/۲۵ ppb)، روی (۶۳/۸ - ۱۱/۰ ppb)، سرب (۱۳/۲۳ - ۱/۰۷) و در عمق هفت متر مس (۱۵/۵۸ - ۱۰/۴۱)، روی (۱۱۹/۰ - ۱۱/۰ ppb) سرب (۱/۵۰ - ۱/۰۷)، بدست آمد و برای منگنز و کروم با توجه به دقت دستگاه مقداری ثبت نشد.

در مطالعه‌ی ارزیابی غلظت فلزهای سنگین در منابع آب سطحی یک منطقه صنعتی در هند، توسط تیواری و همکاران (۲۰۱۵)، در نمونه‌های پیش از مانسون، فلزهای منگنز و کروم غلظت بالاتر و فلزات مس، آهن و سرب غلظت کمتری داشتند و برای نمونه‌های پس از مانسون منگنز، کروم و آهن با غلظت بالاتر و مس و سرب با غلظت کمتری ثبت شدند. اما در پروژه ما میانگین غلظت در عمق یک متر به ترتیب بور < باریم < روی < آرسنیک < مولیبدن < مس < نیکل < روبیدیم < اورانیوم < سرب بدست آمد.

همچنین در کاری که توسط حسن پور و همکاران (۱۳۹۰) بر روی سواحل جنوب شرقی دریای خزر انجام شد روند تغییرات افزایشی غلظت به صورت کروم < روی < کادمیم < سرب بدست آمد و فقط مقادیر کروم بیش تر از مقدار مجاز استانداردهای جهانی (WHO) بود. در کار ما میانگین غلظت‌ها در عمق یک متر برای روی (۱۸/۳ ppb)، کادمیم (۱/۲۲ ppb)، سرب (۳/۰۴ ppb) و در عمق هفت متر روی (۲۶/۵ ppb) و سرب (۱/۲۱ ppb) ثبت شد.

جدول ۳. غلظت فلزهای سنگین و عناصر سمی و غیر سمی در پایش سال ۱۴۰۰ در عمق یک متری

Sc ppb	Se ppb	Cu ppb	As ppb	B ppm	Al ppb	Ba ppb	Mo ppb	U ppb	Rb ppb	Zn ppb	Co ppb	Cd ppb	Ni ppb	Pb ppb	مقادیر
۱/۳۰	۲/۱۸	۱۳/۸۸	۱۶/۰۰	۲/۳۷	۰/۱۵	۲۴/۹۰	۱۵/۳۱	۴/۰۵	۹/۷۵	۱۸/۳۰	۲/۴۹	۱/۲۲	۱۲/۱۹	۳/۰۴	میانگین
۰/۱۶	۰/۶۴	۶/۷۰	۹/۱۷	۰/۲۴	۰/۰۳	۹/۴۰	۱/۳۰	۰/۳۳	۲/۱۴	۱۳/۱۰	-	۰/۰۶	۵/۵۲	۳/۸۸	انحراف معیار
۱/۶۲	۳/۱۴	۳۷/۱۱	۳۰/۰۰	۲/۵۵	۰/۲۶	۴۴/۷۰	۱۷/۱۵	۴/۴۰	۱۶/۸۷	۶۳/۸۰	۲/۴۹	۱/۲۸	۳۱/۶۰	۱۳/۲۳	بیشترین
۱/۰۸	۱/۰۶	۷/۲۵	۱۰/۰۰	۱/۵۸	۰/۱۲	۱۴/۸۰	۱۱/۳۲	۳/۰۵	۶/۹۹	۱۱/۰۰	-	۱/۱۶	۷/۳۰	۱/۰۷	کمترین

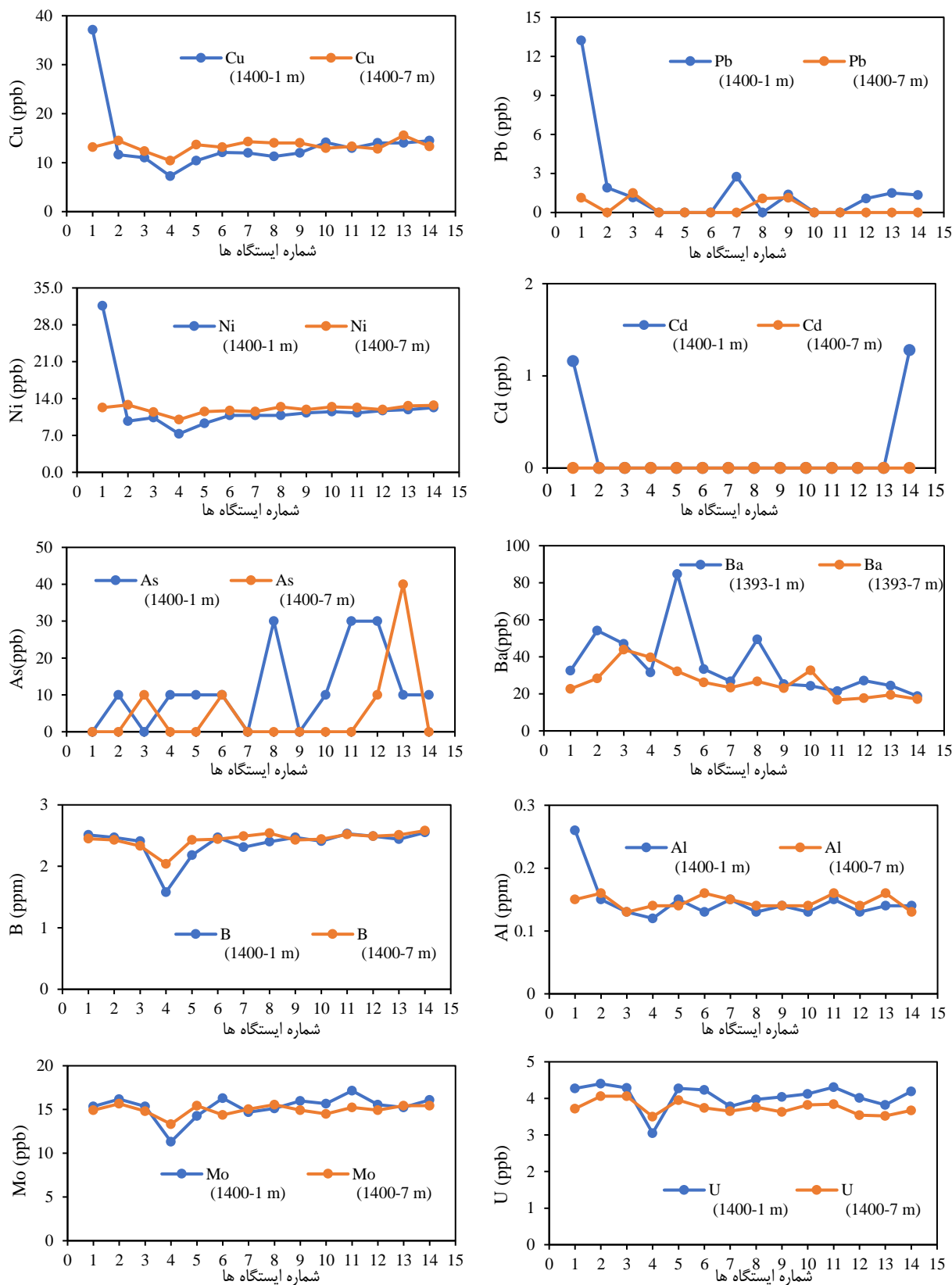
عناصر که در پایش سال ۱۴۰۰ اندازه‌گیری شدند ولی غلظتی از آن‌ها با توجه به دقت دستگاه در هیچ نمونه‌ای مشاهده نشدند: $V < ۱ \text{ ppb}$, $Bi < ۱ \text{ ppb}$, $Gd < ۰/۵ \text{ ppb}$, $Cr < ۱ \text{ ppb}$, $Sb < ۱ \text{ ppb}$, $W < ۱ \text{ ppb}$, $Pr < ۱ \text{ ppb}$, $Sm < ۰/۱ \text{ ppb}$, $Th < ۱ \text{ ppb}$, $Ag < ۱ \text{ ppb}$, $Y < ۱ \text{ ppb}$, $Hg < ۱ \text{ ppb}$, $Br < ۰/۰۱ \text{ ppm}$, $Fe < ۰/۰۱ \text{ ppm}$, $In < ۰/۰۵ \text{ ppb}$, $Mn < ۰/۱ \text{ ppm}$, $Sn < ۱ \text{ ppb}$, $Be < ۰/۲ \text{ ppb}$, $Cd < ۱ \text{ ppb}$

جدول ۴. غلظت فلزهای سنگین و عناصر سمی و غیر سمی در پایش سال ۱۴۰۰ در عمق هفت متری

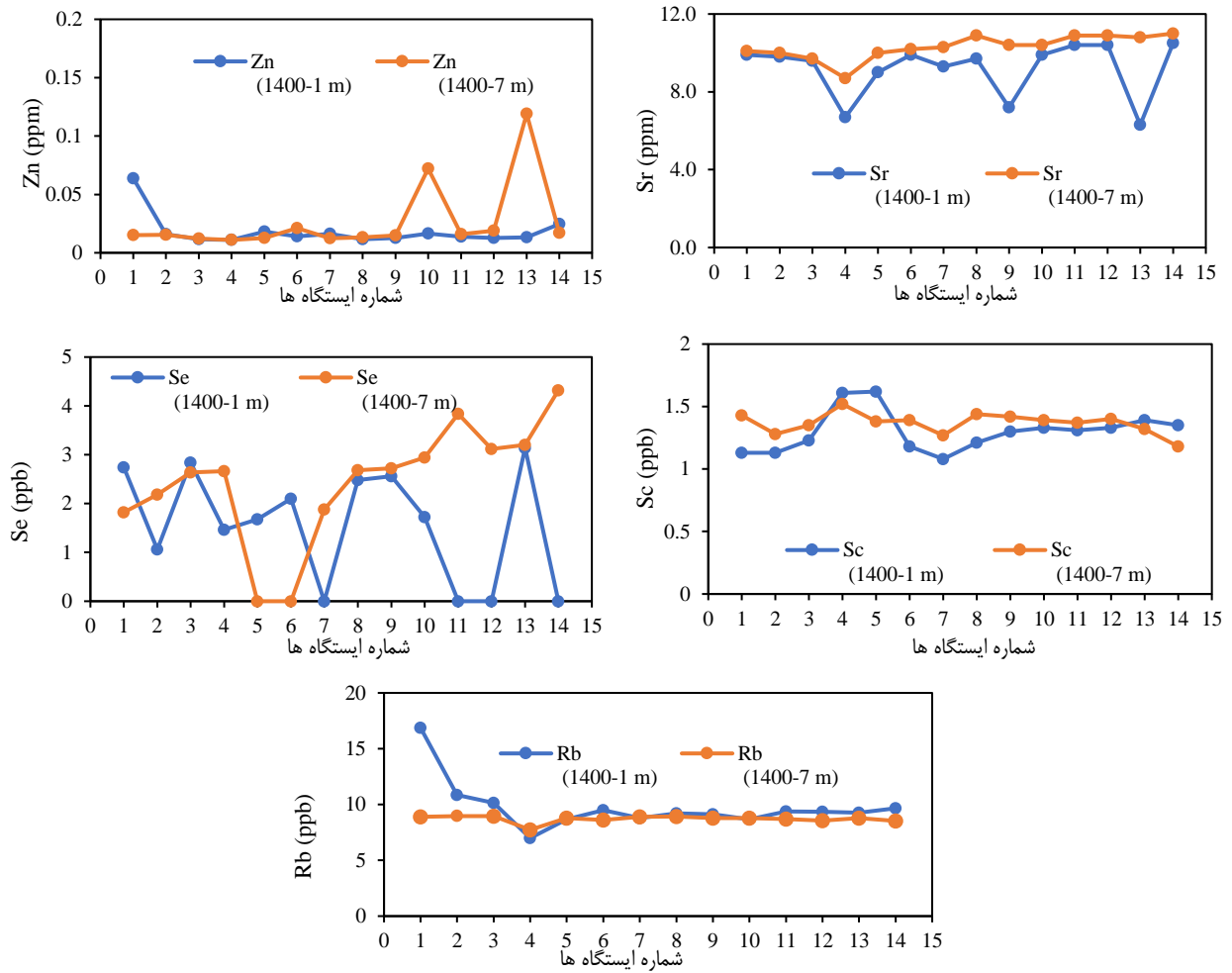
Sc ppb	Se ppb	Cu ppb	As ppb	B ppm	Al ppb	Ba ppb	Mo ppb	U ppb	Rb ppb	Zn ppb	Co ppb	Ni ppb	Pb ppb	مقادیر
۱/۳۷	۲/۸۳	۱۳/۳۹	۱۷/۵۰	۲/۴۴	۰/۱۵	۱۴/۳۰	۱۴/۹۷	۳/۷۵	۸/۷۱	۲۶/۵۰	۱/۹۴	۱۱/۹۶	۱/۲۱	میانگین
۰/۰۸	۰/۷۰	۱/۱۴	۱۳/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۱	۳/۲۰	۰/۵۹	۰/۱۸	۰/۳۰	۳۹/۷۰	-	۰/۷۰	۰/۱۷	انحراف معیار
۱/۵۲	۴/۳۲	۱۵/۵۸	۴۰/۰	۲/۵۸	۰/۱۶	۲۲/۹۰	۱۵/۶۶	۴/۰۶	۸/۹۶	۱۱۹/۰۰	۱/۹۴	۱۲/۸۰	۱/۵۰	بیشترین
۱/۱۸	۱/۸۲	۱۰/۴۱	۱۰/۰۰	۲/۰۴	۰/۱۳	۱۰/۹۰	۱۳/۳۳	۳/۵۰	۷/۷۳	۱۱/۰۰	-	۱۰/۰۰	۱/۰۷	کمترین

عناصر که در پایش سال ۱۴۰۰ اندازه‌گیری شدند ولی غلظتی از آن‌ها با توجه به دقت دستگاه در هیچ نمونه‌ای مشاهده نشدند: $V < ۱ \text{ ppb}$, $Bi < ۱ \text{ ppb}$, $Gd < ۰/۵ \text{ ppb}$, $Cr < ۱ \text{ ppb}$, $Sb < ۱ \text{ ppb}$, $W < ۱ \text{ ppb}$, $Pr < ۱ \text{ ppb}$, $Sm < ۰/۱ \text{ ppb}$, $Th < ۱ \text{ ppb}$, $Ag < ۱ \text{ ppb}$, $Y < ۱ \text{ ppb}$, $Hg < ۱ \text{ ppb}$, $Br < ۰/۰۱ \text{ ppm}$, $Fe < ۰/۰۱ \text{ ppm}$, $In < ۰/۰۵ \text{ ppb}$, $Mn < ۰/۱ \text{ ppm}$, $Sn < ۱ \text{ ppb}$, $Be < ۰/۲ \text{ ppb}$, $Cd < ۱ \text{ ppb}$

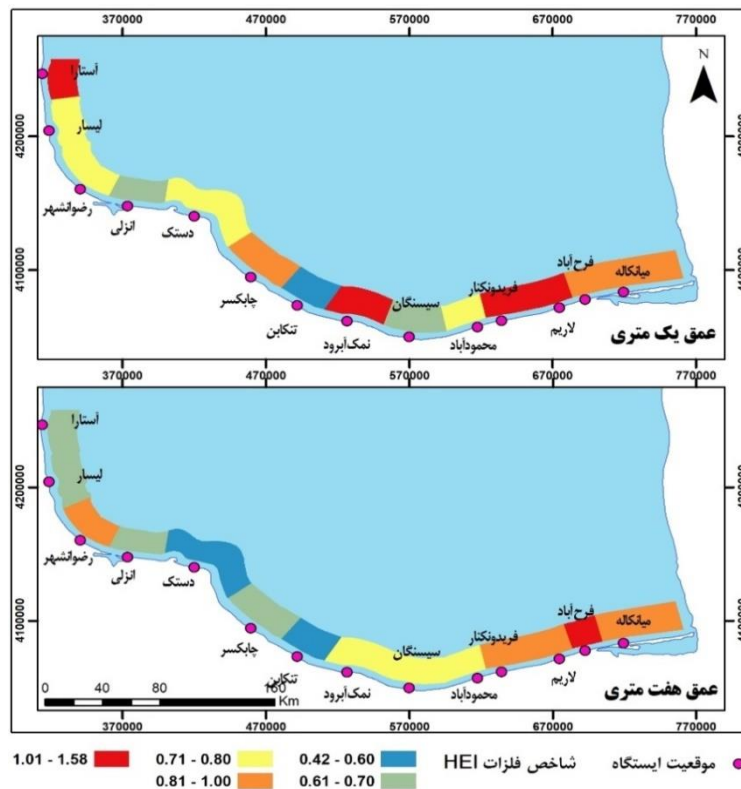
شاخص ارزیابی فلزهای سنگین (HEI) در دو عمق یک و هفت متر پایش سال ۱۴۰۰ در اکثر نمونه‌ها (۱۰ ایستگاه عمق یک متر و ۱۳ ایستگاه عمق هفت متر) در محدوده خالص و یا (۱-۳) قرار دارد و مقدار غلظت اندازه‌گیری شده کم‌تر از حداکثر غلظت مجاز بر طبق استاندارد ۱۰۵۳ است. اما در عمق یک متر ایستگاه‌های آستارا، نمک آبرود، فریدونکنار، لاریم و عمق هفت متر فرح آباد شاخص ارزیابی فلزهای سنگین در فاصله (۱-۲) و یا ناحیه کمی تحت تأثیر فلزهای سنگین می‌باشد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص ارزیابی فلزهای سنگین در عمق یک متر به ترتیب در ایستگاه آستارا و تنکابن و در عمق هفت متر به ترتیب در ایستگاه فرح آباد و دستک ثبت شد. شکل (۳)، مقادیر این شاخص را بر روی ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در عمق یک و هفت متر نشان می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات غلظت فلزهای سنگین در ۱۴ ایستگاه سال ۱۴۰۰

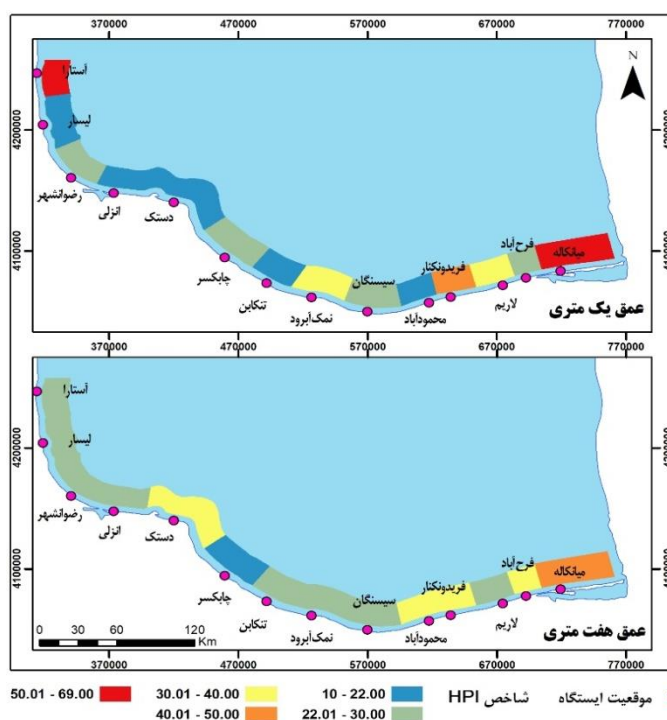


ادامه شکل ۲. تغییرات غلظت فلزهای سنگین در ۱۴ ایستگاه سال ۱۴۰۰

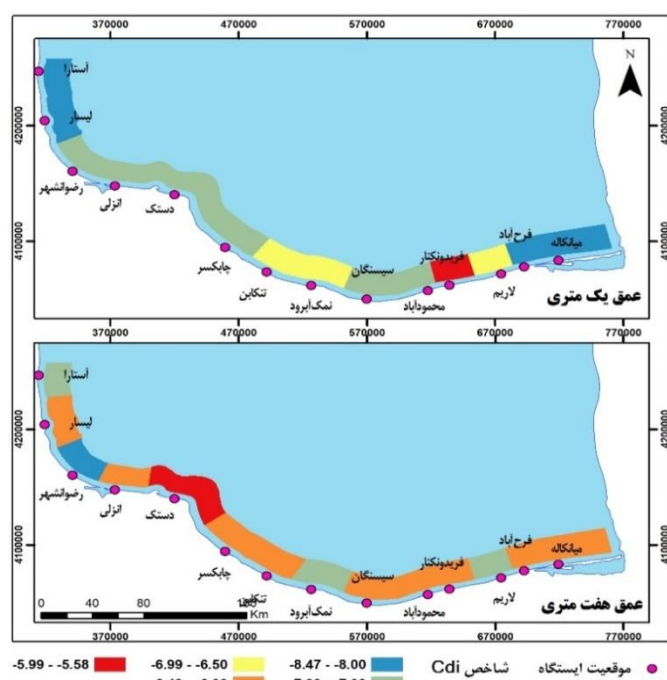


شکل ۳. مقادیر شاخص ارزیابی فلزهای سنگین (HEI) در ایستگاه‌های مختلف سواحل جنوبی دریای خزر

همچنین با توجه به نتایج، شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) برای تمام نمونه‌ها در این پژوهش، کم‌تر از ۱۰۰ می‌باشد که در محدوده آلودگی کم می‌باشد. علاوه بر این، مقدار شاخص درجه آلودگی (Cd) که در برگیرنده اثرات ترکیبی چندین پارامتر کیفی آب است در همه نمونه‌ها منفی است که در دسته آلودگی کم قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج بدست آمده از شاخص‌های مختلف، در بعضی از ایستگاه‌ها، مقدار آلودگی در عمق یک متر بیش‌تر از عمق هفت متر است که با توجه به فاصله کم‌تر عمق یک متر از ساحل، می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر این آلودگی‌ها متأثر از ساحل و آب‌های ورودی از رودخانه‌ها می‌باشد که می‌تواند به علل متفاوت مانند فاضلاب آلوده صنایع مختلف در مسیر و یا فاضلاب انسانی باشد. شکل (۴) و (۵) به ترتیب شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) و شاخص درجه آلودگی (Cd) را با رنگ بندی‌های مختلف در پایش سال ۱۴۰۰ برای عمق‌های یک و هفت متر نشان می‌دهد.



شکل ۴. مقادیر شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) در ایستگاه‌های مختلف سواحل جنوبی دریای خزر



شکل ۵. مقادیر شاخص درجه آلودگی فلزهای سنگین (Cd_i) در ایستگاه‌های مختلف سواحل جنوبی دریای خزر

سیفی و ریاحی (۱۳۹۸) در پژوهشی به منظور بررسی کیفیت آب‌های سطحی معدن مس سرچشمه از شاخص‌های آلودگی فلزهای سنگین استفاده کردند. با توجه به نتایج بدست آمده در این کار، مقدار شاخص HPI در بیش از ۷۰٪ نمونه‌ها در بازه بحرانی یا بیشتر از عدد ۱۰۰ قرار دارد و شاخص HEI و Cd به ترتیب در ۹۶٪ و ۸۴٪ از مکان‌های نمونه برداری بیانگر آلوده بودن آب این نقاط به فلزهای سنگین می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده در تحقیق ما شاخص HPI در تمام ۱۴ ایستگاه پایش در هر دو عمق، کمتر از ۱۰۰ بدست آمد و شاخص Cd نیز در تمام نمونه‌ها منفی بدست آمد که بیانگر عدم آلودگی به فلزهای سنگین بر طبق این دو پارامتر می‌باشد. همچنین شاخص HEI در بازه (۱-۳) و (۱-۲) ثبت شد که به ترتیب بیانگر محدوده خالص و کمی تحت تأثیر فلزهای سنگین است.

در پژوهش اوجکونل و همکاران (۲۰۱۶)، میانگین غلظت سرب (۳۲/۴ ppb)، روی (۲۱۴/۹ ppb)، کادمیم (۱۲/۱ ppb) و مس (۳۴/۱) در یکی از مناطق ضایعات می‌باشد و مقداری برای غلظت نیکل ثبت نشد. اما در پروژه ما، میانگین غلظت سرب، روی، کادمیم، مس و نیکل در عمق یک متر به ترتیب (۳/۰۴ ppb)، (۱۸/۳ ppb)، (۱/۲۲ ppb)، (۱۳/۸۸ ppb) و (۱۲/۱۹ ppb) ثبت شد. با توجه به داده‌ها، میانگین شاخص‌های آلودگی فلزهای سنگین (HPI=۵۱۸/۵۵) و ارزیابی فلزهای سنگین (HEI=۴/۸۳) بدست آمد که به ترتیب بیانگر آلودگی به فلزهای سنگین و به شدت تحت تأثیر فلزهای سنگین است. بیشترین مقدار شاخص‌های (HPI) و (HEI) مطالعه ما در عمق یک متر به ترتیب (۶۸/۴۹) و (۱/۵۳) و در عمق هفت متر به ترتیب (۴۱/۱۴) و (۱/۵۸) بدست آمد که در بازه عدم آلودگی به فلزهای سنگین بر طبق شاخص (HPI) و کمی تحت تأثیر فلزهای سنگین بر طبق شاخص (HEI) قرار می‌گیرد.

آتانگنا و ابرهلستر (۲۰۲۱) در پروژه ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی، غلظت فلزهای سنگین نیکل، مس، آهن، باریم، منگنز و روی را اندازه‌گیری و از شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) و شاخص ارزیابی فلزهای سنگین (HEI) استفاده کردند. با توجه به نتایج شاخص ارزیابی فلزهای سنگین بیش از ۷۵٪ مناطق اندازه‌گیری شده در این مطالعه از کیفیت مطلوبی برخوردار نبودند و فقط کیفیت ۲۵٪ از آنها مناسب بود. علاوه بر این شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) در تمام نمونه‌ها کمتر از ۱۰۰ و یا در محدوده فاقد آلودگی فلزهای سنگین قرار دارد. اما بر اساس نتایج پژوهش ما، میانگین شاخص (HEI) هر دو عمق در بازه (۱-۳) و (۱-۲) ثبت شد که بیانگر محدوده خالص و یا کمی تحت تأثیر فلزهای سنگین می‌باشد. همچنین شاخص (HPI) نیز به طور میانگین در عمق یک متر (۳۰/۰۱) و عمق هفت متر (۲۹/۴۸) بدست آمد و فاقد آلودگی فلزهای سنگین است.

کیو و همکاران (۲۰۱۸) در پروژه تحلیل ریسک غلظت فلزهای سنگین در آب‌های سطحی در سطح روستایی - شهری، به بررسی فلزهای سنگین روی، آرسنیک، جیوه، مس، کروم، کادمیم و سرب پرداختند. با توجه به نتایج، میانگین غلظت سرب (۴/۲۳ ppb)، روی (۷۲/۱ ppb)، کادمیم (۰/۹۸ ppb)، آرسنیک (۱/۷۱ ppb)، کروم (۵/۳۲ ppb)، جیوه (۰/۰۳ ppb) و مس (۲۰/۹ ppb) بدست آمد. همچنین، نتایج نشان داد، که تمامی مقادیر شاخص فلزهای سنگین (HPI) کم‌تر از سطح بحرانی ۱۰۰ است و غلظت فلزهای سنگین، خطرهای زیست‌محیطی ندارد. در پروژه ما، میانگین غلظت فلزهای سرب، جیوه، مس، کروم، کادمیم، روی و آرسنیک در عمق یک و هفت متر کم‌تر از غلظت فلزها در این کار می‌باشد و شاخص (HPI) نیز در محدوده فاقد آلودگی به فلزهای سنگین قرار دارد.

کون و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه شاخص‌های فلزهای سنگین در آب‌های سطحی و زیرزمینی در اطراف معدن تونگون غلظت فلزهای سنگین را محاسبه کردند. با توجه به نتایج، میانگین غلظت فلزهای سنگین غلظت سرب (۰/۰۱۶ ppm)، کادمیم (۰/۹۸ ppb)، آرسنیک (۵/۷۶۱ ppm)، کروم (۰/۱۷۸ ppm)، منگنز (۰/۶۸۴ ppb) و مس (۲/۹۳۹ ppm) بدست آمد و شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) نیز در محدوده بیشتر از ۱۰۰ قرار گرفت که بیانگر آلودگی رودخانه به فلزهای سنگین می‌باشد. اما با توجه به اینکه در پروژه ما حداکثر غلظت سرب (۱۳/۲۳ ppb)، کادمیم (۱/۲۸ ppb)، آرسنیک (۴۰/۰ ppb) و مس (۳۷/۱۱ ppb) ثبت شد، شاخص (HPI) در تحقیق ما به طور میانگین در عمق یک و هفت متر به ترتیب (۳۰/۰۱) و (۲۹/۴۸) بدست آمد که نشان‌دهنده عدم آلودگی سواحل جنوبی دریای خزر به فلزهای سنگین بر طبق این شاخص می‌باشد.

پرساد و بوس (۲۰۰۱) به مطالعه شاخص‌های فلزهای سنگین (مس، کادمیم، آهن، کروم، منگنز، سرب و روی) آب چشمه و آب سطحی در نزدیکی معدن سنگ آهک پرداختند. در این مطالعه غلظت هفت فلزهای سنگین، در طول دوره پیش و پس از مانسون، کمتر از حد مجاز استانداردهای کیفیت آب آشامیدنی بود. همچنین شاخص آلودگی فلزهای سنگین (HPI) آب چشمه و آب‌های سطحی، بسیار کمتر از حد شاخص ۱۰۰ است و این امر به این واقعیت اشاره دارد که علیرغم رشد فراوان معدن سنگ آهک در منطقه، آب چشمه و آب‌های سطحی نسبت به فلزهای سنگین آلوده نیستند. نتایج این کار با داده‌های شاخص (HPI) پژوهش ما برای سواحل جنوبی دریای خزر، در یک محدوده می‌باشد.

قبادی و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی غلظت فلزات سنگین نیکل، روی، سرب، مس، کروم، کادمیم، آرسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت همدان انجام دادند، از شاخص‌های فلزهای سنگین برای جمع‌بندی نتایج و ارائه دسته‌بندی آلودگی آب به فلزهای سنگین، استفاده کردند. بر اساس داده‌های ارائه شده، شاخص‌های HEI، HPI، Cd در فصل بهار و تابستان به ترتیب در دسته آلودگی کم، آلودگی اندک و آلودگی کم قرار دارند. نتایج شاخص‌های این مطالعه با کار ما کمی متفاوت می‌باشد به عبارت دیگر در کار ما شاخص (Cd) منفی و (HPI) نیز کمتر از ۱۰۰ بدست آمد که نشان‌دهنده عدم آلودگی به فلزهای سنگین بر طبق این شاخص‌ها می‌باشند. همچنین مقدار میانگین شاخص (HEI) در عمق یک و هفت متر به ترتیب (۰/۹۰) و (۰/۷۷) بدست آمد.

در مطالعه‌ای که توسط اصغری مقدم و همکاران (۱۳۹۹) بر روی ویژگی‌های هیدروشیمیایی آبخوان دشت نقده انجام دادند، به منظور آنالیز غلظت فلزهای سنگین کروم، روی، آرسنیک، منگنز، آهن و آلومینیوم از شاخص آلودگی فلزهای سنگین استفاده کردند. با توجه به نتایج مقدار میانگین HPI کل منطقه ۲۳/۲۴ ثبت شد و کیفیت ۷۰٪ نمونه‌ها مناسب بوده است. در این مطالعه انحلال سازندهای زمین شناسی، استخراج معدن سنگ آهن، فعالیت واحدهای صنعتی و تغلیظ عناصر در نتیجه تبخیر بالا منطقه، عوامل اصلی غلظت بالای فلزهای سنگین در آب زیرزمینی بیان شدند. در کار ما نیز غلظت این فلزها بررسی شد و میانگین شاخص (HPI) در عمق یک متر (۳۰/۰۱) و هفت متر (۲۹/۴۸) بدست آمد که کمتر از مقدار بحرانی ۱۰۰ می‌باشد و بیانگر عدم آلودگی به فلزهای سنگین است.

ماجهی و بیسوال (۲۰۱۶) در تحقیقی کیفیت آب زیرزمینی اطراف حوضچه‌های خاکستر بعضی از نیروگاه‌های حرارتی منطقه اودیشا هند را بررسی کردند. در این کار آن‌ها غلظت فلزهای سنگین سرب، کادمیم، سلنیوم، آرسنیک و کروم را آنالیز و بر اساس آن پارامتر HPI را برای بخش‌های مختلف در این منطقه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ محاسبه کردند. با توجه به نتایج، HPI در بازه تقریبی ۱۷ تا ۶۰ قرار دارد و بر اساس دسته بندی ارایه شده مقدار این شاخص در بعضی از نقاط برای آب آشامیدنی خوب و برای بعضی نقاط کمی آلوده است. بر اساس داده‌های غلظت فلزهای سمی و سنگین در پروژه ما، شاخص (HPI) در عمق یک متر در بازه (۶۸/۴۹-۱۰/۰۴) و در عمق هفت متر در محدوده (۴۱/۱۴-۲۱/۹۰) قرار گرفتند، به عبارت دیگر بر اساس این شاخص ایستگاه‌های پایش فاقد آلودگی به فلزهای سنگین هستند.

سبحان‌اردکانی (2016) در مطالعه‌ای که بر روی منابع آب زیرزمینی دشت قهاوند انجام داد به بررسی آلودگی کیفی منابع آب و آنالیز شاخص‌های فلزهای سنگین HEI، HPI، Cd در فصل بهار و تابستان پرداخت. با توجه به نتایج مقادیر این شاخص‌ها به ترتیب در فصل بهار ۲/۲۷-، ۹/۰۱، ۱/۷۳ و در تابستان ۱/۹۵-، ۸/۶۹، ۲/۰۴ بدست آمد که سطح آلودگی کم را نشان می‌دهد و غلظت فلزهای سنگین نیز از مقدار مجاز کم‌تر است. در پروژه ما نیز این شاخص‌ها بررسی شدند که شاخص (Cd) برای هر دو عمق منفی و در محدوده کم، شاخص (HPI) در محدوده کمتر از ۱۰۰ و یا عدم آلودگی به فلزهای سنگین در هر دو عمق یک و هفت متر و شاخص (HEI) در محدوده خالص و کمی تحت تأثیر قرار دارد.

استفاده از ارزیابی آلودگی منابع آب و خاک نسبت به فلزهای سنگین با روش آنالیز شاخص‌های فلزهای سنگین در آب و رسوب در پروژه‌های زیادی قابل مشاهده است. در مطالعه بررسی غلظت فلزهای سنگین در رسوبات مصبی رودخانه‌های مهم بخش جنوبی دریای خزر که توسط باقری و بسطامی انجام شد (۱۴۰۱)، از شاخص‌های درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)، ضریب بار آلودگی (PLI) و شاخص غنی شدگی (EF) برای ارزیابی و آنالیز ریسک رودخانه‌های گرگانرود، قره‌سو، تجن، بابلرود، سردآبرود، صفارود، چشمه گیله و سفیدرود استفاده گردید. در این کار بیش‌ترین غلظت آهن (۴۵۰۰۰ ppm)، آلومینیوم (۷۴۰۰۰ ppm)، کروم (۱۴۲/۷۸ ppm)، کبالت (۳۳/۶۷ ppm) و سرب (۵۶/۷۰ ppm) در رودخانه رامسر، آرسنیک (۱۸/۴۵ ppm) و روی (۱۱۰/۳ ppm) در رودخانه گرگانرود، نیکل (۶۰ ppm) در رودخانه قره‌سو و مس (۵۲/۶۳ ppm) در سفیدرود بدست آمد. مقدار غلظت این فلزها در ایستگاه‌های پایش ما بسیار کمتر از مقادیر ثبت شده در رودخانه‌های منتهی به سواحل جنوبی دریای خزر می‌باشد. با توجه به نتایج، mCd و PLI همه رودخانه‌ها به ترتیب در محدوده درجه آلودگی پایین تا متوسط و در بازه بیش‌تر از یک و یا کمی آلوده تا آلوده می‌باشد و همچنین از لحاظ خطر در محدوده کم ریسک و از لحاظ EF در محدوده آلودگی متوسط تا شدید قرار دارد.

در جدول (۵) نتایج مربوط به محاسبه شاخص‌های مختلف فلزهای سنگین در پایش سال ۱۴۰۰ بیان شده است و مقادیر انحراف معیار، میانگین، بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار آن‌ها نیز ذکر شد.

جدول ۵. نتایج شاخص‌های فلزهای سنگین در پایش ۱۴۰۰

ایستگاه ها	عمق یک متر			عمق هفت متر		
	HPI	CDi	HEI	HPI	CDi	HEI
آستارا	۱/۵۳	-۸/۴۷	۰/۶۲	۶۲/۷۷	-۷/۳۸	۲۴/۸۲
لیسار	۰/۷۵	-۸/۲۵	۰/۶۵	۱۵/۲۴	-۶/۳۵	۲۵/۴۴
رضوانشهر	۰/۷۱	-۷/۲۹	۰/۹۰	۲۸/۸۱	-۸/۱۰	۲۴/۴۰
بندر انزلی	۰/۶۸	-۷/۳۲	۰/۶۴	۱۵/۹۸	-۶/۳۶	۲۸/۱۰
دستک	۰/۷۷	-۷/۲۳	۰/۴۲	۱۸/۰۷	-۵/۵۸	۳۴/۶۴
رامسر	۰/۸۳	-۷/۱۷	۰/۶۱	۲۱/۴۱	-۶/۳۹	۲۱/۹۰
تنکابن	۰/۴۶	-۶/۵۴	۰/۶۰	۱۰/۰۴	-۶/۴۰	۲۲/۹۳
نمک آبرود	۱/۲۶	-۶/۷۴	۰/۷۲	۳۰/۱۲	-۷/۲۸	۲۸/۱۸
سیسنگان	۰/۷۰	-۷/۳۰	۰/۷۳	۲۷/۲۰	-۶/۳۱	۲۶/۶۶
محمودآباد	۰/۸۰	-۷/۲۰	۰/۷۲	۱۸/۹۶	-۶/۲۸	۳۰/۷۷
فریدونکنار	۱/۰۴	-۵/۹۶	۰/۸۱	۴۰/۶۸	-۶/۱۹	۳۷/۵۳
لاریج	۱/۰۶	-۶/۹۴	۰/۹۲	۳۵/۲۸	-۷/۰۸	۲۷/۹۹
فرح آباد	۰/۹۸	-۸/۰۰	۱/۵۸	۲۷/۱۶	-۶/۴۲	۳۸/۲۲
میانکاله	۰/۹۴	-۸/۰۶	۰/۸۶	۶۸/۴۹	-۶/۱۴	۴۱/۱۴
Ave	۰/۹۰	-۷/۳۲	۰/۷۷	۳۰/۰۱	-۶/۵۹	۲۹/۴۸
SD	۰/۲۶	۰/۶۶	۰/۲۶	۱۶/۶۲	۰/۶۲	۵/۸۷
Max	۱/۵۳	-۵/۹۶	۱/۵۸	۶۸/۴۹	-۵/۵۸	۴۱/۱۴
Min	۰/۴۶	-۸/۴۷	۰/۴۲	۱۰/۰۴	-۸/۱۰	۲۱/۹۰

به دلیل غیرپارامتریک بودن توزیع فلزها در نمونه‌های آب، استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن در تحلیل‌ها مناسب به نظر می‌رسد (سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸). ضریب همبستگی در بازه ۱ تا ۱- تغییر می‌کند. اعداد ۱ و ۱- بیانگر رابطه همبستگی خوب بین پارامترها و عدد صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی می‌باشد. اگر مقدار ضریب همبستگی بین دو پارامتر بزرگ‌تر از ۰/۷ باشد بیانگر همبستگی زیاد و اگر مقدار آن در بازه ۰/۷-۰/۵ قرار بگیرد، نشان‌دهنده همبستگی متوسط بین پارامترها است (Shyu et al., 2011; سیفی و ریاحی، ۱۳۹۸). رابطه همبستگی اسپیرمن بین فلزهای سنگین و شاخص‌های آن در عمق یک متری پایش سال ۱۴۰۰ در جدول (۶) بیان شده است. با توجه به اینکه غلظت بعضی از فلزهای سنگین در ایستگاه‌های نمونه برداری ثبت نشد، تعداد آن‌ها نمونه‌ها کمتر از تعداد مطلوب است و علی‌رغم بالا بودن ضریب همبستگی در جدول (۶)، رابطه بین آن‌ها با سایر متغیرها معنی‌دار نیست. با توجه به جدول (۶)، بین شاخص ارزیابی فلزهای سنگین و شاخص درجه آلودگی با آرسنیک در سطح اطمینان ۹۹٪ و با فلز نیکل و مس نیز در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه معنی‌دار وجود دارد. همچنین بین شاخص آلودگی فلزهای سنگین با نیکل و سلنیوم در سطح اطمینان ۹۹٪ و با مس در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه معنی‌دار مشاهده می‌شود.

با توجه به جدول (۷)، بین سلنیوم با شاخص ارزیابی فلزهای سنگین و شاخص آلودگی فلزهای سنگین در سطح اطمینان ۹۹٪ رابطه معنی‌دار و مثبت وجود دارد. همچنین بین عنصر مس با مولیبدن (رابطه مثبت) و نیکل با سرب (رابطه منفی) نیز در سطح اطمینان ۹۹٪ رابطه معنادار مشاهده می‌شود و بین سلنیوم با روی (رابطه مثبت)، مولیبدن با نیکل (رابطه مثبت)، روی با نیکل (رابطه منفی) و درجه آلودگی با شاخص آلودگی فلزهای سنگین (رابطه مثبت) در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه معنادار وجود دارد. در رابطه مثبت هر دو پارامتر نسبت مستقیم با یکدیگر دارند و با افزایش یکی دیگری نیز افزایش می‌یابد ولی در رابطه منفی با افزایش یکی دیگری کاهش می‌یابد و برعکس. با توجه به این که غلظت فلز کادمیم در عمق هفت متر، کمتر از حد شناسایی توسط دستگاه بود در بررسی‌های عمق هفت متر این فلز حذف شد.

جدول (۶). رابطه همبستگی اسپیرمن بین فلزهای سنگین و شاخص‌های آن در پایش سال ۱۴۰۰ در عمق یک متری

HEI	CD	HPI	Pb	Ni	Zn	Mo	Ba	Al	As	Cu	Se
۰/۰۲	CD										
۰/۷۳**	-۰/۰۷	HPI									
-۰/۰۲	-۰/۴۳	-۰/۳۸	Pb								
۰/۶۳*	-۰/۱۸	۰/۶۹**	۰/۱۲	Ni							
۰/۱۷	-۰/۲۸	-۰/۰۸	-۰/۷۱	۰/۴۰	Zn						
۰/۲۴	۰/۰۲	-۰/۳۶	-۰/۲۹	۰/۳۳	-۰/۲۲	Mo					
۰/۰۳	-۰/۱۹	-۰/۰۷	-۰/۴۳	-۰/۰۷	-۰/۰۸	۰/۶۵*	Ba				
۰/۱۲	-۰/۲۰	-۰/۰۶	۰/۹۶**	۰/۲۳	۰/۶۸*	-۰/۱۴	-۰/۳۹	Al			
۰/۸۰**	۰/۸۰**	۰/۵۷	-۰/۷۸	۰/۱۵	-۰/۴۹	-۰/۱۱	-۰/۳۴	-۰/۰۴	As		
۰/۵۸*	-۰/۱۷	-۰/۵۶*	-۰/۲۱	۰/۹۵**	۰/۵۶*	-۰/۴۷	-۰/۱۲	۰/۲۷	-۰/۰۰	Cu	
۰/۵۵	-۰/۳۲	۰/۸۶**	-۰/۴۳	۰/۵۹	-۰/۱۸	-۰/۲۱	-۰/۰۶	-۰/۰۹	-۰/۴۱	-۰/۳۴	Se

* معادل $P < ۰/۰۵$ و ** معادل $P < ۰/۰۱$

جدول (۷). رابطه همبستگی اسپیرمن بین فلزهای سنگین و شاخص‌های آن در پایش سال ۱۴۰۰ در عمق هفت متری

HEI	CD	HPI	Pb	Ni	Zn	Mo	Ba	Al	As	Cu	Se
-۰/۲۱	CD										
۰/۴۲	۰/۵۳*	HPI									
-۰/۸۰	-۰/۴۰	-۰/۸۰	Pb								
۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۴۶	-۱/۰۰**	Ni							
۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۳۳	-۰/۴۰	-۰/۶۵*	Zn						
۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۴۲	-۰/۹۵	۰/۶۴*	۰/۰۸	Mo					
-۰/۰۶	۰/۲۹	۰/۲۳	-۰/۸۰	-۰/۳۸	۰/۰۵	-۰/۵۱	Ba				
-۰/۲۲	-۰/۰۱	-۰/۱۷	-۰/۶۳	۰/۲۵	۰/۳۹	-۰/۱۸	-۰/۱۳	Al			
۰/۷۸	۰/۲۶	۰/۷۸	-	-۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۵۴	As		
۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۷	-۰/۶۳	۰/۵۲	۰/۱۶	۰/۷۸**	-۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۷۸	Cu	
۰/۷۴**	۰/۵۷	۰/۸۸**	۰	۰/۳۴	۰/۶۴*	-۰/۱۷	۰/۲۵	-۰/۱۴	۰/۸۷	-۰/۲۰	Se

* معادل $P < ۰/۰۵$ و ** معادل $P < ۰/۰۱$

نتیجه‌گیری

در این کار غلظت فلزهای سنگین و خطرناک مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت که مقدار بعضی از آن‌ها مانند آرسنیک، بور، نیکل و مس بیش‌تر از مقدار استاندارد تعریف شده برای دریای خزر می‌باشد. همچنین با توجه به غلظت‌های بدست آمده در عمق یک متر، بر اساس شاخص ارزیابی فلزهای سنگین (HEI)، ایستگاه آستارا (۱/۵۳) بیش‌ترین مقدار دارد و در محدوده کمی تحت تأثیر فلزهای سنگین قرار می‌گیرد و تنکابن با کم‌ترین مقدار این شاخص یعنی (۰/۴۶) در بازه آب خالص از جنبه فلزهای سنگین می‌باشد. علاوه بر این، بر اساس دسته‌بندی شاخص تجمع‌ی آلودگی فلزهای سنگین یعنی شاخص درجه آلودگی (Cd)، مقدار تمام ایستگاه‌ها کم‌تر از یک است و در دسته آلودگی کم قرار می‌گیرد.

در این پروژه، بر اساس آنالیز آماری انجام شده، در عمق یک متر بین مس با روی، شاخص ارزیابی فلزهای سنگین و شاخص آلودگی فلزهای سنگین، مولیبدن با باریوم، آلومینیوم با روی، نیکل با شاخص ارزیابی فلزهای سنگین، در سطح اطمینان ۹۵٪ و بین نیکل با مس، آلومینیوم با سرب در سطح اطمینان ۹۹٪ رابطه همبستگی معنی‌دار وجود دارد. ضرایب مثبت و منفی در این روابط همبستگی به ترتیب بیانگر رابطه مستقیم و عکس این پارامترها با یکدیگر می‌باشد. همچنین در عمق هفت متر بین مس با مولیبدن و نیکل با سرب در سطح اطمینان ۹۹٪ و بین نیکل با روی و مولیبدن، روی با سلیوم در سطح اطمینان ۹۵٪ رابطه معنی‌دار وجود دارد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع:

- آبادی، محمد، زمانی، عباسعلی، پری زنگنه، عبدالحسین، خسروی، یونس و بدیعی، حسین (۱۳۹۷). اندازه گیری غلظت فلزات سنگین در آب و جلبک اسیپروژیر در امتداد سواحل جنوبی ایرانی دریای خزر. *مجله علمی - پژوهشی زیست شناسی دریا*. ۱۰(۳)، ۳۹-۵۲.
- اصغری مقدم، اصغر، ندیری، عطاالله و صادقی اقدم، فریبا (۱۳۹۹). بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی آبخوان دشت نقده و شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI). *فصلنامه علمی علوم زمین*. ۲۹(۱۱۵)، ۹۷-۱۱۰.
- اعظمی، جابر، مرادپور، حبیب و کیانی‌مهر، ناصر (۱۳۹۶). مروری بر شاخص‌های زیستی محیط‌های آلوده به فلزات سنگین. *فصلنامه انسان و محیط زیست*. ۱۱(۱)، ۱۳-۲۴.
- باقری، حسین و درویش‌بسطامی، کاظم (۱۴۰۱). بررسی غلظت فلزات سنگین در رسوبات مصبی رودخانه‌های مهم بخش جنوبی دریای خزر. *مجله محیط زیست و مهندسی آب*. ۸(۱)، ۳۱-۴۶.
- بهنام، هدیه و فرخیان فیروزی، احمد (۱۴۰۱). استفاده از مدل‌های سینتیک و هم‌دمای خطی و غیرخطی در ارزیابی کارایی حذف سرب از محلول‌های آبی با استفاده از زغال‌های زیستی. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۳(۲)، ۳۳۳-۳۴۶.
- حسن پور، مهدی، پورخیز، علیرضا و قربانی، رسول (۱۳۹۰). اندازه گیری فلزات سنگین در آب، رسوب و پرنده وحشی چنگر در حاشیه جنوب شرقی دریای خزر. *مجله علوم پزشکی مازندران*. ۲۰(۱)، ۱۸۴-۱۹۴.
- حمزه پور، علی، درویش‌بسطامی، کاظم، باقری، حسین، عظیمی، علی، عینعلی، علی و رهنما، رضا (۱۳۹۵). بررسی خواص فیزیکی، شیمیایی و مواد مغذی آب‌های سطحی سواحل جنوبی دریای خزر سیسنگان. *مجله پژوهش علوم و فنون دریایی*. ۱۱(۱)، ۴۱-۵۲.
- خلیلی، رضا، منتصری، حسین، متقی، حامد و جلیلی محمدباقر (۱۴۰۰). ارزیابی کیفیت آب رودخانه تالار استان مازندران با استفاده از ترکیب شاخص‌های کیفیت آب و مدل‌سازی چندمتغیره. *مدلسازی و مدیریت آب و خاک*. ۱(۴)، ۳۰-۴۷.
- سازمان حفاظت محیط زیست (۱۳۹۵). *استاندارد کیفیت آب‌های ایران*.
- سیفی، اکرم و ریاحی، حسین (۱۳۹۸). ارزیابی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در آب‌های سطحی معدن مس سرچشمه با روش‌های آماری چندمتغیره و GIS. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۰(۱)، ۱۶۱-۱۷۶.
- سینکا کریمی، محمدحسین، پورخیز، علیرضا و حسن پور، مهدی (۱۳۹۴). بررسی استفاده از آب و بافت پرندهگان آبی جهت سنجش آلودگی فلزی (مطالعه موردی: تالاب‌های بین‌المللی میانکاله و گمیشان). *فصلنامه اکوبیولوژی تالاب*. ۷(۳۳)، ۱۵-۲۸.
- قبادی، آزاده، چراغی، مهرداد، سبحان اردکانی، سهیل، لرستانی، بهاره و مریخ‌پور، هاجر (۱۴۰۱). ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی دشت همدان - بهار در سال ۱۳۹۷. *نشریه علوم آب و خاک*. ۱(۲۳۷)، ۲۶-۲۵۷.
- محمودی، نعمت‌الله، احمدی، محمدرضا، بابانژاد، منوچهر، سیف‌آبادی، جعفر و روحی، ابوالقاسم (۱۳۹۲). ارزیابی ویژگی‌های مکانی کیفیت آب سواحل مازندران در فصل تابستان و شناسایی عوامل کنترل‌کننده آن (رویکرد چند متغیره). *مجله علوم و فنون شیلات*. ۲(۲)، ۴۷-۶۱.
- موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (۱۳۸۸). آب آشامیدنی - ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (ویرایش پنجم).
- نصرالله زاده ساروی، حسن، نجف‌پور، شعبان، رضایی، مریم و سلیمانی‌رودی، عبدالله (۱۳۹۳). مطالعه تغییرات زمانی-مکانی غلظت فلزات سنگین (روی، مس، نیکل، سرب، کادمیم و جیوه) در آب سواحل ایرانی حوزه جنوبی دریای خزر. *مجله علمی پژوهشی زیست شناسی دریا*. ۱۲(۱)، ۱-۱۲.

REFERENCES

- Aazami J, Moradpour H, KianiMehrn N. (2017). A review of biotic indices for heavy metals in polluted environment. *Human & Environment*, 15(1), 13-24. (In Persian)
- Abadi M, Zamani A, Parizangane A, Khosravi Y, Badiee H. (2018). Spatial distribution of heavy metals (Zn, Cu, Pb, Co, Ni and Cd) in water and algae *Spirogyra* sp. in the southern Iranian coasts of the Caspian Sea. *Marine Biology*, 10(3), 39-52. (In Persian)
- Ameh E, Akpah F. (2011). Heavy metal pollution indexing and multivariate statistical evaluation of hydrogeochemistry of River PovPov in Itakpe Iron-Ore mining area, Kogi State, Nigeria. *Advances in applied science research*, 2(1), 33-46.
- Appiah Opong R, Ofori A, Ofosuhene M, Ofori-Attah E, Nunoo FK, Tuffour I, et al. (2021). Heavy metals concentration and pollution index (HPI) in drinking water along the southwest coast of Ghana. *Applied Water Science*, 11(3), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01386-5>.
- Asgharai Moghaddam A, Nadiri AA, Sadeghi Aghdam F. (2020). Investigation of hydrogeochemical characteristics of groundwater of Naqadeh plain aquifer and heavy metal pollution index (HPI). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29(115), 97-110. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.127310.1464>. (In Persian)

- Atangana E, Oberholster PJ. (2021). Using heavy metal pollution indices to assess water quality of surface and groundwater on catchment levels in South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 182,104254. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104254>.
- Bagheri H, Bostami KD. (2022). Investigation of Heavy Metal Concentrations in Estuarine Sediments of Important Rivers in The Southern Part of The Caspian Sea. *Environment and Water Engineering*, 8(1), 31-46. <https://doi.org/10.22034/JEWE.2021.286828.1569>. (In Persian).
- Behnam H, Farrokhian Firouzi A. (2022). Application of linear and non-linear kinetic and isotherm models for evaluation of lead removal efficiency from aqueous solutions using biochars. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(2), 333-46. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.333585.669124>. (In Persian).
- Bhuyan MS, Bakar MA, Rashed-Un-Nabi M, Senapathi V, Chung SY, Islam MS. (2019). Monitoring and assessment of heavy metal contamination in surface water and sediment of the Old Brahmaputra River, Bangladesh. *Applied Water Science*, 9(5), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1004-y>.
- Celik A, Kartal AA, Akdoğan A, Kaska Y. (2005). Determining the heavy metal pollution in Denizli (Turkey) by using Robinio pseudo-acacia L. *Environment international*, 31(1), 105-12. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.07.004>.
- Chabukdhara M, Gupta SK, Kotecha Y, Nema AK. (2017). Groundwater quality in Ghaziabad district, Uttar Pradesh, India: multivariate and health risk assessment. *Chemosphere*, 179, 167-78. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.086>.
- Ghobadi A, Cheraghi M, Sobhan Ardakani S, Lorestani B, Merrikhpour H. (2022). Heavy Metals Pollution Assessment in Groundwater Resources of Hamadan-Bahar Plain in 2018. *Journal of Water and Soil Science*, 26(1), 239-57. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.1.43971>. (In Persian)
- Chou Y-M, Polansky AM, Mason RL. (1998). Transforming non-normal data to normality in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, 30(2), 133-41 <https://doi.org/10.1080/00224065.1998.11979832>.
- Hamzehpour A, Darvish Bastami K, Bagheri H, Azimi A, Einali A, Rahnama R. (2016). Survey of physicochemical properties and nutrients in surface waters of the southern Caspian Sea-Seasangan. *Journal of Marine Science & Technology Research*, 11(1), 41-52. (In Persian).
- Hassanpour M, Pourkhabbaz A, Ghorbani R. (2011). The measurement of heavy metals in water, sediment and wild bird (common coot) in Southeast Caspian Sea, *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, 20(1), 184-94. (In Persian).
- Herrera-Silveira JA, Morales-Ojeda SM. (2009). Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin*, 59(1-3), 72-86. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.11.017>.
- Iran IoSaIRo. Drinking water -Physical and chemical specifications(5th.revision). (2010). Iran: Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (In Persian).
- Khalili R, Montaseri H, Motaghi H, Jalili MB. (2021). Water quality assessment of the Talar River in Mazandaran Province based on a combination of water quality indicators and multivariate modeling. *Water and Soil Management and Modelling*, 1(4), 30-47. <https://doi.org/10.22098/mmws.2021.9322.1033>. (In Persian).
- Kone K, Rodrigue KA, Kouassi KE, Adouby K. (2019). Heavy metal pollution index of surface water and groundwater around Tongon Mine (Côte d'Ivoire). *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 7(5), 103-11. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20190705.12>.
- Li M, Zhang Z, Li R, Wang JJ, Ali A. (2016). Removal of Pb (II) and Cd (II) ions from aqueous solution by thiosemicarbazide modified chitosan. *International journal of biological macromolecules*. 86, 876-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.02.027>.
- Mahmoudi N, Ahmadi M, Babanezhad M, Seifabadi J, Roohi A. (2013). Spatial characteristics assessment of water quality and identify its controlling factors along Mazandaran coasts during summer (multivariate approach). *Fisheries Science and Technology*, 2(2), 47-61. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23225513.1392.2.2.6.2>. (In Persian).
- Mahmud HNME, Huq AO, binti Yahya R. (2016). The removal of heavy metal ions from wastewater/aqueous solution using polypyrrole-based adsorbents: a review. *Rsc Advances*, 6(18), 14778-91. <https://doi.org/10.1039/C5RA24358K>.
- Majhi A, Biswal SK. (2016). Application of HPI (heavy metal pollution index) and correlation coefficient for the assessment of ground water quality near ash ponds of thermal power plants. *International Journal of Science Engineering and Advance Technology*, 4(8), 395-405.
- Marcovecchio JE, Botté SE. (2007). Heavy metals, major metals, trace elements. Handbook of water analysis, CRC Press, 289-326.



- Mishra S, Kumar A, Yadav S, Singhal MK. (2018). Assessment of heavy metal contamination in water of Kali River using principle component and cluster analysis, India. *Sustainable Water Resources Management*, 4, 573-81. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0141-4>.
- Mohan SV, Nithila P, Reddy SJ. (1996). Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science & Health Part A*, 31(2), 283-9. <https://doi.org/10.1080/10934529609376357>.
- Mousavi SJ, Parvini M, Ghorbani M. (2018). Adsorption of heavy metals (Cu²⁺ and Zn²⁺) on novel bifunctional ordered mesoporous silica: Optimization by response surface methodology. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 84, 123-41. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.010>.
- Mousavi SJ, Parvini M, Ghorbani M. (2018). Experimental design data for the zinc ions adsorption based on mesoporous modified chitosan using central composite design method. *Carbohydrate polymers*, 188, 197-212. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.105>.
- Nasrollahzadeh Saravi H, Najafpour S, Rezaei M, Solaimaniroodi A. (2014). Temporal and spatial of heavy metals concentrations (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd and Hg) in Iranian coastal waters of the Southern Caspian Sea. *Marine Biology*, 6(1), 1-12. (In Persian)
- Nguyen TTH, Zhang W, Li Z, Li J, Ge C, Liu J, et al. (2016). Assessment of heavy metal pollution in Red River surface sediments, Vietnam. *Marine pollution bulletin*, 113(1-2), 513-9. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.030>.
- Nzeve JK, Njuguna SG, Kitur EC. (2015). Assessment of heavy metal contamination in surface water of Masinga Reservoir, Kenya. *Journal of Natural Sciences Research*, 5(2), 101-108.
- Ojekunle OZ, Ojekunle OV, Adeyemi AA, Taiwo AG, Sangowusi OR, Taiwo AM, et al. (2016). Evaluation of surface water quality indices and ecological risk assessment for heavy metals in scrap yard neighbourhood. *SpringerPlus*, 5(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2158-9>.
- Organization EP. (2015). Iranian water quality standard. *Environmental Protection Organization*. (In Persian)
- Panigrahy BP, Singh PK, Tiwari AK, Kumar B, Kumar A. (2015). Assessment of heavy metal pollution index for groundwater around Jharia coalfield region, India. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 6(3), 33-9.
- Prasad B, Bose J. (2001). Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environmental geology*, 41(1-2), 183-8. <https://doi.org/10.1007/s002540100380>.
- Prasanna M, Praveena S, Chidambaram S, Nagarajan R, Elayaraja A. (2012). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring: a case study from Curtin Lake, Miri City, East Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(7), 1987-2001. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1639-6>.
- Qishlaqi A, Moore F, Forghani G. (2009). Characterization of metal pollution in soils under two land use patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 172(1), 374-84. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.024>.
- Qu L, Huang H, Xia F, Liu Y, Dahlgren RA, Zhang M, et al. (2018). Risk analysis of heavy metal concentration in surface waters across the rural-urban interface of the Wen-Rui Tang River, China. *Environmental pollution*, 237, 639-49. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.020>.
- Seifi A, Riahi H. (2019). Evaluation of heavy metal pollution indices for surface water of the Sarcheshmeh copper mine using multivariate statistical methods and GIS. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1), 161-76. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.254261.667869>. (In Persian).
- Shirodkar P, Mesquita A, Pradhan U, Verlekar X, Babu M, Vethamony P. (2009). Factors controlling physico-chemical characteristics in the coastal waters off Mangalore—a multivariate approach. *Environmental Research*, 109(3), 245-57. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.11.011>.
- Shyu G-S, Cheng B-Y, Chiang C-T, Yao P-H, Chang T-K. (2011). Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in Taiwan. *International journal of environmental research and public health*, 8(4), 1084-109. <https://doi.org/10.3390/ijerph8041084>.
- Singh PK, Tiwari A, Panigrahy B, Mahato M. (2013). Water quality indices used for water resources vulnerability assessment using GIS technique: a review. *Int J Earth Sci Eng*, 6(6-1), 1594-600.
- Sinka Karimi MH, Pourkhabbaz AR, Hassanpour M. (2015). Study of using water and waterfowl organs for evaluation of metal pollution (case study: Miankaleh and Gomishan international wetlands). *Wetland Ecology*, 7(23), 15-28. (In Persian).
- Sobhan Ardakani S. (2016). Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of

- Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 10(3), 35-40. <http://dx.doi.org/10.29252/arakmu.10.3.35>.
- Sobhan Ardakani S, Taghavi L, Shahmoradi B, Jahangard A. (2017). Groundwater quality assessment using the water quality pollution indices in Toyserkan Plain. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 4(1), 21-7. <http://dx.doi.org/10.15171/EHEM.2017.04>
- Sobhan Ardakani S, Yari AR, Taghavi L, Tayebi L. (2016). Water quality pollution indices to assess the heavy metal contamination, case study: groundwater resources of Asadabad Plain in 2012. *Archives of Hygiene Sciences*, 5(4), 221-8. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22519203.2016.5.4.3.8>.
- Tiwari MK, Bajpai S, Dewangan U, Tamrakar RK. (2015). Assessment of heavy metal concentrations in surface water sources in an industrial region of central India. *Karbala International Journal of Modern Science*, 1(1),9-14. <https://doi.org/10.1016/j.kijoms.2015.08.001>.
- Zaker NH, Ghaffari P, Jamshidi S. (2007). Physical study of the southern coastal waters of the Caspian Sea, off Babolsar, Mazandaran in Iran. *Journal of Coastal Research*, 564-9. <https://www.jstor.org/stable/26481651>.
- Zhou Q, Yang N, Li Y, Ren B, Ding X, Bian H, et al. (2020). Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00925. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>.



Analysis of heavy metal indexes in the water of the southern shores of the Caspian Sea (monitoring year 1400)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Coastal areas are considered as important and sensitive regions due to their abundant water resources, unique ecological and biological resources, economic activities, social interactions, and tourism. However, due to population growth and improper exploitation, significant environmental damages have been inflicted upon these areas. One of the most pressing global issues is environmental pollution by heavy and hazardous metals. Heavy metals are considered persistent and enduring pollutants in the environment, as they accumulate in food chains or organisms and have various adverse effects. Assessing different indexes of water pollution is a simple and practical method to examine water quality, analyze its qualitative changes, and identify sensitive areas. Evaluation indexes for heavy metals, such as the Heavy Metal Evaluation Index (HEI), Heavy Metal Pollution Index (HPI), and Contamination degree (Cd), are utilized in various studies for classifying water pollution in terms of heavy metals. The Caspian Sea, as the largest enclosed water body on Earth, possesses unique natural conditions and plays a significant geopolitical role in the region. Therefore, due to the importance of coastal protection, water resource management, pollutant control, and the examination of environmental changes and their causes, this article presents the results of the analysis of heavy metal and toxic parameters in the water of the Caspian Sea during the monitoring of the year 1400. Additionally, the results were analyzed using statistical methods and calculated various indexes for heavy metals at the sampling stations.

Method:

The sampling in this monitoring was conducted using a water sampling device at depths of one meter and seven meters. However, in the Astara and Miankaleh stations, due to coastal conditions, sampling was carried out at depths of one meter and four meters. The sampling stations from east to west in the Caspian Sea are: Miankaleh, Farahabad, Larim, Fereydunkenar, Mahmudabad, Sisangan, Namakabroud, Tonekabon, Ramsar, Dastak, Bandar-e Anzali, Rezvanshahr, Lisar, and Astara. For sampling at each station, the sampling container was rinsed with water from the same location, and then 1000 milliliters of water were collected from an approximate depth of 35 centimeters. The samples were sent to the laboratories in cooling chambers on the same day, according to the relevant standards. In this monitoring, the concentrations of heavy elements such as molybdenum (Mo), mercury (Hg), copper (Cu), selenium (Se), bromine (Br), strontium (Sr), silicon (Si), arsenic (As), boron (B), aluminum (Al), barium (Ba), uranium (U), rubidium (Rb), lead (Pb), nickel (Ni), zinc (Zn), cobalt (Co), cadmium (Cd), and chromium (Cr) were measured using the inductively coupled plasma method, and their composition was determined by mass spectrometry, following the standard method number 3125. This monitoring was carried out in Mehr 1400, with three replicates for each station's sampling, and the average of the results was reported.

Results and Discussion:

In this study, the concentrations of various heavy and hazardous metals were assessed, and some of them, such as arsenic, boron, nickel, and copper, were found to exceed the standard limits in the Caspian Sea. Furthermore, based on the obtained concentrations at a depth of one meter, the Heavy Metal Evaluation Index (HEI) indicated that the Astara station (53.1) had the highest value, indicating a moderate impact of heavy metals, while Tonekabon had the lowest value (0.46), indicating relatively clean water in terms of heavy metals. In addition, the pollution degree index value (Cd) of all stations is less than one, so they are in the category of low pollution. In this project, based on the performed statistical analysis, at a depth of one meter, significant correlations were found at a 95% confidence level between copper and lead, the Heavy Metal Evaluation Index and the Heavy Metal Pollution Index, molybdenum and barium, aluminum and lead, nickel and the Heavy Metal Evaluation Index. The positive and negative coefficients in the correlation relationships indicate a direct and inverse relationship between these parameters, respectively. At a depth of seven meters, significant correlations were found at a 99% confidence level between copper and molybdenum, nickel and lead. Moreover, a significant correlation at a 95% confidence level was observed between nickel and copper, and also between molybdenum and selenium.

Keywords: Caspian Sea, Correlation Coefficient, Evaluation Index, Heavy Metals, Pollution Degree Index.