

Survey and zoning the concentration of heavy metals in the water of wells along the Sistan River from zero point border to Hamoun International Wetland

Akram Enayat¹ , Fatemeh Einollahipeer^{2*} , Sahel Pakzad Toochoei^{3*} , Malihe Erfani⁴ 

¹ Former M.Sc. Student, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

² Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

³ Assistant Professor, Department of Natural Ecosystems, Hamoun International Wetland Research Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Abstract

Introduction

The main activity of people in the Sistan region is agriculture and animal husbandry, which due to the drought and the unavailability of surface water and the intermittent flow of water in the Sistan River, the digging of irrigation wells has expanded in this area. The Sistan River continues of Afghanistan's Helmand River, which passes through agricultural and urban areas. Therefore, it is possible that some kinds of pollutants, especially heavy metals, can come from different sources. On the other hand, after entering the Sistan Plain, the river affects the water level of wells along the river. Therefore, in case of contamination, it may increase the concentration of heavy metals in wells. However, until now, the concentration of heavy metals in the water wells has not been investigated and only the salinity factor has been considered from the point of view of water quality. The quality of drinking water is associated with the concentration of physicochemical compounds such as nitrate, phosphate, various anions and cations, and organic and inorganic pollutants such as heavy metals. Drinking water contaminated with metals is turning into a primary health concern for human health care. Therefore, surveying the quality of water can be helpful in management. The aim of this study is to investigate the concentration of heavy metals in the wells along the Sistan River, in order to ensure the quality of water for agriculture, husbandry, and human consumption.

Materials and Methods

In this research, in order to ensure the appropriate quality of water in terms of the concentration of heavy metals and also the possible effect of EC and pH factors on their changes, the concentration of some elements and factors were mentioned in the water samples of 26 active wells. The samples were collected along the Sistan River (with a maximum distance of 1000 meters buffer zone) from the border point to the entrance to Hamoun Hirmand (Afzal-Abad branch, Lorg Bagh and Khwaje mountain) from January to March 2022. According to the investigation of the Afzal-Abad branch and the absence of wells, no samples were obtained from this section. At the same time as the sampling, the characteristics of the well, such as the year of establishment and the type of water usage were recorded. Sampling was done in three repetitions and during sampling pH, EC, TDS, and salinity variables were measured by a portable calibrated device and recorded three times. The collected samples were transferred to the laboratory in order to measure heavy metals in sterilized frosted glass containers. The standard method of the American Public Health Association (APHA) was used to measure each of the considered factors. After the preparation of samples, the concentration of heavy metals was measured with ICP. The obtained results were zoned using the normal kriging and co-kriging methods based on the selected model resulting from the prediction standard error. Geostatistical kriging methods (such as simple kriging, normal kriging, and co-kriging) were used for interpolation of heavy metals distribution. In the semi-variable analysis, the variability of the factors with respect to the spatial distance was organized by different linear, spherical, etc. functions using ArcGIS software.

Results and Discussion

The average amount of pH was measured at 8.31. The concentrations of salinity and TDS were 3.74 and 4.62 g l⁻¹, respectively. EC value was also measured as 6322 μS cm⁻¹. The average concentration of Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, and Pb

was also obtained at 2.64, 124, 10, 5.9, 33, 17, 1.43, and 2.79 $\mu\text{g l}^{-1}$ respectively. The trend of elements obtained $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd}$. The results indicated a low concentration of Cd, Ni, Cr, Cu, Fe, and Zn While Pb concentration was higher than the standard. The low concentration of the mentioned elements is due to the alkaline pH of water, which acts as a buffer and causes the elements to become insoluble and precipitate. Some dangerous elements such as mercury could not be measured due to their low concentration. The amount of salinity and EC factors also showed that the well water is not suitable for agriculture and livestock. The result of element zoning also showed that the concentration of metals increases from the border towards the lake. According to the age of the wells, it can be said that the reason for the decrease in the concentration of metals is due to the longer life of the wells and the chance of water mixing during the Sistan River water harvesting.

Conclusion

The result showed that the concentration of metals, except lead, is lower than the standard value. The low concentration of elements may be due to the alkaline condition of water, which acts as a buffer and causes the insoluble and finally precipitate. Or it can be due to the lower concentration in the bedrock, which can be obtained by surveying the geology of the bed of the wells. The variation in metal concentration among the sampling sites may be due to the age of the well. So up to the Sistan dam, where the wells are older, the concentration of elements is lower. It may be due to river flow, which can cause dilution of metals in wells during high water season. According to the amount of salinity and EC, irrigation with water can cause a quality decrease of soil that leads to loss of cultivated area. Moreover, the fact that water is not suitable for livestock and alternative sources should be introduced.

Keywords: Hamoun wetland, Kriging interpolation, Sistan plain, Water pollution

Article Type: Research Article

Acknowledgment

The authors wish to thank the well owners and farmers in the region for their cooperation during sampling. The authors also wish to thank the Research Institute of Zabol, especially the Hamon International Wetland Research Institute for their cooperation in the laboratory department.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Akram Enayat: Investigation, Methodology, Data analysis; **Fateme Einollahipeer:** Investigation, Methodology, Resources, Validation, Draft review; **Sahel Pakzad Tochaei:** Sampling, Conceptualization, Methodology, Manuscript editing; **Malihe Erfani:** Data analysis, Methodology, Software.

*Corresponding Author, E-mail: fatemeheinollahi@uoz.ac.ir

Citation: Enayat, A., Einollahipeer, F., Pakzad Tochaei, S., & Erfani, M. (2024). Survey and zoning the concentration of heavy metals in water of wells along the Sistan River from zero point border to Hamoun International Wetland. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 52-69.
DOI:10.22098/mmws.2023.12096.1215

Received: 28 January 2023, Received in revised form: 06 February 2023, Accepted: 12 February 2023, Published online: 27 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 1, pp. 52-69
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)





سنجش و پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در آب چاهک‌های امتداد رودخانه سیستان از نقطه صفر مرزی تا تالاب بین‌المللی هامون

اکرم عنایت^۱، فاطمه عین‌الهی پیر^{۲*}، ساحل پاکزاد توچایی^۳، ملیحه عرفانی^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۲ استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

^۳ استادیار، گروه پژوهشی اکوسیستم‌های طبیعی، پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

^۴ استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

چکیده

رودخانه سیستان که ادامه رودخانه هلمند افغانستان است در مسیر عبور خود از زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری می‌گذرد. بنابراین، احتمال ورود انواع آلاینده‌ها به‌ویژه فلزات سنگین از منابع مختلف به این رودخانه وجود دارد. از طرفی، رودخانه پس از ورود به دشت سیستان سطح آب چاهک‌های امتداد رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، در صورت آلودگی ممکن است باعث افزایش غلظت فلزات سنگین در آب چاهک‌ها شود. بر این اساس هدف پژوهش حاضر، بررسی غلظت فلزات سنگین در آب چاهک‌های امتداد رودخانه سیستان بود. نمونه‌برداری از ۲۶ حلقه چاهک فعال در زمستان ۱۴۰۰، از نقطه مرز مشترک افغانستان تا هامون هیرمند انجام شد. غلظت فلزات سنگین با استفاده از دستگاه ICP به‌دست آمد. سپس، نتایج به کمک روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ، توسط نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی شد. میانگین pH برابر ۸/۳۱ بود. درحالی‌که غلظت شوری و ذرات معلق کل به‌ترتیب ۳/۷۴ و ۴/۶۲ گرم بر لیتر به‌دست آمد. هدایت الکتریکی نیز ۶۳۲۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. میانگین غلظت کروم، آهن، نیکل، مس، روی، کادمیم و سرب به‌ترتیب ۲/۶۴، ۱۲۴، ۱۰/۵، ۹/۳۳، ۱۷، ۱/۴۳ و ۲/۷۹ میکروگرم بر لیتر محاسبه شد. الگوی عناصر مورد بررسی نیز به‌صورت کادمیم < کروم < سرب < مس < نیکل روی برآورد شد. نتایج مطالعه اخیر حاکی از کم‌تر بودن غلظت فلزات سنگین کروم، آهن، نیکل، مس، روی و کادمیم در مقایسه با حد مجاز سازمان بهداشت جهانی بود. درحالی‌که غلظت سرب بالاتر از حد مجاز این استاندارد سنجش شد. پایین بودن غلظت عناصر مذکور می‌تواند به‌دلیل کم بودن غلظت عناصر در سنگ بستر باشد. همچنین، pH قلیایی آب می‌تواند به‌صورت بافر عمل کرده و موجب غیرمحلول شدن عناصر و رسوب آن‌ها شود. میزان عوامل شوری و هدایت الکتریکی نشان دادند که آب چاهک‌ها برای زراعت و شرب دام مناسب نیست. نتیجه پهنه‌بندی عناصر نشان‌دهنده افزایش غلظت فلزات از مرز افغانستان به سمت دریاچه هامون است. با توجه به قدمت چاهک‌ها (۶ ماه تا ۴۳ سال) می‌توان بیان کرد که عامل کاهش غلظت فلزات در بخش ابتدایی مسیر، به‌دلیل عمر بیشتر چاهک‌ها و برداشت مداوم آب و مخلوط شدن آب در طی زمان آب‌آوری رودخانه است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی آب، تالاب هامون، درون‌یابی کریجینگ، دشت سیستان

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.pakzad@uoz.ac.ir؛ fatemeheinollahi@uoz.ac.ir

استناد: عنایت، اکرم، عین‌الهی پیر، فاطمه، پاکزاد توچایی، ساحل، و عرفانی، ملیحه (۱۴۰۳). سنجش و پهنه‌بندی غلظت فلزات سنگین در آب چاهک‌های امتداد رودخانه سیستان از نقطه صفر مرزی تا تالاب بین‌المللی هامون. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۱(۴)، ۵۲-۶۹

DOI: 10.22098/mmws.2023.12096.1215

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۵۲ تا ۶۹

© نویسنده‌گان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

جاری بودن رودخانه سیستان در دشت سیستان، نقش مؤثر و حیاتی در اشتغال مردم منطقه دارد. به طوری که شغل اصلی مردم کشاورزی و دامداری بوده و معیشت مردم وابستگی بالایی به منابع آب ورودی رودخانه سیستان دارد (Hafezi Moghadas et al., 2012). از لحاظ وضعیت منابع آب سطحی، قسمت اعظم آب مورد نیاز کشاورزی در منطقه سیستان تنها از طریق جریانات آب سطحی رودخانه هیرمند تأمین می‌شود. بنابراین، افزایش سطح زیرکشت محصولات زراعی در این منطقه تا حد زیادی وابسته به میزان آب ورودی از کشور همسایه (افغانستان) است. این امر، سبب شده تا با ایجاد نوسان در آورد رودخانه هیرمند، سطح زیرکشت محصولات زراعی در منطقه تغییر یابد (Khosravi, 2010). با توجه به در دسترس نبودن همیشگی آب این رودخانه و خشکسالی‌های بیست ساله اخیر در منطقه و فصلی و دوره‌ای بودن جریان آب رودخانه سیستان، استفاده از چاهک‌ها در منطقه رواج یافته است. بدین ترتیب در طی خشکسالی‌های اخیر، کشاورزان لاجرم به حفر چاهک در منطقه به‌ویژه در امتداد این رودخانه روی آورده‌اند. حفر چاهک‌ها توانسته نقش مؤثری در میزان برداشت محصولات کشاورزی و ادامه‌دار بودن فرآیند دامداری و آبی‌پروری در طی خشکسالی‌های اخیر داشته باشد (Arshadi and Zare, 2020).

آب‌گیری مجدد رودخانه سیستان در زمان پرابی موجب افزایش سطح تراز آبی چاهک‌ها می‌شود. بنابراین، تغییرات عوامل کیفی آب رودخانه به‌ویژه وجود انواع آلاینده‌های احتمالی می‌تواند بر کیفیت آب چاهک‌ها در امتداد رودخانه تأثیر داشته باشد. چرا که انواع آلاینده‌های آلی و معدنی، از طریق فعالیت‌های انسانی از قبیل کشاورزی، به رودخانه‌ها و آب‌های سطحی وارد شده (Khalili et al., 2021a,b) و احتمال انتقال و انتشار انواع آلودگی‌ها از طریق رودخانه‌ها به منابع زیرزمینی وجود دارد (Zhou et al., 2020, Astuti et al., 2021). وجود احتمالی این ترکیبات در منابع آبی چاهک‌ها می‌تواند تأثیر معناداری بر سلامت محصولات و دام منطقه داشته باشد. بنابراین، با توجه به استفاده از آب چاهک‌ها برای شرب دام، کشاورزی و آبی‌پروری بایستی کیفیت آب از نظر فلزات سنگین به کمک روش‌های علمی بررسی شود. با این حال، بررسی‌های لازم از منظر کیفیت آب چاهک‌ها از لحاظ آلودگی‌های مختلف مانند غلظت فلزات سنگین صورت نگرفته و تنها به میزان هدایت الکتریکی^۱ (EC) آب توجه شده است. کیفیت آب مصرفی چاه‌های حفر شده در یک منطقه بر اساس

غلظت ترکیبات فیزیکی و شیمیایی آب از قبیل نیترات، فسفات، انواع آمیون‌ها و کاتیون‌ها، اکسیژن‌خواهی زیستی و شیمیایی و به‌ویژه انواع آلاینده‌های آلی و معدنی از قبیل فلزات سنگین از منظر کاربری‌های مختلف بررسی می‌شود (Kazemi et al., 2022; Mughal et al., 2022). در برخی از این مطالعات، به‌منظور ترسیم منطقی و منسجم نتایج حاصل، از روش‌های پهنه‌بندی استفاده می‌شود که نتایج آن‌ها می‌تواند به‌منظور تعیین سلامت منبع مصرفی و مدیریت بهتر استفاده شود (Belkhiri et al., 2020).

پهنه‌بندی کیفیت آب اولین و مهم‌ترین مرحله در مدیریت کیفیت آب است، که به کمک آن چگونگی پراکنش و روند تغییرات آلودگی بر حسب زمان و مکان نشان داده می‌شود. در پهنه‌بندی مؤلفه‌های کیفی آب زیرزمینی از شیوه‌های مختلف درون‌یابی استفاده می‌شود، که عمده‌ترین تفاوت بین این روش‌ها مربوط به چگونگی محاسبه وزنی است که به نقاط مشاهده شده اطراف نقطه مجهول داده می‌شود. روش میان‌یابی به روش کریجینگ (Kriging) از جمله روش‌های زمین آمار است که بر اساس مدل‌های آماری خودهمبستگی برازش می‌شود (Fathi Hafshejani and Beigi Harchegani, 2021; Qiao et al., 2020; Magno et al., 2021). تاکنون پژوهش‌های متعددی به‌منظور تحلیل مکانی و پهنه‌بندی انجام شده است که نشان می‌دهد، تحلیل وضعیت آلودگی به این روش می‌تواند نتایج مفیدی را فراهم سازد. به‌عنوان مثال، Arsalan and Turan (2015) پراکنش غلظت فلزات سنگین آب‌های زیرزمینی ۷۷ حلقه چاه در بخش میانی دریای سیاه (ترکیه) را از منظر شرب و کشاورزی مطالعه و پراکنش آن‌ها را به کمک روش کریجینگ تعیین کردند. در مطالعه‌ای، Belkhiri et al. (2020) کیفیت آب آشامیدنی ۳۵ حلقه چاه دشت ال‌میلا (الجزایر) را به کمک روش کریجینگ پهنه‌بندی کردند. نقشه پراکنش غلظت فلزات سنگین آب چاه‌های حوزه آبخیز Pangkajene اندونزی نیز به روش کریجینگ توسط Astuti et al. (2021) ترسیم شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که روش کریجینگ برای درون‌یابی وضعیت آلاینده‌ها در یک منطقه دقت بالایی دارد. بنابراین، با توجه به اهمیت بررسی کیفیت آب چاهک‌های حفر شده از لحاظ غلظت آلاینده‌های مختلف به‌ویژه فلزات سنگین در منطقه سیستان، نمونه‌برداری از آب چاهک‌ها انجام و غلظت فلزات سنگین بررسی شد. پس از اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در آب چاهک‌ها، از روش کریجینگ به‌منظور پهنه‌بندی غلظت عناصر در چاهک‌های حفر شده در طول مسیر رودخانه سیستان از ورودی مرز افغانستان تا ورودی به هامون هیرمند استفاده شد.

¹ Electrical conductivity

۲- مواد و روش‌ها

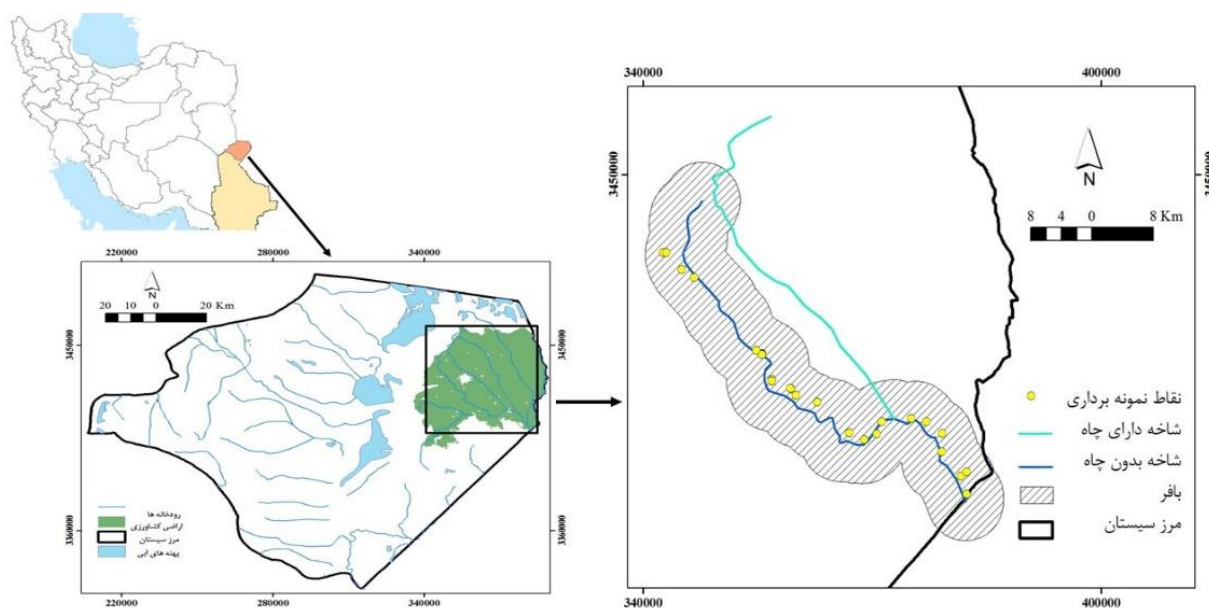
۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان و قسمت شرقی ایران با مختصات جغرافیایی ۶۱ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی، با ارتفاع متوسط ۴۷۸ متر از طرح دریا و به‌ویژه اقلیم گرم و خشک قرار دارد. آب و هوای این منطقه گرم و خشک است. عوامل اقلیمی این منطقه شامل: نزولات جوی کم، درجه حرارت بالا، تغییرپذیری بالای نزولات جوی، تبخیر-تعرق شدید و اقلیم مدیترانه‌ای است. نداشتن مانع ارتفاعی، پوشش گیاهی کم، شیب سست از یک طرف و جاگیری مختلف سینوپتیکی جوی در تمام سال از عمده دلایلی است که دشت سیستان را به یک مرکز بحرانی اقلیمی تبدیل کرده است (Khosravi, 2010).

بیش از ۶۱ درصد دشت سیستان با مساحت حدود ۳۲۶۲۵ هکتار دارای ارتفاع کم‌تر از ۶۰۰ متر بوده و بیش از ۹۰ درصد مساحت منطقه در طبقه شیب صفر تا هشت درصد قرار دارد. رودخانه سیستان در جنوب‌شرقی این دشت در مرز ایران و افغانستان از رودخانه هیرمند منشعب شده و پس از طی حدود ۷۲ کیلومتر مسافت، به دریاچه هامون هیرمند (شاخه افضل‌آباد، لورگ باغ و کوه خواجه) می‌ریزد (Piri and Ansari, 2013; Roodari et al., 2019). بخش اول رودخانه سیستان در منطقه مرزی تا محدوده سد سیستان در برگرفته فلات‌ها و تراس‌های فوقانی متشکل از واریزه‌های بادبزی شکل سنگ‌ریزه‌دار با

پستی و بلندی و بریدگی‌های کم تا نسبتاً زیاد و فرسایش آبی متوسط تا زیاد بوده که روی مارن‌های گچی و نمکی قرار گرفته است. پوشش خاکی این ارضی به‌صورت کم‌عمق تا نیمه‌عمیق و برخی عمیق بر روی مواد گچی و نمکی است. بخش میانی اطراف رودخانه، بین سد سیستان تا پل نهراب، در برگرفته دشت‌های دامنه‌ای حاصل از رسوب‌گذاری و نهشته‌های جدید رودخانه هیرمند است. دارای شیب ملایم و پستی و بلندی کم تا نسبتاً زیاد با خاک خیلی عمیق با بافت سبک تا سنگین به شکل لایه‌های مطبق با شوری و قلیائیت کم تا نسبتاً زیاد است. محدوده پایانی رودخانه، از پل نهراب تا لورگ باغ، در برگرفته تپه‌های کم ارتفاع تا نسبتاً مرتفع با قله مدور و گنبدی شکل بریده بریده و گسسته متشکل از مارن‌های گچی و نمکی و آهکی و رسی فرسایش‌پذیر است. اغلب فاقد پوشش خاکی در برخی دامنه‌ها و دره‌ها دارای خاک‌های کم عمق تا نیمه‌عمیق سنگ‌ریزه‌دار و دارای شوری بسیار زیاد است. عمق خاک در این اراضی کم تا متوسط و به‌طور غیریکنواخت و بافت خاک نیز متوسط تا سنگین ارزیابی شده است (Keikha et al., 2014).

در این مطالعه، برای بررسی کیفی چاهک‌های امتداد رودخانه سیستان، تعداد ۲۶ حلقه چاهک فعال در طول مسیر رودخانه سیستان از منطقه ورودی مرز (نقطه صفر مرزی) تا ورودی تالاب هامون هیرمند (شاخه افضل‌آباد، لورگ باغ و کوه خواجه) (به طول تقریبی ۷۲ کیلومتر) (با فاصله حداکثر ۱۰۰۰ متر از عرض رودخانه) انتخاب و نمونه‌برداری انجام شد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت چاهک‌های نمونه‌برداری در طول مسیر رودخانه هیرمند

Figure 1- Location of sampling wells along the Hirmand River

با استفاده از آزمون آماری ANOVA در سطح معناداری ۰/۰۵ به دست آمد. مقایسه پارامترهای مورد بررسی با استاندارد نیز به کمک آزمون t-test انجام شد. برای به دست آوردن نقشه پیش‌بینی تغییرات غلظت فلزات سنگین، از روش‌های زمین‌آماري کربجینگ (مانند کربجینگ ساده، کربجینگ معمولی و کوکربجینگ) جهت درون‌یابی استفاده شد (Belkhir et al., 2020). در تحلیل نیم تغییر نما، تغییرپذیری متغیر نسبت به فاصله مکانی با توجه به توابع مختلف خطی، کروی و غیره بررسی شد. در نهایت ارزیابی صحت لایه پیش‌بینی به دست آمده با استفاده از روش‌های ارزیابی متقابل مانند معیار جذر میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) بررسی شد. بدین ترتیب که بررسی ویژگی‌های آماری جهت بررسی دامنه، میانگین، چولگی و ضریب کشیدگی داده‌ها و مشاهده هیستوگرام داده‌ها انجام شد تا در صورت لزوم تبدیل داده‌ها انجام شود. از دیگر شروط داده‌ها برای کربجینگ این است که روندی در داده‌ها وجود نداشته باشد و همین‌طور ایستایی داشته باشند (واریانس محلی در مناطق مختلف منطقه ثابت باشد). برای مورد اول آزمون روند انجام شد و برای دومین مورد نقشه‌های Voronoi بررسی شد (Shen et al., 2015).

کربجینگ ساده با تبدیل نمره نرمال و در ادامه کربجینگ بیزی تجربی جهت درون‌یابی استفاده شد و نتایج این دو از نظر عوامل اعتبارسنجی شامل ریشه میانگین مربعات خطای پیش‌بینی شده^۶ (RMS) و همین‌طور بررسی نمودار ارزیابی متقابل، مقادیر برآورد و برای هر یک از عوامل مورد مقایسه صورت گرفت.

مختصات جغرافیایی به همراه مشخصات چاهک‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. در زمستان ۱۴۰۰ از عمق ۱۰ تا ۱۲ متر هر یک از چاهک‌ها نمونه‌برداری شد. هم‌زمان با نمونه‌برداری، مشخصات چاهک، از قبیل سال تأسیس، عمق به همراه کاربری آب (شرب انسان، کشاورزی، دامداری و آبرزی پروری) ثبت شد. در حین نمونه‌برداری متغیرهای pH و شوری، توسط دستگاه واسنجی شده پرتابل (شرکت Eutech)، اندازه‌گیری شد و مطابق با استانداردهای موجود سه بار ثبت شد. برای سنجش هر یک از عوامل مدنظر از روش استاندارد انجمن بهداشت عمومی آمریکا^۱ (PHA) استفاده شد (APHA, 2017). سپس نمونه‌های برداشت شده در داخل ظروف شیشه‌ای تیره استریل شده به منظور اندازه‌گیری سایر شاخص‌های کیفی به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌های برداشت شده برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین به آزمایشگاه منتقل شد. در ادامه برای اندازه‌گیری مقدار عناصر مورد مطالعه از دستگاه ICP-MS^۲ با مشخصات مدل HP-4500 (ساخت آمریکا)، مجهز به اتوسمپلر ASX-520 استفاده شد. جهت ارزیابی کنترل کیفیت سنجش غلظت فلزات سنگین توسط ICP-MS، حد تشخیص دستگاه^۳ (LOD) بر اساس رابطه^۱ (۱) در ۱۵ نانوگرم در لیتر فلزات برابر ۱ میکروگرم در لیتر به دست آمد. صحت‌سنجی نیز بر اساس انحراف نسبی استاندارد^۴ (RSD) به کمک رابطه^۲ (۲) انجام شد. بدین ترتیب که از نمونه استاندارد و نمونه مجهول برای هر عنصر در سه تکرار انجام شد که میزان انحراف نسبی استاندارد کم‌تر از ۵ درصد به دست آمد.

$$LOD = Xb1 + 3(Sb1) \quad (1)$$

$$RSD = 100 \times S/|X| \quad (2)$$

در رابطه‌های (۱) و (۲)، به ترتیب $Xb1$ ، میانگین غلظت نمونه شاهد، $sb1$ انحراف معیار نمونه شاهد، S انحراف معیار نمونه و $|X|$ میانگین نمونه مخلوط با محلول استاندارد در سه تکرار است.

۲-۲- تحلیل آماری

تحلیل آماری داده‌ها به کمک SPSS نسخه ۱۶ انجام شد. به منظور انتخاب نوع آزمون آماری جهت جداسازی گروه‌های مختلف، پراکنش داده‌ها (از لحاظ نرمال بودن) به کمک آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، بررسی شد. پس از حصول اطمینان از نرمال بودن پراکنش داده‌ها، اختلاف معنادار بین غلظت فلزات

¹ American public health association

² Inductivity couples plasma mass spectrometry

³ Limit of detection

⁴ Relative standard deviation

⁵ Root mean square standard error

⁶ Root mean square

جدول ۱- چاهک‌های نمونه‌برداری شده در امتداد رودخانه سیستان با فاصله عرضی کم‌تر از ۱۰۰۰ متر

Table 1- Sampled wells along the Sistan River with a width distance of less than 1000 m

ایستگاه	روستا	E	N	قدمت چاه	استفاده غالب آب چاه
1	حاج عیسی اشترک	61°45' 46.4"	30°49' 46.50"	20	شرب دام و انسان، کشت گندم، جو، یونجه، باغ انگور، هندوانه و خربزه
2	ملاقاسم	30°61' 12.8"	30°50' 03.11"	28	شرب دام، پرورش ماهی، کشت گندم، جو
3	نقطه صفر مرزی	61°46' 14.7"	30°48' 31.1"	16	شرب دام، کشت گندم و جو
4	محمد گرگیچ	61°44' 10.5"	30°52' 43.4"	27	شرب دام و انسان، کشت گندم، جو، یونجه، هندوانه و خربزه و پرورش ماهی
5	تپه آزاد	61°4' 52.2"	30°53' 32.1"	43	شرب دام و انسان، کشت گندم، جو، یونجه، هندوانه و خربزه و پرورش ماهی
6	جی سرخ	61°44' 10.6"	30°51' 26.6"	8	شرب دام و کشت گندم، جو، یونجه
7	گرگیچ - پل کمربندی جدید	61°41' 36.6"	30°53' 43.3"	11	شرب دام و کشت گندم، جو، یونجه، انگور، باغ توت
8	ترقوئی علیمردان - بعد از سد	61°39' 11.7"	30°53' 28.2"	13	کشت جو، گندم، انگور
9	علیمردان	61°38' 46.2"	30°52' 37.6"	20	کشت جو، گندم و گلخانه
10	کمک	61°37' 45.2"	30°52' 12.7"	20	کشت جو، گندم، هندوانه و خربزه گاهی شرب دام
11	شیخ لنگی	61°36' 4.31"	30°52' 40.1"	4	شرب دام و کشت گندم، جو، یونجه، انگور، باغ توت
12	کندرک	61°33' 51.7"	30°54' 47"	8	شرب دام و کشت گندم و جو
13	کندرک	61°33' 52.2"	30°55' 16.6"	6 ماه	شرب دام و کشت گندم و جو
14	محمدی	61°32' 7.4"	30°55' 13.6"	13	کشت گندم و جو
15	حسین پیری	61°31' 42.2"	30°55' 40.4"	23	شرب دام و کشت گندم و جو
16	حسین علی پیری	61°31' 38"	30°55' 41.7"	5	شرب دام و کشت گندم و جو
17	سرکنگ	61°30' 7.7"	30°56' 18.4"	1	کشت گندم و جو
18	ده گل میر	61°30' 4.6"	30°56' 12.6"	1	کشت گندم و جو، انگور و یونجه و شرب دام
19	بعد از پل نهراب (کرباسک)	61°29' 17"	30°58' 6.6"	2	کشت گندم و جو، یونجه و شرب دام
20	بعد از پل نهراب (کرباسک)	61°29' 16.4"	30°58' 4.3"	2	کشت گندم و جو، یونجه و شرب دام
21	محمودی	61°29' 16.1"	30°58' 1.9"	2	کشت گندم و جو، یونجه انگور و شرب دام
22	پل قرآن	61°23' 34.5"	31°03' 18.4"	1	گل خانه
23	محمدآباد لورگ باغ	61°22' 33.5"	31°03' 52.6"	6 ماه	کشت گندم و جو، یونجه و شرب دام
24		61°21' 3"	31°05' 01.7"	6 ماه	
25		61°21' 15.9"	31°05' 1.5"	6 ماه	
26		61°28' 47.5"	30°58' 18.7"	2	

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شاخص‌های کیفی و غلظت فلزات سنگین

در کشورهای مختلف جهان از آب چاه برای شرب، کشاورزی و دام‌پروری که نقش مؤثری به‌ویژه در مناطق خشک دارد استفاده می‌شود. به دلیل خشکسالی‌های اخیر، در منطقه سیستان نیز مردم برای تأمین آب در بخش‌های مختلف، اقدام به حفر چاهک که تا حدودی نیاز کشاورزی و شرب دام را برطرف می‌کند، نموده‌اند. این مطالعه نشان داد که تعداد زیادی از چاهک‌ها دارای مقدار شوری محسوسی بوده که از عوامل محدودکننده مصرف دائمی آن‌ها است و به دلیل شوری بالا، از برخی از چاهک‌ها، آب برداشت نمی‌شد.

علاوه بر تعیین عامل شوری، غلظت فلزات سنگین نیز اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از غلظت عوامل فیزیکی و شیمیایی آب چاهک‌ها به‌همراه مقایسه مقادیر با حد مجاز

سازمان بهداشت جهانی (WHO)^۱ در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به مقایسه مقادیر به‌دست آمده با استاندارد موجود، مقدار pH (۷/۴۲-۸/۹۵) در دامنه استاندارد قرار داشت. از آنجایی که قابلیت هدایت الکتریکی، نسبت مستقیمی با کل ذرات معلق و مواد محلول موجود در آب دارد، بنابراین، سنجش کل ذرات معلق به‌منظور کنترل کیفیت آب از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار کل ذرات معلق ۷/۷-۱/۰۵ گرم در لیتر به‌دست آمد که با مقدار شوری با دامنه ۷/۱۱-۱/۰۵ گرم در لیتر هم‌خوانی داشت. مقدار هدایت الکتریکی نیز ۱۶۱۰۰-۳۰۱۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر به‌دست آمد. هدایت الکتریکی کم‌تر از ۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، جهت آبیاری هر نوع گیاهی قابل استفاده است و در این غلظت، آب جزء دسته غیرشور محسوب می‌شود. آب با میزان هدایت الکتریکی بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در دسته کم شور بوده و برای آبیاری

¹ World Health Organization

دام محدودتر می‌شود. با توجه به مقادیر به‌دست آمده در مطالعه اخیر، آب برخی از چاهک‌ها برای شرب دام مناسب نیست. در مطالعه Astuti et al. (2021) میزان هدایت الکتریکی و کدورت آب چاه‌های حوزه آبخیز پانجانه به‌ترتیب ۸۷۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و ۵۵ میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد که بالاتر از توصیه‌های سازمان بهداشت جهانی برای دستورالعمل‌های آب آشامیدنی بود. از طرفی، خاک‌های منطقه سیستم عمدتاً از نوع آنتی‌سویل و اریدیسویل است. خاک تحتانی اریدیسویل‌ها در منطقه غنی از رس بوده و به‌وسیله نمک‌ها و کربنات‌های ته‌نشست شده به سیمانی تا غیرسیمانی تبدیل می‌شود. در نتیجه هنگام آبیاری زمین‌های کشاورزی، شور شدن و نمک‌زایی در سطح خاک اتفاق می‌افتد (Keikha et al., 2014). بنابراین، استفاده از آب چاهک‌ها برای آبیاری زمین‌های منطقه موجب شور شدن زمین‌ها و از دست رفتن آن‌ها شود.

خاک‌های با بافت سبک تا متوسط قابل استفاده است. در صورت استفاده از این آب در خاک‌های رسی، نیاز به زهکشی دوره‌ای است. در حالی که مقدار شوری آب به ۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر برسد، برای آبیاری هیچ‌گونه گیاه حساس به شوری قابل استفاده نیست. آب با میزان شوری ۱۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، فقط در زمان کمبود آب و به‌صورت محدود می‌تواند استفاده شود و در مقادیر بالاتر از ۱۳۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در آبیاری قابل استفاده نیست (Einollahipeer et al., 2021). با توجه به مقدار عامل هدایت الکتریکی به‌دست آمده، کاربرد آن در خاک‌های منطقه مناسب نیست. در زمینه مصرف شرب دام نیز مقدار هدایت الکتریکی برای شرب دام و پرندگان با مقدار کم‌تر از ۱۵۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، برای تمامی گونه دام و پرند قابل استفاده است. اما در دامنه بین ۸۰۰۰-۱۵۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر فقط برای احشام قابل استفاده است. با افزایش غلظت تا ۱۱۰۰۰ استفاده از آن برای

جدول ۲- مقایسه غلظت فلزات سنگین و فاکتورهای فیزیکی و شیمیایی آب با حد مجاز سازمان بهداشت جهانی

Table 2- The comparison of heavy metals and water physicochemical parameters with WHO

Pb	Cd	Zn	Cu	Ni	Fe	Cr	TDS	EC	pH	شوری	
$\mu\text{g l}^{-1}$						g l^{-1}	$\mu\text{S cm}^{-1}$	-	g l^{-1}		
1.17	0	23	4.6	0	34.67	0	1.05	3012	7.42	1.05	Min
4.2	3.24	130	18	21.2	180.4	4.5	7.7	16100	8.95	7.11	Max
2.79	1.43	17	9.33	10.5	124	2.64	4.62	6322	8.31	3.74	Mean
1.00	30	3000	1000	20	300	50	1.5		6.5-9		WHO

بالاتر از حد قابل قبول کیفیت آب آشامیدنی سازمان بهداشت جهانی (۱/۹ میلی‌گرم در لیتر) است. در مطالعه Astuti et al. (2021) نیز غلظت فلزات سنگین در آب چاه‌های حوزه آبخیز پانجانه کم‌تر از حد استاندارد اندازه‌گیری شده و از نظر سمیت بوم‌شناختی نیز در تراز بی‌خطر دسته‌بندی شده است. در حالی که عنصر کروم دارای حد بالای ریسک سلامت بوم‌شناختی بود.

یکی از دلایل اصلی کم بودن غلظت عناصر در مطالعه حاضر می‌تواند غلظت پایین در سنگ بستر است. همچنین، pH قلیایی آب نیز می‌تواند موجب کاهش غلظت فلزات در آب شود؛ زیرا انحلال فلزات با میزان pH رابطه معکوس دارند. در pH قلیایی، مشابه مطالعه اخیر، فلزات از حالت محلول به‌صورت نامحلول در آمده و رسوب می‌کنند. در نتیجه کاهش غلظت عناصر اتفاق می‌افتد (Cruz-Lopes et al., 2021). همچنین، غلظت فلزات آب تحت تأثیر حرکت‌پذیری عناصر از لایه‌های خاک به بدنه آبی، pH آب، پتانسیل اکسیداسیون فلزات، جنس بستر، غلظت و نوع یون‌های واکنش‌دهنده، وجود ترکیبات آلی و معدنی موجود در آب، ظرفیت تبادل کاتیونی، کانی‌های رسی، وجود اکسیدهای آهن و منگنز و جذب سطحی ویژه بستر هستند (Carolate and Violante, 2016). در مطالعه

فلزات سنگین موجود در آب، اگر به خاک زمین‌های کشاورزی افزوده شوند، نه تنها بر ویژگی‌های مختلف خاک مؤثر بوده بلکه موجب کاهش دست‌یابی زیستی مواد مغذی خاک برای گیاه خواهند شد. از مهم‌ترین نگرانی‌های عمده استفاده از آب در کشاورزی، تجمع فلزات سنگین در خاک، گیاه و انسان است. (Al-Huqail et al., 2022). روند غلظت عناصر مورد بررسی در مطالعه اخیر به‌صورت کادمیم > کروم > سرب > مس > نیکل > روی > آهن به‌دست آمد. عناصری از قبیل جیوه، کبالت، سلنیم و وانادیم نیز به‌دلیل غلظت پایین، اندازه‌گیری نشد. نتایج مطالعه اخیر حاکی از کم‌تر بودن غلظت فلزات سنگین کروم، آهن، نیکل، مس، روی و کادمیم در مقایسه با استاندارد سازمان بهداشت جهانی بود. در حالی که غلظت سرب بالاتر از حد این استاندارد اندازه‌گیری شد. نتیجه پژوهش حاضر با نتایج حاصل از مطالعه Aamizadegan and Asrari (2018) مطابقت دارد. در مطالعه این پژوهش‌گران نیز، غلظت فلزات سنگین که در ۳۹ حلقه چاه آب شرب روستاهای شهرستان چهارم بررسی شد، غلظت فلزات به استثنای سرب پایین‌تر از استاندارد ۱۰۵۳ آب ایران و سازمان جهانی بهداشت بود. در ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی دره کاتماندر در نپالدر (Pant et al. (2011) نشان دادند که آهن بسیار

۲-۲-۳ درون یابی و پهنه بندی غلظت فلزات سنگین در ابتدا کواریت های هر کدام از عناصر سنگین بر اساس همبستگی بین عوامل فیزیکی-شیمیایی با عناصر سنگین که در جدول ۳ آورده شده است، در نظر گرفته شد. بنابراین، برای بررسی رابطه بین عوامل مورد مطالعه از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد و نتایج حاصل جهت تعیین کواریت داده ها مورد استفاده قرار گرفت. همبستگی معنادار نتایج به دست آمده در ایستگاه های مختلف با یکدیگر نیز در سطح 0.05 بررسی شد. به طور کلی، عامل شوری با عوامل هدایت الکتریکی، کل ذرات معلق و فلزات آهن، نیکل، روی، کادمیم، نیکل، روی و کادمیم همبستگی مثبت و معناداری داشت ($p < 0.05$). هم چنین، بین عامل هدایت الکتریکی و کل ذرات معلق، آهن، نیکل و کادمیم، همبستگی مثبت و معناداری به دست آمد. ارتباط بین شاخص کل ذرات معلق و فلزات آهن، نیکل، کادمیم و روی نیز مثبت و معنادار بود ($p < 0.05$). در حالی که pH، با هیچ یک از عناصر مورد مطالعه همبستگی معناداری نداشت.

Cangemi et al. (2019) غلظت فلزات سنگین در آب 58 حلقه چاه در دشت بارسلونا-میلانو (سیسیل ایتالیا) نشان داد که گردش سیال گرمایی و برهم کنش آب با سنگ های زیرزمینی، موجب افزایش قابل توجه غلظت فلزات سنگین در آب های زیرزمینی شده و منابع انسانی مانند کشاورزی و فعالیت های صنعتی نقش مؤثری بر افزایش غلظت فلزات دارند.

۲-۳- پهنه بندی غلظت فلزات سنگین

۳-۱- بررسی پراکنش داده ها

ابتدا داده ها از نظر آماره های توصیفی مانند چولگی، کشیدگی، نرمال بودن و ناهمسانگری در نرم افزار ArcGIS بررسی و سپس مراحل کریجینگ و کوکریجینگ انجام شد. بدین ترتیب که ویژگی های آماری داده ها برای پهنه بندی عناصر بررسی شد و نشان داد تمامی داده ها از نظر آزمون کلموگروف اسمیرنوف نرمال، اما دارای چولگی و کشیدگی هستند. داده ها با چولگی مثبت و منفی به ترتیب با تبدیل به \log و box-cox نرمال شدند. سیستم مختصات همه لایه های تولید شده به روش کریجینگ، WGS_1984_UTM_Zone_41N بود.

جدول ۳- همبستگی بین عوامل فیزیکی و شیمیایی آب و فلزات سنگین

Table 3- Correlation between physicochemical factors of water and heavy metals

	Salin	pH	EC	TDS	Hard	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Salin	1											
pH	-0.19	1										
EC	0.69	-0.03	1									
TDS	0.91	-0.13	0.78	1								
Hard	0.17	0.02	0.41	0.47	1							
Cr	0.08	-0.46	0.11	0.06	0.04	1						
Fe	0.70	-0.09	0.64	0.80	0.26	-0.16	1					
Ni	0.86	-0.09	0.69	0.92	0.32	0.01	0.72	1				
Cu	0.42	0.26	0.36	0.38	-0.0	-0.15	0.52	0.46	1			
Zn	0.67	0.01	0.44	0.75	0.31	-0.22	0.81	0.72	0.59	1		
Cd	0.86	-0.03	0.63	0.84	0.25	0.11	0.63	0.81	0.43	0.56	1	
Pb	0.17	-0.33	-0.08	0.15	0.02	0.31	-0.02	0.18	-0.09	0.06	0.14	1

*همبستگی معنادار، به صورت پررنگ نشان داده شده است.

به عدد یک نزدیک بود (Chai and Draxler, 2014). بنابراین، روش آماری در کریجینگ معمولی برای هر یک از عناصر مورد بررسی بر اساس نتایج حاصل از خطای پیش بینی شده در جدول های ۴ و ۵ انتخاب شد که در نتیجه آن، جهت برازش عنصر کروم در حالت بدون کواریت، از مدل کروی استفاده شد. برای عنصر آهن در دو حالت باکواریت و بدون کواریت، از روش های دایره ای و Stable استفاده شد. عنصر نیکل نیز در دو حالت باکواریت و بدون کواریت توسط روش های نمایی و گوسی برازش شد. از روش نمایی در حالت بدون کواریت نیز برای عنصر مس و از روش نمایی و گوسی در دو حالت باکواریت و بدون کواریت برای عنصر روی استفاده شد.

به منظور انجام فرآیند درون یابی، جهت انتخاب بهترین مدل، چهار مؤلفه میانگین استاندارد^۱ (MS) ریشه میانگین مربعات خطای پیش بینی شده، ریشه میانگین مربعات خطای پیش بینی استاندارد شده و میانگین خطای استاندارد^۲ (ASE)، بررسی شد. انتخاب مدل مناسب بدین صورت بود که بهترین مدل، دارای میانگین استاندارد نزدیک به صفر و مقدار ریشه میانگین مربعات خطای پیش بینی شده در حداقل مقدار بود. در این مدل، میانگین خطای استاندارد به ریشه میانگین مربعات خطای پیش بینی شده نزدیک و ریشه میانگین مربعات خطای پیش بینی شده استاندارد

¹ Standardized mean

² Average standard error

نهایت پهنه‌بندی کیفیت آب شرب مناسب‌ترین روش‌ها هستند. در پژوهش دیگری، (Sadeghian et al. (2018 نیز در بررسی کیفیت آب ۲۰ حلقهٔ چاه دشت ارومیه با استفاده از ArcGIS نشان دادند که جهت پهنه‌بندی پارامترهای کیفی، مدل‌های دایره‌ای، کروی و نمایی، بهترین مدل سیستم تغییر نماها است.

جدول ۵- خطای پیش‌بینی شدهٔ عناصر روی، سرب و کادمیم
Table 5- The predicted error of zinc, lead, and cadmium elements

ASE	RMSS	MS	RMS	حالت	مدل	عنصر
0.57	0.015	23.04	1.40	بدون کواریت	دایره‌ای	Zn
0.74	0.00	32.79	2.87	با کواریت		
0.59	0.01	22.80	1.32	بدون کواریت	کروی	Zn
0.74	0.00	32.76	2.89	با کواریت		
0.64	0.00	22.49	1.16	بدون کواریت	نمایی	Zn
0.72	0.00	32.9	3.05	با کواریت		
0.54	0.02	24.54	1.73	بدون کواریت	گوسی	Zn
0.76	0.00	32.69	2.90	با کواریت		
0.55	0.02	24.54	1.73	بدون کواریت	Stable	Zn
0.70	0.01	32.88	3.21	با کواریت		
0.97	0.88	0.00	0.85	با کواریت	دایره‌ای	Pb
0.97	0.89	0.00	0.85	بدون کواریت	کروی	
0.97	0.87	0.01	0.84	با کواریت	نمایی	Pb
0.97	0.89	-0.01	0.85	بدون کواریت	گوسی	
0.97	0.88	0.02	0.85	با کواریت	Stable	Pb
0.97	0.88	0.02	0.85	بدون کواریت		
1.05	0.72	0.13	0.77	با کواریت	دایره ای	Cu
1.04	1.07	0.10	1.09	بدون کواریت	کروی	
1.05	0.71	0.13	0.75	با کواریت	نمایی	Cu
1.05	1.07	0.1	1.09	بدون کواریت	گوسی	
0.90	0.72	0.11	0.66	با کواریت	Stable	Cu
1.05	1.07	0.09	1.09	بدون کواریت		
1.08	0.77	0.12	0.84	با کواریت	Stable	Cu
1.04	1.07	0.10	1.09	بدون کواریت		
1.08	0.77	0.12	0.84	با کواریت	Stable	Cu
1.08	1.05	1.12	1.12	بدون کواریت		

برای پهنه‌بندی عوامل مختلف از جمله آلاینده‌های محیطی، از سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شود. این سیستم به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی، سامان‌دهی، تحلیل و بازیابی و نمایش خروجی‌های مناسب و قابل فهم، کاربرد گسترده‌ای در این قبیل تحقیقات دارد. در روش زمین‌آمار با در دست داشتن مقادیر کمی عوامل مورد بررسی، در یک محدوده با مختصات جغرافیایی مشخص، قابل برآورد است. بدین ترتیب

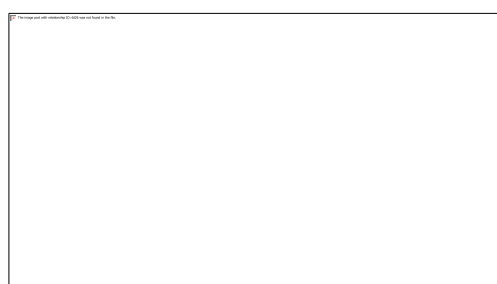
جدول ۴- خطای پیش‌بینی شدهٔ عناصر کروم، نیکل، آهن و مس
Table 4- the predicted error of chromium, nickel, iron, and copper elements

ASE	RMS S	MS	RMS	حالت	مدل	عنصر
1.53	0.84	0.03	1.29	بدون کواریت	دایره‌ای	Cr
-	-	-	-	با کواریت		
1.51	0.84	0.03	1.29	بدون کواریت	کروی	Cr
-	-	-	-	با کواریت		
1.55	0.84	0.03	1.29	بدون کواریت	نمایی	Cr
-	-	-	-	با کواریت		
1.56	0.84	0.03	1.30	بدون کواریت	گوسی	Cr
-	-	-	-	با کواریت		
1.54	0.84	0.03	1.29	بدون کواریت	Stable	Cr
-	-	-	-	با کواریت		
691.08	0.13	0.05	49.6	بدون کواریت	دایره‌ای	Ni
972.91	0.30	0.03	19.8	با کواریت		
631.51	0.51	0.05	46.8	بدون کواریت	کروی	Ni
1108.5	0.33	0.03	21.1	با کواریت		
464.21	0.52	0.00	35.5	بدون کواریت	نمایی	Ni
629.06	0.34	0.03	22.3	با کواریت		
761.14	0.20	0.03	50.6	بدون کواریت	گوسی	Ni
964.85	0.58	0.04	17.3	با کواریت		
526.53	0.39	0.02	36.9	بدون کواریت	Stable	Ni
1084.4	0.44	0.00	21.4	با کواریت		
0.98	0.00	28.50	20.1	بدون کواریت	دایره‌ای	Fe
1.02	0.00	30.98	30.3	با کواریت		
0.99	0.00	29.41	29.8	بدون کواریت	کروی	Fe
1.03	0.00	31.05	30.0	با کواریت		
0.79	0.00	28.80	29.7	بدون کواریت	نمایی	Fe
1.05	0.00	31.29	29.8	با کواریت		
1.01	9.75	30.27	29.9	بدون کواریت	گوسی	Fe
1.03	0.01	31.15	30.0	با کواریت		
1.00	0.00	29.84	29.6	بدون کواریت	Stable	Fe
1.03	0.00	30.97	29.8	با کواریت		
-	-	-	-	بدون کواریت	دایره‌ای	Cu
0.86	0.07	2.42	2.8	با کواریت		
-	-	-	-	بدون کواریت	کروی	Cu
0.86	0.07	2.42	2.8	با کواریت		
-	-	-	-	بدون کواریت	نمایی	Cu
0.85	0.07	2.40	2.8	با کواریت		
-	-	-	-	بدون کواریت	گوسی	Cu
0.82	0.04	2.33	2.9	با کواریت		
-	-	-	-	بدون کواریت	Stable	Cu
0.8/6	0.08	2.43	2.8	با کواریت		

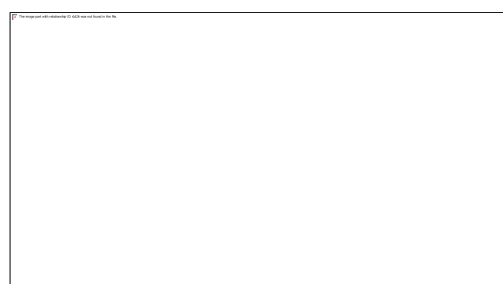
عنصر کادمیم در هر دو حالت به روش نمایی برازش شد. از روش نمایی در حالت بدون کواریت نیز برای برازش عنصر سرب استفاده شد. در پژوهشی، (Maghami et al. (2011 نیز به منظور پهنه‌بندی عوامل کیفی آب در ۲۷ حلقهٔ چاه شهرستان آباد، انواع روش‌های درون‌یابی را به روش‌های میان‌یابی کریجینگ (با سمی واریوگرام خطی، دایره‌ای، کره‌ای، گوسین و نمایی) بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ با سمی واریوگرام‌های نمایی و دایره‌ای، جهت میان‌یابی و در

می‌دهد. محور X واریوگرام نشان‌دهنده فاصله بین جفت نقاط و محور Y مقدار محاسبه شده واریوگرام را نشان می‌دهد که در آن مقدار بیش‌تر نشان‌دهنده همبستگی کم‌تر بین جفت نقاط است. همان‌طوری‌که در شکل ۲ نشان داده شده است، بر طبق انتظار با افزایش فاصله در ابتدای واریانس بین جفت داده‌ها افزایش یافته و پس از آن ثابت می‌ماند. مدل برازش داده شده برای انجام درون‌یابی به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ مورد استفاده قرار گرفت.

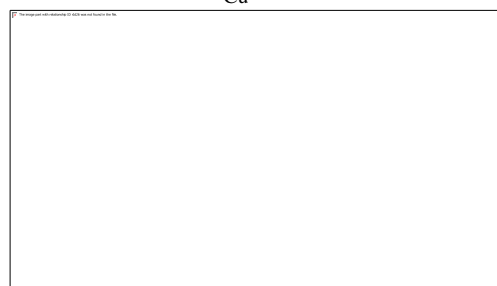
به برآورد این مقادیر در یک ساختار فضایی مشخص و محاسبه میزان خطای همراه برآورد، کریجینگ گفته می‌شود (Arsalan and Turan, 2015). در مطالعه حاضر به منظور بررسی پراکنش فضایی هریک از فلزات به روش درون‌یابی، عمل کریجینگ توسط انواع سمی واریوگرام‌های کروی، دایره‌ای، گوسی، نمایی و Stable (بر اساس میزان خطای استاندارد پیش‌بینی شده) برازش شد، که واریوگرام هر عنصر در شکل ۲ نشان داده شده است. واریوگرام تابعی است که وابستگی واریانس را با توجه به فاصله توصیف می‌کند و پیوستگی فضایی داده‌ها را نشان



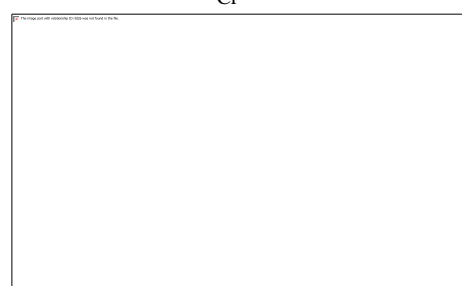
Cu



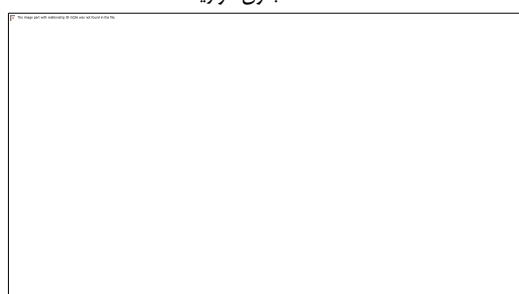
Cr



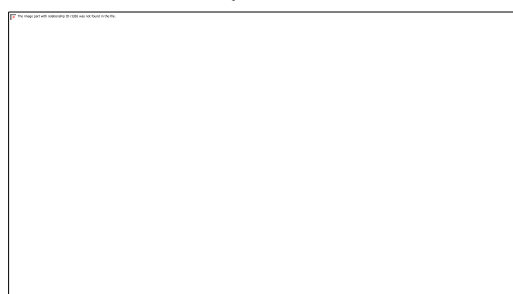
Ni بدون کواریت



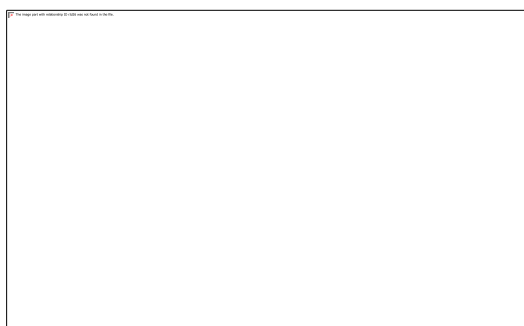
Ni با کواریت



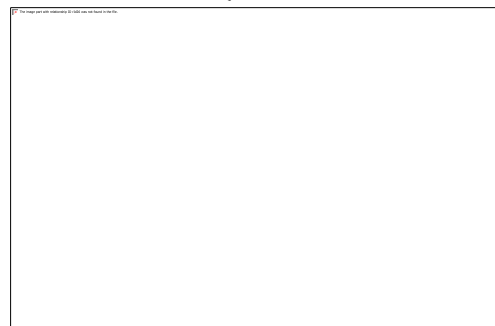
Fe بدون کواریت



Fe با کواریت

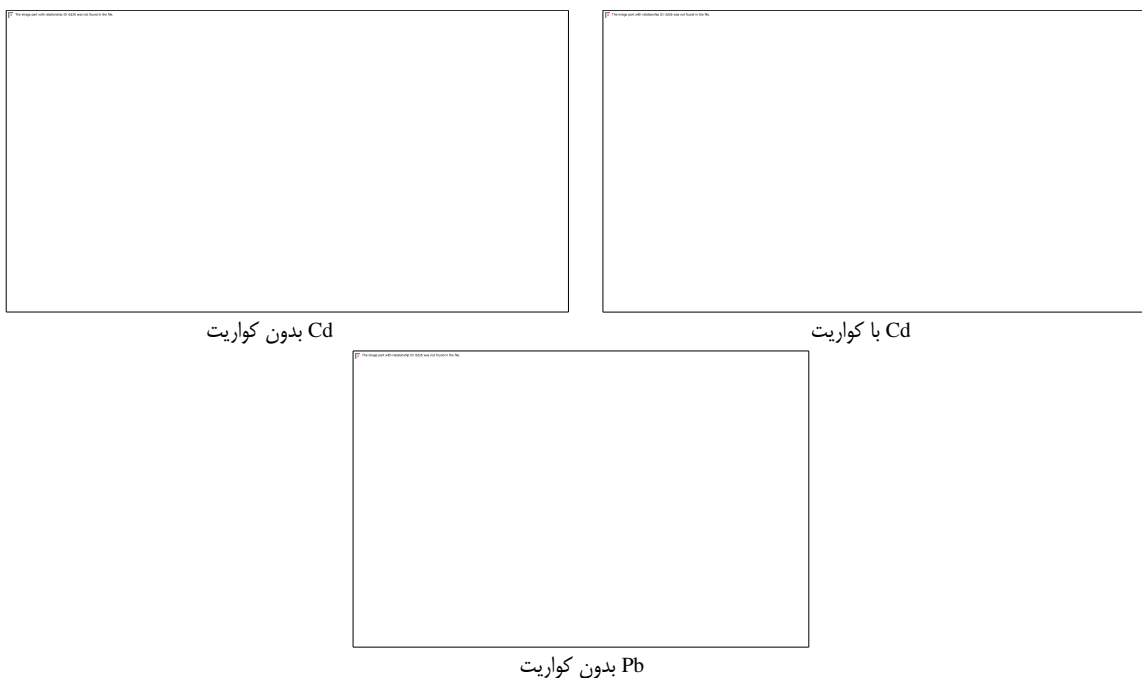


Zn بدون کواریت



Zn با کواریت

شکل ۲- واریوگرام برازش شده عناصر در آب چاهک‌ها
Figure 2- The fitted variogram of the elements in water



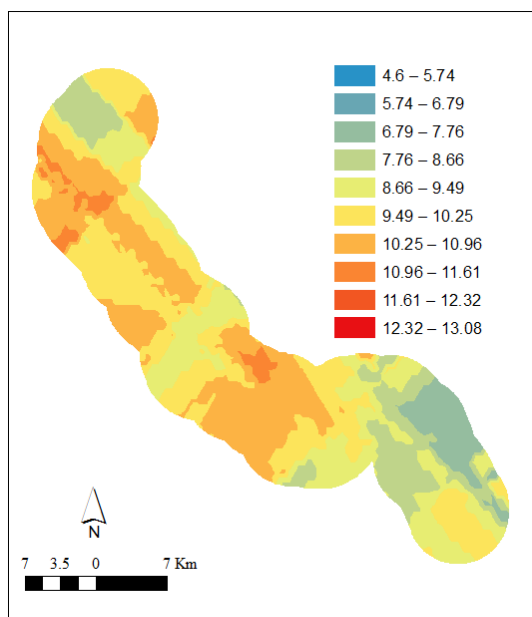
ادامه شکل ۲- واریوگرام برازش شده عناصر در آب چاهک‌ها
Continued Figure 2- the fitted variogram of the elements in water

سیستان و در محدوده کرباسک تا لورگ باغ، چاهک‌ها جدیدتر بودند. به طوری که برخی از آن‌ها قدمتی کم‌تر از ۶ ماه داشتند. مصرف مداوم و برداشت آب در چاه‌های ابتدای مسیر، موجب تغذیه مجدد آب و مخلوط شدن آن با آب ورودی از رودخانه شده است. صاحبان چاهک‌ها نیز اظهار داشتند که آب ورودی از رودخانه سیستان، موجب تغذیه مجدد چاهک و بالا آمدن آب در هر دوره می‌شود. بر این اساس، به دلیل برداشت چندین ساله آب و در نتیجه تعویض مداوم آب و مخلوط شدن آب چاهک‌ها با آب ورودی رودخانه، می‌تواند موجب کاهش غلظت عناصر شود. در حالی که در چاه‌های جدیدتر، فرصت این رقیق‌سازی و تعویض آب ایجاد نشده است. در مطالعه‌ای، Fotouhi (2018) در پهنه‌بندی و مقایسه ۱۱ عامل کیفی مؤثر بر کیفیت آب آشامیدنی ۵۵ حلقه چاه عمیق دشت یزد نشان دادند که چاه‌های یزدگرد و چرخاب در بخش جنوب شرقی و شمال غربی محدوده مطالعاتی دشت که تحت تأثیر جریان‌های رودخانه مهریز و تفت قرار دارند، از لحاظ پارامترهای کیفی از وضعیت مطلوبی برخوردار هستند. در حالی که چاه‌های بخش میانی دشت، دارای غلظت بیش از دو برابر حد مجاز استاندارد ملی آب هستند. در پژوهشی، Joghatayi et al. (2015) در پهنه‌بندی غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌ها در آب زیرزمینی دشت جغتای، با استفاده از شاخص GQI و GIS، نشان دادند که آب در بخش‌های شمالی دشت با توجه طی مسافت و عبور از سازندهای مختلف دارای کیفیت پایین‌تری است. در مطالعه دیگری، Docheshmeh Gorgij and

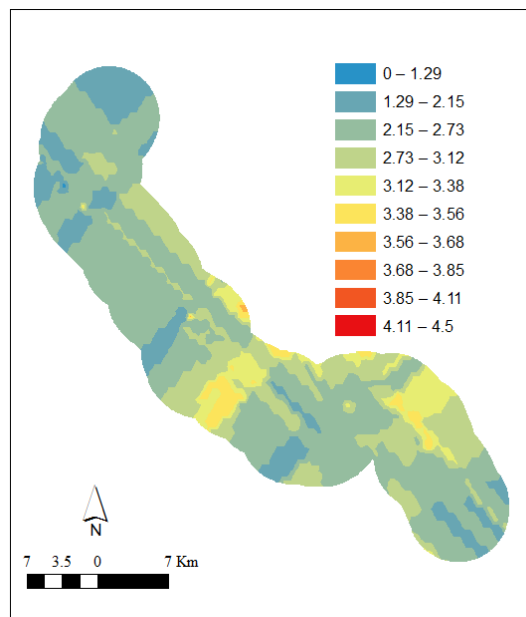
شکل‌های ۳ تا ۸ نیز، نقشه‌های پهنه‌بندی عناصر را نشان می‌دهد. جهت درک بهتر نتایج، دامنه تغییرات مقدار هر عنصر بر اساس میکروگرم در لیتر، به صورت طبقه‌بندی ارائه شده است که خروجی مستقیم روش کریجینگ و کوکریجینگ است. هر لایه تولیدی ماهیت پیوسته داشته که ارائه آن نیز امکان‌پذیر است. اما نمایش نتایج به صورت طبقه‌بندی شده به علت قابلیت درک بهتر تغییرات مقدار عنصر، مؤثر است. بدین ترتیب که، طبقه‌بندی غلظت هر یک از عناصر از غلظت کم به زیاد، در دامنه رنگ آبی کم‌رنگ تا قرمز تیره نشان داده شده است. برای عنصر کروم، مقادیر در سطح متوسط رو به کم، نمایش داده شد. در حالی که طبقه‌بندی عنصر مس حاکی از قالب بودن حد متوسط در محدوده مورد مطالعه بود و کم‌ترین مقادیر آن در محدوده ابتدای مسیر نمونه‌برداری، یعنی محدوده نزدیک بر مرز به‌دست آمد. عنصر آهن نیز در بخش‌های پایانی مسیر رودخانه به دریاچه، دارای غلظت بالاتری بود و این طبقه‌بندی در حالت با کواریت، با جزئیات بیشتری انجام شد. کم‌ترین میزان غلظت نیکل در محدوده زهک یعنی ابتدای مسیر نشان داده شد. روند مشابهی نیز از تغییر غلظت برای عناصر روی و کادمیم در دو حالت با کواریت و بدون کواریت به‌دست آمد. به‌طور کلی نتایج حاصل نشان داد، با افزایش فاصله از مرز، در بخش‌های میانی و پایانی، غلظت عناصر به غیر از سرب، افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده می‌تواند مربوط به قدمت چاهک‌ها باشد. به طوری که در بخش مرزی و در محدوده زهک تا سد سیستان، قدمت چاهک‌ها به بیش از ۴۰ سال می‌رسد. در حالی که بعد از سد

فلزات سنگین در ۲۳ حلقه چاه آب شرب شهرستان اسلامشهر به کمک نرم افزار ArcGIS نشان دادند که وجود تراکم بالای صنایع، زمین های وسیع کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی و آفت کش های حاوی فلزات سنگین، وجود مسیرهای اصلی و فرعی پر تردد و از همه مهم تر وجود شیب هیدرولیکی از شمال غربی به جنوب شرقی در این منطقه، باعث بالا بودن آلودگی در قسمت جنوبی اسلامشهر شده است.

Asghari Moghaddam (2019) نیز در پهنه بندی غلظت فلزات سنگین و ترکیب نیترات در آب های زیرزمینی دشت آذرشهر به روش کریجینگ، نشان دادند که بخش های شرقی و جنوب شرقی دشت دارای کیفیت مطلوب تا قابل قبول، بخش غربی و مرکز با کیفیت متوسط و بخش شمالی و جنوب غربی منطقه دارای کیفیت غیر قابل قبولی است. در ادامه، Valinejhad et al. (2016) نیز در پهنه بندی غلظت برخی



Cu (میکروگرم بر لیتر)

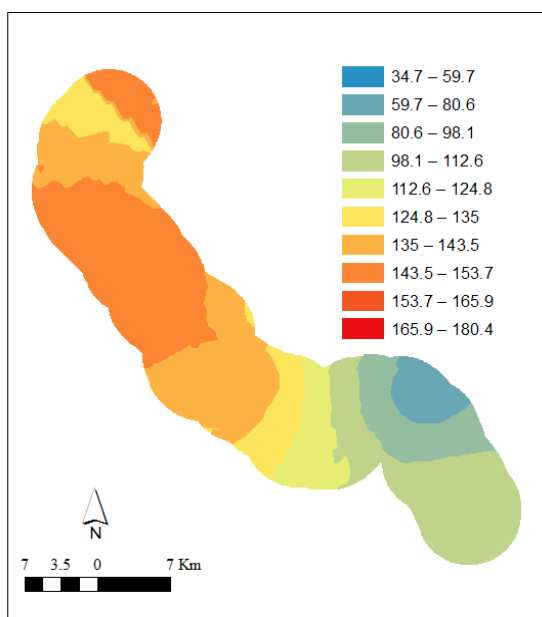


Cr

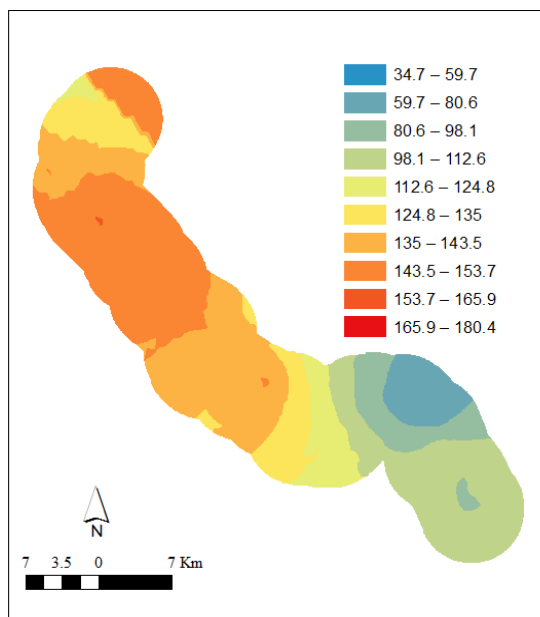
(میکروگرم بر لیتر)

شکل ۳- درون یابی عناصر کروم و مس بدون کواریت

Figure 3- Interpolation of chromium and copper elements without covariate



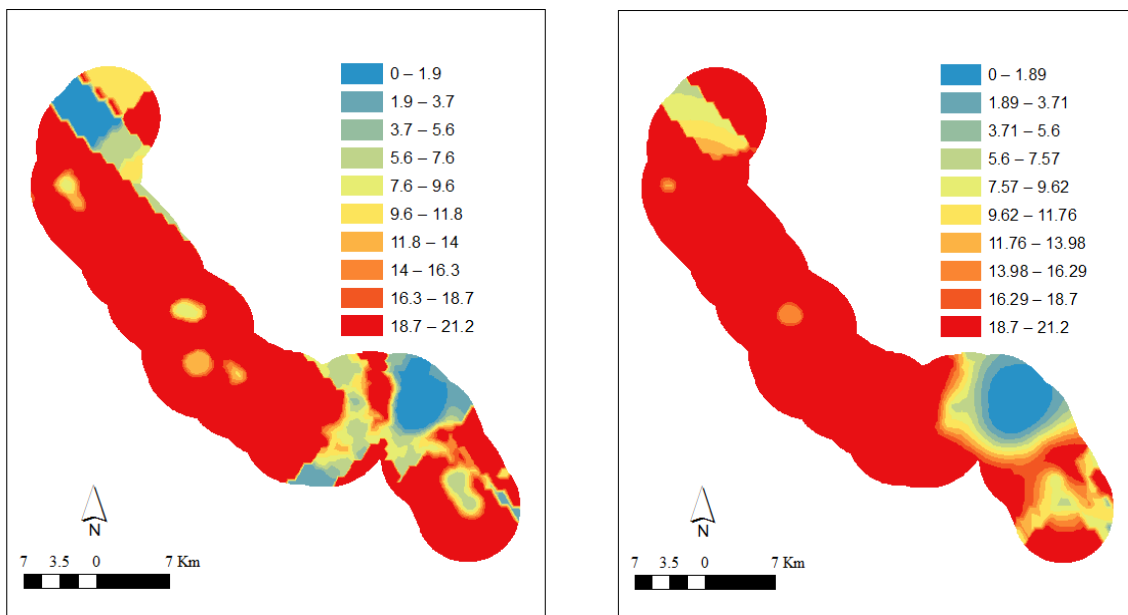
Fe (میکروگرم بر لیتر) بدون کواریت



Fe (میکروگرم بر لیتر) با کواریت

شکل ۴- درون یابی عنصر آهن

Figure 4- Interpolation of iron

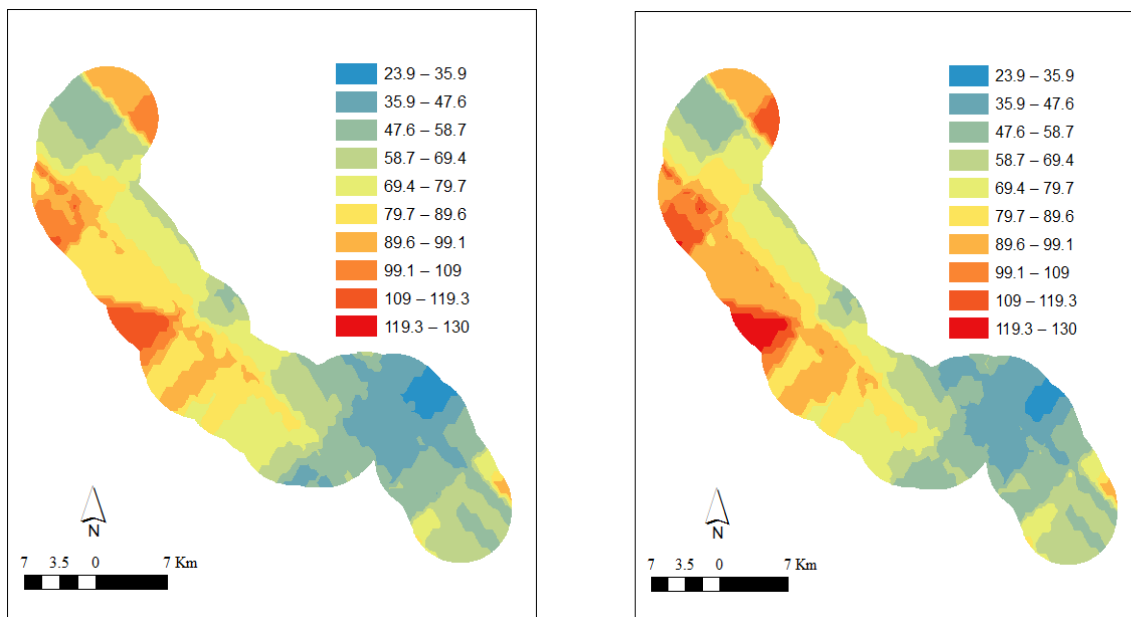


Ni (میکروگرم بر لیتر) بدون کواریت

Ni (میکروگرم بر لیتر) با کواریت

شکل ۵- درون‌یابی عنصر نیکل

Figure 5- Interpolation of nickel

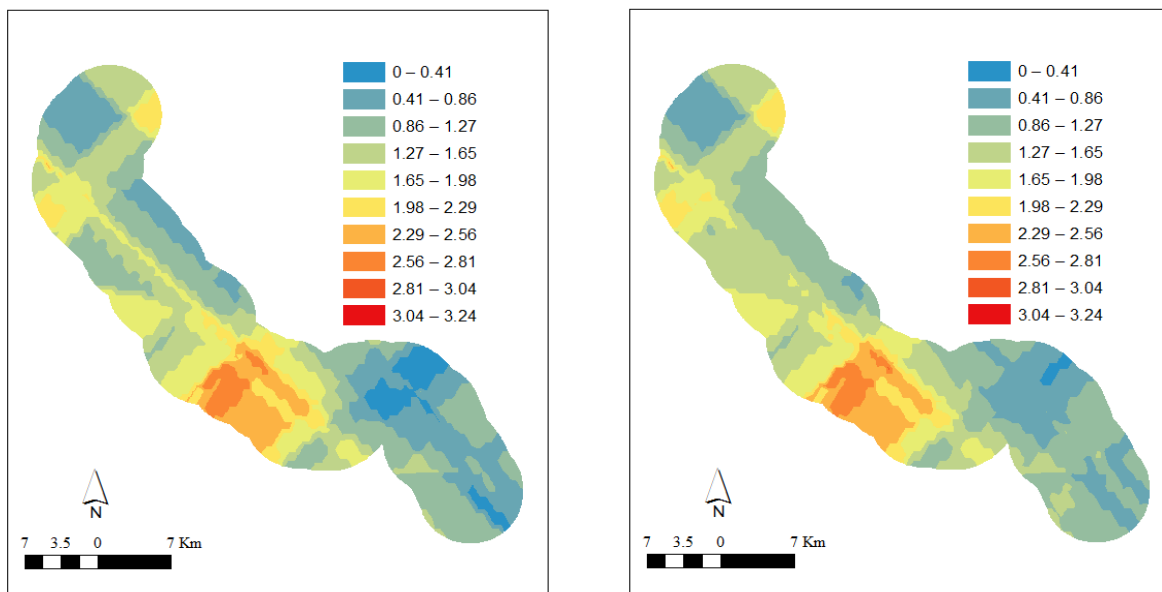


Zn (میکروگرم بر لیتر) بدون کواریت

Zn (میکروگرم بر لیتر) با کواریت

شکل ۶- درون‌یابی عنصر روی

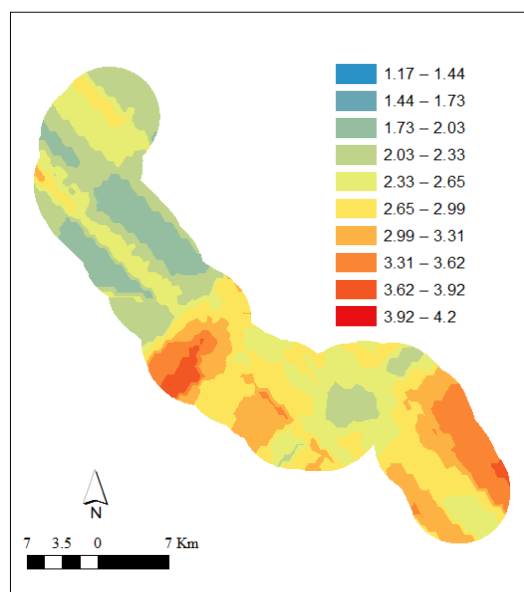
Figure 6- Interpolation of zinc



Cd (میکروگرم بر لیتر) بدون کواریت

Cd (میکروگرم بر لیتر) با کواریت

شکل ۷- درون یابی عنصر کادمیم
Figure 7- Interpolation of cadmium



شکل ۸- درون یابی عنصر سرب (میکروگرم بر لیتر) بدون کواریت
Figure 8- Interpolation of lead without covariate

دست یابی است. روند تغییرات غلظت فلزات به گونه ای است که با افزایش عمر چاهک، غلظت فلز کاهش می یابد. به طوری که کمترین غلظت عناصر از بخش مرز تا محدوده سد سیستان، که چاهک ها قدیمی تر بودند، اندازه گیری شد. این امر می تواند به دلیل اختلاط بین آب چاهک با آب رودخانه در هنگام پرآبی رودخانه باشد. همچنین، با توجه به میزان شوری و هدایت الکتریکی آب چاهک ها، آبیاری زمین های کشاورزی توسط این آب، موجب شور شدن و کاهش کیفیت خاک های زراعی و در نتیجه از دست رفتن سطح زیرکشت می شود. این آب از نظر

۴- نتیجه گیری

نتیجه پژوهش حاضر نشان داد که غلظت عناصر سنگین به غیر از سرب، دارای مقدار پایین تری نسبت به حد مجاز سازمان بهداشت جهانی هستند. پایین بودن غلظت عناصر به دلیل شرایط قلیایی آب چاهک بوده که به عنوان بافر عمل کرده و موجب تبدیل عناصر از حالت محلول به نامحلول شده و در نهایت رسوب آن ها را به همراه داشته است. همچنین، می تواند به دلیل کم تر بودن غلظت در خاک منطقه باشد، که با بررسی آن قابل

سیستان. زمین‌شناسی کاربردی، ۸(۱)، ۱-۱۸. <https://www.sid.ir/paper/127099/fa>

خلیلی، رضا، منتصری، حسین، متقی، حامد (۱۴۰۰a). ارزیابی کیفیت آب رودخانه چالوس با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و شاخص کیفیت آب (WQI). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳)، ۵۲-۵۸. doi: 10.22098/MMWS.2021.9300.1031.۳۸-۵۲

خلیلی، رضا، منتصری، حسین، متقی، حامد، و جلیلی، محمد باقر (۱۴۰۰b). ارزیابی کیفیت آب رودخانه تالار استان مازندران با استفاده از ترکیب شاخص‌های کیفیت آب و مدل‌سازی چند متغیره. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۱)، ۳۰-۴۷. doi: 10.22098/MMWS.2021.9322.1033

خسروی، محمود (۱۳۸۹). تحلیل زمانی - مکانی پایدار دریاچه‌های هامون. تحقیقات منابع آب ایران، ۳(۳)، ۶۸-۷۹. https://www.iwrr.ir/article_15984.html

جغتایی، حجه‌اله، دبیری، رحیم، مسلم‌پور، محمدالیاس، اطاری، مجید، و شریفیان عطاری، رضا (۱۳۹۴). بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی (GQI) در دشت جغتای، شمال شرقی ایران. انسان و محیط زیست، ۱۳(۴)، ۱۷-۲۵. <https://www.magiran.com/paper/1539008>

دوچشمه‌گرگیج، علیرضا، و اصغری‌مقدم، اصغر (۱۳۹۸). بررسی گسترش فلزات سنگین و نیترات در آب زیرزمینی با استفاده از اندیس موران و کریجینگ بیزین (مطالعه موردی: دشت آذرشهر). پژوهش آب ایران، ۱۳(۲)، ۸۱-۹۰. https://iwrij.sku.ac.ir/article_10638.html

رودری، آرتیس، حسن‌پور، فرزاد، یعقوب‌زاده، مصطفی، و دلاور، مجید (۱۳۹۸). بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی دشت سیستان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۶)، ۳۳-۳۴. doi: 10.22034/JEST.2018.18561.2745.۴۴

صادقیان، مرضیه، رضایی، حسین، بهمنش، جواد، و خان‌محمدی، ندا (۱۳۹۷). ارزیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت ارومیه). تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۲)، ۲۸۴-۲۸۹. https://www.iwrr.ir/article_60705.html?lang=fa

عین‌الهی پیر، فاطمه، غفاری، مصطفی، و دهمرده بهروز، رضا (۱۳۹۹). امکان سنجی استفاده از پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری در کشاورزی و آبی‌پروری با مدل CWQI (مطالعه موردی: شهرستان زابل، استان سیستان و بلوچستان، ایران). محیط زیست جانوری، ۱۲(۴)، ۵۸۱-۵۹۲. doi: 10.22034/AEJ.2020.130405

فتحی هفشجانی، الهام، و بیگی هرچگانی، حبیب‌اله (۱۳۹۲). تغییرات مکانی و پهنه‌بندی نیترات و فسفات آب زیرزمینی شهرکرد طی یک دوره پنج ساله. علوم آب و خاک، ۱۷(۶۵)، ۶۳-۷۵. doi: 10.22034/AEJ.2020.130405

فتحی فیروزآباد، فرزانه، اختصاصی، محمدرضا، سفید، محمد، و مروتی شریف‌آبادی، علی (۱۳۹۷). پهنه‌بندی و مقایسه ویژگی‌های موثر بر کیفیت چاه‌های آب آشامیدنی در محدوده شهر یزد با

شرب دام نیز مناسب نبوده و بایستی منابع جایگزین معرفی شود. از طرفی دیگر، افزایش تعداد چاهک‌ها و میزان برداشت آب زمین‌ساز مسأله آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی و به‌دنبال آن، آسیب به زمین و افزایش سطح بیابان در منطقه خواهد شد. در نتیجه، مدیران تصمیم‌گیران، بایستی اقدام به سامان‌دهی چاهک‌ها نموده تا از زیان‌های احتمالی جلوگیری شود.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از مالکین چاهک‌ها و کشاورزان منطقه به دلیل همکاری در حین نمونه‌برداری، کمال تشکر را دارند. همچنین، از پژوهشگاه زابل به دلیل همکاری در بخش آزمایشگاه، به‌ویژه پژوهشکده تالاب بین‌المللی هامون کمال تشکر را دارند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

اکرم عنایت: تحلیل، روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها؛ فاطمه عین‌الهی پیر: تحقیق، روش‌شناسی، منابع، اعتبارسنجی و پیش‌نویس مقاله؛ ساحل پاکزاد توچایی: نمونه‌برداری، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی و ویرایش مقاله؛ ملیحه عرفانی: تحلیل داده‌ها، روش‌شناسی و نرم‌افزار.

منابع

ارشدی، علی، و زارع، حامد (۱۳۹۸). ارزیابی فنی تولید در استخرهای دومنظوره پرورش ماهی ذخیره آب کشاورزی در منطقه سیستان. فن‌آوری‌های نوین در توسعه آبی‌پروری، ۱۴(۴)، ۸-۱۸. doi: 10.1001.1.20080026.1398.13.4.2.4

اعمی‌زادگان، ابوالفضل، و اسراری، الهام (۱۳۹۷). بررسی غلظت فلزات سنگین در چاه‌های آب آشامیدنی شهرستان جهرم. اولین همایش ملی ایمنی، بهداشت و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد میبد. <https://civilica.com/doc/854786>

پیری، حلیمه، و انصاری، حسین (۱۳۹۲). بررسی خشکسالی دشت سیستان و تأثیر آن بر تالاب بین‌المللی هامون. اکوبیولوژی تالاب، ۱۵(۱)، ۶۳-۷۴. <https://www.sid.ir/paper/174970/fa>

حافظی‌مقدس، ناصر، جلیلود، رضا، سلوکی، حمیدرضا، و رهنما، جعفر (۱۳۹۱). مطالعه ژئومورفولوژی مهندسی رودخانه

آب با استفاده از GIS (مطالعه موردی: شهرستان آباده).
 جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۲(۲)، ۱۷۱-۱۸۲. doi: 20.1001.1.20085362.1390.22.2.10.3
 ولی‌نژاد، فاطمه، حسنی، امیرحسام، و صیادی، مجتبی (۱۳۹۵). بررسی میزان فلزات سنگین (کادمیم، کروم، نیکل، سرب و روی) در منابع آب زیرزمینی شهرستان اسلامشهر و تهیه پراکنش آن در محیط GIS. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۸(۲)، ۱۸۷-۱۹۹. https://journals.srbiau.ac.ir/article_9822.html

کاربرد زمین‌آمار. مرتع و آبخیزداری. ۱(۷۱)، ۲۲۳-۲۴۰. doi:10.22059/jrwm.2018.228480.1102
 کیخا، مهدی، کیخا، غلامعلی، اکبری‌مقدم، حسین، و دهمرده، خداداد (۱۳۹۲). مطالعات خاک‌شناسی دشت سیستان. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی سیستان، ۱۷۰-۱۷۳.
 مقامی، یاسر، قضاوی، رضا، ولی، عباسعلی، و شرفی، سیامک (۱۳۹۰). ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی به‌منظور پهنه‌بندی کیفیت

References

- Aamizadegan, A., & Asrari, E. (2018). Investigating the concentration of heavy metals in drinking water wells in Jahrom city. First National Conference on safety, health and Environment. 2018-10-18, Tehran, Iran, Pp. 1-9. <https://civilica.com/doc/854786> [In Persian]
- AL-Huqail, A.A., Kumar, P., Eid, E.M., Adelodun, B., Abou Fayssal, S., Singh, J., Arya, A.K., Goala, M., Kumar, V., & Širić, I. (2022). Risk assessment of heavy metals contamination in soil and two rice (*Oryza sativa* L.) varieties irrigated with paper mill effluent. *Agriculture*, 12, 1864. doi:10.3390/agriculture12111864
- APHA. (2017). Standard method for examination of water and wastewater. *American Public Health Association*.
- Arsalan, H., & Turan, N.A. (2015). Estimation of spatial distribution of heavy metals in groundwater using interpolation methods and multivariate statistical techniques; its suitability for drinking and irrigation purposes in the middle Black Sea region of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(8), 4725. doi: 10.1007/s10661-015-4725-x
- Arshadi, A., & Zare, J. (2020). Technical and productivity assessment study fish culture in reservoir pond in Sistan province. *New Technologies in Aquaculture Development*, 14(4), 8-18. doi:20.1001.1.20080026.1398.13.4.2.4 [In Persian]
- Astuti, R.D.P., Mallongi, A., Amiruddin, R., Hatta, M., & Rauf, A.U. (2021). Risk identification of heavy metals in well water surrounds watershed area of Pangkajene, Indonesia. *Gasenta Sanitaria*, 35(1), 33-37. doi: 10.1016/j.gaceta.2020.12.010
- Belkhiri, A., Tiri, A., & Mouni, L. (2020). Spatial distribution of groundwater quality using kriging and co-kriging interpolations. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100473. doi:10.1016/j.gsd.2020.100473
- Cangemi, M., Madonia, P., Albano, L., Banfordeci, A., Figlia, M.G.D., Martino, R.M.R., Nicolos, M., & Favara, R. (2019). Heavy metal concentrations in the groundwater of the Barcellona-Milazzo plain (Italy): contributions from geogenic and anthropogenic sources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(2), 285. doi:10.3390/ijerph16020285
- Caporale, A., & Violante, A. (2016). Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments. *Current Pollution Reports*, 2(1), 0024. doi:10.1007/s40726-015-0024-y
- Chai, T., & Draxler, R.R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geo Scientific Model Development*, 7(3), 1247-1250. doi:10.5194/gmd-7-1247-2014, 2014
- Cruz-Lopes, Luísa, P., Macena, M., Esteves, B., Guiné, & Raquel, P.F. (2021). Ideal pH for the adsorption of metal ions Cr⁶⁺, Ni²⁺, Pb²⁺ in aqueous solution with different adsorbent materials. *Open Agriculture*, 6(1), 115-123. doi:10.1515/opag-2021-0225
- Docheshmeh Gorgij, A., & Asghari Moghaddam, A. (2019). Using of moran spatial autocorrelation index and bayesian kriging in groundwater quality assessment (case study: Azarshahr palin). *Iranian Water Researches Journal*, 13(2), 81-90. https://iwrij.sku.ac.ir/article_10638.html?lang=en [In Persian]
- Einollahipeer, F., Ghaffari, M., & Dahmardeh Behrooz, R. (2020). Evaluation of urban wastewater with CWQI model for agriculture and aquaculture reuse (case study in Zabol, Sistan and Baloochestan, Iran). *Journal of Animal Environment*, 12(4), 581-592. doi: 10.22034/AEJ.2020.130405 [In Persian]
- Fathi Hafshejani, E., & Beigi Harchegani, H. (2013). Spatial variability and mapping of nitrate and phosphate in shahrekord groundwater over a period of five years. *Water and Soil Sciences*, 17(65), 63-75. doi:20.1001.1.24763594.1392.17.65.14.6 [In Persian]
- Fotouhi Firoozabad, F., Ekhtesasi, M.R., Sefid, M., & Morovvati Sharifabadi, A. (2018). Zonation and comparing quality characteristics of drinking water wells in the city of Yazd using geostatistics. *Range and Watershed Management*, 71(1), 223-

240. doi:10.22059/jrwm.2018.228480.1102 [In Persian]
- Hafezi Moghadas, N., Solouki, H.R., Jalilvand, R., & Rahnama Rad, J. (2012). Sistan river engineering geomorphology study. *Journal of Geotechnical Geology*, 18(1), 1-18. <https://www.sid.ir/paper/127099/en>. [In Persian]
- Joghatayi, H., Dabiri, R., Moslempour, M.E., Otari, M., & Sharifiyan Attar, R. (2015). Groundwater quality assessment using the groundwater quality index and gis in joghatay plain, ne Iran. *Human and Environment*, 13(4), 17-25. <https://www.magiran.com/paper/1539008> [In Persian]
- Kazemi, A., Esmailbeigi, M., Sahebi, Z., & Ansari, A. (2022). Health risk assessment of total chromium in the qanat as historical drinking water supplying system. *Science of the Total Environment*, 807, 150795. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150795
- Keikha, M., Keikha, G.H., Akbari Moghadam, A., & Dahmardeh, K.H. (2014). Geological studies of the Sistan plain. Final report of research project, Research Project of Sistan Agriculture and Natural Research Center, 170-173 pages. [In Persian]
- Khalili, R., Montaseri, H., Mottaghi, H., & Jalili, M. (2021a). Evaluation of water quality in the chalus river using the statistical analysis and water quality index (WQI). *Water and Soil Management and Modeling*, 1(3), 38-52. doi: 10.22098/MMWS.2021.9300.1031 [In Persian]
- Khalili, R., Montaseri, H., Mottaghi, H., & Jalili, M.B. (2021b). 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 Modeling*, 1(4), 30-47. doi: 10.22098/MMWS.2021.9322.1033 [In Persian]
- Khosravi, M. (2010). Temporal and Spatial Analysis of the Stability of the Hamoon Lakes. *Iran-Water Resources Research*, 6(3), 68-79. https://www.iwrr.ir/article_15984.html?lang=en [In Persian]
- Magno, M., Luffman, I., & Nandi, A. (2021). Evaluating spatial regression-informed co-kriging of metals in soils near Abandoned Mines in Bumpus Cove, Tennessee, USA. *Geosciences*, 11(11), 434. doi:10.3390/geosciences11110434
- Maghami, Y., Ghazavi, R., Vali, A.A., & Sharafi, S. (2011). Evaluation of spatial interpolation methods for water quality zoning using GIS Case study, Abadeh Township. *Geography and Environmental Planning*, 22(2), 171-182. doi:10.1001.1.20085362.1390.22.2.10.3 [In Persian]
- Mughal, A., Sultan, K., Ashraf, K., Hassan, A., Zaman, Q.u., Haider, F.U., & Shahzad, B. (2022). Risk analysis of heavy metals and groundwater quality indices in residential areas: A Case Study in the Rajanpur District, Pakistan. *Water*, 14(21), 3551. doi:10.3390/w14213551
- Pant, P.P., Tripathi, A.K., & Dwivedi, Vivek. (2011). Effect of heavy metals on some biochemical parameters of sal (*Shorea robusta*) seedling at nursery level, Doon Valley, India. *Journal of Agricultural Sciences*, 2(1), 45-51. doi:10.1080/09766898.2011.11884667
- Piri, H., & Ansari, H. (2013). Study of drought in Sistan Plain and its impact on Hamoun international wetland. *Wetland*, 5(1), 63-74. <https://www.sid.ir/paper/174970/en> [In Persian]
- Qiao, J., Zhu, Y., Jia, X., Shao, M., Niu, X., & Liu, J. (2020). Distributions of arsenic and other heavy metals, and health risk assessments for groundwater in the Guanzhong plain region of China. *Environmental Research*, 181(108957), 1-9. doi: 10.1016/j.envres.2019.108957
- Roodari, A., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., & Delavar, M. (2019). Investigation of relation between meteorological and hydrological drought in Sistan plain. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(6), 33-44. doi: 10.22034/JEST.2018.18561.2745 [In Persian]
- Sadeghian, M., Rezaei, H., Behmanesh, J., & Khanmohammadi, N. (2018). Evaluation of groundwater quality parameters using GIS and Geostatistical (case study: Urmia plain). *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 284-289. https://www.iwrr.ir/article_60705.html?lang=en. [In Persian]
- Shen, R., Li, J., Yang, M., Zeng, M. (2015). Spatial distribution of heavy metals in roadside soils based on Voronoi diagram: a case study of Wuhan city. *Communications in Computer and Information Sciences*, 482, 732-739. doi:10.1007/978-3-662-45737-5_71
- Valinejhad, F., Hassani, A.H., & Sayadi, M. (2016). Investigation of heavy metals (Cd, Cr, Ni, Pb, Zn) in Islamshahr groundwater resources and their regional distribution pattern in GIS. *Journal of Environmental Science and Technology*, 18(2), 187-199. https://journals.srbiau.ac.ir/article_9822.html. [In Persian]
- Zhou, Q., Yang, N., Li, Y., Ren, B., Ding, X., Bian, H., & Yao, X. (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, 00925. doi:10.1016/j.gecco.2020.e00925