Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Temporal-spatial assessment of groundwater quality in Zahedan County for drinking and agricultural uses

Ali Barahooei[1], Narjes Okati[2]*, Zahra Asadollahi[3], Fatemeh Einollahipeer[2]

[1] Graduated M.Sc. Student, Environment Department, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
[2]Assistant Professor, Environment Department, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran
[3]Assistant professor, Faculty of Natural Resources, Department of Environment and Fisheries, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Abstract

Introduction

The rainfall decrease and limited water resources in arid and semi-arid regions such as the Zahedan region caused the groundwater resources to need more attention in these areas. Moreover, the increase in the population in Zahedan Country and the lack of a suitable system for collecting wastewater in this area have made the pollution of underground water inevitable. So that, the excessive extraction of underground water resources and successive droughts on the other hand have caused a decrease in the underground water level in this region. Therefore, the present study was carried out with the aim of time-spatial monitoring of underground water quality in Zahedan County.

Materials and Methods

The aim of this study was to monitor the temporal-spatial quality of groundwater quality in Zahedan City in four stages. Determining the geographical coordinates of sampling wells, calculating the water quality index (WQI), and Wilcox index, comparing the interpolation methods in ArcGIS 10.8 software to prepare the spatial map of the WQI and comparing the spatial variations of the WQI. This research was conducted in two time periods 2010-2013 and 2014-2017. To investigate the temporal changes in water quality parameters, annual statistics of 90 wells and aqueducts with continuous statistics were used. Then, WQI and Wilcox's indices were calculated for drinking and agricultural uses, respectively. One of the most practical methods is WQI, which indicates the degree of its suitability for various uses, including drinking. This index is usually obtained from the values of general water parameters including dissolved oxygen, acidity, hardness, soluble solids, temperature, turbidity, nitrate, nitrite, and some basic ions. This index combines different water quality parameters to provide a numerical value that can be used for spatial comparisons. Besides, Wilcox's classification is one of the most important index in the field of determining the quality of agricultural water, which is calculated based on two parameters of electrical conductivity (EC) and sodium absorption ratio (SAR) as the risk of alkalinity.

Results and Discussion

The lowest and highest WQI levels were 30.1 and 674.0, respectively in the period 2010-2017. WQI time changes during the study period showed that the WQI is not significantly different between the first (2010-2013) and the second (2014-2017) periods. According to this index, in the first period, 7.9 % of the studied wells were in good condition, 5.6 % in bad condition, 13.5 % in very bad condition, and 73 % undrinkable in terms of drinking water quality. In the second period, 6.7 % of the studied wells were in good condition, 6.3 % in bad condition, 13.3 % in very bad condition, and 73.3 % undrinkable in terms of drinking water quality. In both time periods, the quality of none of the wells in terms of drinking was not in the high class. The results of descriptive statistics showed that the mean parameters of SO_4^{2-}, Cl^-, EC, TH, TDS, and HCO_3^- were two intervals higher than the standard. According to the results of the Pearson correlation test, there is a negative significant relationship between the pH and other parameters. The pH has the most negative significant relationship with TH. TDS and EC variables have the highest positive and significant relationship. This lack of impact can be attributed to the range of very low pH changes in groundwater samples in the two periods. There is also a significant negative relationship between pH and other parameters. The pH has the most negative and significant relationship with

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

potassium. Moreover, according to the Wilcox index, in the period of 2010-2013, 87 % of the studied stations are in the S4C2, S3C3, S3C4, and S4C4 classes, which are unsuitable for agriculture and 12 % were in the C3S3 class, which by applying the necessary measures can be used for agriculture. Likewise, in the period 2014-2017, 91 % of the sampled stations are located in very salty and unsuitable for agriculture, and 8 % of wells. It is possible that the high extraction of underground water and the drop in the water level in the Zahedan region have caused the EC of water to increase. Also, drought can play a role as an aggravating factor in the change in water quality. The results of the Pearson correlation test showed that there is a significant negative relationship between pH and other parameters. Since in the comparison of various interpolation methods based on RMS and R^2 for the WQI, the zoning map was drawn based on the kriging method due to its lowest RMS and highest R^2.

Conclusion

Due to the high salinity of water, the study wells are not used for drinking and agriculture purposes but they can be used in ordinary applications such as washing. Besides, considering the quality characteristics of groundwater in the Zahedan region, it can be acknowledged that proper water management in this region is very important.

Keywords: Groundwater quality, Interpolation, Wilcox Index, WQI, Zahedan

Article Type: Research Article

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

Citation: Barahooei, A., Okati, N., Assadollahi, Z., & Einollahi peer, F. (2023). Temporal-spatial assessment of groundwater quality in Zahedan County for drinking and agricultural uses. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 236-250.
DOI: 10.22098/mmws.2022.11793.1170
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.16.6

Received: 12 November 2022, Received in revised form: 14 December 2022, Accepted: 14 December 2022, Published online: 14 December 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 236-250

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵۴۶-۲۷۸۳

ارزیابی زمانی–مکانی کیفیت منابع آب زیرزمینی شهرستان زاهدان به‌منظور مصارف شرب و کشاورزی

علی براهویی[۱]، نرجس اکاتی[۲*]، زهرا اسدالهی[۳]، فاطمه عین‌الهی پیر[۲]

[۱] دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط زیست، گروه محیط زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

[۲] استادیار، گروه محیط زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

[۳] استادیار، گروه محیط زیست و شیلات، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

افزایش جمعیت شهرستان زاهدان، عدم سیستم مناسب برای جمع‌آوری فاضلاب، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی و خشکسالی‌های متوالی باعث آلودگی و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در این شهرستان شده است. لذا، مطالعهٔ حاضر با هدف پایش زمانی–مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی شهرستان زاهدان، در بازه‌های زمانی ۱۳۹۲–۱۳۸۹ و ۱۳۹۶–۱۳۹۳ انجام شد. برای بررسی روند تغییرات زمانی پارامترهای کیفی آب، از آمار سالانهٔ ۹۰ حلقهٔ چاه و قنات و برای محاسبهٔ کاربری‌های شرب و کشاورزی به‌ترتیب شاخص‌های کیفیت آب (WQI) و ویلکاکس استفاده شد. طبق نتایج، کم‌ترین و بیش‌ترین میزان WQI در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۹۶–۱۳۸۹ به‌ترتیب ۳۰/۱ و ۶۷۴ به‌دست آمد. تغییرات زمانی WQI طی دورهٔ مورد مطالعه نشان داد که WQI در بازهٔ زمانی اول و دوم اختلاف قابل‌توجهی ندارد. حدود ۷۳ درصد آب چاه‌های مورد مطالعه از لحاظ WQI در وضعیت خوبی نداشته و غیرقابل شرب هستند. بر اساس شاخص ویلکاکس در بازهٔ زمانی اول ۸۷ درصد ایستگاه‌ها، در کلاس‌های C۲S۴، C۳S۳، C۴S۳ و C۴S۴ قرار دارند که برای کشاورزی نامناسب بودند. ۱۲ درصد نیز در کلاس C۳S۳ قرار گرفتند که با اعمال تمهیدات لازم قابل استفاده برای کشاورزی بودند. در بازهٔ زمانی دوم، ۹۱ درصد ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده در طبقهٔ خیلی‌شور و نامناسب برای کشاورزی و بقیه در طبقهٔ C۳S۳ قرار داشتند. آزمون کولموگروف–اسمیرنوف، نرمال بودن داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب را تأیید نمود ($p>0/05$). نتایج آزمون همبستگی پیرسون نشان داد که بین پارامترهای کیفی آب ارتباط معناداری ($p<0/05$) وجود داشت. از آن‌جایی که در مقایسهٔ انواع روش‌های درون‌یابی بر اساس RMSE و ضریب همبستگی برای پارامتر WQI، روش کریجینگ نسبت به سایر روش‌ها از دقت بیش‌تری برخوردار بود، لذا نقشهٔ پهنه‌بندی بر اساس آن ترسیم شد. با توجه به خصوصیات نامناسب آب‌های زیرزمینی منطقهٔ زاهدان برای شرب و کشاورزی، می‌توان با پیدا کردن منابع آب جدید جایگزین مانند انتقال آب دریای عمان به زاهدان، مشکل آب منطقه را سریع‌تر برطرف کرد. از طرفی حفاظت از آبخوان زاهدان منجر به بهبود کیفیت آن در آینده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زاهدان، درون‌یابی، WQI، شاخص ویلکاکس، کیفیت آب زیرزمینی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Narjesokati@uoz.ac.ir

استناد: براهویی، علی، اکاتی، نرجس، اسدالهی، زهرا، و عین‌الهی پیر، فاطمه (۱۴۰۲). ارزیابی زمانی–مکانی کیفیت منابع آب زیرزمینی شهرستان زاهدان به‌منظور مصارف شرب و کشاورزی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۳۶–۲۵۰.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11793.1170

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.16.6

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۲۳۶ تا ۲۵۰

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱– مقدمه

روند افزایشی جمعیت و بالا رفتن کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی موجب بیش‌تر شدن تقاضای آب در بسیاری از کشورها از جمله ایران برای مصارف مختلف، مانند شهری، صنعتی و کشاورزی شده است. آب‌های زیرزمینی به جهت استعداد آلودگی کم‌تر و ظرفیت ذخیرهٔ بالا نسبت به آب‌های سطحی، به‌عنوان یک منبع مهم مورد توجه هستند (Eslami et al., 2018). هم‌چنین، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منابع آبی مهم برای حمایت از انواع توسعهٔ اقتصادی و اجتماعی به‌شمار می‌روند و جنبه‌های گسترده‌ای از عملکردها و خدمات اکوسیستم، متأثر از آن‌هاست. از طرفی این منابع با مشکلاتی مواجه هستند که بخشی از آن به میزان بهره‌برداری و مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی مربوط است و علت آن اثرگذاری فعالیت‌های بشر بر روی این منابع کم‌نظیر و بعضاً بدون جایگزین است (Pandey et al., 2020). گسترش روزافزون شهرها، بارش کم و محدود بودن منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، باعث شده که منابع آب زیرزمینی در این مناطق نیازمند توجه بیش‌تری باشند (Torabipoudeh et al., 2020). از طرف دیگر، بهره‌برداری بیش از حد از این منابع، آلوده شدن آن‌ها به‌سبب عوامل مختلف از جمله اثرات فعالیت‌های توسعه‌ای نامناسب و ناهمگون با محیط، مانند کشاورزی و صنعت بر روی این منابع، موجب ایجاد چالش در مدیریت منابع آب در ایران شده است (Eslami et al., 2018). این مسئله اهمیت مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی را از لحاظ کمی و کیفی در کشور را نشان می‌دهد. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای ارزیابی کیفی منابع آبی، محاسبهٔ شاخص کیفیت آب (WQI)[1] است که نشان‌دهندهٔ درجهٔ مطلوبیت آن برای استفاده‌های مختلف از جمله شرب است (Liang et al., 2018; Reyes-Toscano et al., 2020). این شاخص معمولاً از مقادیر پارامترهای عمومی آب شامل اکسیژن محلول، اسیدیته، سختی، مواد جامد محلول، دما، کدورت، نیترات، نیتریت و برخی یون‌های اصلی به دست می‌آید (Lobato et al., 2015; Ram et al., 2021) و پارامترهای کیفی مختلف آب را برای ارائهٔ یک مقدار عددی باهم ترکیب می‌نماید که می‌تواند جهت مقایسه‌های مکانی نیز استفاده شود. با این‌حال، WQI برای پارامترهای شیمیایی مختلف نیاز به وزن‌دهی دارد که معمولاً توسط متخصصان تعیین می‌شوند (Bahrami and Dastourani, 2019).

در دهه‌های اخیر، مطالعات نسبتاً گسترده‌ای در زمینهٔ شاخص‌های کیفی آب در نقاط مختلف جهان انجام شده است. به‌عنوان مثال، در پژوهش Bodrud-Doza et al. (2016) که در منطقه‌ای از بنگلادش انجام شد، بر اساس شاخص کیفیت آب زیرزمینی، حدود ۴۷ درصد نمونه‌ها از لحاظ کیفی برای شرب در طبقهٔ خوب قرار داشتند. هم‌چنین، پژوهشی که در کشور غنا توسط Kulinkina et al. (2017) انجام شد، برخی پارامترهای کیفیت آب از قبیل کلراید، آهن، منگنز و pH اندازه‌گیری شد. نتایج آن‌ها نشان داد که پارامترهای مورد مطالعه در مناطق روستایی فراتر از حد مجاز استانداردهای سازمان بهداشت جهانی[2](WHO) بوده که ضرورت تصفیهٔ آب قبل از استفاده به‌منظور شرب را نشان داد. در همین راستا مطالعه‌ای باهدف تحلیل تغییرات مکانی–زمانی کیفیت آب زیرزمینی در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ در آبخوان حوضهٔ گرام بالیا، در شمال تونس توسط Slama and Seberi (2020) انجام شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که توزیع فضایی همهٔ یون‌ها تقریباً یکسان است. اما نقشه‌های مکانی–زمانی به‌دست آمده برای بازهٔ زمانی بین سال‌های ۲۰۱۵–۲۰۰۰ برای هر یون الگوهای مختلفی را نشان دادند. Ram et al. (2021) به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با کمک WQI جهت مصرف شرب و با استفاده از GIS در منطقهٔ ماهوبا در هند پرداختند. نتایج مطالعهٔ آن‌ها نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی رو به کاهش است و نیاز به تصفیهٔ قبل از مصرف دارد. هم‌چنین، برای جلوگیری از آلودگی‌های انسانی و طبیعی نیاز به حفاظت از این منابع است.

از مطالعات انجام شده در منطقهٔ زاهدان می‌توان به مطالعه Sargazi et al. (2020) اشاره نمود که با هدف ارزیابی پتانسیل خورندگی و رسوب‌گذاری آب‌های زیرزمینی شهر زاهدان جهت مصارف صنعتی انجام شد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مقادیر کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) در تمامی نمونه‌ها از استاندارد آب آشامیدنی WHO فراتر رفته است. کل آب‌های زیرزمینی این منطقه نیز دارای تمایل خورندگی قابل‌توجهی بودند و ۹۶ درصد نمونه‌ها نیز نرخ بالایی از خوردگی موضعی را نشان دادند. Sarhadi et al. (2016) تأثیر شاخص‌های خشکسالی بر تغییرات هیدرواستاتیکی و پارامترهای کیفی آبخوان دشت زاهدان را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که هیدروگراف آبخوان از سال ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۲ به میزان ۱/۳۷ متر افزایش سطح آب را نشان داد که با توجه به شرایط خشکسالی در دشت، آن‌ها بیان نمودند که این افزایش می‌تواند ناشی از کاهش استحصال آب از سفرهٔ زیرزمینی باشد. در همین راستا Kia et al. (2019) به ارزیابی تغییرات مکانی–زمانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از WQI طی دو دهه در آبخوان استان گلستان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که آبخوان در وضعیت خوب و بسیار خوب قرار دارد و فقط بخش کوچکی از آن که به سواحل شرقی دریای خزر و شمال منطقهٔ مطالعاتی منتهی می‌شوند، از لحاظ کیفی در وضعیت بد قرار دارند. Hosseini et al. (2019) از شاخص کیفیت آب (WQI)

[1] Water Quality Index

[2] World Health Organization

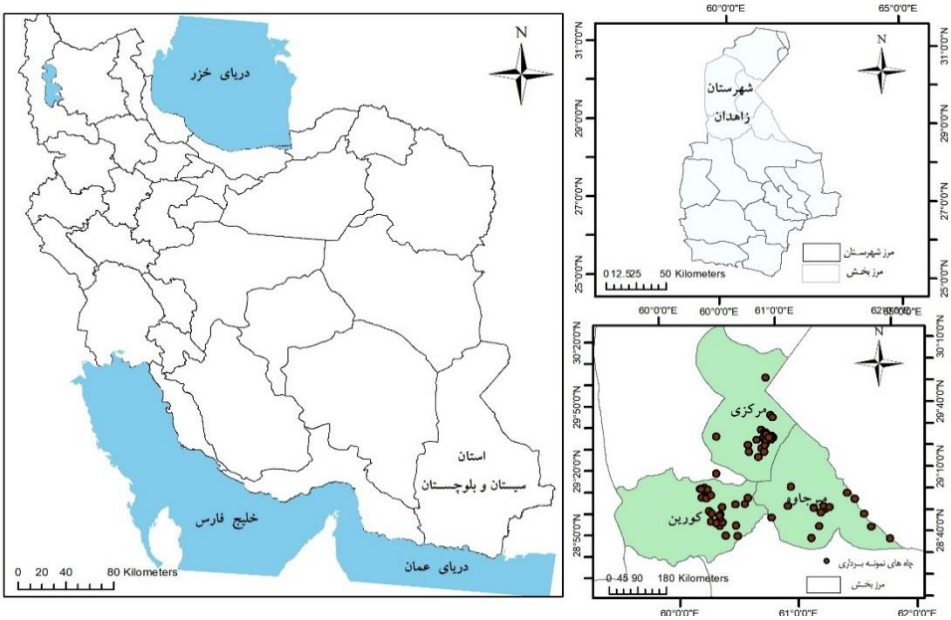
و هیدروژئوشیمی، به‌منظور ارزیابی کیفی آب سطحی، مخازن چاه نیمهٔ استان سیستان و بلوچستان استفاده کردند. آن‌ها بیان نمودند که استفاده از روش WQI برای تفسیر آسان و سریع داده‌ها برای مصرف شرب، بسیار مناسب است. بر اساس تقسیم‌بندی WQI، بیش‌تر نمونه‌های آب از لحاظ کیفیت در محدودهٔ خوب تا ضعیف قرار گرفته بودند. Khalili et al. (2020)، با بررسی کیفیت آب رودخانهٔ گرمارود از سه شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت، شاخص آلودگی رودخانه و شاخص کیفیت وزنی حسابی آب برای نمونه‌های مختلف از سه ایستگاه در دو بازهٔ زمانی تابستان و زمستان سال ۱۳۹۸ استفاده نمودند. نتایج هر سه شاخص بیانگر کیفیت نسبتاً خوب ایستگاه شماره یک و کیفیت بد در ایستگاه‌های شماره دو و سه بود.

افزایش جمعیت شهرستان زاهدان و عدم سیستم مناسب برای جمع‌آوری فاضلاب در این منطقه، آلودگی آب‌های زیرزمینی را امری اجتناب‌ناپذیر نموده است. به‌طوری‌که، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از یک‌سو و خشکسالی‌های متوالی از سوی دیگر باعث کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در این شهرستان شده است. از سویی تأمین آب با کیفیت مطمئن و مناسب برای پاسخ به نیازهای روبه رشد بخش‌های مختلف از قبیل شرب و کشاورزی، یکی از چالش‌های مهم در صنعت آب است؛ به‌خصوص در این منطقه، همانند سایر مناطق کویری ایران، آب‌های زیرزمینی در حیات اجتماعی–اقتصادی مردم نقش مهمی دارند. با توجه به توضیحات فوق، هدف این مطالعه، ارزیابی تغییرات کیفی آب‌های زیرزمینی در منطقهٔ زاهدان به‌منظور استفاده‌های شرب و کشاورزی در بازهٔ زمانی مورد مطالعه است و پژوهش حاضر برای اولین‌بار کیفیت زمانی–مکانی آب‌های زیرزمینی شهرستان زاهدان را با استفاده از شاخص‌های WQI و ویلکاکس به‌ترتیب برای مصارف شرب و کشاورزی، با کمک ArcGIS در طول یک دورهٔ زمانی هشت ساله ارزیابی می‌نماید.

۲– مواد و روش‌ها

۲–۱– منطقهٔ مورد مطالعه

آبخوان زاهدان با مساحت ۱۳۳ کیلومترمربع واقع در دشت زاهدان با ارتفاع متوسط ۱۴۰۰ متر از سطح دریا شده است. سنگ کف آبخوان در شمال غرب از فلیش‌های قدیمی، در نواحی غربی و جنوب غربی از گرانیت و در جنوب، شرق و جنوب شرق از فلیش‌های جوان و رسوبات نئوژن تشکیل شده است. جهت جریان آب زیرزمینی در آبخوان از غرب به شرق و در مناطق جنوبی به سمت شمال بوده و در نهایت از شمال شرق آبخوان خارج می‌شود. هم‌چنین، شهرستان زاهدان در ناحیهٔ شمالی استان سیستان و بلوچستان، بین ۵۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۳۰ دقیقهٔ طول شرقی و ۲۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۲۵ دقیقهٔ عرض شمالی، واقع شده است. میانگین بارندگی سالانهٔ آن حدود ۹۱ میلی‌متر است. تابستان گرم و زمستان سرد و خشک دارد. بالاترین نقطهٔ ارتفاعی این منطقه، قله تفتان در جنوب، با ارتفاعی در حدود ۳۹۴۰ متر از سطح دریا و پائین‌ترین نقطهٔ آن در حوالی میر جاوه، و با ارتفاعی در حدود ۸۶۰ متر از سطح دریا است (Dowlati et al., 2014). منطقهٔ مورد مطالعه شامل بخش‌های مرکزی (شهر زاهدان با کاربری مسکونی) و میرجاوه و کورین (با کاربری‌های کشاورزی و مسکونی) هستند.



شکل ۱– موقعیت چاه‌های منطقهٔ مورد مطالعه

Figure 1- Location of wells in the study area

۲-۲- مختصات جغرافیایی چاه‌های نمونه‌برداری و تهیهٔ آمار نمونه‌برداری پارامترهای مورد بررسی

مختصات جغرافیایی و آمار نمونه‌برداری سالانهٔ ۹۰ حلقهٔ چاه و قنات که دارای آماربرداری پیوسته بودند، در دو بازهٔ زمانی چهار ساله ۱۳۸۹-۱۳۹۲ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳ از شرکت آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان تهیه شد. در شکل ۱ موقعیت چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. بر اساس داده‌های موجود در مرکز آمار ایران، بارش سالانهٔ زاهدان طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۸۹، میانگین بارندگی در سال‌های ۹۲-۸۹ و ۹۶- ۹۳ به‌ترتیب ۷۷/۶، ۳۳/۸ میلی‌متر گزارش شده است (Statistical yearbooks of Iran, 2010-2017). هر چند میانگین بارندگی در هر دو بازهٔ زمانی کم‌تر از متوسط بارندگی کشور بوده است، اما با توجه به روند کاهشی میانگین بارش و تداوم خشکسالی‌ها در منطقه، این دو بازهٔ انتخاب شد تا روند تغییرات فاکتورهای مؤثر بر کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه نیز با گذشت زمان بررسی شود، هم‌چنین، در دو بازهٔ زمانی، داده‌های موجود خلاصه شده و بهتر جمع‌بندی می‌شدند. پارامترهای مورد بررسی شامل EC، pH، TDS، Cl^-، Ca^{2+}، Na^+، Mg^{2+}، k^+، HCO_3^-، SO_4^{2-} و NO_3^- بودند.

۲-۳- محاسبهٔ WQI

بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد که WQI شاخص مناسبی در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی است (Kia et al., 2019; Hosseini et al., 2019). WQI طی سه گام محاسبه شد. در گام اول پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده بر اساس اهمیت نسبی در مجموع کیفیت آب، در نظر گرفته شدند. وزن بیش‌تر مربوط به پارامترهایی است که اثرات بیش‌تری بر سلامت دارند و وجود مقادیر بالاتر از استاندارد می‌تواند در استفاده از آب توسط افراد ایجاد محدودیت نماید؛ بنابراین، وزن پارامترها از یک تا پنج در نظر گرفته شد که در جدول ۱ قابل مشاهده است. در ادامه طبق رابطهٔ (۱) وزن هر پارامتر بر مجموع وزن همهٔ پارامترها تقسیم شد (Kia et al., 2019).

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad (۱)$$

در رابطهٔ بالا W_i وزن نسبی، wi وزن هر پارامتر و n تعداد پارامتر است.

در گام دوم، با تقسیم مقدار هر پارامتر از هر نمونهٔ آب بر مقدار استاندارد آن، نرخ کیفیت محاسبه شد (رابطهٔ ۲). در رابطهٔ بالا q_i نرخ کیفیت، C_i غلظت هر پارامتر شیمیایی در هر نمونهٔ آب، S_i مقدار استاندارد هر پارامتر برای مصرف شرب است. در این مطالعه از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011) استفاده شد.

$$q_i = (C_i/S_i) \qquad (۲)$$

در گام سوم برای محاسبهٔ میزان عددی WQI از رابطه‌های (۳) و (۴) استفاده شد.

$$SI_i = W_i q_i \qquad (۳)$$

$$WQI = \sum SI_i \qquad (۴)$$

در روابط بالا SI_i؛ زیر شاخص پارامتر i، q_i؛ نرخ کیفیت بر اساس غلظت پارامتر i و w_i؛ وزن نسبی است. در ادامه، مجموع مقادیر SI_i به‌عنوان شاخص کیفیت آب زیرزمینی بر اساس جدول ۲ در پنج طبقهٔ عالی، خوب، متوسط، بد و خیلی بد طبقه‌بندی شدند (Radwan et al., 2019; Ram et al., 2021).

جدول ۱- مقادیر استاندارد و وزن واحد پارامترهای شاخص کیفی آب
Table 1- Standard values and unit weight of water quality index parameters

پارامتر	وزن واحد	وزن نسبی (W_i)	مقادیر استاندارد (S_i)*
pH	2	0.5	8.5
Cl^-	4	0.1	250
EC	3	0.075	1500
TH	4	0.1	300
$SO^{r-}_{۴}$	3	0.075	250
TDS	5	0.125	500
$HCO^-_{۳}$	3	0.075	120
Mg^{r+}	2	0.5	50
Na^+	3	0.075	200
Ca^{r+}	3	0.075	200
K^+	2	0.5	12
NO_3^-	5	0.125	50
مجموع	40	-	-

* مقادیر استاندارد توصیه شده سازمان بهداشت جهانی (WHO, 2011)

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس WQI
Table 2- Classification of water quality based on the WQI index

وضعیت آب از نظر شرب	دامنهٔ WQI
عالی	0-25
خوب	26-50
متوسط	51-70
بد	71-90
خیلی بد	91-100

۲-۴- طبقه‌بندی کیفی آب برای کشاورزی

طبقه‌بندی ویلکاکس یکی از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌ها در زمینهٔ تعیین کیفیت آب کشاورزی است که بر مبنای دو پارامتر هدایت الکتریکی EC (برحسب میکرو موس بر سانتی‌متر) و نسبت جذب سدیم (SAR) به‌عنوان خطر قلیائیت محاسبه می‌شود. بر اساس رابطهٔ (۵) با افزایش غلظت سدیم میزان SAR افزایش می‌یابد (Abtahi et al., 2015).

$$SAR = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{(Mg^{2+}) + (Ca^{2+})}{2}}} \quad (۵)$$

مطابق جدول ۳، آب کشاورزی از نظر EC و SAR به‌طور جداگانه به چهار گروه تقسیم می‌شود و با لحاظ نمودن دو پارامتر (C بیان‌گر هدایت الکتریکی و S میزان جذب سدیم است) با هم در چهار نوع کیفیت و ۱۶ رده تقسیم می‌کنند (جدول۴).

۲-۵- روش‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ مکانی WQI

قبل از اجرای روش‌های درون‌یابی، نرمال بودن پارامترهای آب با استفاده از آزمون کولموگروف–اسمیرنوف بررسی شد. از آن‌جا که میزان معناداری بالاتر از ۰/۰۵ (p>۰/۰۵) به‌دست آمد، نرمال بودن توزیع داده‌ها تأیید شد. سپس روش‌های کریجینگ[1] وزنی معکوس فاصله (IDW) و اسپلاین[2] برای تهیهٔ نقشهٔ مکانی WQI مورد بررسی قرار گرفتند. از طریق مقایسهٔ عملکرد روش‌های ذکر شده در تهیهٔ نقشهٔ مکانی WQI با ریشهٔ میانگین مربعات خطای پیش‌بینی (RMS)[3] و ضریب همبستگی (R^2)، بهترین مدل برای درون‌یابی ارزیابی شد (Ghahrodi Tali and Servati, 2005).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقادیر پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعه در بازه‌های زمانی ۱۳۹۲- ۱۳۸۹ و ۱۳۹۷-۱۳۹۳

مقادیر مربوط به آمار توصیفی شاخص کیفیت آب شهرستان زاهدان در ۹۰ چاه مطالعاتی طی سال‌های ۱۳۹۲- ۱۳۸۹ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳ در جدول ۵ آمده است. میانگین پارامترهای SO_4^{2-}، Cl^-، EC، TH، TDS و HCO_3^- در دو بازهٔ زمانی مورد مطالعه بالاتر از حدود استاندارد WHO برای این پارامترها بودند.

۳-۲- بررسی همبستگی میان پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی در بازه‌های زمانی ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و۱۳۹۷-۱۳۹۳

ارتباط بین پارامترهای اسیدیته، کلر، هدایت الکتریکی، سختی کل، سولفات، سدیم، کل جامدات محلول، منیزیم، کلسیم، پتاسیم، بی‌کربنات و نیترات در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون در جدول ۶ آورده شده است. طبق نتایج جدول ۶، بین پارامتر pH با سایر پارامترها ارتباط منفی و معنادار وجود دارد. پارامتر pH بیش‌ترین ارتباط منفی و معنادار را با پارامتر TH دارد. متغیرهای TDS و EC بالاترین ارتباط مثبت و معنادار را دارند. نتایج مطالعهٔ Mirshekar (2012) نشان داد جز پارامتر pH که به‌طورکلی همبستگی خوبی با هیچ‌کدام از عناصر ندارد که این عدم تأثیرپذیری را می‌توان به محدودهٔ تغییرات بسیار کم pH نمونه‌های آب زیرزمینی در دو دوره نسبت داد.

بررسی همبستگی بین پارامترهای اسیدیته، کلر، هدایت الکتریکی، سختی کل، سولفات، سدیم، کل جامدات محلول، منیزیم، کلسیم، پتاسیم، بی‌کربنات و نیترات در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۳ در جدول ۷ آورده شده است. طبق نتایج این جدول، بین پارامتر pH با سایر پارامترها ارتباط منفی و معناداری وجود دارد. پارامتر pH بیش‌ترین ارتباط منفی و معنادار را با یون پتاسیم (K^+) دارد. متغیرهای TDS و EC بالاترین ارتباط مثبت و معنادار را با هم دارند. در نتایج مطالعهٔ Hosseini et al. (2019)، نیترات بیش‌ترین همبستگی مثبت و معنادار را با فسفات، سختی کل و BOD داشت و بیش‌ترین همبستگی منفی و معنادار نیترات، با پارامتر pH به‌دست آمد.

۳-۳- آمار توصیفی مقادیر کلی WQI در بازه‌های زمانی ۱۳۸۹-۱۳۹۲ و ۱۳۹۳-۱۳۹۶

مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین WQI در بازهٔ زمانی مورد مطالعه در جدول ۸ آورده شده است. نتایج آزمون T-test نشان داد که تفاوت معناداری (p=۰/۵۲) از نظر WQI در دو بازهٔ زمانی مورد مطالعه وجود ندارد.

۳-۴- طبقه‌بندی کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس WQI در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳

طبقه‌بندی کیفیت آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس WQI در بازهٔ زمانی سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳ در جدول ۹ آورده شده است. بر اساس این شاخص در بازهٔ زمانی ۱۳۹۲-۱۳۸۹، ۷/۹ درصد چاه‌های مورد مطالعه از لحاظ کیفیت آب شرب در وضعیت خوب، ۵/۶ درصد در وضعیت بد، ۱۳/۵ درصد در وضعیت خیلی بد و ۷۳ درصد غیرقابل آشامیدن بودند. در سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۹۳ نیز ۶/۷ درصد چاه‌های مورد مطالعه از لحاظ کیفیت آب شرب در وضعیت خوب، ۶/۳ درصد در وضعیت بد، ۱۳/۳ درصد در وضعیت خیلی بد و ۷۳/۳ درصد غیرقابل آشامیدن بودند. در هر دو بازهٔ زمانی کیفیت هیچ‌کدام از چاه‌ها از لحاظ شرب در طبقهٔ عالی قرار نداشت. مقایسهٔ نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با مطالعات سایر محققین که در مناطق دیگر بررسی مشابهی را انجام دادند، نشان می‌دهد مشکل کاهش کیفیت آب به دلایل مختلف در مناطق دیگر کشور نیز دیده شده است. به‌عنوان مثال، مطالعه Nakhaie Nejad et al. (2017) در یک دورهٔ آماری ۱۴ ساله (۱۳۹۱-۱۳۷۷) برای ۲۰ حلقه چاه، شش رشته قنات و سه چشمه در دشت سرایان نشان داد که در سال ۱۳۹۱ این دشت با کاهش

[1] Kriging
[2] Spline
[3] Root-Mean-Square

عمق آب مواجه شده و این کاهش عمق آب در قسمت‌های شمالی تمرکز بیش‌تری دارد و کاهش سطح آب زیرزمینی کاهش کیفیت آب را به همراه داشته است. بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب تالاب چغاخور در ایران با استفاده از شاخص کیفیت آب WQI نیز نشان داد که کیفیت آب تالاب در دو طبقهٔ فقیر و نامناسب قرار داشت (Sadat-Noori et al., 2014).

جدول ۳- طبقه‌بندی آب از نظر کشاورزی طبق دیاگرام ویلکاکس بر اساس EC و SAR

Table 3- Classification of water in terms of agriculture according to Wilcox diagram based on EC and SAR

کیفیت آب	EC	رده	SAR	رده
عالی	EC<250	C_1	SAR<10	S1
خوب	250<EC<750	C2	10<SAR<18	S2
متوسط	750<EC<2250	C3	18<SAR<26	S3
نامناسب	EC<2250	C4	SAR<26	S4
کیفیت آب	EC	رده	SAR	رده
عالی	EC<250	C_1	SAR<10	S1
خوب	250<EC<750	C2	10<SAR<18	S2
متوسط	750<EC<2250	C3	18<SAR<26	S3

جدول ۴- طبقه‌بندی آب کشاورزی بر اساس SAR و خطر شور شدن

Table 4- Classification of agricultural water based on SAR and risk of salinization

ردیف	ردهٔ آب	نوع کیفیت آب برای کشاورزی
1	C1S1	شیرین – برای کشاورزی کاملاً بی‌ضرر
2	C1S2.C2S1.C2S2	کمی شور – برای کشاورزی تقریباً مناسب
3	C1S3.C2S3.C3S1.C3S2.C3S3	شور– برای کشاورزی با اعمال تمهیدات لازم
4	C1S4.C2S4.C3S4.C4S4.C4S2.C4S1.C4S3	خیلی شور– مضر برای کشاورزی

جدول ۵– مقادیر پارامترهای شاخص کیفیت آب زیرزمینی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۲–۱۳۸۹ و ۱۳۹۶–۱۳۹۳

Table 5- Values of underground water quality index parameters in the time period of 2010-2013 and 2014-2017

پارامتر	بازهٔ زمانی	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
pH	92-89	6.57	8.43	7.47	0.45
	96-93	6.71	9.10	7.57	0.51
Cl^-	92-89	2.20	3200	379.35	560.19
	96-93	2.50	2585	482.64	529.59
EC	92-89	474	13600	4985	2897
	96-93	74.60	17200	۴۹۴۸	2950
TH	92-89	70	3312	671	541
	96-93	55	3454	792	591
SO_4^{2-}	92-89	0.10	2016	382	523
	96-93	0.70	3614	628	666
TDS	92-89	304	9020	3298	1939
	96-93	277	10110	3255	1970
HCO_3^-	92-89	2.60	904.02	191	243
	96-93	2.40	974.78	274.45	257.55
Mg^{2+}	92-89	0.20	632.64	54	86
	96-93	0.40	522.72	77	88
Na^+	92-89	5.70	1750	328	419
	96-93	5.50	1900	451	444
Ca^{2+}	92-89	0.50	7716	112	484
	96-93	0.50	576.62	129.15	136
K^+	92-89	0.10	36	6.69	9.27
	96-93	0.10	48	10.20	10.61
NO_3^-	92-89	0.20	23	5	5
	96-93	0.15	25	10	3

جدول ۶- همبستگی بین پارامترهای دخیل در کیفیت آب زاهدان سال های ۱۳۹۲ -۱۳۸۹

Table 6- Correlation between the parameters involved in the water quality of Zahedan in the years 2010-2013

NO_3^-	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	HCO_3^-	TDS	SO_4^{2-}	TH	EC	Cl^-	pH	متغیر
											1	pH
										1	-0.50**	Cl^-
									1	0.35**	-0.51**	EC
								1	0.68**	0.81**	-0.62**	TH
							1	0.74**	0.25**	0.89**	-0.46**	SO_4^{2-}
						1	0.94**	0.71**	0.30**	0.95**	-0.49**	TDS
					1	0.35**	0.30**	0.72**	0.99**	0.40**	-0.53**	HCO_3^-
				1	0.35**	0.78**	0.84**	0.86**	0.31**	0.87**	-0.49**	Mg^{2+}
			1	0.21**	0.06	0.27**	0.25**	0.17**	0.04**	0.25**	-0.21**	Na^+
		1	0.29**	0.85**	0.28**	0.86**	0.89**	0.74**	0.24**	0.86**	-0.54**	Ca^{2+}
	1	0.82**	0.24**	0.76**	0.12*	0.84**	0.80**	0.59**	0.08**	0.79**	-0.45**	K^+
1	0.75**	0.45**	0.59**	0.33**	0.69**	0.76**	0.85**	0.87**	0.32**	0.85**	-0.47**	NO_3^-

**همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنادار و * همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنادار می‌باشند.

جدول ۷- همبستگی بین پارامترهای دخیل در کیفیت آب زاهدان سال های ۱۳۹۶-۱۳۹۳

Table 7- Correlation between parameters involved in Zahedan water quality in 2014-2017

NO_3^-	K+	Ca^+	Na^+	Mg^{2+}	HCO_3^-	TDS	SO_4^{2-}	TH	EC	Cl^-	pH	متغیر
											1	pH
										1	-0.48**	Cl^-
									1	0.43**	-0.38**	EC
								1	0.69**	0.81**	-0.58**	TH
							1	0.81**	0.38**	0.89**	-0.46**	SO_4^{2-}
						1	0.90**	0.72**	0.39**	0.93**	-0.45**	TDS
					1	0.41**	0.41**	0.72**	0.98**	0.46**	-0.39**	HCO_3^-
				1	0.44**	0.81**	0.89**	0.86**	0.40**	0.90**	-0.54**	Mg^{2+}
			1	0.83**	0.36**	0.81**	0.89**	0.83**	0.33**	0.86**	-0.53**	Na^+
		1	0.78**	0.84**	0.34**	0.84**	0.81**	0.72**	0.30**	0.84**	-0.60**	Ca^{2+}
	1	0.84**	0.73**	0.74**	0.18**	0.82**	0.70**	0.59**	0.16**	0.79**	0.54**	K^+
1	0.36**	0.75**	0.54**	0.22**	0.51**	0.74**	0.89**	0.88**	0.35**	0.87**	-0.53**	NO_3^-

**همبستگی در سطح ۰/۰۱ معنادار و * همبستگی در سطح ۰/۰۵ معنادار می‌باشند.

جدول ۸- مقایسهٔ مقادیر شاخص کیفیت آب زیرزمینی در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۳

Table 8- Comparison of the values of the underground water quality index in the years 2010-2013 to 2014-2017

سطح معناداری	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	فراوانی	متغیر
0.52	143.80	2.05	670.40	30.09	90	WQI 1389-1392
	137.09	2.02	670.42	32.77	90	WQI 1393-1396

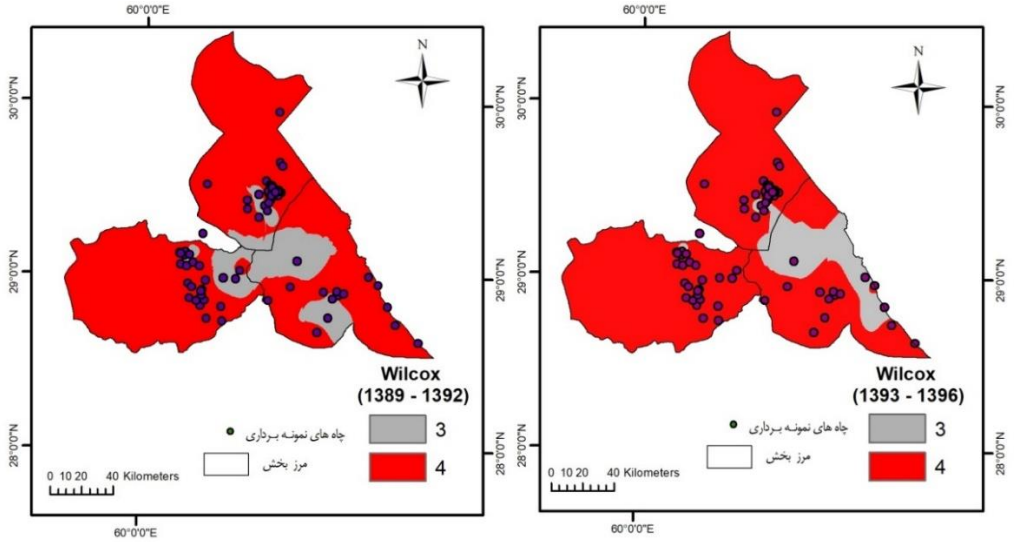
جدول ۹- طبقه‌بندی کیفی آب‌های منطقه بر اساس WQI در بازه‌های زمانی ۱۳۹۲- ۱۳۸۹ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳

Table 9- Water quality classification of the region based on the WQI index in the time periods of 2010-2013 and 2014-2017

ردیف	WQI	کیفیت آب	درصد چاه‌های منطقه	
			1396-1393	1392-1389
1	0-25	عالی	0	0
2	26-50	خوب	6.7	7.9
3	51-70	متوسط	6.7	5.6
4	71-90	بد	13.3	13.5
5	91-100	خیلی بد	73.3	73

۳–۵– ارزیابی کیفیت آب از نظر کشاورزی بر اساس شاخص ویلکاکس

شکل ۲ نقشهٔ پهنه‌بندی کیفیت آب را به‌منظور استفادهٔ کشاورزی نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۱۰، بر اساس شاخص ویلکاکس در بازهٔ زمانی ۹۲–۸۹، ۸۷ درصد ایستگاه‌های مورد مطالعه در کلاس‌های C۲S۴، C۳S۳، C۴S۳ و C۴S۴ قرار دارند که برای کشاورزی نامناسب هستند و ۱۲ درصد نیز در کلاس C۳S۳ جای گرفتند که با اعمال تمهیدات لازم قابل استفاده برای کشاورزی هستند. در بازهٔ زمانی ۱۳۹۶–۱۳۹۳، ۹۱ درصد ایستگاه‌های نمونه برداری شده در طبقهٔ خیلی‌شور و نامناسب برای کشاورزی قرار دارند و تنها حدود نُه درصد چاه‌های مورد مطالعه در طبقهٔ C۳S۳ قرار داشتند. در این مطالعه چاه‌هایی که طبقات یک (آب شیرین و بی‌ضرر برای کشاورزی) و دو (کمی شور و تقریباً مناسب برای کشاورزی) را شامل شوند، وجود نداشت. طبق نتایج برخی مطالعات Entezari et al. (2014) اُفت متوسط آب زیرزمینی می‌تواند باعث افزایش میزان EC آب شود. از طرفی پیامدهایی مانند خشکسالی به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده در تغییر کیفیت آب باشد (Yazdanpanahi et al., 2017). بنابراین، احتمال می‌رود برداشت زیاد از آب‌های زیرزمینی و اُفت سطح آب در منطقهٔ زاهدان به همراه خشکسالی‌های متوالی باعث افزایش EC آب شده باشند. نتایج به‌دست آمده پژوهش حاضر با نتایج مطالعهٔ Sargazi et al. (2020) در منطقهٔ زاهدان مطابقت دارد. از این جهت که در آن مطالعه نیز کیفیت آب از نظر EC و SAR بالاتر از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی به‌دست آمده است. Torabipoudeh et al. (2020) از شاخص‌های شولر و ویلکاکس برای تعیین کیفیت آب‌های زیرزمینی لنجانات و نجف‌آباد استفاده کرده‌اند.



شکل ۲– پهنه‌بندی منطقهٔ مورد مطالعه بر اساس شاخص ویلکاکس؛ ۳) آب شور و کشاورزی با اعمال تمهیدات، و ۴) آب خیلی شور و نامناسب برای کشاورزی

Figure 2- Zoning of the study area based on the Wilcox index; 3) salty water and agriculture with the implementation of measures, and 4) very salty and unsuitable water for agriculture

جدول ۱۰– درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شاخص ویلکاکس در منطقهٔ مورد مطالعه در بازهٔ زمانی ۱۳۹۲–۱۳۸۹ و ۱۳۹۶–۱۳۹۳

Table 10- The percentage of each of the classification classes of the Wilcox index in the study area in the time frame of 2010-2013 and 2014-2017

سال‌های مورد مطالعه	C1				C2				C3				C4			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
1389-1392	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	11	8	0	0	6	73
1393-1396	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	8	11	0	0	3	85

در سایر مناطق خشک کشور نیز نتایج مشابهی به‌دست آمده است که از جمله می‌توان به پژوهش Eslami et al. (2018) را نام برد که به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای اهداف کشاورزی در اردکان یزد پرداخته شد. آن‌ها گزارش نمودند که بر اساس پارامترهای TDS، SAR و EC به‌ترتیب در ۴۲، ۴۰/۲۶ و ۵۵/۳ درصد از نواحی دشت اردکان کیفیت آب برای مصرف آبیاری در شرایط نامطلوب قرار دارد. همچنین، مطالعات Nakhaie Nejadet et al. (2017) در دشت سرایان نشان داد که در سال ۱۳۹۱ دشت سرایان با کاهش عمق آب مواجه شده است و این کاهش عمق آب در قسمت‌های شمالی تمرکز بیش‌تری پیداکرده است و کاهش سطح آب زیرزمینی کاهش کیفیت آب را به همراه داشته است.

۳-۶- نتایج مقایسهٔ روش‌های درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ مکانی WQI

نتایج حاصل‌شده از مقایسهٔ انواع روش‌های درون‌یابی برای پارامتر WQI طی بازهٔ سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹و ۱۳۹۶-۱۳۹۳ در جدول ۱۱ ارائه شده است. مقایسهٔ روش‌های درون‌یابی بر اساس RMS و ضریب همبستگی (R^2) انجام شد.

جدول ۱۱- مقایسهٔ انواع روش‌های درون‌یابی بر اساس RMS برای پارامتر WQI در بازهٔ سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹و۱۳۹۶-۱۳۹۳

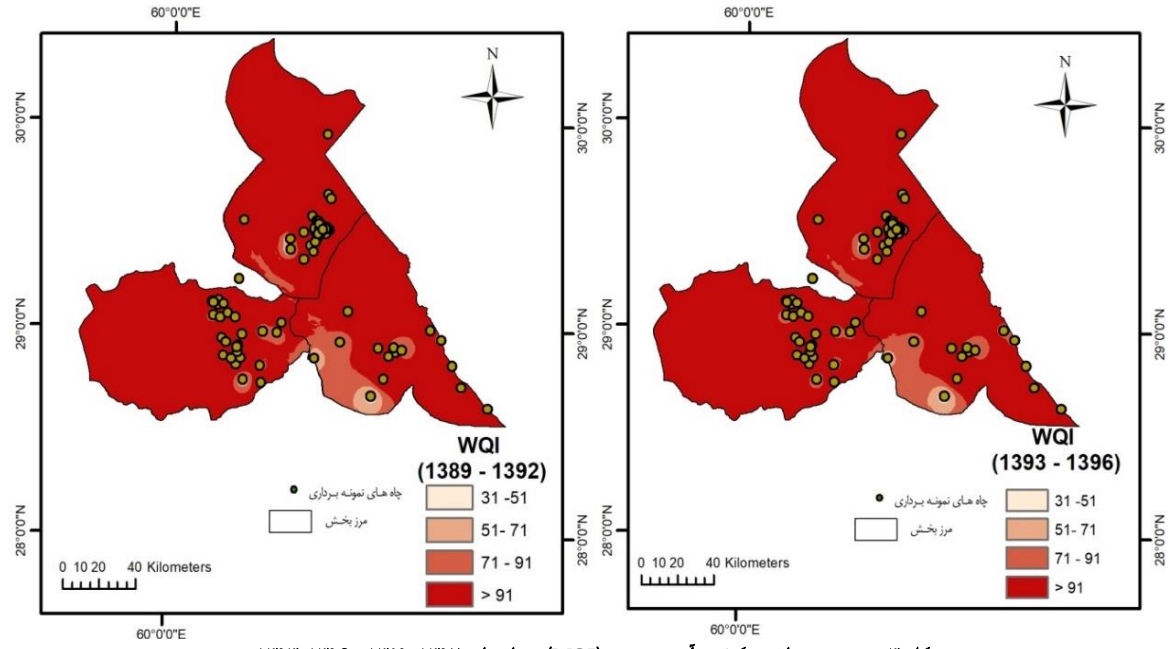
Table 11- Comparison of interpolation methods based on RMS for WQI parameter in the years 2010-2013 and 2014-2017

روش درون‌یابی	1389-1392		روش درون‌یابی	1393-1396	
	RMS	R^2		RMS	R^2
IDW	99.35	0.35	IDW	99.42	0.34
Spline with Tension	101.21	0.32	Spline with Tension	100.45	0.31
Kriging	87.39	0.41	Kriging	98	0.39

پس از بررسی نتایج به‌دست آمده از مقایسهٔ انواع روش‌های درون‌یابی بر اساس RMS و ضریب همبستگی برای پارامتر WQI در بازهٔ سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹و ۱۳۹۶-۱۳۹۳ روش کریجینگ دارای کم‌ترین میزان RMS و بیش‌ترین ضریب همبستگی (R^2) و روش Thin Plate Spline دارای بیش‌ترین میزان RMS و کم ترین ضریب همبستگی بود. بنابراین، پهنه‌بندی بر اساس روش کریجینگ صورت گرفت. دلیل این‌که روش کریجینگ نسبت به دو روش دیگر از دقت بیش‌تری برخوردار است، احتمالاً به خاطر تعداد زیاد ایستگاه‌های مورد مطالعه (۹۰ چاه و قنات) و توزیع نرمال داده‌ها می‌تواند باشد. در مطالعهٔ Yazdani et al. (2017) نیز از روش کریجینگ برای پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب استفاده شده است. معیار آن‌ها نیز برای انتخاب مدل مناسب درون‌یابی، مقدار RMS کم تر بود. هم‌چنین، در سایر مطالعات از جمله Mohammadyari et al. (2016)، Abbasnia et al. (2018) و Torabipoudeh et al. (2020) نیز با مناسب دانستن روش کریجینگ، از این روش برای پهنه‌بندی تغییرات WQI آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. از آن‌جایی که مقادیر برآوردی بر اساس روش‌های متعدد درون‌یابی دارای اختلافات فراوان می‌باشند، بنابراین انتخاب روش مناسب درون یابی و داشتن تعداد نمونهٔ کافی و با پراکنش مناسب در آبخوان مورد بررسی، در میزان دقت نقشهٔ پهنه‌بندی أثرگذار است (Gong et al., 2014). به نظر می‌رسد روش مناسب برای تخمین یک شاخص، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای مؤثر بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش مناسب تخمین یک متغیر در یک منطقه را به سایر متغیرها و مناطق با شرایط متفاوت تعمیم داد (Khudair et al., 2018). با توجه به نتایج روش کریجینگ نسبت به IDW صحت بیش‌تری در برآورد WQI بررسی شده دارد. با نتایج به‌دست آمده از تهیهٔ نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعه، مشاهده میشود که روش‌های زمین آمار نسبت به روش‌های معین دقت خوبی دارند به این شرط که پیش فرض‌های زمین آمار در مورد داده‌ها صدق کند. در نهایت پیشنهاد می‌شود از روش‌های زمین آماری به‌عنوان ابزاری مفید برای شناسایی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده شود و به‌تدریج این روش جایگزین روش‌های قدیمی شود تا علاوه‌بر کاهش هزینه، راندمان پروژه‌های آبی به‌علت استفاده از آمار دقیق افزایش یابد.

۳-۷- نتایج مقایسهٔ تغییرات مکانی WQI در بازه‌های زمانی ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳

پس از انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی، نقشهٔ پهنه‌بندی کیفی WQI در سال‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و ۱۳۹۳-۱۳۹۶ برای منطقهٔ مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 ترسیم شد. با بررسی مکانی و زمانی پارامترها از روی نقشهٔ پهنه‌بندی می‌توان تحلیل و برآورد مناسبی از کیفیت شاخص کیفیت آب چاه‌های منطقهٔ مورد مطالعه به‌دست آورد. پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (WQI) در بازه‌های ۱۳۹۲-۱۳۸۹ و ۱۳۹۶-۱۳۹۳ در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در نقشهٔ پهنه‌بندی نیز دیده می‌شود تفاوت قابل‌توجهی از لحاظ WQI در دو بازهٔ زمانی دیده نمی‌شود و اغلب چاه‌های مورد مطالعه همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز گفته شد، در طبقات کیفی خیلی بد جای دارند و هیچ‌کدام از چاه‌ها در طبقهٔ عالی از لحاظ کیفیت آب قرار نداشتند.



شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی (WQI) در بازه‌های ۱۳۹۲–۱۳۸۹ و ۱۳۹۶–۱۳۹۳

Figure 3- Zoning of the underground water quality index (WQI) in the periods of 2010-2013 and 2014-2017

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کیفیت آب‌های زیرزمینی شهرستان زاهدان از لحاظ پارامترهای pH، TDS، Cl^-، Ca^{2+}، Na^+، Mg^{2+}، k^+، HCO_3^-، NO_3^- و SO_4^{2-} در بازهٔ زمانی ۱۳۹۲–۱۳۸۹ و ۱۳۹۶–۱۳۹۳ مطالعه شد. تغییرات زمانی WQIدر دورهٔ مورد مطالعه نشان داد که این شاخص در بازهٔ زمانی اول (۱۳۸۹–۱۳۹۲) و بازهٔ زمانی دوم (۱۳۹۳–۱۳۹۶) اختلاف قابل‌توجهی ندارد. حدود ۷۳ درصد آب چاه‌های مورد مطالعه از لحاظ WQI در وضعیت خوبی قرار نداشته و غیرقابل آشامیدن بودند. به‌دلیل شوری زیاد آب، از چاه‌ها برای مصارف شرب استفاده نمی‌شود، اما در مصارف معمولی مانند شست و شو استفاده می‌شوند. هم‌چنین، شاخص ویلکاکس نشان داد که کیفیت اغلب آب های زیرزمینی این منطقه برای کشاورزی و امور زراعی نیز مناسب نیست. با مقایسهٔ انواع روش‌های درون‌یابی بر اساس RMS و ضریب همبستگی برای پارامتر WQI در بازهٔ زمانی مورد مطالعه، روش کریجینگ دارای کم‌ترین میزان RMS و بیش‌ترین ضریب همبستگی (R^2) در مقایسه با روش‌های IDW و Thin Plate Spline همبستگی بود. از این‌رو پهنه‌بندی بر اساس روش کریجینگ انجام شد. با توجه به خصوصیات نامناسب آب‌های زیرزمینی منطقهٔ زاهدان، می‌توان بیان داشت که برداشت از این آب‌ها برای امور زراعی باید متوقف شود؛ زیرا استفاده از آن‌ها به‌منظور کشاورزی باعث شور شدن خاک منطقه خواهد شد و افزایش شوری خاک نیز مسئله دیگری در آینده خواهد بود. بنابراین پیشنهاد می‌شود طرح احیای آبخوان زاهدان اجرا شود تا با برقراری تعادل بین تغذیه و برداشت از آبخوان فرصت بهبود کیفیت آب فراهم شود. همین‌طور در مورد آب شرب این منطقه که هم‌اکنون بخش زیادی از آن از چاه نیمه‌های سیستان تأمین می‌شود و این منابع نیز، به‌دلیل خشک شدن ورودی آب رودخانه هیرمند به منطقه سیستان و عدم پایبندی کشور افغانستان در دادن حقابهٔ ایران از این رودخانه، به سرعت در حال کاهش هستند، پیشنهاد می‌شود پس از انجام مطالعات دقیق در مورد جایگزینی منابع جدید از جمله انتقال آب از دریای عمان و یا ارزیابی منابع آب زیرزمینی سایر آبخوان‌های نزدیک به زاهدان، اقدام اساسی انجام شود.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر بخشی از نتایج پایان‌نامه کارشناسی ارشد علوم و مهندسی محیط زیست در دانشگاه زابل می‌باشد. نویسندگان از سازمان آب منطقه‌ای استان سیستان و بلوچستان که اطلاعات و داده‌های مورد نیاز را در اختیار ما قرار دادند و از تمامی کسانی که در انجام این پژوهش یاری رساندند، کمال تشکر را دارند. بخشی از هزینه‌های این پژوهش از محل پژوهانه با شماره قرارداد ۲۴۳۰–IR –UOZ–GR معاونت پژوهشی دانشگاه زابل تأمین شده است.

منابع

اسلامی، هادی، المدرسی، سیدعلی، خسروی، رسول، فلاح‌زاده رضاعلی، پیروی رویا، و تقوی، محمود (۱۳۹۶). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت یزد–اردکان برای اهداف کشاورزی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). *سلامت و بهداشت*، ۸ (۵)، ۵۷۵–۵۸۶.

انتظاری، علیرضا، اکبری، الهه، و میوانه، فاطمه (۱۳۹۲). بررسی کیفیت آب شرب استحصالی از منابع زیرزمینی بر بیماری‌های انسانی دهه اخیر در دشت مشهد. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۳(۳۱)، ۱۵۷–۱۷۲.

بهرامی، فرشته، و دستورانی، مهدی (۱۳۹۸). ارزیابی کیفی آب زیرزمینی دشت سرایان با استفاده از شاخص کیفی WQI. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۳(۴)، ۱۰۶۴–۱۰۷۴.

ترابی پوده، حسن، یونسی، حجت‌الله، حقیزاده، علی، و ارشیا، آزاده (۱۳۹۸). ارزیابی تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی و شاخص IRWQIGC نجف آباد در محدودهٔ آبخوان‌های لنجانات–نجفآباد. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۸(۲۵)، ۵۳–۶۶.

حسینی، هاشم، شاکری، عطا، رضایی، محسن، دشتی برمکی، مجید، و شهرکی، مهدی (۱۳۹۷). کاربرد شاخص کیفیت آب (WQI) و هیدروژئوشیمی در ارزیابی کیفی آب سطحی، مخازن چاه نیمه استان سیستان و بلوچستان. *سلامت و محیط زیست*، ۱۱(۴)، ۵۷۵–۵۸۶.

خلیلی، رضا، پروین‌نیا، محمد، و زالی، سید ابوالفضل (۱۳۹۹). ارزیابی کیفیت آب رودخانه گرمارود با استفاده از شاخص آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI)، شاخص آلودگی رودخانه (RPI) و شاخص کیفیت وزنی حسابی آب (WAWQI). *محیط زیست و مهندسی آب*، ۶(۳)، ۲۷۴–۲۸۴.

دولتی، جواد، لشکری‌پور، غلامرضا، و حافظی مقدس، ناصر (۱۳۹۳). بررسی عوامل مؤثر بر هیدروژئوشیمی آبخوان زاهدان با استفاده از روش‌های تحلیل عاملی، نمایه‌های اشباع و نمودارهای ترکیبی. *آب و خاک*، ۲۸(۴)، ۶۷۹–۶۹۴.

سالنامه‌های آماری کشور، (۱۳۹۶–۱۳۸۹). سازمان برنامه و بودجه. مرکز آمار ایران.

قهرودی تالی، منیژه، و ثروتی، محمدرضا (۱۳۸۴). کاربرد Metadata (GIS) در مدیریت یکپارچهٔ نواحی ساحلی. جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۳(۵)، ۱–۲۴.

کیا، فرزانه، قربانی، خلیل، و سالاری جزی، میثم (۱۳۹۸). ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از WQI طی دو دهه در آبخوان استان گلستان. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۰(۱)، ۳۹–۵۱. doi:10.22059/ijswr.2018.237952.667723

محمدیاری، فاطمه، حقدار، حسین، و بصیری، رضا (۱۳۹۶). پهنهبندی کیفیت آب های زیرزمینی برای شرب با استفاده از روشهای زمین آماری مطالعه موردی مناطق خشک مهران و دهلران. *داده‌های جغرافیایی (SEPEHR)*، ۱۰۱(۲۶)، ۱۹۹–۲۰۸.

میرشکار، مصیب (۱۳۹۲). پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت مرودشت با استفاده از GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل.

نخعی‌نژاد، سارا، زهتابیان، غلامرضا، ملکیان، آرش، و خسروی، حسن (۱۳۹۶). بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی دشت سرایان در خراسان جنوبی. *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۴(۲)، ۲۶۸–۲۷۹. doi:10.22092/ijrdr.2017.111885

یزدان پناهی، علی، احمدالی، خالد، گل افشانی، مهدی، و حیدری علمدارلو، اسماعیل (۱۳۹۷). بررسی اثر کاربری اراضی بر تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مشهد). *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۲(۴۳)، ۱۰۸–۱۱۶.

یزدانی، محمدرضا، کوه‌بنانی، حمیدرضا، دشتی امیرآباد، جلال، و عظیمی‌نژاد، مصطفی (۱۳۹۶). ارزیابی شاخص‌های کیفی آب زیرزمینی دشت مشهد با استفاده از تکنیکهای زمین آمار و GIS. دانشکده علوم پزشکی نیشابور، ۵(۳)، ۶۳–۷۳.

References

Abbasnia, A., Radfard, M., Mahvi, A.H., Nabizadeh, R., Yousefi, M., Soleimani, H., & Alimohammadi, M. (2018). Groundwater quality assessment for irrigation purposes based on irrigation water quality index and its zoning with GIS in the villages of Chabahar, Sistan and Baluchistan, Iran. *Data in brief*, 19, 623-631. doi:10.1016/j.dib.2018.05.061

Abtahi, M., Golchinpour, N., Yaghmaeian, K., Rafiee, M., Jahangiri-rad, M., Keyani, A., & Saeedi, R. (2015). A modified drinking water quality index (DWQI) for assessing drinking source water quality in rural communities of Khuzestan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 53(1), 283-291. doi:10.1016/j.ecolind.2015.02.009

Bahrami, F., & Dastourani, M. (2019). Quality assessment of groundwater in the plain of Sarayan using water quality index (WQI). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(4), 1064-1074. [In Persian]

Bodrud-Doza, M., Islam, A.R.M.T., Ahmed, F., Das, S., Saha, N., & Rahman, M.S. (2016). Characterization of groundwater quality using water evaluation indices, multivariate statistics and geostatistics in central Bangladesh. *Journal of Water Science*, 30(1), 19–40. doi:10.1016/j.wsj.2016.05.001

Dowlati, J., Lashkaripour, Gh., & Hafezi Moghadas, N. (2014). Investigating the factors affecting the Zahedan's aquifer hydrogeochemistry using foctor analysis, saturation indices and

composite diagrams' Methods. *Journal of Water and Soil*, 28(4), 679-694. [In Persian]

Eslami, H., Almodaresi, S., Khosravi, R., Fallahzadeh, R., Peirovi, R., & Taghavi, M. (2018). Assessment of groundwater quality in Yazd-Ardakan plain for agricultural purposes using geographic information system (GIS). *Journal of health*, 8(5), 575-586. [In Persian]

Entezari, A., Akbari, E., & Mayvaneh, F. (2014). investigation of drinking water quality obtained from groundwater on human diseases in recent decade in Mashhad plain. *Journal of Geographical Sciences*, 13(31), 157-172. [In Persian]

Ghahrodi Tali, M., & Servati, M.R. (2005). Application of Metadata (GIS) in integrated coastal zone management. *Journal of Geography and Regional Development*, 3(5), 1-24. [In Persian]

Gong, G., Mattevada, S., & O'Bryant, S.E. (2014). Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environmental research*, 130, 59-69. doi:10.1016/j.envres.2013.12.005

Hosseini, H., Shakeri, A., Rezaei, M., Dashti Barmaki, M., & Shahraki, M. (2019). Application of water quality index (WQI) and hydro-geochemistry for surface water quality assessment, Chahnimeh reservoirs in the Sistan and Baluchestan Province. *Iranian Journal of Health & Environment*, 11(4), 575-586. [In Persian]

Khalili, R., Parvinnia, M., & Zali, A. (2020). Water quality assessment of Garmarood River using the national sanitation foundation water quality index (NSFWQI), river pollution index (RPI) and weighted arithmetic water quality index (WAWQI). *Journal of Environment and Water Engineering*, 6(3), 274-284. [In Persian]

Khudair, B.H., Jasim, M.M., & Alsaqqar, A.S. (2018). Artificial neural network model for the prediction of groundwater quality. *Civil Engineering Journal*, 4(12), 2959-2970. doi:10.28991/cej-03091212

kia, F., Ghorbani, Kh., & Salarijazi, M. (2019). Assessment of spatial and temporal variations of groundwater quality using WQI during two decades in aquifer of Golestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1), 39-51. doi:10.22059/ijswr.2018.237952.667723 [In Persian]

Kulinkina, A.V., Plummer, J.D., Chui, K.K.H., Kosinski, K.C., Adomako-Adjei, T., Egorov, A.I., et al. (2017). Physicochemical parameters affecting the perception of borehole water quality in Ghana. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220(6), 990-7. doi:10.1016/j.ijheh.2017.05.008

Liang, B., Han, G., Liu, M., Yang, K., Li, X., & Liu, J. (2018). Distribution sources and water quality assessment of dissolved heavy metals in the Jiulongjiang River water Southeast China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(2), 2752. doi: 10.3390/ijerph15122752

Lobato, T., Hauser-Davis, R., Oliveira, T., Silveira, A., Silva, H., Tavares, M., et al. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: a case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology*, 522, 674-83. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.021

Mirshekar, M. (2012). Zoning of the underground water quality of Morvdasht plain using GIS. M.Sc. Thesis, University of Zabol, Zabol, Iran. [In Persian]

Mohammadyari, F., Haqdar, H., & Basiri, R. (2016). Zoning the quality of underground water for drinking using geostatistical methods, a case study of the dry areas of Mehran and Dehlran. *Geographic Data*, 101(26), 199-208. [In Persian]

Nakhaie Nejad, S., Zehtabian, Gh., Malekian, A., & Khosravi, H. (2017). A survey on spatial and temporal variations of groundwater quality and quantity in Sarayan plain in south Khorasan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 24(2), 268-279. doi:10.22092/ijrdr.2017.111885 [In Persian]

Pandey, H.K., Tiwari, V., Kumar, S., Yadav, A., & Srivastava, S.K. (2020). Groundwater quality assessment of Allahabad smart city using GIS and water quality index. *Sustainable Water Resources Management*, 6(2), 1-14. doi:10.1007/s40899-020-00375-x

Radwan, A., Abdelmoneim, M., Basiony, A., & El-Alfy, M. (2019). Water pollution monitoring in Idku Lake (Egypt) using phytoplankton and NSF-WQI. *Egyptian Journal of Aquatic Biology Fisheries*, 23(4), 465–481. doi:10.21608/ejabf.2019.57161

Ram, A., Tiwari, S.K., Pandey, H.K., Chaurasia, A.K., Singh, S., & Singh, Y.V. (2021). Groundwater quality assessment using water quality index (WQI) under GIS framework. *Applied Water Science*, 11(2), 1-20. doi:10.1007/s13201-021-01376-7

Reyes-Toscano, C.A., Alfaro-Cuevas-Villanueva, R., Cortes-Martinez, R., Morton-Bermea, O., Hernandez-Alvarez, E., Buenrostro-Delgado, O., & Ávila-Olivera, J.A. (2020). Hydrogeochemical characteristics and assessment of drinking water quality in the urban area of Zamora, Mexico. *Water*, 12(2), 556. doi:10.3390/w12020556

Sadat-Noori, S.M., Ebrahimi, K., & Liaghat, A.M. (2014). Groundwater quality assessment using the water quality index and GIS in Saveh-

Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(9), 3827-3843. doi:10.1007/s12665-013-2770-8

Sargazi, S., Almodaresi, S.A., Ebrahimi, A.A., Dalvand, A., Sargazi, H., & Khatebasreh, M. (2020). Assessment of groundwater quality for industrial purposes using geographical information system (GIS) in Zahedan, Sistan and Baluchestan Province, Iran. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 5(4), 1162-1172. doi:10.18502/jehsd.v5i4.4968

Sarhadi, M., Nohtani, M., & Reiki, M. (2016). Effect of drought on qualitative and quantitative parameters of Zahedan plain Aquifer. *Ecopersia*, 4(4), 1541-1554. doi:10.18869/modares.ecopersia.4.4.1541

Slama, T., & Sebei, A. (2020). Spatial and temporal analysis of shallow groundwater quality using GIS, Grombalia aquifer, Northern Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 170, 103915. doi:10.1016/j.jafrearsci.2020.103915

Statistical yearbooks of Iran, (2010-2017). Program and Budget Organization, Iran Statistics Center: [In Persian]

Torabipoudeh, H., Yonesi, H., Haghizadeh, A., & Arshia, A. (2020). Assessment of groundwater quality changes and evaluation of irwqigc in Lenjanat-Najafabad aquifers area. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 8 (25), 53-66. [In Persian]

WHO, (2011). Guidelines for Ddrinking Water Quality: training pack. Edition World Health Organization, Geneva, Switzerland.

Yazdanpanahi, A., Ahmadaali, K., Golafshani, M., & Heidaryalamdarloo, E. (2018). Effects of land use on spatial-temporal variation of ground water quality (case study: Mashhad plain). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12 (43), 108-116. [In Persian]

Yazdani, M., Koohbanani, H., Dashti Amirabad, J., & Aziminejad, M. (2017). Evaluation of groundwater quality indices of Mashhad plain using geostatistics and GIS techniques. *Journal of Neyshabur University of medical science*, 5(3), 63-73. [In Persian]