

## Research Paper

## Investigating spatial and temporal changes in groundwater quality for drinking, agricultural and industrial uses (Case study: Kerman Plain)

Bahareh Mirkamandar<sup>1</sup>, Mohammad Bagher Rahnama<sup>\*2</sup>, Mohammad Zounemat-Kermani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Phd Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>2\*</sup>Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran



10.22125/iwe.2026.563036.1913

Received:  
**October 31, 2025**  
Accepted:  
**March 16, 2026**  
Available online:  
**June 25, 2026**

**Keywords:**  
Quality, Groundwater,  
Schoeller Diagram, Wilcox,  
Zoning, GIS

### Abstract

Reduced rainfall, drought, and lack of surface water resources in desert areas have led to excessive extraction of aquifers and threatened groundwater quality. The Kerman study area, one of these areas, is facing a decline in water quality due to population growth, urbanization, and industry. This research evaluates and zones the groundwater quality of the plain using kriging in GIS and Hydrochemical analysis (Piper, Schoeller, and Wilcox diagrams) over a 22-year period (2002-2024). Data for 10 parameters (Ca, Mg, pH, TDS, Th, EC, SO<sub>4</sub>, Cl, Na, SAR) were analyzed at 27 sampling points. The results showed that the dominant groundwater type was sodium bicarbonate and there was no significant change during the study period. In terms of quality, the eastern, southeastern and southern regions (Mahan and Joupar) have good to acceptable quality for drinking and agriculture. In contrast, the northwestern areas (Ekhtiar-Abad and Naghshineh) have unsuitable drinking water and a large part of the north and west of the plain is unsuitable to temporarily drinkable. For industrial uses, the water of the eastern, southern and western areas is suitable for industrial processes of the first and second groups (sensitive industries), while the northern and northwestern areas with the maximum chlorine concentration are suitable for industries of the third and fourth groups (relatively sensitive industries). For sustainable management, it is recommended that: transferring water from high-quality areas, improving the quality of polluted sources, cultivating salt-tolerant plants in the north, and eliminating unauthorized wells be on the agenda.

## 1. Introduction

Kerman Province, with an average rainfall of 129 mm per year, is considered one of the arid and semi-arid regions of the country. This is while the average rainfall in the country is 242 mm and the global average is 780 mm per year. The climatic conditions of Kerman province and the type and amount of rainfall have caused about 95 percent of water consumption in this province to rely on groundwater, which determines the role and importance of these valuable resources in terms of quantity and quality. The increase in population and, on the other hand, the expansion of culture and urbanization, the development of industry, and the excessive extraction of groundwater from various aquifers in this province, including the Kerman Plain aquifer, have led to a decrease in the quality of groundwater. This over-extraction and the presence of various natural and unnatural pollutants can ultimately make groundwater susceptible to salinity and various contaminants and affect its quality. Therefore, the quality of groundwater resources in this plain, as an important source of water supply for various uses, is important in addition to its quantity. Lack of attention and sufficient awareness of the quality conditions of existing groundwater can cause management and health problems, endanger the health of

the community, and reduce agricultural development in this region. Water quality is an aspect of Hydrogeochemistry that discusses the chemical characterization of water, the spatial distribution of various chemical formations, and the usability of water for drinking, agricultural, and industrial purposes. Usually, to determine the suitability of water quality for different uses, after sampling and conducting chemical analysis tests on them, the results are compared with standard values for each parameter for each type of use. There are various standards and methods for assessing water quality for different uses. One of these standards for assessing drinking water quality is the Schuller semi-logarithmic diagram. The Wilcox classification is also one of the most important standards for determining agricultural water quality.

## 2. Materials and Methods

In this study, the groundwater quality of the Kerman Plain was investigated through zoning of various parameters using the Kriging method in GIS software. For this purpose, the parameters of calcium (Ca), magnesium (Mg), pH, total dissolved solids (TDS), water hardness (Th), salinity (Ec), sulfate (SO<sub>4</sub>), chlorine (CL), sodium (Na), and sodium absorption ratio (SAR) measured by sampling from 27 quality wells were received from Kerman Regional Water Company for the period 2002 to 2024. Drawing Piper diagrams to determine the type and facies of the plain's groundwater in three different periods, including the beginning of the qualitative modeling period (2002), the middle period (2013), and the end of the study period (2024), is the second step in examining and evaluating the groundwater quality of the study area. Also, the necessary studies were carried out to determine the suitability of the plain's groundwater for drinking, agricultural, and industrial uses, respectively, using the Schuller and Wilcox diagrams and the Ministry of Energy's raw water, wastewater, and return water quality classification guide in the above three time periods.

## 3. Results

The results of this study showed that the dominant groundwater type in the Kerman Plain was sodium bicarbonate, with no noticeable change during the study period. In terms of quality, the eastern, southeastern, and southern areas of the studied aquifer (Mahan and Joupar) have good to acceptable quality for drinking and agriculture. In contrast, the northwestern areas (Ekhtiar-Abad and Naghshineh) have unsuitable drinking water, and a large part of the north and west of the plain is unsuitable to temporarily drinkable. For industrial uses, water from the eastern, southern, and western regions is suitable for industrial processes in groups one and two (sensitive industries), while the northern and northwestern regions with the highest chlorine concentration are suitable for industries in groups three and four (relatively sensitive industries).

## 4. Discussion and Conclusion

Based on the results of the water quality assessment of the Kerman Plain aquifer, it is recommended: In the drinking water sector: For the northwestern areas with poor quality (Ekhtiar-Abad and Naghshineh), a water transfer system should be designed from high-quality areas located in the south and east of the plain (such as Mahan and Joupar) by piping. It is also necessary to implement advanced treatment systems, including reverse osmosis (RO) processes with pretreatment, filtration, and softening in contaminated wells. Continuous quality monitoring by installing online chlorine, TDS, and EC measurement stations at 10 sensitive points along with monthly sampling of quality wells should be prioritized. Also, applying a tiered drinking water tariff based on regional quality and implementing public education on optimal consumption in low-quality areas is recommended.

**In the agricultural sector:** In northern areas with high sodium risk (SAR>18), cultivation of salt-tolerant plants such as cotton, barley, spinach, and medicinal plants (wild desert plants) is recommended instead of sensitive crops (such as pistachios). Implementing pressurized drip irrigation with low-drip tap water is essential to reduce salt accumulation in the roots, along with periodic soil flushing at a ratio of 1 to 4 (one unit of high-quality water for every four units of saline water) in the fall. Additionally, providing low-interest facilities and crop insurance to farmers who use salt-tolerant varieties can be an incentive.

**In the industrial sector:** Well water from the eastern, southern and western regions with TDS <500 ppm and chlorine CL <0.6 (mEq/L) can be used directly for first Group processes (pharmaceutical industries, electronic components) and second Group processes (bleached paper, sensitive textiles). For third Group industries (raw kraft paper, food industry), it is recommended to use water with EC<750 (μS/cm) from central areas and recycle

the wastewater in the cooling cycle after biological treatment. The northern and northwestern regions with chlorine concentrations (mEq/L)  $CL=7-14$  are the best places for the development of forth Group industries (cement, petrochemicals, firefighting) that require water with minimal treatment. Creating a special industrial zone in these areas for less sensitive industries could help in the balanced development of the region. These findings highlight the necessity of adopting management strategies appropriate to the qualitative conditions of each region.

## 5. Six important references

- 1) Guide to classifying the quality of raw water, wastewater, and return water for industrial and recreational uses, Ministry of Energy, Office of Engineering and Technical Standards of Water and Water Resources, Publication 462.
- 2) Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans. American Geophysical Union* 25 (6), 914-928.
- 3) Piri, H., Ansari, H. and Bameri, A. 2014. Spatial Variation of Groundwater Quality for Drinking and Agricultural Plains Bajestan Using Geostatistical Methods. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(3), 107-122.
- 4) Salari, M. 2024. Investigating groundwater quality using water quality indicators for drinking, agriculture and industry (Case study: Shiraz plain). *Journal of Environmental Science Studies*, 8(4), 7574-7586. Doi: 10.22034/jess.2023.380846.1953.
- 5) Sistani, S., Zare Mehrjerdi, M. R., Sayari, N. and Amirtaimoori, S. 2022. Determining the Optimal Cropping Pattern with Footprint and Quality Water Approach (Case Study: Bardsir City). *Irrigation and Water Engineering*, 13(1), 403-420. Doi: 10.22125/iwe.2022.158535.
- 6) Wilcox, L.V. 1955. Classification and Use of Irrigation Waters. US Department of Agriculture. Cire. 969, W D.C. USA. p 19.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

## بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: دشت کرمان)

بهاره میرکماندار<sup>۱</sup>، محمدباقر رهنما<sup>۲\*</sup>، محمد ذونعمت کرمانی<sup>۳</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

مقاله پژوهشی

### چکیده

کاهش بارندگی، خشکسالی و نبود منابع آب سطحی در نواحی کویری، منجر به برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و تهدید کیفیت آب زیرزمینی شده است. محدوده مطالعاتی کرمان از این نواحی، تحت تأثیر رشد جمعیت، شهری‌سازی و صنعت با افت کیفیت آب روبروست. این پژوهش به ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت با استفاده از کریجینگ در GIS و تحلیل هیدروشیمیایی (نمودارهای پایپر، شولر و ویلکاکس) در بازه زمانی ۲۲ ساله (۱۴۰۳-۱۳۸۱) می‌پردازد. داده‌های ۱۰ پارامتر (Ca, Mg, pH, TDS, Th, EC, SO<sub>4</sub>, Cl, Na, SAR) در ۲۷ نقطه نمونه‌برداری تحلیل شد. نتایج نشان داد که تیپ غالب آب زیرزمینی بی‌کربنات سدیم و بدون تغییر محسوس در دوره مورد مطالعه بود. از نظر کیفیت، نواحی شرق، جنوب شرقی و جنوب (ماهان و جوپار) از کیفیت خوب تا قابل قبول برای شرب و کشاورزی برخوردارند. در مقابل، نواحی شمال غربی (اختیارآباد و نقشینه) آب نامناسب شرب و بخش وسیعی از شمال و غرب دشت نامناسب تا موقتاً قابل شرب است. برای مصارف صنعتی، آب نواحی شرقی، جنوبی و غربی برای فرآیندهای صنعتی گروه اول و دوم (صنایع بسیار حساس و حساس) مناسب بوده، در حالی که نواحی شمال و شمال غربی با حداکثر غلظت کلر گزینه مناسب برای صنایع گروه سوم و چهارم (صنایع نسبتاً حساس) است. برای مدیریت پایدار پیشنهاد می‌گردد: انتقال آب از مناطق باکیفیت، اصلاح کیفیت منابع آلوده، کشت گیاهان مقاوم به شوری در شمال، و حذف چاه‌های غیرمجاز در دستور کار قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: کیفیت، آب زیرزمینی، دیاگرام شولر، ویلکاکس، پهنه‌بندی، GIS

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران ایمیل: bahar.mirkamandari@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشیار، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران ایمیل: mbr@uk.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران ایمیل: zounemat@uk.ac.ir

## مقدمه

کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خود با متوسط بارندگی معادل یک سوم میانگین جهانی در زمره کشورهای خشک و نیمه خشک قرار دارد. پراکندگی مکانی بارندگی در سطح کشور متفاوت بوده، به گونه‌ای که میزان بارندگی سالانه از ۲۰۰۰ میلیمتر در برخی استان‌ها تا ۳۰ میلیمتر در نواحی کویری ملاحظه شده است. از طرفی بررسی آمار ماهانه بارندگی و سایر پارامترهای هواشناسی نشان می‌دهد که رژیم بارندگی بر نیاز ماهانه اکثر مناطق منطبق نمی‌باشد و در اکثر شهرهای بزرگ آثار کم آبی در منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی کاملاً مشهود است. استان کرمان نیز، با متوسط بارندگی ۱۲۹ میلیمتر در سال، جزء مناطق خشک و نیمه خشک کشور محسوب می‌گردد. این در حالی است که متوسط بارندگی کشور ۲۴۲ میلیمتر و متوسط جهانی ۷۸۰ میلیمتر در سال است. شرایط اقلیمی استان کرمان و نوع و مقدار بارندگی باعث گردیده که حدود ۹۵ درصد از مصارف آب در این استان متکی به آبهای زیرزمینی است و همین موضوع نقش و اهمیت این منابع ارزشمند را از نظر کمی و کیفی مشخص می‌کند. افزایش جمعیت و از طرفی، گسترش فرهنگ و شهرنشینی، توسعه صنعت و برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی آبخوان‌های مختلف این استان از جمله آبخوان دشت کرمان موجب کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده که این اضافه برداشت‌ها و وجود آلاینده‌های مختلف طبیعی و غیرطبیعی در نهایت می‌تواند آب زیرزمینی را مستعد به شوری و آلودگی‌های مختلف کرده و کیفیت آن را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین کیفیت منابع آب زیرزمینی این دشت به عنوان منبع مهم، تأمین آب مصارف مختلف علاوه بر کمیت آن حائز اهمیت است.

عدم توجه و آگاهی کافی از شرایط کیفی آب زیرزمینی موجود می‌تواند سبب بروز مشکلات مدیریتی، بهداشتی، به خطر افتادن سلامت جامعه و کاهش توسعه کشاورزی در این منطقه گردد. کیفیت آب یکی از جنبه‌های هیدروژئوشیمیایی است که درباره‌ی توصیف شیمیایی آب، توزیع مکانی انواع تشکیلات شیمیایی و قابلیت مصرف آب

برای اهداف شرب، کشاورزی و صنعتی بحث می‌کند. معمولاً جهت تعیین تناسب کیفیت آب با مصارف مختلف، پس از نمونه‌گیری و انجام آزمایشات تجزیه‌ی شیمیایی بر روی آن‌ها، نتایج با مقادیر استاندارد برای هر پارامتر جهت هر نوع مصرف مورد مقایسه قرار می‌گیرد (Esfandiari et al., 2015 and Azareh et al., 2010). استانداردها و روش‌های مختلفی جهت بررسی کیفیت آب در مصارف مختلف وجود دارد.

یکی از این استانداردها جهت بررسی کیفیت آب آشامیدنی، نمودار نیمه لگاریتمی شولر است (Schoeller, 1965). طبقه‌بندی ویلکاکس نیز از مهم‌ترین استانداردها برای تعیین کیفیت آب کشاورزی نام برده می‌شود (Willcox, 1955). به طور مثال پیری و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش‌های زمین آمار پژوهشی با هدف بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت بجستان جهت مصارف شرب و کشاورزی انجام دادند. نتایج ایشان شوری و نسبت جذبی سدیم را برای اکثر چاه‌های این منطقه تأیید کرده و نشان داد مصرف آب این چاه‌ها در دراز مدت باعث شور شدن و کاهش نفوذپذیری خاک گردیده و از نظر شرب نیز باعث رسوبگذاری و خوردگی در لوله‌ها می‌شود. قره‌محمدلو و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی مشابه به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت سیدان فاروق پرداختند. سالاری (۱۴۰۲) به بررسی کیفیت آب زیرزمینی جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت براساس نمودار ویلکاکس (Willcox)، شولر (Schoeller) با استفاده از نرم‌افزار Chemistry و ضریب اشباعیت لانژلیه (Is) در بخشی از دشت شیراز واقع در مرکز استان فارس پرداخته است. مطابق نتایج ایشان با توجه به شاخص کیفی ویلکاکس و شولر آب زیرزمینی این منطقه برای مصارف کشاورزی در حد متوسط و از نظر شرب در محدوده قابل قبول قرار دارد. حسینی وردنجانی و همکاران (۱۴۰۲) آب زیرزمینی شهرستان خانمیرزا، لردگان، بروجن، اردل و کیار را برای مصارف شرب بر اساس شاخص‌های کیفیت آب مورد ارزیابی قرار دادند. پژوهش ایشان نشان داد استفاده ترکیبی از نرم افزار GIS و شاخص‌های WQI و GWQI در ارزیابی کیفی



مصارف شرب، کشاورزی و صنعت می‌پردازد. همچنین نمودارهای مرتبط با کیفیت آب مانند تحلیل های هیدروشیمیایی پیشرفته با استفاده از نرم‌افزار AquaChem 13 ترسیم گردیده است. یافته‌های این پژوهش چارچوبی علمی برای تصمیم‌گیری بهینه در تخصیص منابع آب، برنامه‌ریزی توسعه پایدار و حفاظت از آبخوان ارائه می‌دهد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی مورد نظر دشت کرمان (شکل ۱) در محدوده جغرافیایی  $۵۶^{\circ}۴۲'$  تا  $۵۷^{\circ}۲۰'$  طول شرقی و  $۳۰^{\circ}۲۶'$  تا  $۳۰^{\circ}۰۱'$  عرض شمالی و در زون ۴۰ قرار دارد. آبخوان این محدوده در حوضه آبریز کویر درانجیر با مساحت  $۱۶۱۲.۱۵$  کیلومتر مربع و در جنوب غربی دشت لوت قرار دارد. سطح دشت شامل سطوح آبرفتی و نواحی کوهستانی و کوهپایه‌ای با ارتفاع متغیر و حداکثر ارتفاع ۲۱۰۰ متر در نواحی جنوب شرقی، حداقل ۱۶۵۰ متر در نواحی شمال غرب و به طور متوسط دارای ارتفاع ۱۸۳۰ متر از سطح دریا می‌باشد. همچنین این دشت توسط کوه‌های چوپار از جنوب و کوه‌های دارمانو و تیز از شمال، کوه‌های بید و بادامو از مغرب و کوه‌های نامور و نصر از مشرق محدود و محاصره شده است. وجود ناهمواری‌های مشرق کرمان که در فاصله نزدیک شهر قرار گرفته‌اند باعث جلوگیری از رشد و توسعه شهر در این قسمت گردیده است.

دشت کرمان به صورت یک ناودیس دارای ساختار گرابنی و تحت تأثیر عملکرد گسل‌های مستقیم و ثقلی تشکیل شده است. محدوده شهر کرمان بر گستره‌ای از نهشته‌های ریزدانه رسی - سیلتی با نفوذپذیری کم بنا شده و در حالت کلی می‌توان گفت، از نظر جنس و نوع دارای همگنی و یکنواختی بالایی تا عمق ۳۰ متر می‌باشد. بخش عمده این رسوبات ریزدانه، از نظر خصوصیات ژئوتکنیکی عمدتاً شامل کانی‌های ایلیت، کلریت، اسمکتیت بوده و عمدتاً در دو گروه CL و CL-ML بر اساس طبقه‌بندی مذکور قرار گرفته‌اند. بر اساس نتایج حاصل از روش‌های

آب زیرزمینی و چگونگی توزیع مکانی آن‌ها درون محدوده مورد مطالعه جهت انتخاب منابع آب برای مصارف شرب، مفید و موثر می‌باشد. این پژوهش نیز توسط دولت کردستانی و همکاران (۱۳۹۸) در منطقه حوضه آبخیز سیلوه انجام شد. دهشویی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی آب زیرزمینی در شهرستان سیرجان با استفاده از نمودارها و پارامترهای متداول در رده‌بندی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد چاه موجود در شمال شرق آبخوان نسبت به سایر چاه‌ها از کیفیت بالاتری برخوردار است و طبق نمودار شولر در محدوده خوب تا قابل قبول می‌باشد. همچنین چاه‌های واقع در شمال غرب، غرب، جنوب و جنوب غرب آبخوان از لحاظ شرب و کشاورزی نسبت به سایر چاه‌ها کیفیت نامناسبی دارند. ایشان با کلاسه‌بندی پارامتر EC به روش ویلکاکس نشان داد، بخش وسیعی از این آبخوان در کلاس نامناسب قرار دارد و فقط قسمت‌هایی از شمال شرق، شرق و بخش‌های میانی آبخوان در کلاس متوسط قرار گرفتند. همان گونه که ذکر شد جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی روش‌های متعددی برای تعیین کیفیت و طبقه‌بندی آب در مصارف مختلف استفاده می‌شود.

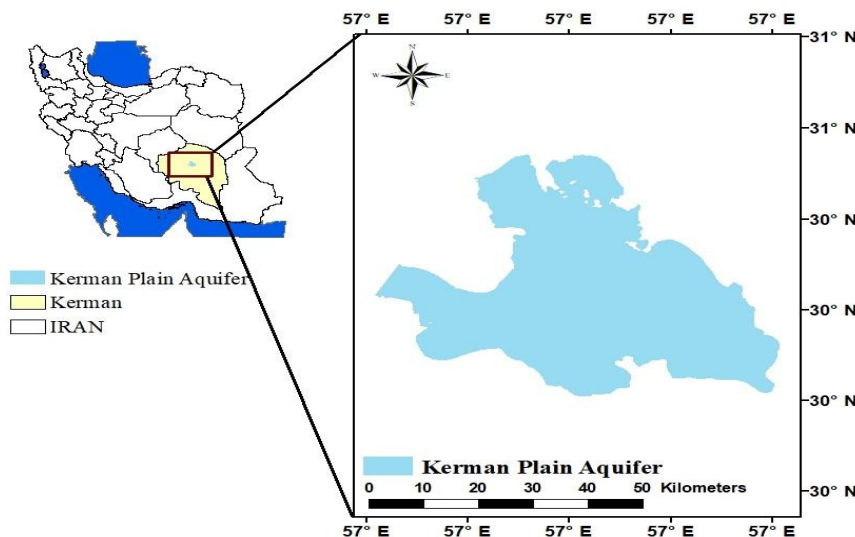
در انجام این پژوهش با استفاده از روش زمین آمار کریجینگ در نرم‌افزار GIS نقشه پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی آبخوان محدوده مطالعاتی آبخوان دشت کرمان تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نمودارهای پایپر، شولر و ویلکاکس جهت تعیین تیپ، رخساره آب و بررسی تناسب آب زیرزمینی دشت برای مصارف شرب و کشاورزی در دو دهه‌ی مورد مطالعه (سال ۲۰۲۴-۲۰۰۲) با استفاده از نرم‌افزار AquaChem 13 ترسیم گردیده است.

با وجود کاربرد گسترده روش‌های ارزیابی کیفیت آب، پژوهش‌های پیشین در دشت کرمان عمدتاً تک‌منظوره و فاقد تحلیل جامع چندزمانی بوده‌اند. این مطالعه برای نخستین بار با بهره‌گیری هم‌زمان از مدل‌سازی زمین‌آمار کریجینگ در GIS و تحلیل‌های هیدروشیمیایی پیشرفته (نمودارهای پایپر، شولر و ویلکاکس)، به ارزیابی مقایسه‌ای کیفیت آب زیرزمینی در بازه ۲۲ ساله (۲۰۲۴-۲۰۰۲) برای

<sup>1</sup> Kriging

بوده، زمستان‌های آن سرد تا شدیداً سرد و تابستان‌هایی معتدل، نیمه گرم و خشک است (سالنامه هواشناسی، ۲۰۱۹). رودخانه اصلی و دائمی که در محدوده مورد مطالعه جریان دارد رودخانه چاری است که از جنوب غربی آبخوان به سمت شرق جریان داشته و به دشت باغین می‌ریزد. آبدهی سالانه حوضه آبریز محدوده مطالعاتی دشت کرمان ۱۳/۴۶ میلیون مترمکعب است. براساس پژوهش‌های انجام شده تغذیه آبخوان دشت کرمان ناشی از بارندگی، حجم رواناب و سیلاب‌های تولیدی داخل، رودخانه سکنج و چاری می‌باشد که به ترتیب از محدوده جنوب شرقی و جنوب وارد می‌شوند. بر اساس آخرین آماربرداری تعداد ۸۴۶ چاه در سطح دشت با هدف بهره‌گیری از آب در بخش شرب، کشاورزی و صنعت دایر می‌باشند (گزارش مطالعات هیدروژئولوژی شرکت آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۹). موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی آبخوان دشت کرمان واقع در استان کرمان در شکل (۱) نمایش داده شده است.

مختلف در ارزیابی عمق سنگ کف، ضخامت آبرفت در دشت کرمان بین صفر تا ۳۵۰ و در محدوده شهر کرمان بین ۳۰ تا ۳۵۰ متر گزارش شده است. این نهشته‌ها از دیدگاه منشأ تشکیل، حاصل تعامل دو فرآیند رسوب‌گذاری سیلابی و دریاچه‌ای هستند (امینی‌زاده بزنجانی و همکاران، ۱۳۹۱) و (آقامولایی و همکاران، ۱۳۹۳). این دشت شامل یک ایستگاه سینوپتیک واقع در فرودگاه کرمان، هفت ایستگاه باران‌سنجی خودکار وابسته به سازمان هواشناسی و یک ایستگاه باران‌سنجی خودکار وابسته به شرکت آب منطقه‌ای استان کرمان می‌باشد. میانگین دراز مدت بارندگی در دشت کرمان ۱۲۸ میلیمتر و میانگین حداکثر دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک کرمان در پنجاه سال اخیر ۴۲ درجه سلسیوس، میانگین حداقل دما ۳۰- درجه سلسیوس و میانگین دمای سالانه این منطقه از ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتیگراد متغیر است. میانگین تبخیر و تعرق طولانی مدت برای این دشت ۲۵۳۰ میلیمتر در سال برآورد شده است. به طور کلی این منطقه دارای آب و هوای سرد و خشک



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی آبخوان دشت کرمان

قرار دارند و با استفاده از همبستگی فضایی تخمین زده می‌شوند (ایساکس و سری و استاوا، ۱۹۸۹):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (1)$$

### روش تحقیق روش کریجینگ

در این روش مقدار متغیر مورد نظر در هر نقطه نمونه‌برداری نشده با بکارگیری یک میانگین متحرک وزنی از مقادیر اندازه‌گیری شده که در همسایگی نقطه مورد نظر

هدف از این مرحله، شناسایی و مدل‌سازی وابستگی فضایی<sup>۱</sup> متغیرهای هیدروشیمیایی است. این وابستگی از طریق واریوگرام تجربی<sup>۲</sup> محاسبه و سپس توسط یک مدل ریاضی توصیف می‌گردد. واریوگرام تجربی بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید:

$$Y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i)]^2 \quad (3)$$

که در آن  $Z(x)$  مقدار متغیر در مکان  $x$  و  $N(h)$  تعداد جفت نقاطی است که فاصله افقی بین آن‌ها برابر  $h$  است. تحلیل‌ها نشان داد که پراکندگی داده‌ها از یک ساختار خودهمبستگی<sup>۳</sup> مشخص پیروی می‌کند. برای مدل‌سازی ساختار فضایی مشاهده شده در واریوگرام تجربی، سه مدل رایج ژئواستاتستیکی شامل مدل کروی، مدل نمایی و مدل گاوسی مورد ارزیابی قرار گرفت و مدل نهایی گاوسی بر اساس دستیابی به بهترین تطابق بصری با نقاط واریوگرام تجربی انتخاب شد.

پهنه‌بندی و ارزیابی کیفیت آب جهت تعیین تیپ، رخساره و تناسب آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت

پهنه‌بندی جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی با نرم‌افزار GIS پس از دریافت پارامترهای کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، pH، کل جامدات محلول (TDS)، سختی آب (Th)، شوری (Ec)، سولفات (SO<sub>4</sub>)، کلر (CL)، سدیم (Na) و نسبت جذبی سدیم (SAR) اندازه‌گیری شده به واسطه‌ی نمونه‌برداری از ۲۷ چاه کیفی که از شرکت آب منطقه‌ای کرمان برای بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۳ که موجود بود، صورت گرفته است. موقعیت مکانی چاه‌های منتخب نیز در این پژوهش در طول دوره زمانی مورد مطالعه ثابت می‌باشد. از آمار ۲۳ چاه جهت انجام مدل‌سازی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی و آمار ۴ چاه (حجت آباد، اسماعیل آباد<sup>۲</sup>، حسین آباد و سعدی) با پراکندگی مناسب (واقع در شمال، جنوب، شرق و غرب آبخوان) جهت ارزیابی

در این معادله،  $Z^*(x_0)$ : مقدار تخمین زده شده در موقعیت  $x_0, \lambda_i$ : وزن نسبت داده شده به متغیر  $Z$  در نقطه  $x_i$  و  $n$ : تعداد نقاط همسایگی می‌باشد. مطابق مقادیر نهایی ارائه شده در سمت راست رابطه (۱)، جمع وزنی مقادیر  $\lambda_i$  بایستی برابر یک شوند. همچنین در محاسبه وزن‌های نسبت داده شده به متغیر  $Z$  باید حداقل واریانس کریجینگ ایجاد شود. واریانس کریجینگ در نقطه  $x_0$  مطابق معادله (۲) عبارت است از:

$$\sigma^2_{OK}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) + \mu \quad (2)$$

در معادله فوق  $\gamma(x_i, x_j)$ : مقدار تغییرنا بین تمام جفت مقادیر اندازه‌گیری شده یا معلوم،  $\mu$  ضریب لاگرانژین برای ایجاد واریانس حداقلی،  $\gamma(x_i, x_0)$  مقدار نیم تغییرنا بین موقعیت مورد تخمین ( $x_0$ ) و  $\lambda_i$  آمین نقطه با مقادیر معلوم است. با نرمال بودن واریانس خطاهای کریجینگ، دامنه اطمینان مقادیر تخمین زده شده در سطوح مختلف قابل محاسبه است. هدف از محاسبه تغییر نما شناخت تغییرپذیری متغیر نسبت به فاصله زمانی و مکانی می‌باشد. به این صورت مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصله معلوم  $h$  از یکدیگر قرار دارند، برای  $h$  های مختلف محاسبه و در مقابل  $h$  رسم می‌گردد (حسنی پاک، ۱۳۷۷). هر تغییر نما حاوی چند عامل تأثیرگذار می‌باشد:

الف) دامنه تأثیر: دامنه‌ای که در آن متغیر نما ثابت شده و به حالت افقی نزدیک می‌گردد. از این دامنه جهت تعیین متغیر اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود.

ب) آستانه متغیر نما: آستانه یا سقف مقدار ثابتی است که متغیر نما در دامنه تأثیر به آن می‌رسد.

ج) اثر قطعه‌ای: مقدار متغیر نما در مبدأ مختصات است که به ازای  $h = 0$  اثر قطعه‌ای  $C_0$  نامیده می‌شود. در حالت بهینه مقدار اثر قطعه‌ای صفر است ولی در اکثر مواقع مقادیر بیش از صفر را شامل می‌شود (پیری، ۱۳۹۲).

## مدل‌سازی واریوگرام فضایی

<sup>3</sup> Autocorrelation

<sup>1</sup> Spatial Dependency

<sup>2</sup> Experimental Variogram

سولفات‌ها ترکیبی از سولفید و اکسیژن موجود در آب بوده و از جمله مواد معدنی طبیعی در تشکیلات برخی خاک‌ها، سنگ‌ها و آب‌ها می‌باشند. این مواد معدنی به مرور زمان در آب زیرزمینی حل شده و در طبیعت رها می‌گردند. سدیم از نمک‌های موجود در آب زیرزمینی می‌باشد و نسبت جذبی سدیم حاوی مقادیر کاتیونی است که در آب کشاورزی می‌تواند در رشد گیاهان مؤثر باشد. استفاده از نمودارهای پاییر جهت تعیین تیپ و رخساره‌ی آب زیرزمینی دشت در سه دوره متفاوت شامل ابتدای بازه زمانی مدل‌سازی کیفی (سال ۱۳۸۱)، میان دوره (سال ۱۳۹۲) و پایان دوره مورد مطالعه (سال ۱۴۰۳) گام دوم در بررسی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین بررسی‌های لازم جهت تناسب آب زیرزمینی دشت برای مصارف شرب و کشاورزی و صنعت به ترتیب توسط نمودارهای شولر، ویلکاکس و راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، پساب‌ها و آب‌های برگشتی وزارت نیرو در سه بازه زمانی فوق صورت گرفت که نتایج در ادامه ارائه شده است. نام و مختصات چاه‌های کیفی منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است.

نتایج و اعتبارسنجی مدل زمین‌آمار با شاخص‌های آماری استفاده گردیده است. چنین بررسی‌هایی براساس اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی از نمونه‌های آبی هستند که معرف منبع آب مصرفی سالانه است. نمونه‌گیری از چاه‌های کیفی آبخوان‌ها زمانی انجام می‌شود که پمپ نیم‌ساعت یا بیشتر کارکرده تا کیفیت آب شرایط عادی به خود گرفته باشد. همچنین با توجه به تغییرات فصلی کیفیت آب زیرزمینی، نمونه‌گیری سالانه دو بار در سال (در دو نوبت فصول گرم و سرد) اندازه‌گیری می‌شود. پارامتر شوری (EC) بیانگر هدایت الکتریکی آب است که با میزان کل نمک‌های محلول نسبت مستقیم دارد. افزایش بیش از حد این پارامتر، مانع رسیدن آب کافی به محصول شده و بر رشد و کیفیت آن تأثیر منفی خواهد داشت. پارامتر کل مواد جامد محلول<sup>۱</sup> (TDS) در آب حاوی مجموع یون‌های کاتیون و آنیون است. دو پارامتر شوری و کل جامدات محلول با یکدیگر در تناسب هستند. سختی<sup>۲</sup> (Th) به مجموع کاتیون‌های کلسیم و منیزیم موجود در آب می‌گویند که افزایش بیش از حد استاندارد این پارامترها در آب منجر به بروز مشکلاتی مانند ایجاد رسوب و کاهش کارایی تجهیزات مختلف شده و از مهم‌ترین فاکتورها در صنعت تصفیه آب می‌باشد.

جدول(۱): نام و مختصات چاه‌های کیفی منطقه مورد مطالعه (شرکت آب منطقه‌ای کرمان)

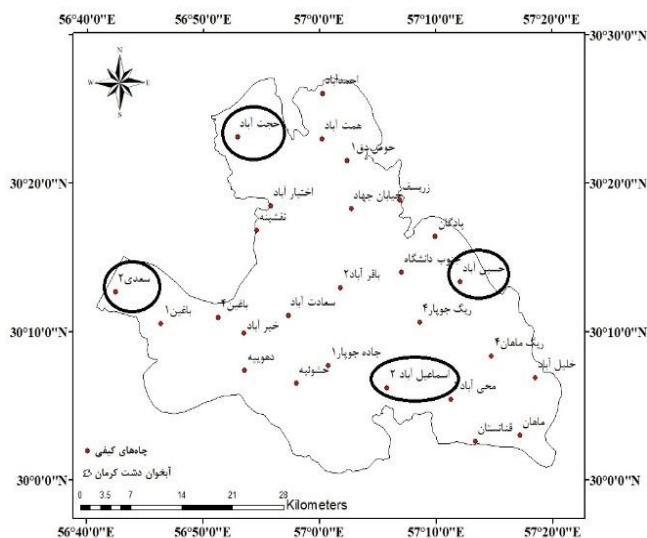
ردیف	شماره صحرایی	نام چاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	W1	سعدی ۲	۴۷۱۸۸۴	۳۳۴۲۲۶۰

<sup>2</sup> Hardness of Water

<sup>1</sup> Total dissolved solids



۳۳۶۱۵۱۷	۴۸۸۶۷۹	حجت آباد	W2	۲
۳۳۵۳۶۵۸	۵۱۱۰۵۲	زرسیف	W3	۳
۳۳۳۰۳۲۷	۵۰۹۲۵۹	اسماعیل آباد ۲	W4	۴
۳۳۴۲۷۴۷	۵۰۲۸۶۳	باقر آباد ۲	W5	۵
۳۳۳۸۲۶۹	۴۷۸۱۰۰	باغین ۱	W6	۶
۳۳۳۹۰۴۱	۴۸۵۹۹۰	باغین ۴	W7	۷
۳۳۳۷۰۸۲	۴۸۹۵۸۱	خیر آباد	W8	۸
۳۳۳۲۴۴۲	۴۸۹۶۶۳	دهویه	W9	۹
۳۳۴۹۸۷۵	۴۹۱۳۰۳	نقشینه	W10	۱۰
۳۳۵۲۹۳۹	۴۹۳۲۲۴	اختیار آباد	W11	۱۱
۳۳۳۹۲۸۸	۴۹۵۶۷۸	سعادت آباد	W12	۱۲
۳۳۳۰۸۴۲	۴۹۶۷۵۸	حشوئیه	W13	۱۳
۳۳۶۱۳۱۱	۵۰۰۳۳۱	همت آباد	W14	۱۴
۳۳۶۶۹۳۴	۵۰۰۴۲۱	احمدآباد	W15	۱۵
۳۳۳۳۱۰۰	۵۰۱۱۶۲	جاده جوپار ۱	W16	۱۶
۳۳۵۸۵۵۹	۵۰۳۷۵۱	حوض دق ۱	W17	۱۷
۳۳۵۲۵۶۱	۵۰۴۴۰۲	خیابان جهاد	W18	۱۸
۳۳۴۴۶۹۷	۵۱۱۲۹۳	جنوب دانشگاه	W19	۱۹
۳۳۳۸۴۵۱	۵۱۳۷۶۴	ریگ جوپار ۴	W20	۲۰
۳۳۴۹۱۸۸	۵۱۵۹۳۹	پادگان	W21	۲۱
۳۳۲۸۸۳۱	۵۱۸۱۲۴	محو آباد ۲	W22	۲۲
۳۳۴۳۵۴۲	۵۱۹۳۹۰	حسین آباد	W23	۲۳
۳۳۲۳۶۷۷	۵۲۱۴۹۰	قناتستان	W24	۲۴
۳۳۳۴۲۴۷	۵۲۳۶۳۵	ریگ ماهان ۴	W25	۲۵
۳۳۲۴۴۱۹	۵۲۷۶۰۷	ماهان	W26	۲۶
۳۳۳۱۵۱۸	۵۲۹۷۰۴	خلیل آباد	W27	۲۷



موقعیت جغرافیایی و توزیع مکانی چاه‌های کیفی نمونه‌برداری شده جهت انجام مدل‌سازی زمین‌آمار و چهار چاه منتخب در شمال، جنوب، شرق و غرب آبخوان در شکل (۲) مشخص شده است.

شکل (۲): موقعیت جغرافیایی و نحوه پراکندگی چاه‌های کیفی آبخوان دشت کرمان

نمودار شولر جهت تعیین مناسبت وضعیت آب آشامیدنی در نواحی مختلف، شناسایی نوع غالب شیمیایی در آبخوان‌ها، بررسی روند تغییرات کیفیت آب در امتداد جریان آب زیرزمینی، کنترل و پایش آلودگی و قیاس منابع آب مختلف مانند چاه، چشمه، قنات و رودخانه کاربرد دارد. از نقاط قوت آن می‌توان مقایسه مستقیم چند نمونه آب در یک نمودار، دید سریع از غلبه یون‌ها و تغییرات نسبی آن‌ها، امکان بررسی تغییرات در طول زمان یا مکان و مناسب برای شناسایی نقاط با آلودگی یا تغییر کیفیت آب را نام برد. مطابق استاندارد شولر کیفیت آب به شش کلاس تقسیم می‌شود (شولر، ۱۹۹۵). حدود کیفیت آب در هر کلاس به تفکیک پارامتر بر حسب (میلی‌گرم بر لیتر) در جدول (۲) ارائه شده است.

### نمودار پایپر

نمودار پایپر یکی از پرکاربردترین نمودارها برای تعیین تیپ آب و روشی گرافیکی به منظور نمایش و ترکیب یونی آب‌ها استفاده می‌شود. ساختار نمودار شامل سه بخش اصلی: مثلث پایینی چپ شامل ترکیب کاتیون‌ها (کلسیم  $Ca^{2+}$ ، منیزیم  $Mg^{2+}$ ، سدیم  $Na^+$  و پتاسیم  $K^+$ )، مثلث پایینی راست شامل ترکیب آنیون‌ها (کلرید  $Cl^-$ ، سولفات  $SO_4^{2-}$ ، بی‌کربنات  $HCO_3^-$  و کربنات  $CO_3^{2-}$ ) و چهارضلعی مرکزی یا لوزی که با ترکیب مختصات دو مثلث، ترکیب کلی هیدروشیمی آب در لوزی مرکزی نمایش داده و طبقه‌بندی نوع آب و شناسایی روندهای تکامل شیمیایی را ساده می‌کند. (پایپر، ۱۹۴۴). شکل (۳) نحوه تقسیم‌بندی نمودار پایپر را جهت تعیین تیپ و رخساره آب نمایش می‌دهد.

### نمودار شولر

جدول (۲): طبقه بندی شولر جهت تعیین کیفیت آب آشامیدنی

TH (mg/L)	TDS (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	pH	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	نوع کیفیت برای آشامیدن
۲۵۰ >	۵۰۰ >	۱۷۵ >	۱۱۵ >	۱۴۵ >	۷/۳	<۴/۴	<۲۰	خوب
۲۵۰-۵۰۰	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۷۵-۳۵۰	۱۱۵-۲۳۰	۱۴۵-۲۸۰	۷/۸	۶	۲۵	قابل قبول
۵۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۳۵۰-۷۰۰	۲۳۰-۴۶۰	۲۸۰-۵۸۰	۹	۳۷	۸۵	نامناسب
۱۰۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰۰-۴۰۰۰	۷۰۰-۱۴۰۰	۴۶۰-۹۲۰	۵۸۰-۱۱۵۰	۱۰	۷۲	۱۳۰	بد
۲۰۰۰-۴۰۰۰	۴۰۰۰-۸۰۰۰	۱۴۰۰-۲۸۰۰	۹۲۰-۱۸۴۰	۱۱۵۰-۲۲۴۰	۱۱	۸۵	۱۷۵	موقتاً قابل شرب
۴۰۰۰ >	۸۰۰۰ >	۲۸۰۰ >	۱۸۴۰ >	۲۲۴۰ >	۱۱ >	۱۴۴ >	۲۴۰ >	غیرقابل شرب

میکروزیمنس بر سانتیمتر) و محور عمودی به نسبت جذب سدیم (SAR) اختصاص دارد. SAR شاخصی برای خطر سدیمی است که از رابطه‌ی (۴) بدست می‌آید. یون‌ها در این رابطه برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر هستند.

### نمودار ویلکاکس

نمودار ویلکاکس نخستین بار توسط ل. وی. ویلکاکس (L. V. Wilcox) در سال ۱۹۵۵ جهت ارزیابی وضعیت کیفی آب از نظر مصرف در بخش کشاورزی معرفی گردید (ویلکاکس، ۱۹۵۵). محور افقی این نمودار به میزان هدایت الکتریکی آب در محدوده ۱۰۰ تا بالای ۲۲۵۰ (برحسب

و آب‌های رده C4S4 بدترین آب برای مصارف کشاورزی می‌باشند. جداول (۳) و (۴) طبقه‌بندی آب جهت مصارف کشاورزی و همچنین نوع کیفیت و رده آب را براساس طبقه‌بندی ویلکاکس ارائه می‌دهند. نمودار ویلکاکس برای طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

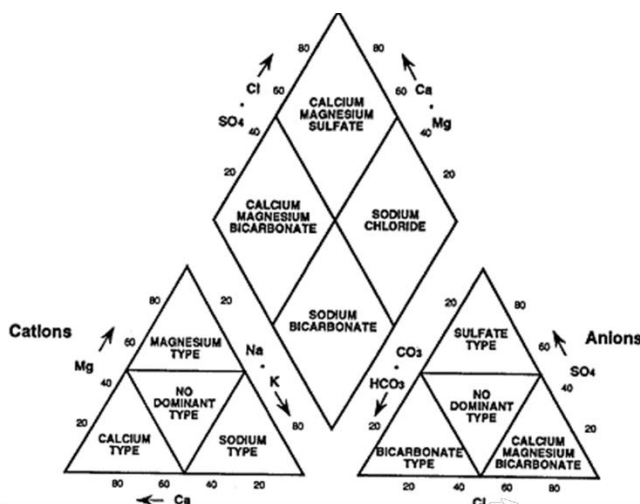
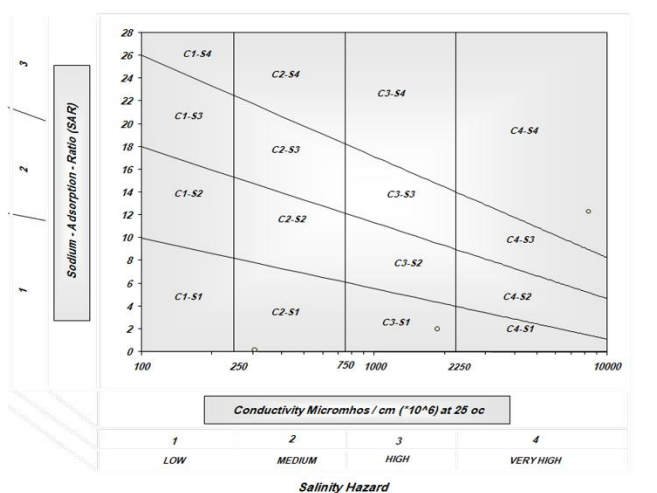
نمودار ویلکاکس به ۱۶ رده تقسیم می‌گردد و همزمان طبقه‌های خطر شوری (C1 تا C4) و خطر سدیمی (S1 تا S4) را نشان می‌دهد. آب‌های رده C1S1 بهترین

جدول (۳): طبقه‌بندی آب جهت مصارف کشاورزی با استفاده از نمودار ویلکاکس

EC	طبقه	SAR	طبقه
۰-۲۵۰	C1 عالی	۰-۱۰	S1 عالی
۲۵۰-۷۵۰	C2 خوب	۱۰-۱۸	S2 خوب
۷۵۰-۲۲۵۰	C3 متوسط	۱۸-۲۶	S3 متوسط
۲۲۵۰-۵۰۰۰	C4 نامناسب	۲۶-۳۲	S4 نامناسب

جدول (۴): کیفیت و رده آب براساس طبقه‌بندی ویلکاکس

ردیف	رده آب	نوع کیفیت برای کشاورزی
۱	C1-S1	شیرین برای کشاورزی کاملاً بی‌ضرر
۲	C2-S1, C2-S2, C1-S2	کمی شور، برای کشاورزی تقریباً مناسب
۳	C3-S1, C3-S2, C3-S3, C2-S3, C1-S3	شور، برای کشاورزی با تمهیدات مناسب
۴	C4-S1, C4-S2, C4-S4, C3-S4, C2-S4, C1-S4	خیلی شور برای کشاورزی



شکل (۳): نمودار پایپر جهت تعیین تیپ و رخساره آب (شکل سمت راست) و نمودار ویلکاکس برای طبقه‌بندی کیفیت آب کشاورزی (شکل سمت چپ) (دانش‌نامه جامع آب و محیط زیست، ۱۳۹۰)

۲- حساس، ۳- نسبتاً حساس و ۴- حساسیت کم دسته‌بندی نمود. نظر به اینکه آب‌های مصرفی در صنایع مختلف متفاوت بوده و هر صنعت معمولاً به چندین نوع آب با کیفیت متفاوت نیاز دارد بنابراین، این دسته‌بندی با توجه

### شاخص استاندارد آب مورد استفاده در صنایع

کیفیت آب مورد استفاده برای صنایع مختلف متفاوت بوده و بر مبنای شرایط آب‌های مصرفی، می‌توان صنایع مختلف را در چهار گروه متفاوت شامل: ۱- بسیار حساس،

صنایع شیمیایی برای تهیه قلیایی‌ها و ترکیبات کلردار و مواد آلی، صابون، دترجنت و رنگ؛ (۷) آب مصرفی در صنایع غذایی از جمله: کارخانجات شکر.

ج- گروه سوم (گروه نسبتاً حساس)

این گروه از آب‌های مصارف صنعتی دارای حساسیتی مشابه با آب آشامیدنی می‌باشند. روش‌های معمول تصفیه می‌توانند کیفیت مطلوب این گروه را ایجاد کنند. فرآیندهای زیر مثالی برای این گروه می‌باشند:

(۱) آب بویلرهای کم فشار؛ (۲) آب‌های خنک کننده چرخشی باز؛ (۳) آب مصرفی در تصفیه هوا؛ (۴) آب مصرفی نورد گرم، (۵) نورد سرد، حرارت زدا، تمیز کننده گاز و پرداخت در صنایع فولاد؛ (۶) آب فرآیند در صنایع شیمیایی برای تهیه مواد شیمیایی غیرآلی و کود؛ (۷) آب مصرفی در صنایع کاغذ و مقوا برای کرافت سفید نشده و خمیر شیمیایی سفید نشده و خمیر چوب؛ (۸) آب فرآیندهای عمومی در صنایع غذایی، تهیه غذاهای کنسرو شده، شیرینی‌پزی و نانواپی و صنایع لبنی و یخ؛ (۹) آب فرآیندهای دباغی و فرآیندهای پرداخت عمومی دباغی؛ (۱۰) آب مصارف بهداشتی.

د- گروه چهارم (گروه حساسیت کم)

فرآیندهای این گروه نیازمند حداقل حساسیت نسبت به سایر گروه‌ها هستند. آب مورد نیاز مصارف صنعتی در این گروه بدون تصفیه یا با حداقل تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیندهای قابل ذکر در این گروه به شرح زیر هستند:

آب‌های خنک کننده یکبار مصرف و چرخشی باز؛ (۲) آب شستشوی سطوح؛ (۳) آب مصرفی در صنایع شیمیایی برای تهیه چسب؛ (۴) آب فرایند در پتروشیمی؛ (۵) آب فرایند در کارخانجات سیمان؛ (۶) آب مصرفی جهت انتقال مواد؛ (۷) آبیاری؛ (۸) آب مصرفی در آتشنشانی.

جدول (۵) محدوده مطلوب پارامترهای مورد نظر در سنجش کیفیت آب مورد نیاز صنایع را نشان می‌دهد (راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، ۴۶۲).

به کیفیت آب مصرفی و میزان تصفیه مصرفی برای رسیدن به کیفیت مطلوب انجام شده است.

### گروه‌های آب صنعتی

الف- گروه اول (گروه بسیار حساس)

این گروه از آب‌های صنعتی شامل فرآیندهایی در صنعت می‌باشند که آب مصرفی آن‌ها دارای حساسیت بسیار بالایی بوده و تمامی و یا اکثر اجزای آن دارای این حساسیت هستند. تأمین آب این گروه از روش‌های پیشرفته تصفیه و ترکیب چند روش حاصل می‌گردد. فرآیندهای زیر را می‌توان در این گروه نام برد:

(۱) آب بویلرهای پرفشار؛ (۲) آب شستشوی کمپرسور در نیروگاه‌ها؛ (۳) آب خنک کننده چرخشی بسته؛ (۴) آب مصرفی در صنایع داروسازی؛ (۵) آب مصرفی در تولید قطعات حساس الکترونیکی؛ (۶) آب شستشوی دمین برای صنایع فولاد و آهن؛ (۷) آب مصرفی در فرآیند رنگرزی چرم‌سازی؛ (۸) آب مصرفی در صنایع شیمیایی پلاستیک و لاستیک.

حد بالای مشخص شده برای هر شاخص، نزدیکترین محدوده مطلوب برای فرآیندهای ذکر شده است، ولی به طور دقیق منطبق بر نیاز آبی آن‌ها نمی‌باشد.

ب- گروه دوم (گروه حساس)

این گروه شامل فرآیندهایی می‌شود که دارای حساسیت بالایی هستند ولی این حساسیت شامل تمامی اجزاء نبوده و نسبت به گروه اول حساسیت کم‌تری دارا هستند. تأمین آب مصارف صنعتی در این گروه همانند گروه اول نیازمند روش‌های پیشرفته تصفیه می‌باشد. از فرآیندهای قابل ذکر در این گروه می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

(۱) آب‌های بویلر با فشار متوسط (با در نظر گرفتن سختی ناچیز)؛ (۲) آب خنک کننده گردشی بسته؛ (۳) آب نرم برای شستشو در صنایع فولاد؛ (۴) آب مصرفی در صنایع کاغذ و مقوا برای تهیه کاغذ مرغوب، کرافت سفید شده و خمیر شیمیایی سفید شده؛ (۵) آب مصرفی در نساجی برای فرآیندهای آهارزنی، فرآیندهای سفید کردن، رنگرزی، شستشو و ساخت خمیر ریون؛ (۶) آب مصرفی در



جدول (۵): معیارهای سنجش کیفی آب برای مصارف صنعتی

محدوده‌ی مطلوب برای انواع صنایع				شاخص
حساسیت کم	نسبتاً حساس	حساس	بسیار حساس	
۰ - ۱۴/۱	۰ - ۷/۰۸	۰ - ۲/۸۲	۰ - ۰/۶	کلر (mEq/L)
۰ - ۱۰/۴	۰ - ۵/۰۲	۰ - ۲/۱	۰ - ۰/۴۱	سولفات (mEq/L)
۰ - ۱۰۰۰	۰ - ۵۰۰	۰ - ۱۰۰	۰ - ۵۰	مواد جامد محلول (ppm)
۰ - ۵۰۰	۰ - ۲۵۰	۰ - ۱۰۰	۰ - ۱	سختی کل (mEq/L)

کاتیون‌ها هستند. بنابراین بر اساس این نمودار، تیپ غالب آب زیرزمینی دشت کرمان بی‌کربنات سدیم و به طور کلی، تیپ آب در ۴۵/۲ درصد چاه‌های نمونه‌برداری شده بی‌کربنات سدیم، ۳۵/۵ درصد کلروره سدیم و ۱۹/۳ درصد سولفات سدیم است. نمودار پایپر نمایش داده شده در شکل (۴) ب) که برای سال ۱۳۹۲ واقع در میانه دوره مورد نظر ترسیم شده است، نشان می‌دهد اکثر نمونه‌ها در مثلث آنیون‌ها، در ناحیه‌ی مرکزی و بدون تیپ غالب قرار داشته و سایر نمونه‌ها در جهت افزایش آنیون کلر و کاتیون سدیم هستند. تیپ و رخساره غالب نتیجه‌گیری شده برای نمونه‌های آب زیرزمینی این دشت در این بازه زمانی نیز بی‌کربنات سدیم است. به طور دقیق‌تر ۴۱/۹ درصد نمونه‌ها بی‌کربنات سدیم، ۳۵/۵ درصد کلروره سدیم و ۲۲/۶ درصد سولفات سدیم هستند. با مقایسه تغییرات تیپ و رخساره آب زیرزمینی در این دوره (۱۳۹۲) با دوره قبل (۱۳۸۱) مشخص شد، تیپ ۳/۳ درصد نمونه‌ها از بی‌کربنات سدیم به سولفات سدیم تغییر یافته است. شکل (۴) ج) نمودار پایپر را در انتهای بازه زمانی مورد مطالعه (۱۴۰۳) نشان می‌دهد. بر این اساس تیپ و رخساره آب زیرزمینی دشت در این بازه زمانی، ۴۱/۹ درصد بی‌کربنات سدیم، ۴۵/۲ درصد کلروره سدیم و ۱۲/۹ درصد سولفات سدیم می‌باشد که می‌توان تیپ آب غالب را در این بازه زمانی، مجدداً بی‌کربنات سدیم تعیین نمود. با بررسی و مقایسه تغییرات تیپ آب زیرزمینی این دوره با دو دوره زمانی قبل مشخص شد، تیپ غالب آب زیرزمینی منطقه طی بازه زمانی ۲۲ ساله، بی‌کربنات سدیم مانده و بدون تغییر بوده است. از مقایسه تغییرات تیپ و رخساره آب زیرزمینی در این دوره (۱۴۰۳) با دوره قبل (۱۳۹۲) مشخص شد، فقط ۹/۷ درصد تیپ نمونه‌ها از سولفات سدیم به کلروره سدیم تغییر یافته است. پایداری طولانی‌مدت تیپ هیدروشیمیایی غالب در دشت کرمان به صورت بی‌کربنات سدیم، عمدتاً ناشی از تعامل پیچیده بین ساختار زمین‌شناسی و دینامیک هیدرولوژیکی آبخوان است. همانطور که گزارش‌های

### اعتبارسنجی پهنه‌بندی کیفیت آب

معیارهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> (MSE)، میانگین مطلق خطا<sup>۲</sup> (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE)، معادلات (۵ تا ۸) جهت اعتبارسنجی و ارزیابی دقت مدل آماری استفاده گردیده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [h_{obs}(t) - h_{est}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [h_{obs}(t) - \bar{h}(t)]^2} \quad (5)$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (h_{est}(t) - h_{obs}(t))^2}{n} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |h_{est}(t) - h_{obs}(t)|}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n [h_{est}(t) - h_{obs}(t)]^2}{n}} \quad (8)$$

### نتایج

گام ابتدایی ارزیابی پارامترهای کیفی آب برای مصارف مختلف به صورت غربال و صحت‌سنجی پارامترهای Ca، Mg، pH، SO<sub>4</sub>، Cl، TDS و Th در هر چاه کیفی انجام شد. سپس نوع آب و رخساره هیدروشیمیایی آبخوان دشت کرمان و نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی برداشتی از چاه‌های کیفی با رسم نمودارهای پایپر در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ و انتهای بازه زمانی مورد نظر در سال ۱۴۰۳ مقایسه گردید و نتایج جهت مقایسه بهتر در شکل (۴) الف تا ج) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل (۴) نمودار (الف) مشاهده می‌شود، اکثر نمونه‌ها در مثلث آنیون‌ها (مثلث پایین سمت راست)، در ناحیه‌ی مرکزی و بدون تیپ غالب بوده و سایر نمونه‌ها در جهت افزایش آنیون کلر و بی‌کربنات و کاتیون سدیم در مثلث

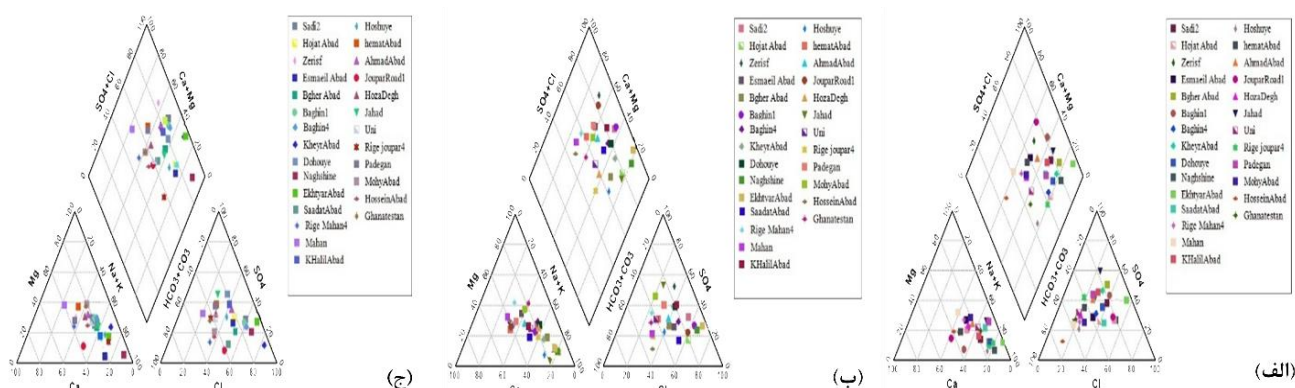
<sup>3</sup> Root Mean square Error

<sup>1</sup> Mean squared Error

<sup>2</sup> Mean absolute Error

کاتیونی بالایی هستند. در شرایطی که آب ورودی ممکن است دارای کلسیم و منیزیم بالاتری باشد (ناشی از هوازدگی سنگ‌های آهکی موجود در سنگ بستر ماری-آهکی منطقه)، فرآیند تبادل یونی به طور مداوم یون‌های کلسیم و منیزیم را از محلول خارج کرده و یون‌های را به محلول وارد می‌کند. این فرآیند، غلظت سدیم را بالا نگه می‌دارد، در حالی که فرآیندهای هوازدگی معمول، منبع اصلی یون بی‌کربنات هستند. جدول (۶) جهت مقایسه بهتر تغییرات تیپ و رخساره آب در سه دوره مورد نظر ارائه شده است.

زمین‌شناسی نشان می‌دهند، محدوده شهر کرمان بر روی یک لایه ضخیم (تا ۳۰ متر) از نهشته‌های ریزدانه رسی-سیلتی با نفوذپذیری کم بنا شده است. این ویژگی نفوذپذیری پایین به طور مؤثری فرآیند تغذیه عمودی آبخوان را کند کرده و منجر به زمان ماندگاری طولانی‌تر برای آب زیرزمینی می‌شود. این زمان طولانی، برای تحقق فرآیندهای تعادلی ضروری است. همچنین محتوای کانی‌شناسی این رسوبات ریزدانه، که عمدتاً شامل ایلیت، کلریت و اسمکتیت است، نقش اصلی را در پایداری این تیپ ایفا می‌کنند. کانی‌های رسی دارای ظرفیت تبادل



شکل (۴): ارزیابی کیفی آب دشت کرمان با توجه به نمودار پایپر در سال‌های الف) ۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳

جدول (۶): جدول مقایسه تغییرات تیپ و رخساره آب زیرزمینی دشت کرمان در سه دوره مورد مطالعه

تیپ و رخساره سال	بی‌کربنات سدیم	تغییرات نسبت به دوره قبل (کاهش/افزایش)	کلروره سدیم	تغییرات نسبت به دوره قبل (کاهش/افزایش)	سولفات سدیم	تغییرات نسبت به دوره قبل (کاهش/افزایش)
۱۳۸۱	۴۵/۲	-	۳۵/۵	-	۱۹/۳	-
۱۳۹۲	۴۱/۹	کاهش ۳/۳	۳۵/۵	بدون تغییر	۲۲/۶	افزایش ۳/۳
۱۴۰۳	۴۱/۹	بدون تغییر	۴۵/۲	افزایش ۹/۷	۱۲/۹	کاهش ۹/۷

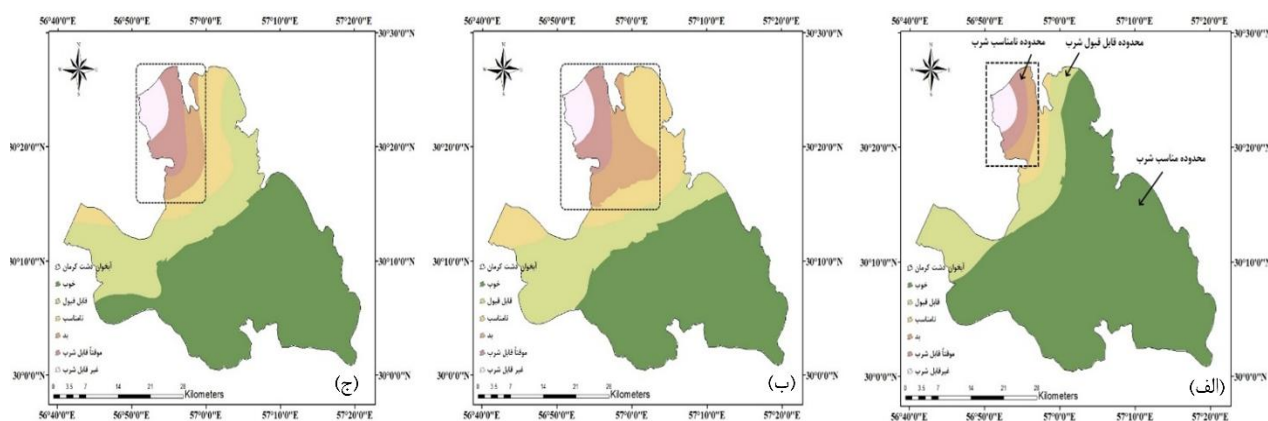
سه دوره ابتدای بازه زمانی مورد مطالعه (۱۳۸۱)، میان دوره (۱۳۹۲) و انتهای دوره (۱۴۰۳) در محدوده‌ی استاندارد برای مصارف شرب قرار گرفتند. همچنین از مقایسه غلظت سایر پارامترهای شیمیایی با مقادیر ارائه شده در جدول (۲) مشخص شد از ابتدای بازه زمانی مورد مطالعه تا کنون کیفیت آب زیرزمینی شمال غربی آبخوان شرایط نامناسب تا غیرقابل شرب را دارا می‌باشد. نواحی شمال شرقی، شرق،

### ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب

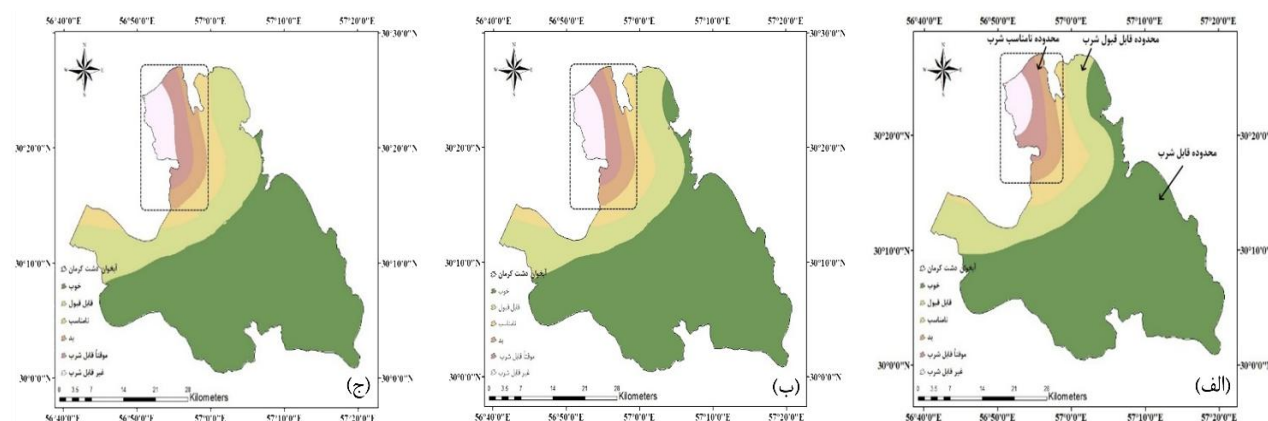
شاخص استاندارد ارزیابی کیفیت آب برای مصارف شرب در پژوهش حاضر نمودار شولر است. پارامترهای اندازه‌گیری شده از چاه‌های کیفی براساس جدول استاندارد شولر (جدول (۲)) به شش کلاس با شرایط خوب، قابل قبول، نامناسب، بد، موقتاً قابل شرب و غیرقابل شرب تقسیم شده است. مطابق این جدول پارامترهای pH, Mg, Ca طی

باغین) در میان دوره مورد مطالعه (سال ۱۳۹۲) شرایط قابل قبول تا غیر قابل شرب را دارا می‌باشد که در تصاویر مذکور مشخص شده است. نقشه‌های حاصل از پهنه‌بندی پارامتر TDS در شکل (۶) افزایش شرایط نامناسب را برای دو دوره انتهایی در غرب آبخوان نشان می‌دهد. نقشه‌های پارامتر Th ارائه شده در شکل (۷) تغییر شرایط خوب در دوره اول را به شرایط قابل قبول در دو دوره بعد در نواحی جنوب و جنوب غربی (محدوده چاه‌های قناتستان، چوپار و دهوشیه) بیان می‌کنند و از مقایسه‌ی شرایط در دو دوره انتهایی وضعیت پایدارتر حال حاضر (سال ۱۴۰۳) در آبخوان قابل مشاهده است.

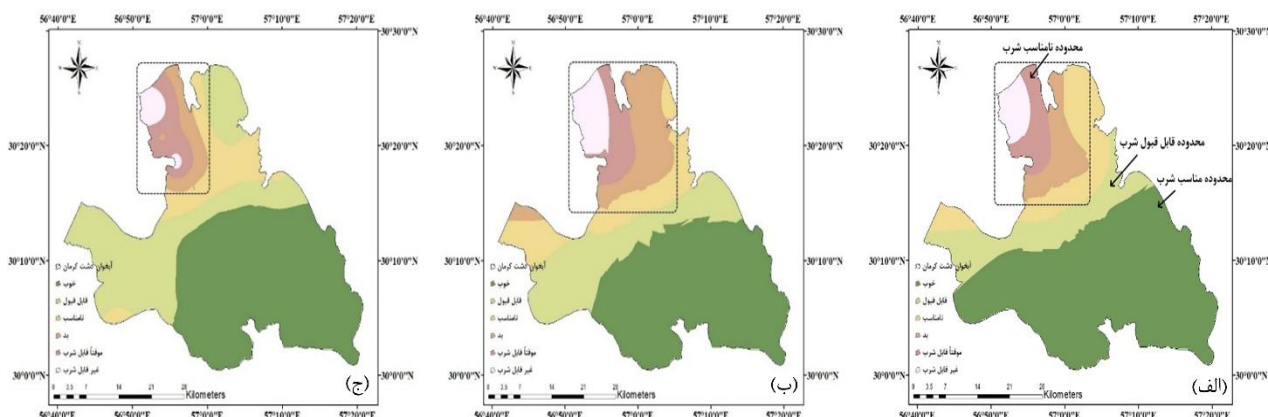
جنوب و محدوده‌ای از غرب آبخوان نیز در کلاس شرایط خوب و قابل قبول قرار گرفتند. نقشه‌ی پارامترهای  $SO_4$ ، TDS، Th و Na پهنه‌بندی وضعیت کیفی آبخوان را برای سه دوره مورد مطالعه به ترتیب در تصاویر (۵ تا ۸) نمایش می‌دهند. با بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شده برای پارامتر  $SO_4$  در تصاویر شکل (۵) می‌توان گفت مطابق استاندارد شولر حداکثر شرایط خوب تا قابل قبول در دوره اول و آخر دیده می‌شود و سطح وسیع از آبخوان شامل نواحی شمالی (محدوده چاه‌های حجت‌آباد، اختیار آباد و نقشینه)، شرقی (محدوده چاه‌های همت‌آباد، حوض دق ۱، خیابان جهاد) و نواحی غربی (محدوده چاه‌های سعدی و



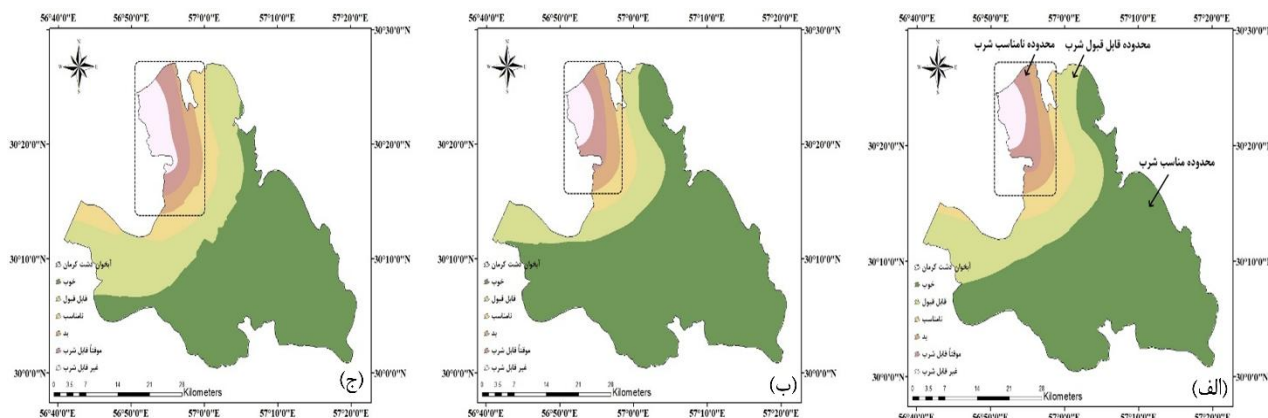
شکل (۵): نقشه‌های هم سولفات برای مصارف شرب در سال‌های الف) ۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳



شکل (۶): نقشه‌های هم کل جامدات محلول برای مصارف شرب در سال‌های الف) ۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳



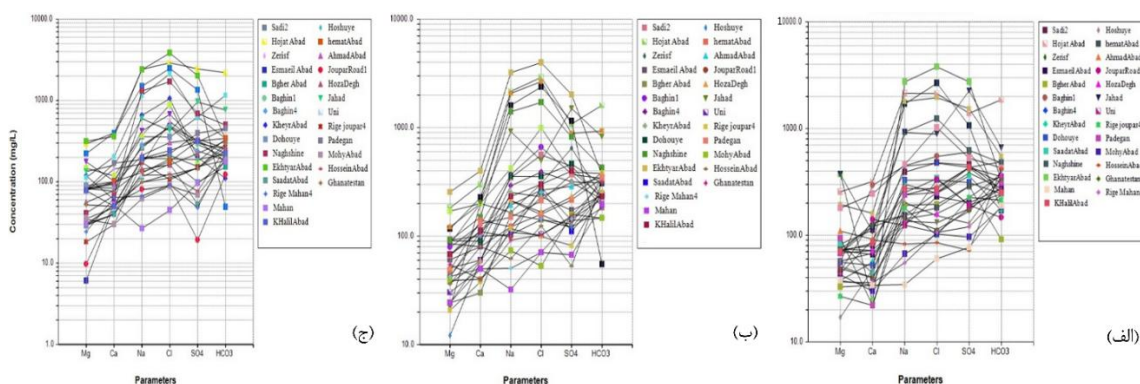
شکل (۷): نقشه‌های هم‌سختی کل برای مصارف شرب در سال‌های الف(۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳



شکل (۸): نقشه‌های هم‌سختی برای مصارف شرب در سال‌های الف(۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳

ناحیه‌ی مورد نظر کلاسه‌بندی آبخوان به صورت فوق را تأیید می‌کند.

نمودارهای شولر نمایش داده شده در شکل (۹ الف تا ج) براساس نام چاه‌های کیفی یا مکان نمونه، وضعیت کیفی نقاط را بیان می‌کنند. هر چاه کیفی براساس قرارگیری در

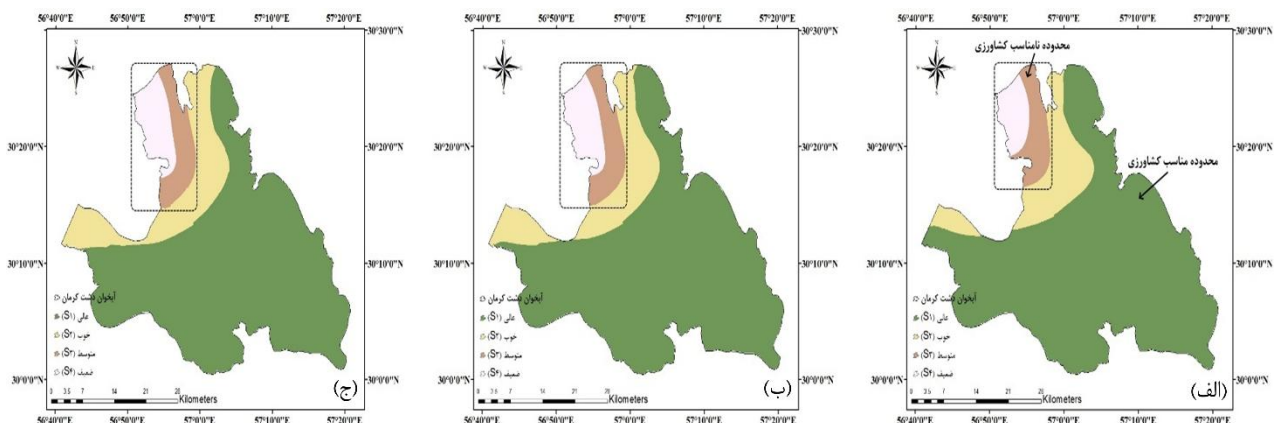


شکل (۹): ارزیابی کیفی آب دشت کرمان با توجه به نمودار شولر در سال‌های الف(۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳

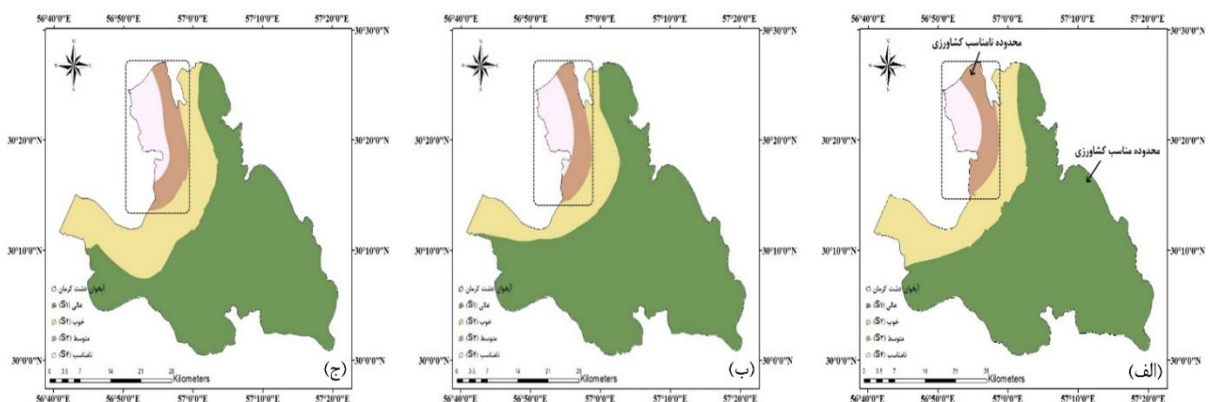
ارزیابی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی

منطقه غالب است چالش برانگیز است، زیرا پسته اگرچه تا حدی به شوری مقاوم است، ولی تجمع سدیم ناشی از SAR بالا می‌تواند جذب آب و مواد غذایی را مختل کرده و عملکرد گیاه را کاهش دهد. بنابراین، در کنار انتخاب گونه‌های مقاوم به شوری، مدیریت آبیاری با آب با کیفیت بهتر (برای شستشوی خاک) و استفاده از اصلاح‌کننده‌های شیمیایی (نظیر گچ) برای کاهش اثر جذب سدیم و بهبود نفوذپذیری خاک، به‌ویژه در مناطق شمالی آبخوان، ضروری به نظر می‌رسد. این اقدامات می‌تواند به حفظ پایداری کشت پسته و کاهش ریسک تخریب خاک در بلندمدت در SAR کمک کند. نقشه‌های ارائه شده برای پارامتر SAR در شکل (۱۱) شرایط آبخوان را مانند بالا نمایش می‌دهد.

نقشه‌ی پارامترهای EC و SAR به عنوان نمونه جهت پهنه‌بندی و نمایش بهتر وضعیت کیفی آبخوان برای استفاده بخش کشاورزی در سه دوره مورد مطالعه، در تصاویر شکل (۱۰ و ۱۱) ارائه شده است. مطابق نقشه‌های پهنه‌بندی شده برای پارامتر شوری در شکل (۱۰) از ابتدا تا انتهای دوره مورد نظر نواحی شرقی، جنوبی، جنوب غربی و میانی آبخوان بر اساس طبقه‌بندی ویلکاکس در شرایط عالی تا خوب بوده و در شمال غربی آبخوان بر اساس نقشه‌های پهنه‌بندی در شرایط موقتاً متوسط تا ضعیف قرار دارد. هم‌زمانی EC بالا و SAR بالا می‌تواند منجر به کاهش نفوذپذیری خاک و تشدید شوری در این محدوده مورد مطالعه شود. این شرایط برای کشت پسته که در این



شکل (۱۰): نقشه‌های هم شوری برای مصارف کشاورزی در سال‌های الف) ۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳



شکل (۱۱): نقشه‌های هم نسبت جذب سدیم برای مصارف کشاورزی در سال‌های الف) ۱۳۸۱، ب) ۱۳۹۲ و ج) ۱۴۰۳



آبخوان در این دوره هم مجدداً با شرایط خیلی شور و نامناسب برای کشاورزی قرار دارند. به طور کلی تحلیل شاخص خطر سدیمی (SAR) و هدایت الکتریکی (EC) به روش Wilcox، نشان داد نواحی شمالی دشت کرمان با مقدار  $SAR > 18$  در محدوده‌ی خطر بسیار بالا قرار گرفتند که این شرایط، با تبادل کاتیونی سدیم در خاک، موجب پراکندگی ذرات رس و کاهش شدید نفوذپذیری خاک می‌شود. در نتیجه، علاوه بر مشکلات شوری، تجمع سدیم در ناحیه ریشه می‌تواند اکسیژن‌رسانی را محدود و رشد ریشه را مختل کند. برای مدیریت این شرایط، انتخاب گونه‌های مقاوم به شوری و سدیم ضروری است. گیاهانی مانند پنبه، جو، اسفناج، گیاهان دارویی بومی و گونه‌های وحشی کویری نه تنها تحمل شوری بالاتری را دارند، بلکه در محیط‌هایی با نفوذپذیری کاهش یافته نیز عملکرد نسبی خود را حفظ می‌کنند. در مقابل، محصولات حساس نظیر پسته در این شرایط، کاهش عملکرد محسوسی نشان می‌دهد و حتی در سال‌های خشکی می‌توانند دچار افت کیفیت بازار پسند شود.

در راستای مدیریت مزارع مختلف، استفاده از آبیاری قطره‌ای تحت فشار با شیرابه‌های کم‌چکه نقش مهمی در کاهش سرعت تجمع نمک در ناحیه ریشه خواهد داشت. با این روش، توزیع یکنواخت آب در حجم خاک، مانع از ایجاد نقاط با غلظت بالای نمک می‌شود. با این حال، کاهش نفوذپذیری خاک به دلیل سدیم بالا، لزوم اجرای شستشوی دوره‌ای خاک با نسبت ۱:۴ (یک واحد آب با کیفیت خوب به ازای چهار واحد آب شور) در فصل پاییز را برجسته می‌سازد تا سدیم قابل تبادل شسته و ساختار خاک تا حدی بازیابی شود.

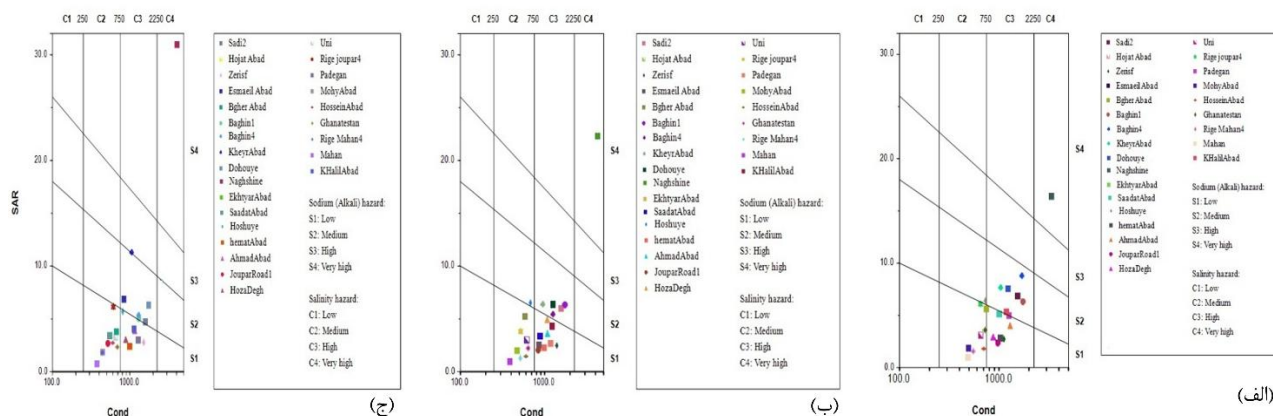
ارتباط میان کیفیت آب و عملکرد محصول، نه تنها از طریق انتخاب گیاه مناسب، بلکه از طریق اقداماتی برای حفظ ساختار خاک محقق می‌گردد، زیرا کاهش نفوذپذیری در بلندمدت می‌تواند جذب آب، عناصر غذایی و نهایتاً عملکرد محصول را محدود کند. برای پایداری اقتصادی این تغییرات مدیریتی، ارائه تسهیلات کم‌بهره و بیمه محصولات برای کشاورزان استفاده‌کننده از گونه‌های مقاوم به شوری، ترویج آزمون دوره‌ای خاک و آب برای پیش SAR و EC، آموزش اجرای مدیریت تلفیقی آبیاری و شستشو پیشنهاد

طبقه‌بندی کیفیت آب آبخوان دشت کرمان برای مصارف کشاورزی، براساس جداول استاندارد ویلکاکس (جداول ۳ و ۴) و نمودار ویلکاکس (شکل ۳) در شکل (۱۲) برای سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۳ نمایش داده شده است. مطابق نمودار ویلکاکس ارائه شده در شکل (۱۲ الف) کیفیت آب زیرزمینی منطقه در سال ۱۳۸۱ در اکثر مکان نمونه‌های واقع در جنوب، جنوب شرقی و شرق آبخوان در رده C2-S1 و C3-S1 به ترتیب با شرایط کیفی کمی شور و برای کشاورزی تقریباً مناسب و شور برای کشاورزی با تمهیدات مناسب بوده است. در این شرایط خطر شوری جدی‌تر از خطر سدیمی است.

نواحی غربی و جنوب غربی در رده C3-S2 با شرایط شور و برای کشاورزی با تمهیدات مناسب نمایش داده شده است. چاه نقشینه در رده C4-S4 با شرایط خیلی شور و نامناسب برای کشاورزی گزارش شده است. آب‌های گروه C3 و C4 برای گیاهان حساس مناسب نیستند و باید یا برای گیاهان مقاوم به شوری استفاده شوند یا با آب‌های کم‌شور رقیق شوند. نمونه‌هایی که در گروه S3 و S4 قرار دارند، حتی اگر شوری متوسط داشته باشند، ممکن است به خاک آسیب بزنند و نیازمند اصلاح باشند. شکل (۱۲ ب) نمودار ویلکاکس را برای سال ۱۳۹۲ نمایش می‌دهد. نتایج نمایش داده شده در این نمودار نیز مشابه دوره قبل و بدون تغییر بوده است.

اکثر مکان نمونه‌ها در نواحی جنوب، جنوب شرقی و شرق آبخوان در رده C2-S1 و C3-S1 به ترتیب با شرایط کیفی کمی شور و برای کشاورزی تقریباً مناسب و شور برای کشاورزی با تمهیدات مناسب بوده است. نواحی غربی و جنوب غربی در رده C3-S2 با شرایط شور و برای کشاورزی با تمهیدات مناسب می‌باشند. چاه نقشینه در رده C4-S4 با شرایط خیلی شور و نامناسب برای کشاورزی است. نمودار ویلکاکس در انتهای بازه زمانی مورد مطالعه (سال ۱۴۰۳) در شکل (۱۲ ج) نشان داده شده است. مطابق این نمودار تغییرات کیفی آب زیرزمینی آبخوان دشت کرمان همانند دوره‌های گذشته در نواحی مختلف ثابت و بدون تغییر بوده است. تنها چاه خیرآباد در این بازه زمانی نسبت به دو دوره قبل از C3-S2 به C3-S3 تغییر رده داده ولی همان شرایط کیفی را شامل می‌گردد. چاه نقشینه واقع در بخش غربی

می‌شود. چنین رویکردی، پیوند منطقی و علمی میان کیفیت آب، انتخاب گیاه، نفوذپذیری خاک و پایداری عملکرد فراهم کرده و می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی مدیریتی و سیاستگذاری محلی قرار گیرد.



شکل (۱۲): ارزیابی کیفی آب دشت کرمان با توجه به نمودار ویلکاکس در سال‌های الف (۱۳۸۱)، ب (۱۳۹۲) و ج (۱۴۰۳)

به دلیل خطر خوردگی تجهیزات فلزی و خطوط انتقال آب همراه بوده است. بررسی وضعیت کیفی مکان نمونه‌ها در سال ۱۳۹۲ نشان داد، تغییر قابل ملاحظه‌ای در گسترش ناحیه‌ای هر پارامتر و افزایش آن رخ نداده است. غلظت‌ها در نواحی شرقی، جنوبی و غربی نسبت به دوره قبل همچنان پایین بوده است و روند افزایشی جدیدی در سایر بخش‌ها دیده نمی‌شود. این نشان می‌دهد که در این بازه زمانی، تغییر کیفیت پارامترها در سطح وسیع چندان محسوس نبوده و احتمالاً تحت تأثیر تعادل نسبی سطح ایستابی و نبود تغذیه ناشی از پساب‌ها است. از منظر مصارف صنعتی، مناطق شرقی و جنوب‌شرقی برای فرآیندهای گروه اول و دوم مناسب تلقی می‌شوند.

وضعیت کیفی در انتهای دوره مورد مطالعه (سال ۱۴۰۳) مشابه دو دوره قبل نشان داده شده است. به این صورت که نواحی مرکزی و جنوب‌شرقی آبخوان در طبقه حساس و نسبتاً حساس قرار گرفته و ریسک شدید خوردگی، رسوب‌گذاری کلریدی و تهدید برای تجهیزات فلزی، بویلرها و سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی را به حداقل رسانده و برای استفاده در فرآیندهای صنعتی گروه اول و دوم مطلوب تشخیص داده شدند. میرکماندار و

### ارزیابی کیفیت آب برای مصارف صنعت

ارزیابی و طبقه‌بندی آب آبخوان دشت کرمان برای مصارف صنعتی با استفاده از راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، پساب‌ها و آب‌های برگشتی وزارت نیرو و جدول (۵) انجام شده است. در این راستا غلظت پارامترهای مورد نظر در این طبقه‌بندی از جمله سختی Th، کل مواد جامد محلول TDS، کلر CL و سولفات SO<sub>4</sub> برای سه دوره مورد مطالعه در هر مکان نمونه با جدول (۵) مقایسه و مشخص شد.

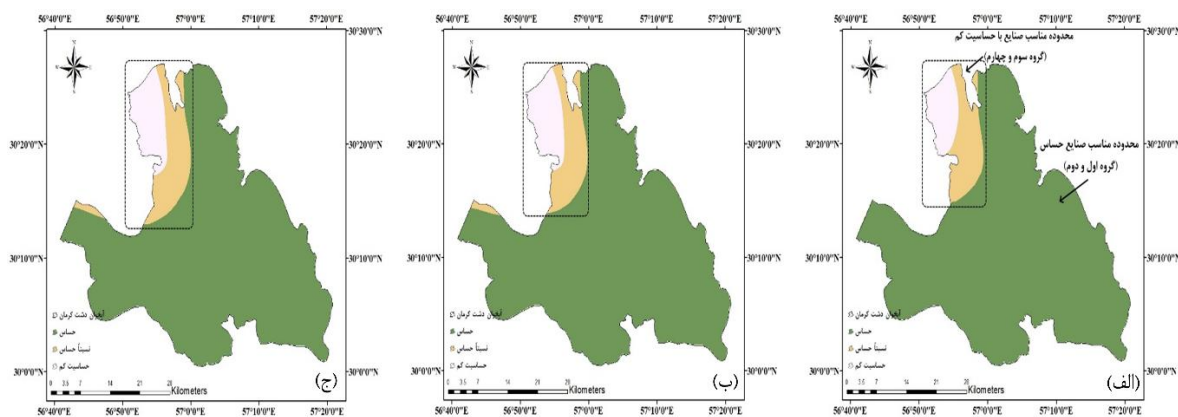
بخش اعظمی از آبخوان از جمله، نواحی مرکزی، شمال شرقی و شرقی، جنوب آبخوان و بخشی از غرب آن براساس این چهار پارامتر حساسیت زیادی داشته و در گروه حساس قرار گرفته‌اند. علت آن می‌تواند غلظت پایین پارامترهای این نواحی و تخلیه کم آب زیرزمینی این مناطق باشد. این نواحی به دلیل سطح پایین تر شوری، پایداری هیدروژئوشیمیایی و خطر نفوذ آلودگی کمتر، برای استقرار صنایع حساس مناسب‌ترند. وسعت اندکی از شمال غربی و غرب آبخوان در طبقات نسبتاً حساس و حساسیت کم قرار گرفتند. می‌توان نتیجه‌گیری کرد در این دوره (سال ۱۳۸۱)، توسعه‌ی صنعت در این نواحی با محدودیت شدید



این شرایط، این نواحی به دلیل توان جذب پایین توسعه کشاورزی و محدودیت‌های زیست‌محیطی ناشی از افت سطح آب، به‌عنوان مناسب‌ترین مناطق برای استقرار صنایع کم‌حساسیت به کیفیت آب (مانند صنایع معدنی، سیمان، و فرآوری فلزات) پیشنهاد می‌شوند. این پیشنهاد بر مبنای سازگاری نسبی نیاز آبی این صنایع با کیفیت موجود و کاهش فشار بر مناطق مرکزی و جنوبی آبخوان است که از نظر کمی و کیفی، نقش حیاتی در تأمین آب شرب و کشاورزی دارند. در عین حال، با توجه به افت مستمر منابع و تغییرات منفی شاخص‌های کیفی در سه دوره زمانی مطالعه‌شده، ضروری است توسعه صنعتی در شمال آبخوان با اعمال سقف برداشت مشخص و پایش دوره‌ای سطح ایستابی و کیفیت همراه باشد تا از بروز اثرات برگشت‌ناپذیر زیست‌محیطی جلوگیری گردد.

نقشه پهنه‌بندی کلر به عنوان مثال جهت درک بهتر مطابقت هر ناحیه با گروه‌های معرفی شده در شکل (۱۳)، در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۳ به ترتیب الف، ب و ج نمایش داده شده است. مطابق نقشه‌ی ارائه شده در تصاویر الف و ب برای سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۹۲، آب زیرزمینی نواحی شرقی، مرکزی، جنوبی و غربی آبخوان با حداقل غلظت کلر برای فرآیندهای صنعتی گروه دوم مناسب می‌باشد و سایر نواحی آبخوان شامل شمال و شمال غرب با غلظت بالای کلر برای صنایع گروه چهارم با حساسیت کم کارایی دارند.

همکاران (۱۴۰۴) نشان داد حداکثر میزان افت تراز آب زیرزمینی دشت کرمان در دوره ۲۲ ساله (۱۴۰۳-۱۳۸۱) در محدوده غربی و شرقی به طور متوسط ۱/۲۳ متر در سال و حداقل آن را نواحی مرکزی و جنوب آبخوان به طور متوسط ۰/۲۷ متر طی هر سال تجربه کرده است. همچنین میزان افت تراز آب زیرزمینی در چاه‌های شمالی این آبخوان به طور متوسط ۰/۵۴ متر در سال گزارش شده است. بنابراین، با توجه به حداکثر افت تراز آب زیرزمینی به میزان ۲۷/۰۶ متر طی بازه‌ی زمانی ۲۲ ساله در محدوده غربی و شرقی این نکته حائز اهمیت است که، اگرچه موقعیت پیشنهادی صنایع برای فرآیندهای گروه اول و دوم در مناطقی با کیفیت نسبی بهتر قرار دارد، اما پتانسیل برداشت پایدار در این مناطق در معرض کاهش جدی است. همچنین با توجه به محدودیت‌های زیست‌محیطی، ادامه برداشت کنونی بدون مدیریت مصرف می‌تواند منجر به افت بیشتر سطح تراز آبخوان، افزایش تمرکز نمک، و حتی تداخل آب شور و شیرین شود که برای صنایع با نیاز به آب خالص، پیامد زیان‌باری خواهد داشت. بر اساس نتایج پژوهش نامبرده، افت سطح ایستابی در نواحی شمال و شمال‌غربی آبخوان طی ۲۲ سال اخیر حدود ۱۲ متر برآورد شده که نشان‌دهنده فشار فزاینده بر منابع زیرزمینی این بخش است. در عین حال، شاخص‌های کیفی از جمله حداکثر غلظت کلر، شوری و نسبت جذب سدیم بیانگر کیفیت نامناسب آب برای مصارف حساس هستند. با وجود



شکل (۱۳): نقشه‌های هم‌کلر برای مصارف صنعت در سال‌های ۱۳۸۱، ۱۳۹۲ و ۱۴۰۳ به ترتیب الف، ب و ج

عملکرد مدل در سطح مطلوبی قرار دارد. مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، در بازه ۰/۹۹۳ تا ۰/۹۹۹ بیانگر عملکرد عالی مدل زمین‌آمار در شبیه‌سازی و برآورد پارامترهای کیفی آب است. مقادیر MSE برای همه پارامترها کم‌تر از یک است، که نشان‌دهنده همخوانی بسیار بالا بین داده‌های اندازه‌گیری شده واقعی و مقادیر درون‌یابی شده به روش کریجینگ می‌باشد. به‌طور مشابه، مقادیر بسیار پایین MAE و RMSE نیز تأیید می‌کنند که مدل توسعه‌یافته از توان پیش‌بینی قوی و خطای پائینی برخوردار است.

ارزیابی عملکرد مدل زمین‌آمار در برآورد پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت کرمان طی سه دوره زمانی مورد مطالعه، با محاسبه معیارهای آماری زیر ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) بر اساس معادلات (۵ تا ۸) صورت گرفته و نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است. این جدول همچنین شامل مقادیر میانگین، انحراف معیار، حداکثر و حداقل هر پارامتر در طول دوره مطالعاتی است که محدوده تغییر پارامترهای مورد نظر را مشخص می‌نماید. تحلیل نتایج معیارها نشان می‌دهد که

جدول (۷): جدول میانگین معیارهای آماری پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت کرمان در دوره مورد مطالعه

CI	Na	Ec	SAR	Th	TDS	SO4	
۵۸۸/۷۷	۵۱۸/۹۷	۲۱۰۳/۱۶	۷/۰۷	۶۱۸/۰۷	۱۸۳۲/۷۵	۴۳۱/۳۹	میانگین
۸۹۱/۷۱	۶۸۲/۱۸	۲۳۱۳/۲۳	۸/۱۴	۵۰۸/۵۴	۲۰۴۸/۷۱	۵۱۹/۸۴	انحراف معیار
۳۸۶۴	۲۷۹۰/۶۷	۱۰۰۰۳	۳۷/۳۱	۲۲۱۶/۶۷	۸۶۳۱	۲۴۰۲/۱۶	حداکثر
۵۲/۷۱	۲۳/۵۹	۵۱۴/۴۰	۰/۸۷	۱۵۸/۳۳	۳۹۹/۳۳	۴۸/۰۵	حداقل
۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۹۹۹	۰/۹۹۳	۰/۹۹۹	ضریب تعیین ( $R^2$ )
۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۴۹	۰/۶۵	۰/۴۸	میانگین مربعات خطا (MSE)
۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۴۹	۰/۶۵	۰/۴۸	میانگین قدرمطلق خطا (MAE)
۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۱۹	۰/۷۰	۰/۸۱	۰/۶۹	ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)

بر اساس این یافته‌ها، برای دستیابی به مدیریت پایدار و عملیاتی، توصیه‌های زیر با رویکردی متناسب با ظرفیت‌های موجود و حفظ تعادل کمی و کیفی ارائه می‌گردد: حفاظت از مناطق حیاتی (جنوب و مرکز)، با توجه به کیفیت نسبتاً بهتر آب در مناطق ماهان و جوپار، که نقش حیاتی در تأمین شرب و کشاورزی دارند، برداشت صنعتی از این مناطق باید ممنوع یا به شدت محدود شود. پتانسیل برداشت پایدار در این مناطق باید صرفاً برای مصارف حیاتی حفظ گردد. نصب ایستگاه‌های آنلاین سنجش کلر، TDS و EC در ۱۰ نقطه حساس و نمونه‌برداری ماهانه از چاه‌های کیفی (به ویژه در شمال) برای پایش آلودگی نقطه‌ای و پیش‌بینی تداخل آب شور و شیرین ضروری است. همچنین، با توجه به تمرکز صنعتی پیشنهاد شده در شمال، نظارت دقیق بر مدیریت پساب صنایع گروه سوم و چهارم

### نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکردی یکپارچه زمین‌آمار و هیدروشمیایی، ارزیابی چندزمانی کیفیت آبخوان کرمان (۱۴۰۳-۱۳۸۱) را به انجام رساند. نتایج نشان داد که تیپ هیدروشمیایی بی‌کربنات سدیم در طول ۲۲ سال به دلیل نفوذپذیری کم، حضور کانی‌های رسی فعال و کنترل فرآیندهای هوازدگی، پایداری ساختاری خود را حفظ کرده است. با این حال، افت شدید تراز آب زیرزمینی (به‌ویژه در محدوده غرب و شرق به میزان ۱/۲۳ متر در سال و شمال با افت ۰/۵۴ متر در سال) و تخریب کیفیت آب، تهدیدی جدی برای پایداری منطقه است.



قطره‌ای و شستشوی دوره‌ای با نسبت ۱:۴ (به عنوان راهکاری برای بازیابی موقت ساختار خاک) باید تقویت شود. ارائه تسهیلات و بیمه کشاورزان فعال در این حوزه برای تضمین پایداری اقتصادی این تغییرات ضروری است. تخصیص نواحی شمال و شمال غرب به صنایع گروه چهارم (سیمان و پتروشیمی) که کمترین حساسیت را به کیفیت آب دارند، یک راهکار مؤثر برای توسعه متوازن است؛ مشروط بر آنکه توسعه صنعتی در این مناطق با سقف برداشت مشخص و پایش مستمر همراه باشد. صنایع حساس باید منحصراً به مناطق شرقی، جنوبی و مرکزی با کیفیت بهتر هدایت شوند. بنابراین، به طور کلی پایداری بلندمدت دشت کرمان تنها با اتخاذ راهبردهای مدیریتی تفکیک‌شده بر اساس زون‌بندی کیفی و کمی، همراه با برنامه‌ریزی عملیاتی برای انتقال منابع و اجرای دقیق پروتکل‌های حفاظتی، میسر خواهد شد.

(مانند بازیافت در چرخه خنک‌کننده) برای جلوگیری از آلودگی بیشتر آبخوان حیاتی است.

در راستای مدیریت توزیع آب شرب، طراحی سیستم انتقال آب از مناطق با کیفیت جنوبی (ماهان و جوپار) برای تأمین آب شرب مناطق اختیارآباد و نقشینه که دارای کیفیت آب نامناسب است، باید بر اساس ظرفیت مازاد پایدار واقعی آن چاه‌ها و با در نظر گرفتن کسری افت تراز ناشی از این انتقال (برای جلوگیری از کاهش تراز آبخوان) صورت پذیرد. اجرای سیستم‌های تصفیه پیشرفته (مانند RO با پیش‌تصفیه) در چاه‌های شمالی آلوده، به عنوان یک راهکار جایگزین یا مکمل برای کاهش فشار بر خطوط انتقال بلندمدت ضروری است.

در نواحی شمالی با کیفیت نامناسب آب برای کشاورزی ترویج قاطعانه کشت گیاهان مقاوم به سدیم و شوری (پنبه، جو و بومی) و اجرای روش‌های مدیریتی مانند آبیاری

## منابع

- آقاملائی، ایمان. لشکری پور، غلامرضا. غفوری، محمد و امینی زاده، محمدرضا. بررسی خصوصیات حوزه رسوبی دشت کرمان از دیدگاه زمین شناسی مهندسی. نشریه زمین شناسی ژئوتکنیک (زمین‌شناسی کاربردی)، ۱۳۹۳، دوره ۱۰، شماره ۳، ۱۳۹۳، ص ۱۸۰-۱۶۹. <https://sid.ir/paper/517506/fa>. SID.
- امینی‌زاده بزنجانی، محمدرضا. لشکری‌پور، غلامرضا. غفوری، محمد. حافظی مقدس، ناصر. بررسی وضعیت سنگ کف دشت کرمان با توجه به مدل حوزه رسوبی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال دوم، شماره ۷، ۱۳۹۱، ص ۸۲-۷۰.
- حسینی پاک، ع. ا. ۱۳۷۷. زمین آمار. انتشارات دانشگاه تهران.
- دولت کردستانی، م. نوحه گر، ا. و جانی‌زاده. س. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش WQI و روش‌های زمین آمار (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سیلوه). مهندسی اکوسیستم بیابان، دوره ۸، شماره ۲۴، ۹۵-۱۰۸.
- دهشیبی، ر. شیرزادی، ف. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۴۰۱. بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی جهت مصارف مختلف مطالعه موردی شهرستان سیرجان واقع در استان کرمان. *آبخوان و قنات*: Doi: 10.22077/jaaq.2022.1866, 81-91, 2(1).
- راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، پساب‌ها و آب‌های برگشتی برای مصارف صنعتی و تفریحی، وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه ۴۶۲.
- سالاری، م. ۱۴۰۲. بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب جهت مصارف شرب، کشاورزی و صنعت (مطالعه موردی: دشت شیراز)، مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۸، شماره ۴، ص ۷۵۸۶-۷۵۷۴.
- فرهنگ جغرافیایی آبدی‌های کشور - استان کرمان. ۱۳۸۲. انتشارات سازمان جغرافیایی وزارت دفاع و پشتیبانی نیروهای مسلح، چاپ ۱۱، ص ۳۴.
- قره محمودلو، م. حشمت‌پور، ع. جندقی، ن. زارع، ع. و مهرابی، ح. ۱۳۹۸. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت سیدان- فاروق برای هدف های آبیاری و شرب. *فصلنامه علوم محیطی*، دوره ۱۷، شماره ۳، ص ۱۰۶-۸۹.

Doi: 10.29252/envs.17.3.89

میرکماندار، ب. رهنما، م. ب. و ذونعمت کرمانی، م. ۱۴۰۱. ارزیابی کمی و کیفی و شناسایی آلاینده‌های آبخوان دشت کرمان. شانزدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.  
میرکماندار، ب. رهنما، م. ب. و ذونعمت کرمانی، م. ۱۴۰۳. بررسی اثر اجرای شبکه فاضلاب شهری بر دینامیک جریان آب زیرزمینی (مطالعه موردی: شهر کرمان). نشریه علمی پژوهش‌های مهندسی آب ایران. دوره ۳، شماره ۲. ص ۹۸-۷۷.  
[10.22034/ijwer.2025.535809.1100](https://doi.org/10.22034/ijwer.2025.535809.1100)

Azareh, A., Zehtabian, G., Nazari Samani, A., Khosravi, H. 2015. Desertification monitoring in Garmsar plain with emphasis on water and agriculture criteria. *Journal of Range and Watershed Management*, 68(3), 427-439.

Esfandiari, M., Hakimzadek Ardakani, M. 2010. Assessing the actual status of desertification, with an emphasis on soil resource degradation based on the IMDPA model (case study: Abadeh Tashk-Fars). *Journal of rangeland and desert research Iran*, (4) 624-631.

Hosseini-Vardanjani, S. M., Khoshrovesh, M., Taheri Sudejani, H., Ghahreman Shahraki, M., and Pourgholam-Amiji, M. 2023. Qualitative Assessment of Groundwater for Drinking Purposes Based on Water Quality Indicators, *Irrigation and Water Engineering*, 14, 2, 164-180. Doi: 10.22125/iwe.2023.387366.1710.

Isaaks, E.H., and R.M. Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 p.

Mirkamandar, B., Rahnama, M. B. and Zounemat-Kermani, M. 2025. Groundwater Depletion in an Arid Aquifer: Insights from Long-Term MODFLOW Modeling of the Kerman Plain. *Water Harvesting Research*, 8(2), 207-227. Doi: 10.22077/jwhr.2025.9858.1184.

Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Trans. American Geophysical Union* 25 (6), 914-928.

Piri, H., Ansari, H. and Bameri, A. 2014. Spatial Variation of Groundwater Quality for Drinking and Agricultural Plains Bajestan Using Geostatistical Methods. *Irrigation Sciences and Engineering*, 37(3), 107-122.

Rezvani Ghalhari M, Ajami B, Ghordouei Milan E, Khalooei M, Mahvi A. H. 2022. Evaluation of groundwater quality for drinking purposes in Kashan using water quality indicators. *Iranian Journal of Health and Environment*. 14(4):615-28.

Schoeller, H. 1995. *Terres et eaux* (Paris- Algiers), Unesco Series, Paris pp: 4-11.

Sistani, S., Zare Mehrjerdi, M. R., Sayari, N. and Amirtaimoori, S. 2022. Determining the Optimal Cropping Pattern with Footprint and Quality Water Approach (Case Study: Bardsir City). *Irrigation and Water Engineering*, 13(1), 403-420. Doi: 10.22125/iwe.2022.158535.

Wilcox, L.V. 1955. Classification and Use of Irrigation Waters. US Department of Agriculture. Cire. 969, W D.C. USA. 19 p.