



Geographical and statistical analysis of groundwater quality changes in Bam Plain

Moslem Borji Hassangavyar¹ | Hossein Yousefi^{2✉} | Ali Mahmoudi Aznaveh³

1. Department of Arid and Mountainous Reclamation Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: moslem.borji@gmail.com
2. Corresponding Author, School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: hosseinyousefi@ut.ac.ir
3. School of Energy Engineering and Sustainable Resources, College of Interdisciplinary Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ali.aznaveh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 26 February 2024
Received in revised form
5 April 2024
Accepted 30 April 2024
Published online 5 September 2024

Keywords:

Water quality assessment
Sustainable development
Groundwater chemistry
Water quality variables
Water resource management

ABSTRACT

Increasing population growth and thereby increasing exploitation of ground water resources has led to not only decreased quantity but also reduced quality of these valuable resources. Therefore, necessity of studying the quality of water in these areas can help proper management of these water resources. The aim of this study was to determine the groundwater quality variables using principal component analysis and then to evaluate the efficacy of the three kriging models namely simple kriging, universal kriging, and ordinary kriging in interpolation of the most important qualitative variables defined in Bam plain. For this purpose, of the 60 existing wells, 40 wells with good distribution in the study area were selected randomly as for training and the remaining wells were used to test the models. Results of principal component analysis showed that the two variables EC and TDS as the main variables explained the highest changes in variance of other water quality variables. Results of interpolation based on these two parameters showed that ordinary and universal kriging were relatively same in estimating the salinity in the training step, but in the testing step, in the KO method, the RMSE and MAE coefficients are 24.422 and 35.153 microsiemens per centimeter, respectively. These values have differences of 1.22 and 0.52 $\mu\text{s/cm}$ less than the KU method, and consequently, they are superior to Universal Kriging. In interpolation of variable TDS in both the training and testing steps, ordinary kriging had the best performance compared to the two other methods. Interpolation results based on these two variables also showed that the salinity in the north and northeastern parts of the plain in two ordinary and universal kriging was higher than other places indicating a good conformity with changes in land use.

Cite this article: Borji Hassangavyar, M., Yousefi, H., & Mahmoudi Aznaveh, A. (2024). Geographical and statistical analysis of groundwater quality changes in Bam Plain. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 527-541.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.373180.1151>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.373180.1151>



تحلیل جغرافیایی و آماری تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت بم

مسلم برجی حسن گاویار^۱ | حسین یوسفی^۲ | علی محمودی ازناوه^۳

۱. گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: moslem.borji@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های بین رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: hosseinyousefi@ut.ac.ir
۳. دانشکده مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشکدگان علوم و فناوری‌های بین رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ali.aznaveh@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

افزایش جمعیت و در نتیجه آن افزایش بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی نه تنها باعث کاهش کمیت بلکه سبب تخریب کیفیت این منابع ارزشمند شده است. لذا ضرورت مطالعه و بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند به مدیریت صحیح استفاده از این منابع آبی کمک نماید. لذا هدف از این مطالعه، تعیین مهم‌ترین متغیرهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی و سپس، بررسی عملکرد سه مدل کریجینگ ساده، جهانی و معمولی در درون‌یابی مهم‌ترین متغیرهای کیفی تعیین شده در دشت بم می‌باشد. بدین منظور از ۶۰ حلقه چاه موجود، ۴۰ حلقه چاه به صورت تصادفی و با پراکنش مناسب در منطقه مورد مطالعه به عنوان چاه آموزشی و مابقی چاه‌ها برای آزمایش مدل‌ها استفاده شد. نتایج آزمون مؤلفه‌های اصلی نشان داد که دو متغیر EC و TDS به عنوان متغیرهای اصلی، بیش‌ترین تغییرات واریانس موجود در سایر متغیرها کیفی آب را توجیه می‌کنند. نتایج درون‌یابی براساس این دو پارامتر نشان داد که روش کریجینگ معمولی و جهانی در تخمین شوری در مرحله‌ی آموزش دارای عملکرد نسبتاً مشابهی می‌باشند، اما در مرحله آزمایش، در روش KO ضرایب RMSE و MAE به ترتیب برابر ۴۲۲/۳۴ و ۱۵۳/۳۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بوده که به ترتیب دارای اختلاف ۱/۲۲ و ۰/۵۲ میکروزیمنس بر سانتی‌متر کم‌تر از روش KU می‌باشد و در نتیجه بهتر از کریجینگ جهانی است. در درون‌یابی متغیر TDS روش کریجینگ معمولی در هر دو مرحله‌ی آموزش و آزمایش بهترین عملکرد را نسبت به روش دیگر داشته است. همچنین نتایج درون‌یابی براساس این دو متغیر نشان داد که میزان شوری در قسمت شمال و شمال شرقی دشت در دو روش کریجینگ معمولی و جهانی بیش‌تر از سایر نقاط بوده، که با تغییرات کاربری اراضی منطقه انطباق مناسبی داشته است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

ارزیابی کیفیت آب

توسعه پایدار

شیمی آب زیرزمینی

متغیرهای کیفی آب

مدیریت منابع آب

استناد: برجی حسن گاویار، مسلم؛ یوسفی، حسین و محمودی ازناوه، علی (۱۴۰۳). تحلیل جغرافیایی و آماری تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت بم. نشریه

مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۵۴۱-۵۲۷. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.373180.1151>

۱. مقدمه

آب‌های زیرزمینی یک منبع طبیعی می‌باشد که از اهمیت جهانی برخوردار است، به‌ویژه در مناطقی که دسترسی به آب‌های زیرزمینی محدود است. منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک ممکن است در محدوده کمی پیدا شوند و یا سفره‌های آب تجدیدناپذیر عمیق باشند و یا تغذیه آن‌ها مشکل باشد (Kumar et al., 2013). افزایش جمعیت و در نتیجه آن افزایش بهره‌برداری از این منابع ارزشمند در این مناطق باعث شده است که نه تنها کمیت منابع آب زیرزمینی کاهش یابد، بلکه کیفیت این منابع نیز رو به نامناسب‌بودن پیش رود و باعث شورشیدن و تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی شود (Askari et al., 2009; El-Hames et al., 2013). هم‌چنین این تغییرات کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌تواند ناشی از مدیریت غلط بهره‌برداری از آن باشد، که مقدمه‌ای بر تخریب منابع آب و سایر منابع چه به‌صورت مستقیم و چه به‌صورت غیر مستقیم است (Zehtabian et al., 2010). به‌طوری‌که، اگر آلودگی در منبع کلیدی آب به‌وجود آید، مدیریت مؤثر آن اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (Kumar et al., 2023; Yousefi et al., 2013). از سوی دیگر مدیریت مصرف آب و کاهش میزان آب مصرفی در محصولات تولیدی بشر (Mohammadi et al., 2024) و مصارف خانگی علاوه بر کمیت بر کیفیت منابع آبی نیز تأثیرگذار است. لذا ضرورت مطالعه و بررسی کیفیت آن در این مناطق می‌تواند به مدیریت صحیح استفاده از منابع آبی کمک نماید. در این میان، استفاده از روش‌های سنتی برای بررسی وضعیت کیفی سفره‌های آب زیرزمینی زمان بر و پرهزینه است. به‌طوری‌که، روش‌های زمین‌آماری با توجه به داشتن توانمندی‌هایی چون کاهش تعداد نمونه‌برداری، کاربرد هم‌زمان و ارائه برآوردهای دقیق‌تر از وضعیت مکانی متغیرها به لحاظ استفاده، می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش دقت برآوردها شود (Jahanshahi et al., 2014). روش‌های زمین‌آماری در زمینه‌های دیگر مانند هواشناسی، خاکشناسی و ... کاربرد دارند، اما این روش‌ها به‌طور گسترده‌ای در زمینه پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی استفاده شده است (Bordbar et al., 2022; El-Hames et al., 2013; Hassan, 2014; Paryani et al., 2022). از این‌رو، پژوهش‌های متعددی در سطح جهانی و ملی در زمینه کاربرد روش‌های زمین‌آمار در بررسی مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی انجام شده است که می‌توان موارد زیر را به‌عنوان نمونه ذکر کرد.

Hassanzadeh Nafooti and Emami Maybodi (2018) در پژوهشی، تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت مروست در دوره ۱۴ ساله از ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰ با استفاده از روش‌های زمین‌آماری بررسی نمودند. در این راستا پارامترهای مختلفی مانند EC، pH، SAR و یون‌های اصلی اندازه‌گیری و با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی، نقشه‌های پهنه‌بندی کیفیت آب تهیه شد. نتایج نشان داد که غلظت اکثر پارامترها از غرب به شرق و جنوب به شمال دشت افزایش یافته و کیفیت آب در طول زمان رو به کاهش است. برای ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی از سه شاخص MAE، MBE و RMSE استفاده شد که نشان داد روش کوکریجینگ معمولی برای اکثر پارامترها بهترین روش می‌باشد. در پژوهشی دیگر، Azhdari and Hosseini (2018) با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و GIS، تغییرات مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت سگری را بررسی کردند و با توجه به آن بهترین روش پهنه‌بندی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی این دشت انتخاب شد. نتایج نشان داد که روش کریجینگ معمولی با کم‌ترین مقدار RMSE، دقیق‌ترین روش برای پهنه‌بندی کیفیت آب‌های زیرزمینی بود. براساس نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده، کیفیت آب در برخی مناطق دشت به‌دلیل برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی نامطلوب بود و پارامترهای EC، TH و TDS در برخی مناطق محدودیت‌هایی برای شرب ایجاد می‌کردند.

Bakhshodeh and Golestani Kermani (2019) به ارزیابی دو روش زمین‌آماری کریجینگ و کوکریجینگ در راستای تعیین تغییرات مکانی چهار پارامتر کیفی آب زیرزمینی دشت بردسیر شامل EC، pH، TDS و TH پرداختند. در این راستا اطلاعات ۴۶ حلقه چاه و قنات موجود در منطقه در دو سال ۱۳۸۱ و ۱۳۹۵ گردآوری شد. براساس شاخص RMSE روش

کوکریجینگ برای پارامترهای مذکور، بهترین روش درون‌یابی است. Pirzadeh and Asvar (2020) در پژوهشی، توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت سیرجان طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۷ با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و GIS بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ ساده برای اکثر پارامترها بهترین روش درون‌یابی بود. غلظت یون‌ها طی سال‌های مورد مطالعه رو به افزایش بود و تجمع غلظت یون‌ها در غرب و جنوب دشت سیرجان بیش‌تر بود. دلیل این امر، برداشت بی‌رویه آب از این منطقه برای کشاورزی بود. Eghbalian and Bahmani (2020) در پژوهشی، کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت همدان-بهار با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و GIS بررسی شد. نتایج نشان داد که شوری، باقی‌مانده خشک، نسبت جذب سدیم، بی‌کربنات، pH، کلر و سدیم در برخی مناطق دشت از نظر کشاورزی دارای محدودیت بودند. دلیل این امر، فعالیت‌های انسانی و توسعه فعالیت‌های صنعتی بود. برای بررسی توزیع مکانی پارامترهای کیفی، از روش‌های مختلف زمین‌آماري و GIS استفاده شد و بهترین روش با کم‌ترین خطای RMSE انتخاب شد. روش‌های روش‌های توابع شعاعی (RBF)، تخمین گرموضعی (GPI)، تخمین گرام (LPI) برای پارامترهای EC، TDS و TH و روش LPI برای پارامتر pH بهترین روش‌های درون‌یابی بودند. Eftekhari et al. (2021) در پژوهشی دیگر، کیفیت آب زیرزمینی بیرجند با استفاده از شاخص DGWQI و روش‌های زمین‌آماري مبتنی بر GIS بررسی شد. نتایج نشان داد که ۶۳ درصد مساحت آبخوان کیفیت مناسب، ۱۸ درصد کیفیت ضعیف، ۱۰ درصد کیفیت خیلی ضعیف و ۹ درصد کیفیت غیرآشامیدنی داشت. پارامترهای Mg^{2+} ، EC و TDS حساس‌ترین پارامترها در محاسبه DGWQI بودند. روش‌های کریجینگ معمولی و تغییرنگار کروی برای تحلیل فضایی پارامترها مناسب بودند. نقشه DGWQI نشان داد که بخش غربی و جنوب‌غربی آبخوان برای شرب مناسب نیست (Saghazadeh, 2022). کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت کبودرآهنگ با روش‌های زمین‌آماري و GIS بررسی شد. کیفیت آب از نظر TH و pH مناسب بود، اما EC و TDS در برخی مناطق محدودیت شرب داشتند. دلیل این امر برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و حفر چاه‌های غیرمجاز بود. RBF، GPI و LPI برای EC، TDS و TH و LPI برای pH بهترین روش‌های درون‌یابی بودند. Khan et al. (2023) در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب در منطقه‌ای در پاکستان پرداختند. این مطالعه با استفاده از یک شاخص کیفیت آب سطحی یکپارچه براساس ۱۸ پارامتر انجام شد. نتایج نشان داد که ۶۹/۲۳ درصد از نمونه‌ها برای مصرف مناسب بود اگرچه از ۳۰/۷۷ درصد نمونه‌ها را به‌عنوان نامناسب برای آشامیدن به‌دلیل آلودگی ارزیابی شد. هم‌چنین درون‌یابی با استفاده از روش کریجینگ معمولی و جهانی انجام شد. براساس ضریب RMSPE کریجینگ جهانی عملکرد بهتری را در مقایسه با کریجینگ معمولی نشان داد.

با توجه به بررسی مطالعات انجام‌شده، می‌توان دریافت که در مطالعات قبلی از انواع روش‌های درون‌یابی به‌ویژه روش درون‌یابی کریجینگ برای بررسی کیفیت آب زیر زمینی استفاده شده است، که برای این کار از ارزیابی متقابل با استفاده از نقاط معلوم مورد استفاده در پهنه‌بندی مدل برای ارزیابی صحت روش‌های مختلف زمین‌آماري در برآورد کیفیت شیمیایی منابع آبی از قبیل چشمه‌ها، قنات و چاه‌ها استفاده شده است. با این حال، این روش‌ها نیز دارای محدودیت‌هایی می‌باشند، از جمله این‌که بهترین نتایج را در صورت بهنجاربودن توزیع داده‌های موردبررسی ارائه می‌دهند که این شرط لزوماً در مورد همه فراسنج‌های علوم زمینی صادق نیست (Soleimani et al., 2012). این ویژگی و سایر محدودیت‌های روش‌های درون‌یابی باعث شده است که دانشمندان در مطالعات مختلفی عملکرد این روش‌ها را با انواع دیگر آن مورد مقایسه قرار دهند (Zimmerman et al., 1999). از طرف دیگر، در مطالعات گذشته سعی بر این شده است که بیش‌ترین تعداد متغیر کیفی را موردبررسی قرار دهند که گاهی لزومی به درون‌یابی تمامی آن‌ها نیست و تنها با انجام درون‌یابی برای دو یا سه متغیر مهم، دید کافی از کیفیت آب زیرزمینی ایجاد خواهد شد (Jahanshahi et al., 2014; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2009).

با توجه به مطالعات قبلی که به طور گسترده به انواع روش‌های درون‌یابی، به‌ویژه در بررسی کیفیت آب زیرزمینی، پرداخته‌اند، این پژوهش برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه دشت بم به تعیین مهم‌ترین متغیرهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی می‌پردازد. هدف دیگر این مطالعه بررسی عملکرد سه مدل کریجینگ (OK، UK و SK) و مقایسه آن‌ها با یکدیگر در درون‌یابی مهم‌ترین متغیرهای کیفی تعیین شده در دشت بم می‌باشد. تأکید بر شناسایی متغیرهای حیاتی‌تر برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، امکان تجزیه و تحلیل هدفمندتر و کارآمدتری را فراهم می‌کند و ارزیابی عوامل خاصی که تغییرات کیفیت آب را در منطقه تحت پوشش قرار می‌دهند را میسر می‌سازد. علاوه بر این، تحلیل مقایسه‌ای از مدل‌های کریجینگ، برای ارائه نکاتی در مورد تکنیک بهینه در درون‌یابی دقیق پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی، ارائه می‌دهد. با ترکیب این پیشرفت‌های روش‌شناختی، این پژوهش رویکرد جامع و نوآورانه‌ای را به ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی ارائه می‌دهد و برای مدیریت منابع آب و توسعه پایدار در منطقه دشت بم، اطلاعات قابل توجهی فراهم می‌کند.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در بین طول‌های جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و عرض‌های ۲۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی واقع شده‌است. ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۹۶۰ متر، وسعت آن ۹۹۲۱ کیلومترمربع است که ۴۳۵۷ کیلومترمربع آن شامل دشت می‌باشد. محدوده مذکور دارای آب‌وهوای گرم و کویری است (Malakootian and Nouri, 2010). متوسط بارندگی این منطقه ۶۰ میلی‌متر بوده که بیش‌تر به صورت رگباری است، البته بیش‌ترین میزان تغذیه دشت نیز ناشی از نفوذ آب بارندگی می‌باشد. این دشت از رسوبات آبرفتی دوران چهارم تشکیل شده و سازندهای تشکیل‌دهنده این بخش شامل دشت‌سرهای کم ارتفاع با تراس‌های رسوبی ودشت‌های رسی است که مخازن اصلی آب زیرزمینی منطقه در این بخش‌ها واقع شده‌اند. بیش‌ترین مساحت کاربری این دشت مربوط به اراضی لخت و سپس اراضی شور و کشاورزی است. این دشت از جنوب با کوه‌های جبال‌بارز که از مرتفع‌ترین کوه‌های استان کرمان است محصور می‌گردد و کوه کشیت در قسمت شمال‌غربی و غرب دشت و لوت زنگی احمد در شمال آن قرار دارد (Lashkaripour and Salari, 2007). شکل (۱)، موقعیت دشت بم را در نقشه ایران، استان کرمان و محل نقاط نمونه‌برداری (چاه‌ها) را در داخل واحدهای کاری ایجادشده نشان می‌دهد.

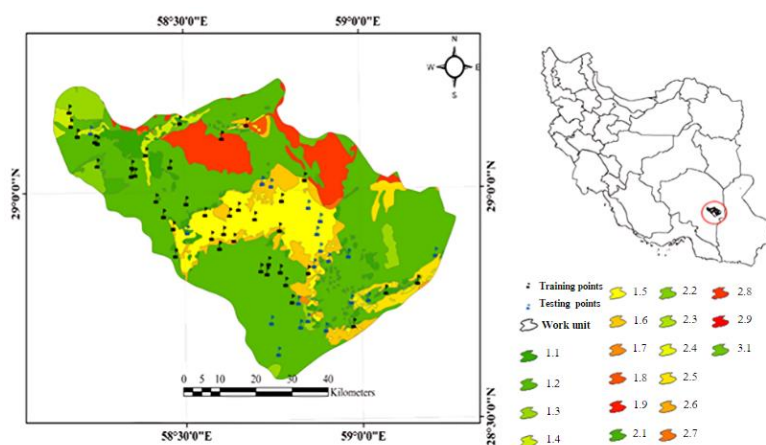


Figure 1. Location of selected wells in the study area

۳. روش تحقیق

در این مطالعه با توجه به چارچوب طراحی شده در شکل (۲)، ابتدا اقدام به جمع‌آوری داده‌های کیفی آب در منطقه مورد مطالعه شد. به این منظور، تعداد ۶۰ حلقه چاه که دارای پراکنش مناسب در منطقه مورد مطالعه بودند، انتخاب گردیدند. به دلیل این که دامنه مقدار عددی پارامترهای کیفی استفاده شده در این پژوهش مانند (Ca, Mg, Cl, TDS, SO₄, EC, pH, HCO₃, Na و Th) متفاوت است، پس از بازسازی داده‌ها به منظور آماده‌سازی برای انجام آنالیز مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی، تمام داده‌ها بین صفر و یک استاندارد شده‌اند.

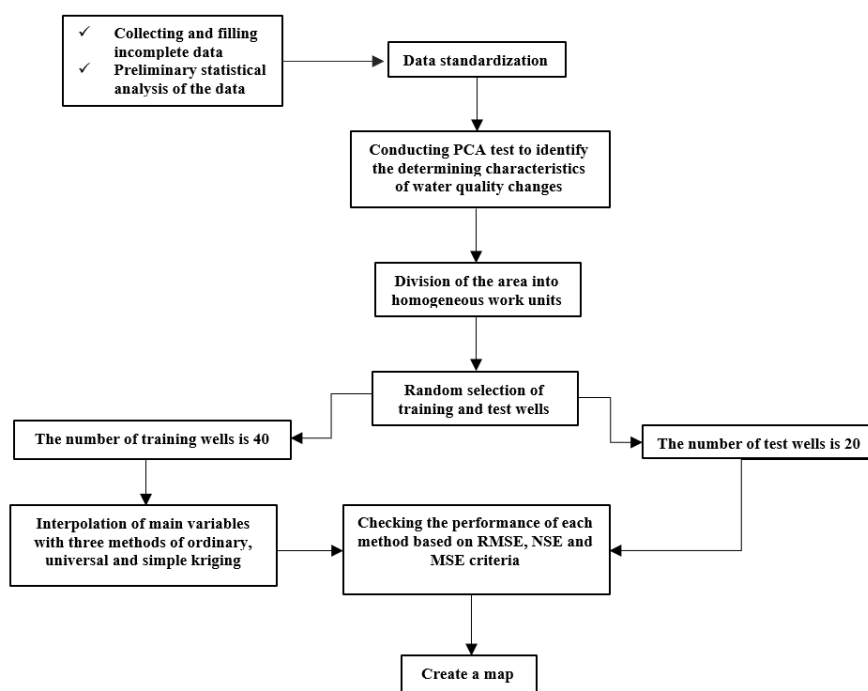


Figure 2. The research flowchart

سپس، به منظور شناسایی متغیرهای مهم سنجش کیفیت آب زیرزمینی از آزمون PCA استفاده گردید. به عبارتی، روش PCA برای انتخاب مجموعه‌ای از حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی که می‌توانند جایگزینی برای بررسی سایر پارامترها باشد استفاده شد. به عبارتی دیگر، با انجام این آزمون و تعیین یک یا چند متغیر به عنوان تغییرپذیرترین متغیرها دیگر نیاز به بررسی متغیرهای اضافی دیگر نیست، به دلیل این که متغیرهای معرفی شده توسط PCA حداکثر تغییرات سایر متغیرها را توجیه می‌کنند. این روش با استخراج مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از ماتریس همبستگی شروع شده و سپس مقادیر ویژه^۴ کم کنار گذاشته می‌شود (Davis and Sampson, 1986) که مقادیر ویژه سهم هر عامل به واریانس کل را محاسبه می‌کند. سهم عاملی که مقادیر ویژه بزرگ‌تر داشته باشد بیش‌تر می‌باشد. واریانس تبیین شده برحسب درصدی از کل واریانس و درصد تجمعی است. مقادیر ویژه هر عامل، نسبتی از واریانس کل متغیرهاست که توسط آن عامل تبیین می‌شود. مقدار ویژه از طریق مجموع مجزورات بارهای عاملی مربوط به تمام متغیرها در آن عامل قابل محاسبه است، از این‌رو، این مقادیر اهمیت اکتشافی عامل‌ها را در ارتباط با متغیرها نشان می‌دهد. به طوری که پایین بودن این مقدار برای یک عامل به این معنی است که آن عامل نقش اندکی در تبیین واریانس

متغیرها داشته است (Zare-Chahouki, 2010). متغیرهای استفاده شده برای آزمون PCA شامل EC , SO_4 , TDS , Cl , Mg , Ca , pH , HCO_3 , Na و Th می باشد. در ادامه به منظور تشریح پیوستگی مکانی متغیرهای اصلی انتخاب شده در مرحله قبل، نیم متغیرنمای داده‌ها به گونه‌ای جداگانه در محیط نرم‌افزاری GS+ ترسیم گردید (Hosnikip, 1999; Li et al., 2013).

در زمین آمار برای ایستا نمودن داده‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. که پس از آنالیز نیم تغییرنما و تشخیص وجود روند در داده‌ها یکی از کارهایی که برای ایستا نمودن داده‌ها می‌توان انجام داد، تقسیم منطقه به واحدهای کاری می‌باشد. این عمل می‌تواند هنگامی صورت گیرد که منطقه وسیع بوده و تعداد داده‌ها نیز کافی باشد. به طوری که در هر واحد همگن تعداد نقطه کافی برای بررسی‌های دوباره و برآورد موجود باشد. برای ایجاد واحدهای کاری، سه لایه زمین‌شناسی، کاربری اراضی و خوشه‌بندی مربوط به فرارگیری هر چاه، براساس پارامترهای کیفی آب در محیط Arc GIS9.3 و با دستور overly استفاده شد (شکل ۱). به منظور بررسی تشابه موجود بین چاه‌های منطقه مورد مطالعه و طبقه‌بندی آن‌ها با نرم‌افزار SPSS، داده‌های مربوط به ۱۰ پارامتر اندازه‌گیری شده توسط شاخص فاصله اقلیدسی نسبی (به عنوان معیار فاصله‌ای) و به روش واریانس حداقل، طبقه‌بندی خوشه‌ای گردید و نتایج حاصله در ایجاد واحدهای همگن مورد استفاده قرار گرفت. در این پژوهش چاه‌های موجود در سه خوشه قرار گرفته است. بعد از تقسیم منطقه به واحدهای همگن، اقدام به انتخاب تصادفی ۶۰ درصد از تعداد چاه برای آموزش مدل‌ها و ۴۰ درصد برای آزمایش مدل‌ها شد. سپس با استفاده از سه روش درون‌یابی کریجینگ معمولی، ساده و جهانی و اتخاذ مدل مناسب براساس نتایج جدول (۴)، اقدام به درون‌یابی متغیر مهم در کل دشت مورد مطالعه گردید.

در انتها، به منظور مقایسه روش‌های میان‌یابی استفاده شده در این پژوهش و انتخاب مناسب‌ترین روش زمین آمار، از تکنیک اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های آموزشی و آزمایشی استفاده شد. در ارزیابی انجام شده ابتدا ۶۰ درصد چاه‌ها انتخاب و با سه روش (OK، UK و SK) درون‌یابی برای متغیرهایی که با توجه به آزمون PCA به عنوان متغیر اصلی کیفیت آب زیرزمینی تشخیص داده شده‌اند، انجام گرفت. سپس با ۴۰ درصد باقی مانده چاه‌های که در قسمت آموزش مدل استفاده نشده‌اند اقدام به تست هر کدام از مدل‌ها گردید. در پایان با داشتن مقادیر واقعی و برآورد شده می‌توان خطا و انحراف روش‌های استفاده شده را برآورد کرد. معیارهای گوناگونی برای این کار وجود دارد که می‌توان به ریشه دوم میانگین مربع خطا^۵ و میانگین مطلق خطا^۶ و ضریب ناش^۷ - ساتکلیف اشاره کرد که معادله آن‌ها به صورت روابط (۱)، (۲) و (۳) می‌باشد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2}{n}} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad \text{رابطه ۲}$$

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - \bar{Z}(x_i))^2} \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن‌ها، $Z^*(x_i)$ و $Z(x_i)$ به ترتیب مقدار تخمین زده شده و مقدار واقعی متغیر Z ، میانگین مقادیر مشاهداتی $\bar{Z}(x_i)$ و n تعداد اندازه‌گیری‌های انجام شده در محدوده مورد مطالعه می‌باشد (Marofi et al., 2010). طبیعی است بهترین روش، آن است که دارای کمترین مقدار $RMSE$ ، MAE و همچنین ضریب NSE نزدیک به یک باشد.

۴. نتایج و بحث

جدول (۱)، مقادیر ویژه و واریانس متناظر با هر عامل را نشان می‌دهد. مقادیر ویژه اولیه برای هر یک از عامل‌ها در قالب مجموعه واریانس تبیین شده برآورد شده است. پس براساس روش PCA، یک عامل اصلی شناسایی شد که ۸۸/۸۰۷

درصد از واریانس کل داده‌ها را توجیه می‌کند که توسط دو متغیر TDS و EC ارائه شده است. جدول (۲)، سهم متغیرها را در عامل‌ها قبل از چرخش نشان می‌دهد. این اعداد از یک سو نشان‌دهنده توانایی عامل تعیین‌شده در تبیین واریانس متغیرهای مورد مطالعه و از سوی دیگر نشان‌دهنده تناسب متغیرها برای تحلیل عاملی می‌باشد.

Table 1. Total variance values extracted for existing factors

Factors	Initial eigenvalues		
	Total	Percentage of variance	Cumulative variance percentage
1	8.881	88.807	88.807
2	0.605	6.048	94.855
3	0.321	3.207	98.062
4	0.119	1.185	99.247
5	0.057	0.575	99.821
6	0.014	0.144	99.966
7	0.002	0.023	99.988
8	0.001	0.012	100
9	8-E356/3	7-E356/3	100
10	16-366 E/6-	16-366 E/6-	100

Table 2. Matrix of chemical components of groundwater

Chemical variables of water	Th	SAR	Na	Mg	Ca	Cl	So ₄	pH	TDS	Ec
Components	0.11	0.09	0.11	0.1	0.1	0.11	0.11	-0.07	0.12	0.12

جدول (۳)، مقادیر برخی از آماره‌های مربوط به TDS و EC را برای تمام چاه‌ها نشان می‌دهد. نتایج نشان دادند که TDS و EC هر دو دارای ضریب تغییرات بالایی می‌باشند. وضعیت توزیع داده‌ها برای کارهای آماری و از جمله زمین آمار از اهمیت قابل توجهی برخوردار می‌باشد. در صورت نرمال بودن یا نزدیک به نرمال بودن توزیع داده‌ها، روش‌های تخمین مورد استفاده در زمین آمار از دقت بالایی برخوردار خواهند بود. مقادیر ضریب چولگی نشان داد که وضعیت توزیع هر دو متغیر از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند و ضریب چولگی آن‌ها بین -۱ و +۱ نمی‌باشد (Bameri *et al.*, 2012)، لذا با استفاده از روش لگاریتم‌گیری توزیع داده‌ها نرمال گردید.

Table 3. The results of the statistical analysis of the groundwater quality

Variable	Kurtosis	Skewness	Minimum	Maximum	Coefficient Variation	Mean	Standard deviation
TDS	10.98708	3.14661	220	6838	1.236681	1030	1273.782
EC	10.98868	3.14661	399	10520	1.236846	1584.375	1959.628

به منظور ایجاد پیوستگی مکانی مناسب، منطقه به واحدهای همگن تقسیم شد و نمونه‌های آموزشی و آزمایشی به صورت تصادفی از داخل واحدها انتخاب گردید.

جدول (۴) ویژگی‌های مربوط به هر یک از واحدهای کاری ایجاد شده و تعداد چاه آموزشی و آزمایشی انتخابی از هر کدام را نشان می‌دهد. بزرگ‌ترین واحد کاری واحد ۱/۲ با ۲۴۳۶ کیلومتر مربع است که در آن زمین‌های بایر در ترانس‌های آبرفتی قرار گرفته‌اند. تعداد ۴۰ حلقه چاه به صورت تصادفی از داخل واحدهای کاری مختلف انتخاب شده است که واحد ۱/۲ با ۱۷ و واحد ۱/۵ با ۱۱ حلقه بیش‌ترین تعداد چاه را در مرحله آزمایش دارا بوده‌اند. در مرحله آزمایش از نه واحد کاری چاه انتخاب شده است و مابقی واحدها چاهی برای آموزش مدل نداشته‌اند. در مرحله آزمایش نیز از ۲۰ حلقه چاه استفاده گردید که بیش‌ترین تعداد آن‌ها از داخل واحدهای کاری ۱/۲ و ۱/۵ بوده است. در مجموع از بین ۱۹ واحد کاری هفت واحد دارای چاه در مرحله آزمایش بوده‌اند. ذکر این نکته لازم است که واحدهای ۲/۲ و ۲/۸ تنها واحدهایی هستند که در مرحله آموزش چاه از آن‌ها انتخاب شده اما در آزمایش هیچ چاهی ندارند.

Table 4. Characteristics of work units and the number of selected wells from each unit in the training and testing stages

Description	Number of selected wells		Area (square kilometers)	Work unit
	Testing	Training		
Agricultural use in low alluvial terrace	2	3	204	1.1
Barren land on a low alluvial terrace	7	17	2436	1.2
Moderate and poor pastures in low alluvial terrace	1	1	132	1.3
Salt lands in low alluvial terrace	1	2	81	1.4
Agriculture in the clay plain	7	11	474	1.5
Barren in the clay plain	1	2	256	1.6
Poor and moderate pastures in the clay plain	0	0	5	1.7
Salty lands in the clay plain	0	0	15	1.8
Agriculture in the high plains	0	0	0	1.9
Barren in the high plain	0	0	39	2.1
Poor and moderate pastures in the high plains	0	1	37	2.2
Salty lands in the high plains	0	0	2	2.3
Agriculture in the dunes	0	0	18	2.4
Barren in the sand dunes	1	2	113	2.5
Poor and moderate pastures in the sand hills	0	0	2	2.6
Salt lands in andesitic tuffs	0	0	9	2.7
Agriculture in andesite tuffs	0	1	385	2.8
Barren in andesitic tuffs	0	0	0	2.9
Poor and moderate pastures in andesite tuffs	0	0	22	3.1

سپس براساس جدول (۵)، مدل کروی به عنوان بهترین واریوگرام تجربی در درون یابی انواع روش های کریجینگ شامل (OK، UK و SK) شناسایی شد. اساس انتخاب مدل مناسب برای برازش بر روی نیم تغییرنمای تجربی مقدار \hat{RSS} بوده، که باید کمتر از 0.5 باشد. این نسبت معرف آن است که چه مقدار از کل تغییرپذیری را اثر قطعه ای توجیه می کند (Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2009). شکل های (۳) و (۴) نیم متغیرنمای مربوط به پارامتر شوری و کل مواد محلول را برای روش کریجینگ معمولی با مدل کروی نشان می دهد. جدول (۴) مدل مناسب برازش داده شده بر روی واریوگرام و عامل های مربوطه را نشان می دهد.

Table 5. Characteristics of the fitted fit variogram for the qualitative factors

Variable	Model	Nugget (co)	Sill (co+c)	Range (m)	Co/(co+c)	RSS
EC	OK	0.003	1.14	39130.7	0.26	0.106
TDS	OK	0.0029	1.14	39130.7	0.25	0.112
EC	SK	0.007	1.157	36673.3	0.6	0.129
TDS	SK	0.007	1.157	36676.3	0.6	0.129
EC	UK	0.003	1.14	39130.7	0.26	0.106
TDS	UK	0.0029	1.14	39130.7	0.25	0.106

همان طور که از شکل واریوگرام ها مشخص است و با توجه به توضیحات این قسمت در بخش مواد و روش ها پیوستگی مکانی و ایستایی در همه مدل ها به بهترین حالت ایجاد شده است. نتایج ارزیابی صحت درون یابی مقادیر غلظت املاح محلول و شوری در جدول های (۶) و (۷) ارائه شده است. براساس معیارهای ارزیابی استفاده شده، تفاوت بین دو روش OK و UK در درون یابی پارامترهای EC و TDS قابل چشم پوشی است و این دو روش در هر دو پارامتر بررسی شده در مرحله آموزش بهترین عملکرد را داشته اند. شکل های (۵) و (۶) مقادیر مشاهداتی و تخمین زده شده با سه روش استفاده شده را به ترتیب برای پارامترهای EC و TDS نشان می دهد. هم چنین شکل های (۷) تا (۱۰) نقشه های پهنه بندی عناصر مورد بررسی با مناسب ترین روش های به دست آمده برای هر پارامتر را نشان می دهند.

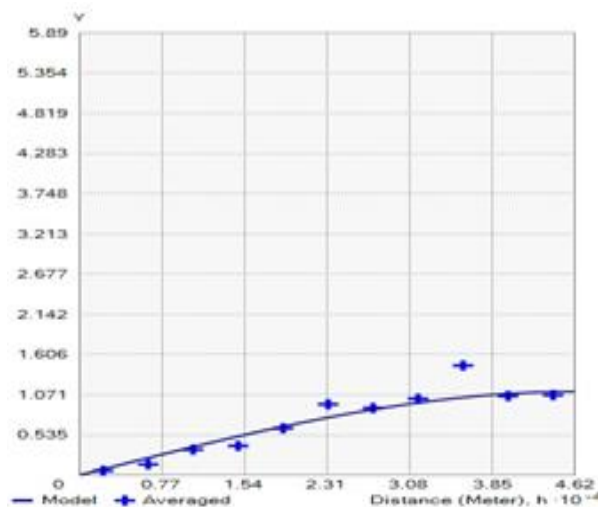


Figure 3. Experimental variable related to TDS parameter in OK method

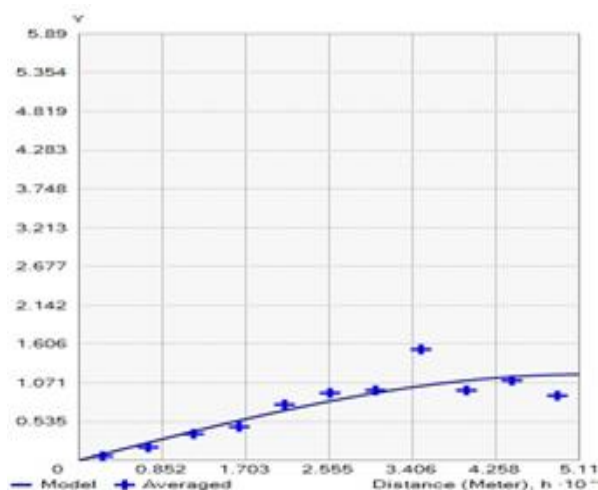


Figure 4. Experimental variable related to TDS parameter in OK method

Table 6. The results of mutual evaluation of training and test wells in different geostatistical methods of EC estimation

Assessment stage	Model	R ²	RMSE	MAE	NSE
Training	KO	0.99	8.03	5.29	0.99
	KS	0.99	8.13	5.41	0.99
	KU	0.99	8.03	5.29	0.99
Test	KO	0.76	422.54	153.35	0.48
	KS	0.73	445.02	158.82	0.42
	KU	0.76	423.76	153.87	0.47

Table 7. The results of mutual evaluation of training and test wells in different geostatistical methods of TDS estimation

Assessment stage	Model	R ²	RMSE	MAE	NSE
Training	KO	0.99	95.17	19.52	0.99
	KS	0.99	108.09	47.93	0.99
	KU	0.99	95.19	19.62	0.99
Test	KO	0.76	61.91	199.89	0.47
	KS	0.77	267.36	206.84	0.5
	KU	0.75	274.75	198.04	0.48

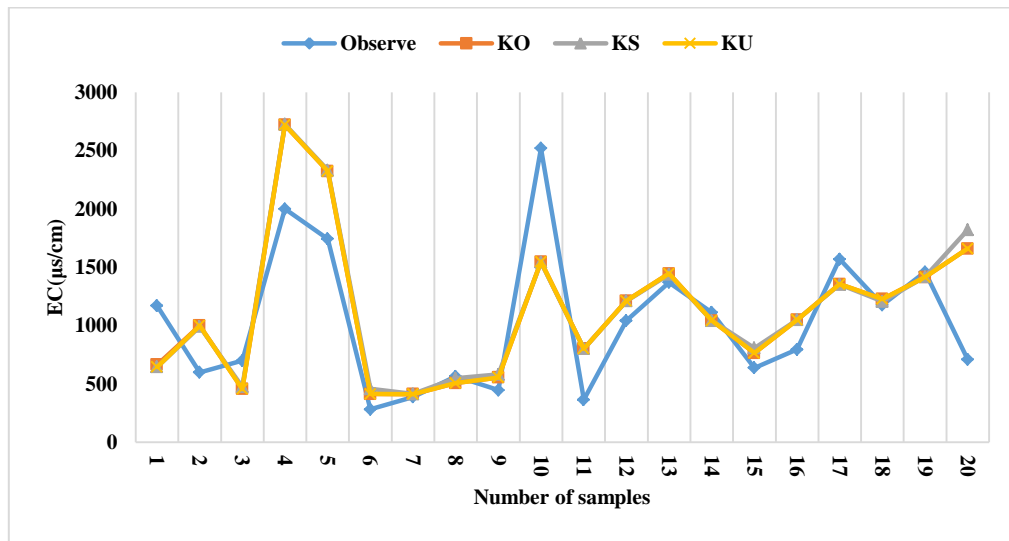


Figure 5. Evaluation of different EC parameter interpolation methods in the test phase

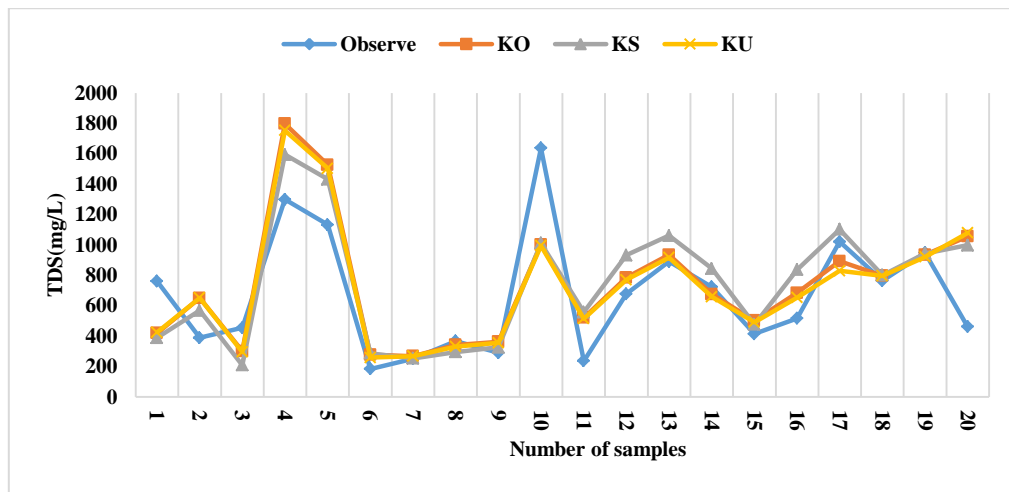


Figure 6. Evaluation of different TDS parameter interpolation methods in the test phase

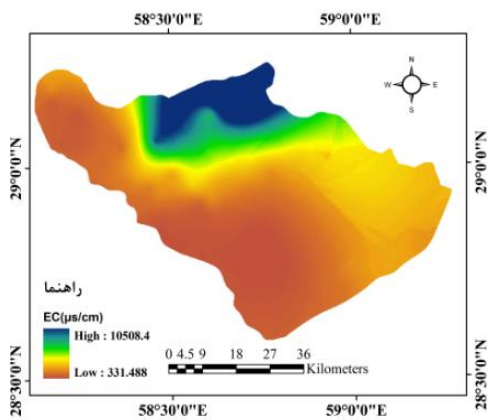


Figure 7. Spatial distribution of EC changes, ordinary kriging

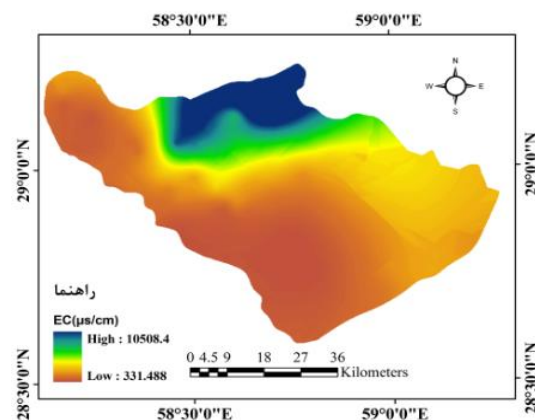


Figure 8. Spatial distribution of EC changes, universal kriging

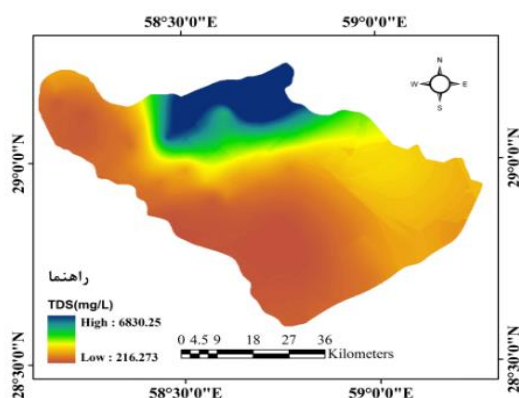


Figure 9. Spatial distribution of TDS changes, ordinary kriging

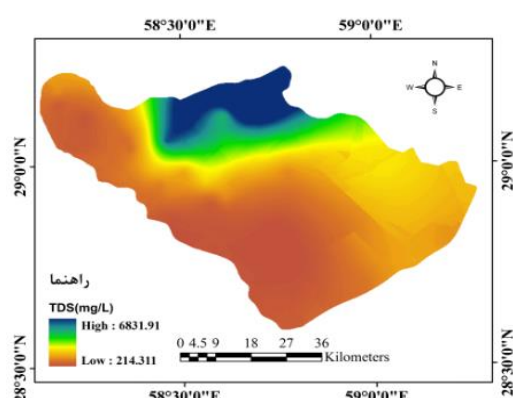


Figure 10. Spatial distribution of TDS changes, universal kriging

۵. نتیجه گیری

نتایج جدول (۲) نشان داد که براساس قابلیت تبیین واریانس، یک عامل شناسایی شده است که مقدار واریانس تبیین کننده آن ۸۸/۰۷ درصد از کل واریانس در بین تمام عامل‌ها می‌باشد. طبق جدول (۳)، دو پارامتر EC و TDS به‌خاطر دارابودن بیش‌ترین میزان همبستگی معنی‌دار با عامل اول (۰/۱۲) در آن عامل قرار گرفته‌اند. پس این دو متغیر، متغیرهای اصلی توجیه‌کننده تغییرات سایر پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت بم می‌باشند. بنابراین از بین تمام متغیرهای اندازه‌گیری شده آب فقط متغیرهای مهم (EC و TDS) در نظر گرفته شده است و این نتیجه تنها برای منابع آب زیرزمینی شهر بم و متغیرهای انتخاب شده در این پژوهش معتبر می‌باشد. بنابراین، این تجزیه و تحلیل برای داده‌های کیفی در مناطق مختلف، متفاوت است و قابل تعمیم به دشت دیگر نمی‌باشد که با نتایج پژوهش Ouyang (2005) بر روی کیفیت آب رودخانه جانز در فلوریدا و Rasi Nezami *et al.* (2013) در رودخانه کرخه مطابقت دارد.

نتایج بررسی ویژگی‌های موردنظر نشان داد که متغیرهای TDS و EC دارای چولگی و ضریب تغییرات بالایی می‌باشند (جدول ۳) که به ترتیب از طریق بهره‌گیری از لگاریتم داده‌ها و ایجاد منطقه به واحدهای کاری همگن این موارد اصلاح گردید. به طوری که منطقه براساس کاربری اراضی، زمین‌شناسی و خوشه‌بندی به ۱۹ واحد کاری تقسیم شد و سپس به صورت تصادفی ۶۰ درصد چاه‌ها برای آموزش و مابقی برای آزمایش از داخل واحدهای کاری انتخاب شده‌اند. بیش‌ترین مساحت منطقه، مربوط به واحد کاری ۱/۲ است، که شامل زمین بایر در تراس آبرفتی کم ارتفاع می‌باشد. نکته قابل توجه این می‌باشد که بیش‌ترین تراکم چاه‌های مورداستفاده (۴۲ حلقه) در هر دو مرحله مربوط به واحدهای کاری ۱/۲ و ۱/۵ (کشاورزی در دشت رسی) می‌باشد. نتایج ترسیم واریوگرام و برازش هر یک از ویژگی‌های مورد مطالعه نشان داد که داده‌ها از ساختار استحکام فضایی متوسط تا قوی برخوردار هستند (مقدار مؤلفه $C_0/(C_0+C)$ کم‌تر از ۰/۲۵ که در جدول (۵) نشان داده شده است). این موضوع نشان‌دهنده دقت بالا و پیوستگی مکانی مدل‌های برازش داده شده است. همچنین در آنالیز نیم تغییرنماها (شکل‌های ۳ و ۴ مشخص شده است که آستانه در هر دو متغیر ثابت شده است و این به معنی ایستادن داده‌ها می‌باشد).

نتایج حاصل از ارزیابی نقاط آموزشی (جدول ۶) نشان داد که تشخیص روش مناسب‌تر از بین روش KO و KU برای درون‌یابی پارامتر EC در دشت بم غیرممکن است، چونکه مقادیر معیارهای ارزیابی در هر دو روش کاملاً یکسان بوده‌است. اما در مرحله آزمایش مدل‌های مختلف با نقاط استفاده‌نشده در درون‌یابی برای این پارامتر مشخص شد که روش KO دارای عملکرد بهتری بوده است، به طوری که، میزان ضرایب RMSE و MAE در این روش به ترتیب برابر

۴۲۲/۲۴ و ۱۵۳/۳۵ میکروزیمنس بر سانتی متر بوده که به ترتیب دارای اختلاف ۱/۲۲ و ۰/۵۲ میکروزیمنس بر سانتی متر کم تر از روش KU می باشد. در مجموع، در پژوهش حاضر روش KO دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش های استفاده شده می باشد، که با پژوهش های *Delbari et al.* (2013)، *Jahanshahi et al.* (2014) و *Soleimani et al.* (2012) مطابقت دارد. اما نکته قابل ذکر در این بررسی، خطا در پیش بینی مقادیر حدی شوری در هر سه مدل است، به طوری که در شکل (۵) نمونه های شماره ۴، ۱۰، ۱۱، ۱۷ و ۲۰ که دارای مقادیر حدی هستند در تخمین صورت گرفته برای هر سه مدل با خطا همراه بوده اند. همان طور که از شکل های (۷) و (۸) مشخص است، میزان شوری در قسمت شمال و شمال شرقی دشت در دو روش KO و KU بیش تر از سایر نقاط بوده است، که با تغییرات کاربری اراضی منطقه انطباق مناسبی داشته است، به گونه ای که فقط در این نقاط کاربری ۱/۴ که دارای اراضی شور است به چشم می خورد. به دلیل تماس مداوم آب با لایه اراضی شور میزان املاح این مناطق افزایش پیدا کرده است.

عملکرد روش های استفاده شده براساس جدول (۷) در بررسی متغیر TDS در مرحله آموزش نسبت با نتایج به دست آمده از متغیر EC متفاوت بوده، به طوری که مقادیر RMSE و MAE در روش KO بهترین عملکرد را نشان داده است و تمایز روش مناسب از بین سه روش مذکور نسبت به EC راحت تر صورت می گیرد. در مرحله آزمایش متغیر TDS با مدل های استفاده شده، KO دارای مقادیر RMSE و NSE کم تر بوده است. اما همانند شوری در این متغیر نیز تخمین مقادیر حدی (نمونه های شماره ۱، ۴، ۱۰، ۱۱ و ۲۰ در شکل ۶) در هر سه روش با خطا روبه رو بوده است. پراکنش مکانی TDS نیز همانند EC بوده و در شمال و شمال شرقی دشت افزایش چشمگیر داشته است که دلیل این موضوع را می توان به وجود لایه شور در اراضی (واحد ۱/۴) منطقه و برداشت بیش از حد به واسطه وجود کشاورزی های زیاد در این مناطق دانست.

۶. پی نوشت ها

1. Ordinary Kriging
2. Universal Kriging
3. Simple Kriging
4. Eigenvalue
5. Root Mean Square Error
6. Mean Absolute Error
7. Nash-Sutcliffe
8. Residual Sums of Squares

۷. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Askari, M., Mosaedi, A., Dehghani, A. A., & Halghi, M. M. (2009). Application of Geostatistics and GIS analysis, in study of groundwater quality spatial variability, Case study: Qazvin aquifer, Iran. *International Conference on Water Resources, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.* (In Persian).
- Azhdari, Z., & Hosseini, S. Z. (2018). Spatial variations of groundwater quality parameters using geostatistics (Case study: Segsi Plain, Isfahan). *Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 63-80. (In Persian).
- Bakhshodeh, M., & Golestani Kermani, S. (2019). Evaluation of kriging and cokriging interpolation methods to determine the spatial changes of some groundwater quality parameters of Bardsir Plain. *15th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction.* (In Persian).

- Bameri, A., Khormali, F., Kiani, F., & Dehghani, A. A. (2012). Spatial variability of soil organic carbon on different slope positions of loess hillslopes in Toshan area, Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 19(2), 43-61. (In Persian).
- Bordbar, M., Neshat, A., Javadi, S., Pradhan, B., Dixon, B., & Paryani, S. (2022). Improving the coastal aquifers' vulnerability assessment using SCMAI ensemble of three machine learning approaches. *Natural Hazards*, 110(3), 1799-1820. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05013-z>
- Davis, J. C., & Sampson, R. J. (1986). *Statistics and data analysis in geology* (Vol. 646). Wiley New York.
- Delbari, M., Afrasiab, P., & Salari, M. (2013). Mapping water salinity and sodicity using selected geostatistical methods, case study: Kerman plain. *Water Resources Engineering*, 6(No16/Spring 2013), 11-24.
- Eftekhari, M., Eslaminezhad, S. A., Haji Elyasi, A., & Akbari, M. (2021). Geostatistical Evaluation with Drinking Groundwater Quality Index (DGWQI) in Birjand Plain Aquifer. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 267-278. (In Persian).
- Eghbalian, S., & Bahmani, O. (2020). Study of Local and Temporal Changes of Groundwater Quality Standards of Hamedan-Bahar Plain Using (GIS) over a 10 Year Period. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(3), 83-98. (In Persian).
- El-Hames, A. S., Hannachi, A., Al-Ahmadi, M., & Al-Amri, N. (2013). Groundwater quality zonation assessment using GIS, EOFs and hierarchical clustering. *Water Resources Management*, 27, 2465-2481.
- Hassan, J. (2014). A Geostatistical approach for mapping groundwater quality (Case Study: Tehsil Sheikhpura). *Int J Sci Res*, 3(4), 239-245.
- Hassanzadeh Nafooti, M., & Emami Maybodi, E. (2018). Temporal and spatial variations of groundwater quality of Marvast Plain. *Watershed Engineering and Management*, 10(1), 121-132. (In Persian).
- Hosnipak, A. (1999). *Geostatistics* (First). Tehran University Publications. (In Persian).
- Jahanshahi, A., Rohimoghaddam, E., & Dehvari, A. (2014). Investigating groundwater quality parameters using GIS and geostatistics (case study: Shahr-Babak plain aquifer). *Water and Soil Science*, 24(2), 183-197. (In Persian).
- Khan, M., Almazah, M. M. A., Ellahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A. Y., & Zaman, B. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853>
- Kumar, M., Sunitha, V., & Reddy, M. (2013). Determination of an Optimal Interpolation Technique by Using Ordinary Kriging to Represent Spatial Distribution of Groundwater Quality Indices at Ysr District, Andhra Pradesh, India. *Advances in Agriculture, Sciences and Engineering Research*, 3, 1293-1310.
- Lashkaripour, G., & Salari, H. (2007). An investigation on the quantitative effect of the 2003 Bam earthquake on Bam plain aquifer. *Geotechnical Geology*, 3(1), 52-59. (In Persian).
- Li, J., Zhang, Z., Feng, Y., & Zhang, X. (2013). *Use of genetic-algorithm-optimized back propagation neural network and ordinary kriging for predicting the spatial distribution of groundwater quality parameter* (Z. Zhu, Ed.; p. 87684V). <https://doi.org/10.1117/12.2011857>
- Malakootian, M., & Nouri, J. (2010). Chemical Variations of Ground Water Affected by the Earthquake in bam region Malakootian, M. *International Journal of Environmental Research*, 4(3), 443-454. https://doi.org/10.22059/ijer.2010.229_80 (In Persian).
- Marofi, S., A. Toranjeyan, & Zare Abyaneh. H. (2010). Evaluation of geostatistical methods for estimating electrical conductivity and pH of stream drained water in Hamedan-Bahar Plain. *Journal of Water and Soil Conservation*, 16(2), 169-187. (In Persian).
- Mohammadi, A., Yousefi, H., & Mahmoudi Aznavah, A. (2024). Evaluation of Tehran Province Livestock Production from Water Footprint Prospective. *Environmental Energy and Economic Research*, 1-16.
- OUYANG, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research*, 39(12), 2621-2635. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.04.024>
- Paryani, S., Neshat, A., Pourghasemi, H. R., Ntona, M. M., & Kazakis, N. (2022). A novel hybrid of support vector regression and metaheuristic algorithms for groundwater spring potential mapping. *Science of The Total Environment*, 807, 151055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151055>
- Pirzadeh, B., & Asvar, T. (2020). Determining spatial and temporal variations of groundwater quality parameters using GIS and interpolation methods (case study: Sirjan Plain). *Irrigation and Water Engineering*, 11(2), 266-275. (In Persian).

- Rasi Nezami, S., Nazariha, M., Baghvand, A., & Moridi, A. (2013). Karkheh River Water Quality Using Multivariate Statistical Analysis and Qualitative Data Variations. *Mui-Jhsr*, 8(7), 1280-1292. <http://hsr.mui.ac.ir/article-1-486-en.html> (In Persian).
- Saghazadeh, N. (2022). Comparison and Applications of Geostatistical and Determined Methods for Groundwater Quality Zonation of Drinking. *Desert Ecosystem Engineering*, 2(3), 55-66. (In Persian).
- Soleimani, K., Zandi, J., & Zandi, S. (2012). Evaluating the efficiency of geostatistical methods for mapping spatial distributions of springs TDS and pH (Case Study: Mirdeh Watershed, Kurdistan). *Environmental Study*, 38(4), 57-66. (In Persian).
- Taghizadeh-Mehrjardi, rohollah, Zareian-Jahromi, mojtaba, Mahmoodi, S., Heidari, A., & Sarmadian, freedom. (2009). Investigation of Interpolation Methods to Determine Spatial Distribution of Groundwater Quality in Rafsanjan. *Ijwmse*, 2(5), 63-70. <http://jwmsei.ir/article-1-94-fa.html> (In Persian).
- Yousefi, H., Khademi, V., & Mahmoudi Aznaveh, A. (2023). Feasibility of wetland technology in biological wastewater treatment Tehran Province villages. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 10(2), 215-229. <https://doi.org/10.22059/ije.2023.362170.1748> (In Persian).
- Zare-Chahouki, M. A. (2010). Data analysis in natural resources research with SPSS software. *Academic Center of Education Culture and Research-Tehran Branch: Tehran. Iran.* (In Persian).
- Zehtabian, G. H., Janfaza, E., & Nematollahi, M. J. (2010). Modeling of ground water spatial distribution for some chemical properties (case study in Garmsar watershed). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 17(1), 61-73. (In Persian).
- Zimmerman, D., Pavlik, C., Ruggles, A., & Armstrong, M. P. (1999). An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting. *Mathematical Geology*, 31(4), 375-390. <https://doi.org/10.1023/A:1007586507433>