نشریه علمی
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران
Iran-Watershed Management Science & Engineering
Vol. 19, No. 68, Spring 2025
سال نوزدهم- شماره ۶۸- بهار ۱۴۰۴

Spatial-Temporal Assessment of Groundwater Quality Characteristics for Agricultural Use in Malayer Plain

Samira Al-Sadat Hedayati[1], Omid Bahmani *[2], Peyman Tahmasbi[3], Fatemeh Dalavand[4], Seyed Abolfazl Hosseini[5]

Received: 03-09-2024, Revised: 24-09-2024, Accepted: 29-10-2024, Published: 09-06-2025
https://doi.org/10.22034/19.68.6

Extended Abstract

Introduction

Groundwater is a vital resource for agricultural water supply, particularly in arid and semi-arid regions. Overextraction of groundwater aquifers has led to both qualitative and quantitative degradation, reducing their potential for sustainable water supply. Monitoring spatial and temporal variations in agricultural water quality is essential for efficient utilization and aligning water quality parameters with agricultural usage. Geostatistics has emerged as a powerful tool across various disciplines, especially for interpolation and estimation tasks. Numerous methods are available for studying and mapping groundwater quality variations, with their accuracy depending on regional conditions and data availability. Previous research highlights the reliability of interpolation methods in generating groundwater quality maps. Thus, creating groundwater quality maps using local data and appropriate spatial analysis methods is vital for water resource management. This study evaluates geostatistical methods to analyze spatial and temporal variations in groundwater quality parameters for agricultural purposes in Malayer Plain, Hamadan Province.

Methodology

The study area encompasses the main aquifer of Malayer Plain in Hamadan Province, with an area of 518.63 km². Data from 31 wells, provided by the Hamadan Regional Water Company, were used to analyze groundwater quality parameters. These parameters included EC, pH, HCO_3, CL, and SAR, measured during June and September over a five-year period (2016–2020). Zoning maps were created using Inverse Distance Weighting (IDW) and Kriging (Ordinary, Universal, and Simple) methods with exponential, Gaussian, and spherical variograms in ArcGIS 10. The accuracy of the zoning methods was evaluated using statistical metrics such as Mean Error (ME), Root Mean Square Error (RMSE), and Root Mean Square Standardized Error (RMSSE). The best interpolation method for each parameter was selected based on these metrics. Temporal variations in groundwater quality parameters were assessed by generating algebraic maps using the Raster Calculator tool, dividing the parameter values for June

1. M.Sc. Graduate, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Corresponding Author: omid.bahmani@basu.ac.ir
3. Ph.D. Students of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
4. Ph.D. Students of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
5. Ph.D. Students of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.22034.19.68.78]

and September 2020 by those from 2016. Continuous classified maps were created using the Wilcox agricultural water quality index implemented via Python scripting in ArcGIS 10.

Results and Discussion

In June, the most suitable interpolation methods for each parameter were Ordinary Kriging, Universal Kriging, IDW, and Ordinary Kriging, respectively. In September, the preferred methods for EC, pH, HCO_3, CL, and SAR were Ordinary Kriging, Universal Kriging, IDW, Ordinary Kriging, and IDW, respectively. Groundwater quality was classified into four standard classes—excellent, good, medium, and poor—based on EC and SAR. Maps of agricultural water quality standards were developed for June and September. The SAR parameter exhibited a stable trend in June but showed significant fluctuations in September, particularly in 2017. For EC, despite an increasing trend in both months, values were consistently lower in June compared to September. According to the Wilcox index, areas classified as "good" quality decreased by 4.9% from 2016 to 2020 in June and by 12.3% in September.

Conclusion

This study utilized GIS tools to determine the quality standards for agricultural water and analyze spatial-temporal variations in groundwater quality parameters in the saturated aquifer of Malayer Plain. Python scripting was employed to produce classified raster maps based on the Wilcox index. The results indicated that the geostatistical methods used were sufficiently accurate for the study area. Kriging and IDW provided the best interpolation accuracy. The analysis covered five years of data for June and September, focusing on EC, pH, HCO_3, CL, and SAR. The results showed declining groundwater quality, with increased concentrations of CL, HCO_3, and EC over time, while slight reductions were observed for pH and SAR. None of the areas were classified as "poor" according to the Wilcox index, but central and southeastern parts of the aquifer fell into the "medium" class, indicating vulnerability to critical conditions. Given the importance of groundwater quality for agriculture, the environment, and the economy, the continued application of interpolation methods can serve as a fast and effective approach for groundwater quality monitoring in Malayer Plain.

.

Keywords: *Malayer, Groundwater, Drought, Geostatistics, Wilcox*

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We appreciate the Regional Water Company of Hamadan Province for providing the groundwater quality data of the Malayer plain.

Conflicts of interest

"The authors of this article declare that they do not have any conflict of interest regarding the writing and publication of the contents and results of this research."

Data Availability Statement:

All information and results are presented in the text of the article

Authors' contribution

1- Samira Al-Sadat Hedayati: Writing the initial version of the article, conceptualization, software analysis, drawing maps

2-Omid Bahmani: Guidance, conceptualization, consultation, revision of the text of the article, control of the results

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

3- Peyman Tahmasbi: Editing and revising the article, analysis of results, and conceptualization.

4- Fatemeh Dalavand: Review of the article, control of the results

5- Seyed Abolfazl Hosseini: Revision of the text of the article, control of the results

Citation: Alsadat Hedayati S, Bahmani O, Tahmasebi P, Dalvand F, Hosseini S A. Spatial-Temporal Assessment of Groundwater Quality Characteristics for Agricultural Use in Malayer Plain. jwmseir 2025; 19 (68): 78-92

Iran-Watershed Management Science & Engineering, Year 2025, Vol 19, No 68, PP 78-92

Publisher: Watershed Management Society of Iran

© Author(s)

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

بررسی تغییرات مکانی- زمانی ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در بخش کشاورزی دشت ملایر

سمیرا السادات هدایتی[۱]، امید بهمنی[۲*]، پیمان طهماسبی[۳]، فاطمه دالوند[۴]، سید ابوالفضل حسینی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۳، تاریخ داوری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹
https://doi.org/10.22034/19.68.6

چکیده

آب زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. استخراج بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی، منجر به تخریب کیفی و کمی آبخوان‌ها و کاهش پتانسیل آن‌ها برای تأمین آب می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب زیرزمینی در دشت ملایر استان همدان طی دوره آماری پنج‌ساله ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ انجام شد. با توجه به نقش حیاتی آب زیرزمینی در کشاورزی مناطق خشک و نیمه‌خشک و تهدیدهای ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه، از روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار شامل کریجینگ (معمولی، عام و ساده) وIDW در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10 برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پارامترهای کیفیEC، pH، HCO3، CL و SAR در دو مقطع زمانی خرداد و شهریور استفاده شد. داده‌های مورد نیاز از ۳۱ حلقه چاه تأمین و دقت روش‌ها با شاخص‌های آماری مانند میانگین خطا و ریشه میانگین مربع خطا ارزیابی شد. نتایج نشان داد که دقت روش‌ها بسته به پارامتر و زمان متفاوت است، به‌گونه‌ای که در ماه خرداد، روش کریجینگ معمولی برای اکثر پارامترها بهترین عملکرد را داشت، در حالی که در شهریور ترکیبی از کریجینگ و IDW بهینه بود. با استفاده از شاخص ویلکاکس، کیفیت آب برای کشاورزی در چهار کلاس ارزیابی و نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده با زبان برنامه‌نویسی پایتون تولید شد. تحلیل تغییرات نشان داد که کیفیت آب در پارامترهایی چون EC، HCO3 و CL در دوره انتهایی نسبت به ابتدای دوره کاهش داشته و غلظت آن‌ها افزایش یافته است، در حالی که تغییرات pH و SAR کم‌تر بوده‌اند. همچنین مساحت مناطقی با کیفیت "خوب" به‌ترتیب در خرداد و شهریور به میزان ۴/۹ و ۱۲/۳ درصد کاهش یافته است. هیچ‌یک از مناطق در کلاس "نامناسب" قرار نگرفتند، اما بخش‌هایی از نواحی مرکزی و جنوب‌شرقی در کلاس "متوسط" قرار گرفته و مستعد بحران هستند. نتایج بیانگر کارایی بالای روش‌های درون‌یابی در پایش و مدیریت منابع آب زیرزمینی بوده و استفاده مستمر از آن‌ها برای حفظ پایداری منابع آب کشاورزی منطقه پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه ها: ملایر، آب‌زیرزمینی، خشک‌سالی، زمین‌آمار، ویلکاکس

نوع مقاله: پژوهشی

استناد: هدایتی سمیراالسادات، بهمنی امید، طهماسبی پیمان، دالوند فاطمه، حسینی سید ابولفضل. بررسی تغییرات مکانی- زمانی ویژگی‌های کیفی آب مورد استفاده در بخش کشاورزی دشت ملایر. علوم ومهندسی آبخیزداری ایران۱٤۰٤؛ ۱۹(٦٨): ۷۸-۹۲
علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱٤۰٤، دوره ۱۹، شماره ٦٨، صفحه ۷۸-۹۲

ناشر: انجمن آبخیزداری ایران

© نویسندگان

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.
۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران. نویسنده مسئول: omid.bahmani@basu.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.
٤ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.
۵ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.22034.19.68.78]

مقدمه

در بسیاری از مناطق، استفاده بیش از حد از منابع آب با کیفیت خوب باعث کاهش حجم آب قابل‌دسترس و استفاده از منابع آب با کیفیت نامطلوب شده است [٦]. بنابراین برای مدیریت صحیح منابع و برقراری تناسب بین کیفیت و نحوه استفاده از آب، بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت آب امری ضروری است [١٨].

روش‌های گوناگونی برای مطالعه و پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و داده‌های کافی دارای دقت گوناگونی هستند [٢٠]. از جمله روش‌های میان‌یابی برای تهیه نقشه‌های تغییرات کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌توان به روش‌های زمین آمار (مانند کریجینگ[1] و کوکریجینگ[2]) و روش‌های معین (مانند عکس فاصله[3] و تابع شعاعی[4]) اشاره کرد [١٩].

انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع آبی منطقه به شمار می‌رود [٢٢]. امروزه زمین‌آمار در بسیاری از علوم و مطالعات مختلف (به‌ویژه در مطالعاتی که نیاز به میان‌یابی و برآورد است) استفاده می‌شود [١٢]. فتوانی و همکاران [١٠] از روش کریجینگ معمولی برای مطالعه و پهنه‌بندی نقشه کیفی آب‌های زیرزمینی دشت‌های کشاورزی تریفا[5] در شمال شرق مراکش استفاده نمودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار در مقایسه با مطالعات قبلی بود.

ثمین و همکاران [٢١] از روش کریجینگ و کوکریجینگ معمولی برای تخمین نسبت جذب سدیم و کلر در آب‌های زیرزمینی ٩٠ حلقه چاه استان فارس استفاده نمودند. نتایج نشان داد که تخمین‌های هر دو روش قابل‌قبول است، اما تخمین روش کوکریجینگ دقیق‌تر از کریجینگ است.

رضایی و همکاران [١٧] با استفاده از زمین‌آمار و نمونه‌های ١٣٥ حلقه چاه مربوط به شهریور سال ١٣٨٦، تغییرات مکانی چند شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی (شامل Na، EC و SAR) در سطح استان گیلان را بررسی نمودند. نتایج نشان داد میزان هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی در اکثر مناطق استان پایین است. ولی در مناطق پایین‌دست حوضه سفیدرود به‌ویژه در منطقه تلاقی سفیدرود با دریای خزر این شاخص از یک دسی‌زیمنس بر متر بیش‌تر است. به‌همین ترتیب در این منطقه میزان SAR و Na نیز در مقایسه با دیگر مناطق بالاتر است ولی از نظر کشاورزی برای کشت برنج مشکلی به‌وجود نخواهد آورد. هم‌چنین نتایج نشان داد از نظر شاخص SAR ، کیفیت آب‌های زیرزمینی استان در مجموع مناسب است. اما از نظر هدایت الکتریکی کیفیت آب‌های زیرزمینی استان به‌ویژه در مناطق مرکزی و مرکزی متمایل به شرق همجوار با دریا پایین بوده و می‌تواند پایداری تولید برنج در این مناطق را که از مناطق عمده برنج‌کاری استان است به خطر اندازد. روش‌های پهنه‌بندی مورد بررسی از نظر دقت تفاوت زیادی نداشتند ولی در مجموع روش‌های کریجینگ و معکوس فاصله با توان یک دقت بیش‌تری در درون‌یابی این خواص کیفی داشتند. عادلی [٢] از داده‌های ١٤٥ مکان مختلف شهرستان گرگان که طی سال‌های ١٣٨٣تا ١٣٨٨ جمع‌آوری شده بود برای ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی (شامل وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ با توابع مختلف از جمله نمایی، کروی و معمولی) در پهنه‌بندی فاکتورهای کیفی آب استفاده نمود. نتایج مؤید نزدیکی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی برای داده‌های مورد استفاده بوده است. سایر نتایج نیز حاکی از آن بود که کیفیت منابع آب در این شهرستان از جنوب‌شرق به شمال‌غرب در مورد اکثر فاکتورهای کیفی از جمله هدایت الکتریکی و نیترات نامطلوب‌تر می‌شود. ایشان دلیل آن را علاوه بر شرایط خاص طبیعی عواملی از جمله نفوذ فاضلاب گرگان و استفاده از کود و سموم کشاورزی بیان نمودند.

صاحب جلال و همکاران [١٨] تغییرات زمانی و مکانی ویژگی‌های کیفی آب (شامل EC، SAR، CL و B) مربوط به ٧٦ حلقه چاه در دشت بهادران مهریز را با استفاده از روش زمین‌آماری کریجینگ مورد مطالعه قرار دادند. بررسی نقشه شوری نشان داد که آب زیرزمینی در ٤٨ درصد از منطقه در کلاس محدودیت شدید و ٥٢ درصد در کلاس با محدودیت کم تا متوسط قرار دارند. همچنین در یک دوره ٥ ساله شوری آب زیرزمینی در ٣١/١ درصد از منطقه کاهش، در ٢٦/٥ درصد افزایش و در ٤٢/٤ درصد بدون تغییر مانده بود. ارسلان [٥] بر اساس داده‌های ٩٧ چاه پایش شده در یک دوره هفت ساله، نقشه تغییرات مکانی و زمانی آب‌های زیرزمینی دشت بافرا ترکیه را با استفاده از کریجینگ معمولی[6] و کریجینگ شاخص[7] تهیه نمود. نقشه‌های تنوع مکانی کاهش شوری را از سال ٢٠٠٤ تا ٢٠١٠ نشان داد که این امر را به تکمیل سامانه‌های آبیاری و زهکشی و آب‌شویی نمک از مناطق مرتفع نسبت داد.

قمشیون و همکاران [١١] با بررسی تغییرات مکانی ویژگی کیفی آب زیرزمینی (شامل هدایت الکتریکی، کلر، غلظت املاح محلول، سدیم و سولفات) در دشت سمنان و سرخه با استفاده از روش‌های زمین‌آمار معکوس فاصله، کریجینگ و کوکریجینگ به این نتیجه رسیدند که روش کوکریجینگ دارای دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگر است. مقایسه نقشه‌های پهنه‌بندی مکانی پنج عامل کیفی نشان داد که در مرزهای دشت از یک روند افزایشی برخوردارند هستند، ولی در قسمت‌های مرکزی دشت تغییر محسوسی در طی دوره آماری (٧٩-١٣٧٨ تا ٨٩-١٣٨٨) نداشته‌اند.

جعفری و بخشنده‌مهر [١٣] برای بررسی توزیع مکانی دو شاخص

1. Kriging
2. Cokriging
3. Inverse Distance Weighting
4. Radial Basis Functions
5. Triffa

6. Ordinary Kriging
7. Indicator Kriging

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

مهم کیفیت آب زیرزمینی شامل EC و SAR در استان اصفهان، فنون تحلیل زمین‌آماری مانند کریجینگ، IDW و RBF را بر داده‌های ۵۴۰ حلقه چاه اعمال و نقشه پیوسته EC و SAR را تهیه نمودند. مطابق نتایج، از میان روش‌های مورد بررسی روش کریجینگ با مدل واریوگرامی دایره‌ای بهترین عملکرد و کم‌ترین خطا را نشان داد بررسی‌ها نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی استان اصفهان از لحاظ کشاورزی، از جنوب به شمال و همچنین از غرب به شرق مخصوصاً در پلایا (اراضی فاقد کشاورزی) که کلاس کیفیت آب غیرقابل استفاده غالب است کاهش می‌یابد. جهانشاهی و همکاران [۱۴] با بررسی تغییرپذیری داده‌های کیفی سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ مربوط به ۵۶ حلقه چاه دشت شهربابک واقع در استان کرمان به این نتیجه رسیدند که از بین روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ و معکوس فاصله، روش کریجینگ بهترین روش است. نتایج حاصل از نقشه‌های پهنه‌بندی TDS، EC و CL نشان‌دهنده سه محدوده در شرق، جنوب شرق و جنوب منطقه بود که دارای شرایط نامطلوب از نظر شرب است که در برخی از این نواحی بالاتر از حد مجاز تعیین شده توسط استانداردهای شولر و ویلکاکس قرار می‌گیرد.

عبدالهی و همکاران [۱] تغییرات متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شـــهرکرد در مقیاس مکانی را بررسی نمودند. آن‌ها مدل‌های مختلف زمین‌آمار را بر داده‌های کمی و کیفی آب زیرزمینی برازش و مدل‌های مناسب را انتخاب نمودند. با توجه به معیارهای ارزیابی خطا و معیار ارزش‌یابی متقابل، تخمین‌گر کریجینگ عام با روند درجه یک و مدل کروی چهارگانه، کریجینگ عام و رونـــد درجه‌ی یک با مدل کروی پنج‌گانـــه، لاگ کریجینگ معمولی با مدل نمایی، کریجینگ عام و روند درجـــه یک با مدل نمایی، لاگ کریجینگ معمولی بـــا مدل کروی پنج‌گانـــه و کریجینگ معمولی با مدل نمایی به‌ترتیب برای پهنه‌بندی داده‌های هدایت الکتریکی، کلســـیم، کلر، منیزیم، بیکربنات، ســـولفات، سدیم و نیترات بهترین نتایج را داشتند. نقشه‌های پهنه‌بندی کیفی آب زیرزمینی نشان‌دهنده‌ی کاهش کیفیت آب در مرکز و خروجی آبخوان بود. کاهه و همکاران [۱۵] برای ارزیابی و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی به کمک زمین‌آمار در محدوده مطالعاتی ساری- نکا، ۶۵ نمونه آب چاه کشاورزی مربوط به سال آبی ۱۳۹۳-۱۳۹۲ را از نظر پارامترهای مؤثر در کشاورزی شامل کلر (CL)، هدایت الکتریکی (EC)، خاصیت اسیدی و قلیایی (PH) مانده کربنات سدیم (RSC) مورد تجزیه شیمیایی قراردادند. نتایج نشان داد بیش از ۹۰ درصد نمونه‌های آزمایش کیفیت آب چاه‌های مورد استفاده از نظر مصرف برای کشاورزی در کلاس S_3-C_2 و S_3-C_1 قرار دارند. بلخری و همکاران [۷] توزیع فضایی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از درون‌یابی‌های کریجینگ و کوکریجینگ با هدف ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف آشامیدنی در دشت ال ملیلیه، الجزایر، به روشی یکپارچه انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد شاخص GWQI[1] همبستگی قوی و معنی‌داری با هدایت الکتریکی (EC)، کلسیم (Ca)، منیزیم (Mg)، سولفات (SO_4) و بی‌کربنات (HCO_3) داشتند. بر این اساس، از این پارامترها به‌عنوان متغیرهای مشترک در روش کوکریجینگ استفاده شد. عملکرد پیش‌بینی روش‌های درون‌یابی انتخاب‌شده با استفاده از آزمون اعتبارسنجی سنجیده شد. نتایج نشان داد که کوکریجینگ با هدایت الکتریکی به‌عنوان متغیر مشترک، از دقت بالاتری نسبت به روش کریجینگ در پیش‌بینی شاخص کیفیت آب زیرزمینی برخوردار است.

المشقبه و همکاران [۳] با استفاده از تکنیک‌های کریجینگ در محیط GIS، کیفیت آب‌های زیرزمینی در حوضه عمان- زرقا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که درون‌یابی مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، به دلیل تأثیر پیچیده سامانه‌های کشت و شهرنشینی، با مشکلات مختلفی روبرو است. با بررسی و رتبه‌بندی خطاهای همبستگی متقابل روش‌ها و پارامترهای مختلف، مشخص شد که روش کریجینگ معمولی با استفاده از مدل‌های مختلف نیم‌واریوگرام نتایج کلی خوبی ارائه می‌دهد. همچنین، به‌جز پارامترهای NO^{-}_{3} و Ca^{2+} که از ساختار مکانی قوی برخوردار هستند، بیش‌تر پارامترهای کیفیت آب‌های زیرزمینی دارای ساختار مکانی متوسطی هستند. در این مطالعه، از تکنیک‌های کریجینگ معمولی برای برآورد پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی (Ca^{+2}، Mg^{+2}، Na^{+}، K^{+}، CL^{-} و NO^{-3}) استفاده شد.

دلبری و همکاران [۹] در مطالعه‌ای، توزیع مکانی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در شهرستان فسا واقع در استان فارس را مورد بررسی قرار دادند و مناسب‌ترین مناطق برای اجرای سامانه‌های آبیاری بارانی از نظر کیفیت آب را تعیین کردند. نتایج نشان داد که همبستگی مکانی بین تمام پارامترها در منطقه مورد مطالعه از متوسط تا قوی است. همچنین توزیع مکانی pH و HCO_3 با استفاده از کریجینگ معمولی صورت گرفت. همچنین احتمال تجاوز غلظت‌های EC، SAR، Na^{+} و CL^{-} از حد آستانه در آب‌های زیرزمینی با استفاده از کریجینگ شاخص[2] به‌دست آمد. نقشه‌های احتمال نشان داد که خطر تجاوز EC، SAR، Na^{+} و CL^{-} از حد آستانه بحرانی داده شده در نیمه‌پایین منطقه مورد مطالعه بیش‌تر است. همچنین مناطق مناسب برای طراحی سامانه آبیاری بارانی ۲۵۲۴۰ هکتار تعیین شد که حدود ۳۴ درصد از کل اراضی کشاورزی را تشکیل می‌دهد و در قسمت‌های شمالی و شرقی واقع شده است. شانکار و همکاران [۲۳] توزیع مکانی ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از تکنیک‌های شاخص کیفیت آب و GIS در ناحیه تانجاور بررسی کردند، نتایج به‌دست آمده از SAR، RSC، Na نشان داد که ۷۵ درصد از نمونه‌های آب‌های زیرزمینی به‌دلیل زمان ماند طولانی آب، انحلال مواد معدنی از ترکیب لیتولوژیکی و افزودن کودهای شیمیایی کاملاً برای مصارف کشاورزی مناسب هستند.

وانگ و همکاران [۲۶] با استفاده از روش‌هایی مانند نیمه‌واریوگرام و انتروپلاسیون کریجینگ، ویژگی‌های توزیع مکانی کیفیت آب‌های

1. Groundwater Quality Index

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

زیرزمینی در شهرستان لانگکوو، استان شاندونگ چین ارتباط آن با کاربری اراضی و نفوذ آب دریا را مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که انواع یون‌های شیمیایی اصلی آب‌های زیرزمینی، از نوع HCO_3·CL–Na·Ca·Mg و HCO_3·CL–Na·Ca هستند. همچنین ویژگی‌های توزیع مکانی کیفیت آب‌های زیرزمینی ارتباط نزدیکی با کاربری اراضی و نفوذ آب دریا دارد و غلظت جرمی اکثر یون‌ها به‌تدریج از ساحل به‌سمت داخل خشکی کاهش می‌یابد. همچنین پراکندگی مکانی CL^- و Na^+ تحت تأثیر قابل توجه نفوذ آب دریا قرار دارد. توزیع مکانی NO_3^-، ارتباط نزدیکی با توزیع اراضی کشاورزی و سکونتگاهی دارد.

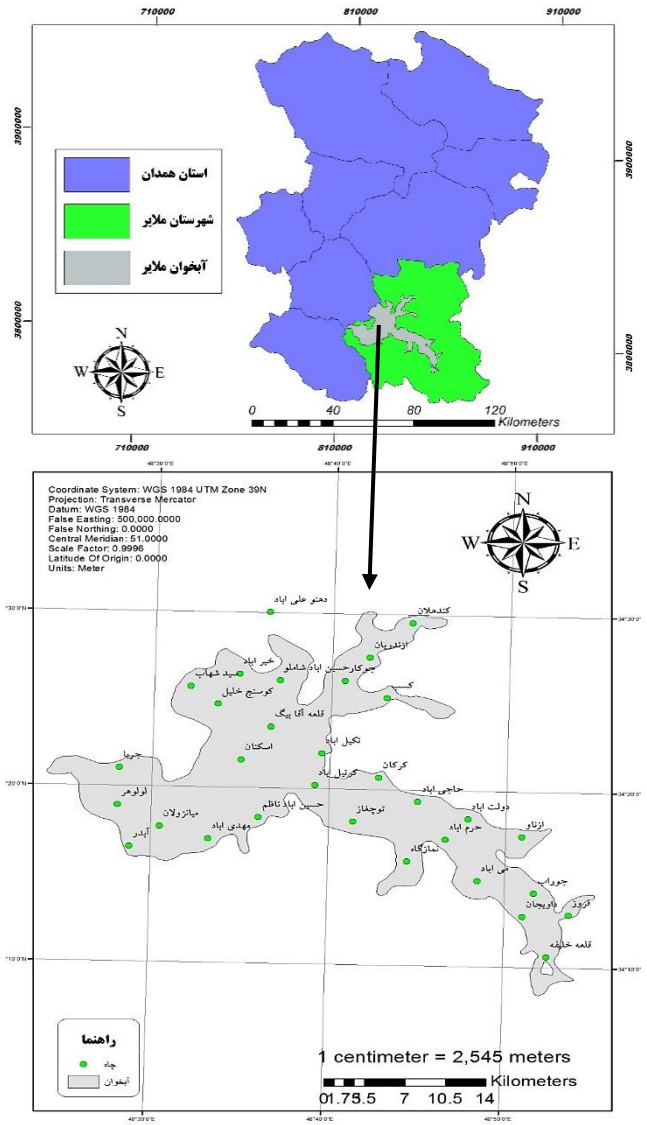
به‌دلیل وجود منابع آب زیرزمینی و سطحی و خاک حاصلخیز، بخش کشاورزی در دشت ملایر رونق زیادی دارد و ارزیابی کیفی روند تغییرات آن بسیار با اهمیت است. هدف این پژوهش بررسی روش‌های مختلف زمین‌آمار و انتخاب روش مناسب برای بررسی روند تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب کشاورزی در دشت ملایر استان همدان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

آبخوان اصلی دشت ملایر با وسعت ۵۱۸/۶۳ کیلومترمربع از نظر جغرافیایی در فاصله بین ۰۶′ ۴۶° تا ۱۰′ ۴۹° طول شرقی و ۵۸′ ۳۰° تا ۵۶′ ۳۴° عرض شمالی از نصف‌النهار گرینویچ قرار گرفته است. موقعیت آبخوان و چاه‌های مشاهداتی مورد استفاده در این پژوهش برای پهنه‌بندی نقشه‌های پیوسته رستری پارامترهای کیفی آب در شکل (۱) آورده شده است. دشت ملایر بر اساس روش آمبرژه دارای آب و هوای نیمه‌خشک سرد است. حداکثر دمای روزانه در (مرداد)

گرم‌ترین ماه سال ۴۱ و حداقل آن در (بهمن) سردترین ماه سال ۲۵- درجه سانتی‌گراد است. میانگین بارش، تبخیر (از تشتک) و رطوبت نسبی سالانه آن به‌ترتیب حدود ۳۱۵ میلی‌متر، ۲۶۶۵ میلی‌متر و ۵۰ درصد گزارش شده است.



شکل ۱- موقعیت آبخوان و چاه‌های مشاهداتی دشت ملایر در استان همدان و کشور ایران.

Fig 1. Location of the Malayer aquifer and observation wells in Hamadan Province, Iran.

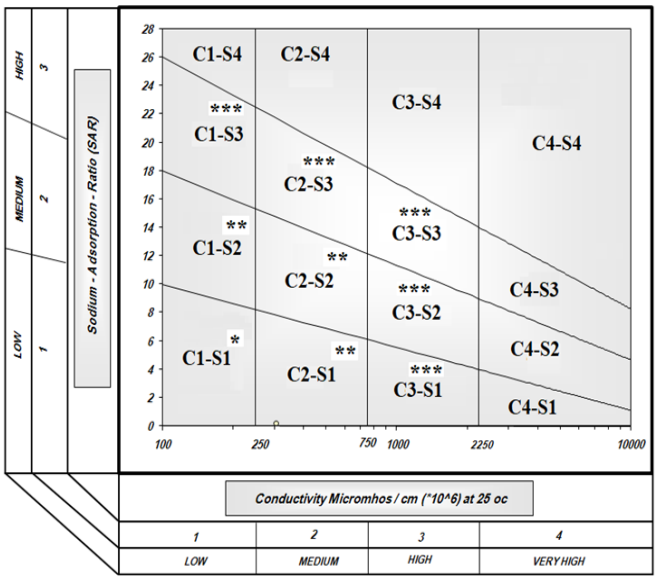
داده‌ها

به‌منظور ارزیابی و بررسی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی دشت ملایر، از آمار و داده‌های ۳۱ حلقه چاه، اخذشده از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان همدان، استفاده شد (شکل ۱). پارامترها شامل EC، PH، HCO_3، CL و SAR و مربوط به دو مقطع زمانی خرداد و شهریور دوره آماری ۵ ساله (۱۳۹۵-۱۳۹۹) بودند. داده‌های مورد استفاده برای تهیه نقشه در ابتدا از نظر ویژگی‌های آماری پایه از جمله حداقل، حداکثر، میانگین، خطای استاندارد میانگین، چولگی و کشیدگی برای همه متغیرهای کیفی، بررسی شدند. پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها و حذف روند (در صورت وجود)، از آن‌ها برای ایجاد نقشه با استفاده از روش‌های درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ (معمولی، عمومی و ساده) با تغییرنماهای نمایی، گوسی و کروی استفاده شد. برای هر متغیر، روشی به‌عنوان روش درون‌یابی نهایی انتخاب شد که دارای بیشترین دقت تخمین بود. پس از تهیه لایه‌های پهنه‌بندی دو شاخص EC و SAR برای تعیین کلاس کیفی آب برای کشاورزی از دیاگرام و طبقه‌بندی ویلکاکس استفاده شد.بررسی تغییرات زمانی پارامترهای منتخب کیفیت آب زیرزمینی با ایجاد نقشه‌های جبری از طریق ابزار اسکریپت عددی انجام شد. برای این منظور با استفاده از ابزار Raster Calculator نقشه‌های پیوسته که حاصل تقسیم هر مقدار از سلول‌های پارامتر در ماه خرداد و شهریور سال‌های ۱۳۹۹ بر ۱۳۹۵ بود، تدوین شد. برای تهیه نقشه‌ها و انجام محاسبات از نرم‌افزار ArcGS10 استفاده‌شد. به منظور تولید نقشه‌های پیوسته کلاسه‌بندی

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.22034.19.68.78]

در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی از شاخص استاندارد کشاورزی (ویلکاکس) توسط کد برنامه‌نویسی پایتون استفاده شد. پایتون به‌عنوان یک ابزار چندمنظوره، در حوزه آب کاربردهای متنوعی دارد. از تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی سامانه‌های آبی گرفته تا مدیریت منابع آب و پردازش تصاویر ماهواره‌ای، پایتون به ابزاری قدرتمند برای متخصصان آب تبدیل شده است. سادگی سینتکس و وجود کتابخانه‌های تخصصی مانند Geopandas و Rasterio، پایتون را به گزینه‌ای ایده‌آل برای انجام تحقیقات و مطالعات در حوزه آب تبدیل کرده است.

دیاگرام ویلکاکس



شکل ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب به روش ویلکاکس برای مصارف کشاورزی، * آب‌های خیلی خوب، ** آب‌های خوب، * آب‌های متوسط و بقیه کلاس‌ها نامناسب**

Fig 2. Classification of water quality according to the Wilcox method for agricultural uses: * very good water, ** good water, *** moderate water, and the remaining classes are unsuitable.

در این نمودار در محور افقی شاخص هدایت الکتریکی(EC) و در محور عمودی نسبت جذب سدیم (SAR) با توجه به میزان تأثیری که بر محصولات و خاک کشاورزی دارند، به چهار گروه تقسیم شده‌اند. از تلفیق این گروه‌ها، ۱۶ کلاس کیفیت آب حاصل شده است که تناسب آب را برای استفاده در کشاورزی با آن تعیین می‌شود (شکل ۲) [٤].

روش IDW

این روش بر اساس وزن‌دهی به نقاط نمونه‌برداری برعکس فاصله آن‌ها از نقطه تخمین بنا شده است. هرچه فاصله نمونه تا نقطه تخمین کم‌تر باشد وزن آن بیش‌تر و برعکس. در این روش مقدار متغیر در نقاط نمونه-برداری نشده (تخمین) از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$z = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{z_i}{d_i^m}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d_i^m}} \qquad (۱)$$

که در آن z مقدار برآورد متغیر در منطقه نمونه‌برداری نشده، di فاصله نقطه نمونه‌برداری شده تا نقطه تخمین، N تعداد کل نمونه‌ها و پارامتر m توان فاصله است. تغییرات m باعث قابلیت انعطاف روش IDW می‌شود به‌گونه‌ای که با نزدیک شدن آن به صفر تخمین‌گر IDW رفتاری شبیه میانگین حسابی و با افزایش بیش از حد آن رفتاری شبیه چندضلعی تیسن از خود نشان می‌دهد [١٦]. در این پژوهش از سه پارامتر توان (۳ و ۲، ۱=m) استفاده و نتیجه آن با کریجینگ از طریق اعتبارسنجی متقابل و با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا مقایسه شدند.

روش کریجینگ

این روش بر منطق «میانگین متحرک وزن‌دار» استوار است. از مهم‌ترین ویژگی‌های کریجینگ این است که به ازای هر تخمینی، خطا و دامنه اطمینان آن را می‌توان محاسبه کرد، درحالی‌که در روش‌های کلاسیک معمولاً چنین نخواهد بود. روش کریجینگ در قالب رابطه (۱) بیان می‌شود. مقدار وزن آماری (λ_i) در روش کریجینگ معمولی از حل رابطه (۲) به‌دست می‌آید. همچنین روابط کریجینگ عام و ساده نیز به شکل رابطه (۳) و (٤) است [١٢].

$$z^*(h) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(x_i) \qquad (۱)$$

$$\gamma(x_i, x_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i . \gamma(x_i, x_j) + \mu, \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1 \qquad (۲)$$

$$z(x) = m(x) + \varepsilon(x) \qquad (۳)$$

$$z^*(x_0) = m(x) + \sum_{i=0}^{n} \lambda_i . [z(x_i) - m] \qquad (٤)$$

که در آن z*(h) مقدار متغیر مکانی برآورد شده، z(xi) مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه x_i و λ_i وزن آماری که به نمونه xi نسبت داده می‌شود، است. همچنین γ(xi,xj) نیم‌تغییرنما بین نقطه‌های i و j و γ(xi,x0) نیم‌تغییرنما بین نقطه iام و نقطه‌ای که باید برآورد شود و μ ضریب لاگرانژ است. در رابطه‌های m میانگین متغیر x است. مؤلفه m(x) قطعیت‌پذیر بوده و می‌تواند تابعی از مختصات باشد در صورتی که ε(x) یک متغیر تصادفی (احتمال‌پذیر) است که در صورت دارا بودن خاصیت پیوستگی می‌تواند ساختار مکانی متغیر ناحیه‌ای باشد. تخمین یا پیش‌بینی متغیرها در زمین‌آمار شامل دو

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

مرحله است، مرحله نخست مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که به‌وسیله آنالیز نیم‌تغییرنما (واریوگرام) قابل بررسی است، مرحله دوم تخمین متغیر مورد نظر بوده که به مرحله اول وابسته است. تابع واریوگرام به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=0}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h)^2 \qquad (۵)$$

z(xi)، z(xi+h) و N(h) به‌ترتیب مقادیر متغیر در نقاط xi، xi+h و تعداد جفت نمونه‌های به‌کاررفته به ازای هر فاصلهh است. قبل از کاربرد واریوگرام‌های تجربی در تخمین، لازم است به آن‌ها مناسب‌ترین مدل تئوری را برازش داد و سپس مدل را در فرآیند تخمین.به کار برد. برای واریوگرام تعداد معدودی مدل شناخته شده و به‌طور معمول به‌کار می‌رود. از جمله نیم‌تغییرنماهای تئوریک (نظری) کاربردی در زمین‌آمار، می‌توان به شبیه‌های کروی (رابطه ٦)، گوسی (رابطه ۷) و نمایی (رابطه ۸) اشاره کرد [۱۲].

$$\gamma(h) = c[\frac{h}{a} - 0.5\frac{h^3}{a^3}] \qquad (٦)$$

$$\gamma(h) = c[1 - e^{\frac{h}{a}}] \qquad (۷)$$

$$\gamma(h) = c[1 - e^{\frac{h^2}{a^2}}] \qquad (۸)$$

در این روابط c حد آستانه‌ای، a دامنه تأثیر، h فاصله نقاط و g(h) نیم‌تغییرنما است.

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی دقت روش‌ها در پهنه‌بندی پارامترهای کیفیت آب از معیارهای آماری میانگین خطا[1] (ME)، ریشه میانگین مربع خطا[2] (RMSE) و ریشه میانگین مربع خطای استاندارد[3] (RMSSE) استفاده شد (رابطه‌های ۹، ۱۰ و ۱۱). [۸].

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}[z_{est} - z_{obs}]}{n} \qquad (۹)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[z_{est} - z_{obs}]^2}{n}} \qquad (۱۰)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}[\frac{z_{est} - z_{obs}}{\sigma}]^2}{n}} \qquad (۱۱)$$

Sدر این رابطه‌ها، z_{obs} مقادیر مشاهده شده (واقعی)، $\bar{z}_{obs}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، z_{est} مقادیر برآورد شده (خروجی مدل)، $\bar{z}_{est}$ میانگین مقادیر برآورد شده، σ مقدار انحراف استاندارد مکانی و n تعداد مشاهدات است. هرچه مقدار RMSE کم‌تر، Mean Error به صفر نزدیک‌تر و RMSSE به یک نزدیک‌تر باشند نتایج مطلوب‌تر است.

نتایج و بحث

پیش از تولید نقشه‌ها، در هر دسته پارامتری روش‌های پهنه‌بندی با استفاده از معیارهای ME، RMSE و RMSSE مورد مقایسه واقع شد. در جداول (۱) و (۲) منتخب روش‌های پهنه‌بندی برای تمامی پارامترهای کیفیت آب موجود در منطقه ارائه شده است. برتری هر روش در این شرایط وابسته به کم‌تر بودن خطای RMSE یا RMSES و در نهایت ME بوده است. بنابراین ستون نهایی در جداول (۱و ۲)، نوع روش انتخاب‌شده به همراه جزئیات روش را در هر پارامتر معرفی می‌کند. در مراحل بعدی این پژوهش، تعدادی از این پارامترها (شامل EC، PH، HCO_3، CL و SAR) به‌عنوان عناصر نهایی انتخاب‌شده و

به‌منظور محاسبه شاخص‌های استاندارد کیفیت آب بررسی شد.

با توجه به جدول (۱) روش پهنه‌بندی مناسب در ماه خرداد برای پارامترEC، PH، HCO_3، CL و SAR به‌ترتیب روش کریجینگ معمولی، کریجینگ عام، کریجینگ عام، IDW و کریجینگ معمولی انتخاب شده است. همچنین با توجه به نتایج جدول (۲)، روش کریجینگ معمولی انتخاب شده است. همچنین با توجه به نتایج جدول (۲)، روش پهنه‌بندی مناسب در ماه شهریور برای پارامترهای EC، PH، HCO_3، CL و SAR به‌ترتیب روش کریجینگ معمولی، کریجینگ عام، IDW، کریجینگ معمولی و IDW انتخاب شده است. نتایج نشان داد اگرچه در اکثر موارد روش کریجینگ بر IDW برتری داشته است اما دقت روش‌های مختلف درون‌یابی برای داده‌های مورد استفاده بسیار نزدیک بوده است. این نتیجه با نتایج سایر پژوهشگران ([۲]، [۱۱]، [۱۳] و [۱]) مطابقت داشت. برای تشریح جامع‌تر تغییرات پارامترهای کیفیت آب در آبخوان ملایر با میانگین‌گیری از هر دو دوره پنج ساله در شکل (۳) مشخص شده است. همان‌گونه که در شکل مذکور می‌توان مشاهده کرد، در رقوم کمی انتخابی تحت عناوین PH، HCO_3 و EC در دوره انتهایی نسبت به دوره مشابه اول افت کیفیت با افزایش غلظت وجود داشته است. با این حال در دو پارامتر CL و SAR این مقدار به نسبت دوره مشابه اندکی افت را هم نشان می‌دهد (شکل ۳). آنالیز داده‌های شکل ۳ نشان می‌دهد که پارامتر pH در ماه‌های شهریور و خرداد، طی دوره مطالعه، از پایداری نسبی برخوردار بوده است. در مقابل، پارامتر HCO_3در این دو ماه، نوسانات معنی‌داری داشته و الگوی زمانی مشخصی را نشان نمی‌دهد.

پروفایل تغییرات پارامتر کلر در ماه‌های خرداد و شهریور، هم‌خوانی قابل توجهی با یک‌دیگر دارد. با این حال، پارامتر SAR در این دو ماه، رفتار متضادی از خود نشان می‌دهد. درحالی‌که در ماه خرداد، این پارامتر روند پایداری را طی می‌کند، در ماه شهریور و به‌ویژه در سال ۱۳۹۹، نوسانات شدیدی در مقادیر آن مشاهده می‌شود. در نهایت در

1. Mean Error
2. Root Mean Square Error
3. Root Mean Square Standardized Error

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

جدول ۱- مقادیر مقایسه‌ای خطا پهنه‌بندی پارامترها در ماه خرداد

Table 1 - Comparative error values of parameter zoning in June

شماره Number	نام Name	RMSE[1]				ME[2]				RMSSE[3]			مدل انتخابی Selected model
		IDW	K-S	K-O	K-U	IDW	K-S	K-O	K-U	K-S	K-O	K-U	
1	EC	182.8	256.6	238.9	265.7	10.883	-9.777	-11.438	-13.292	1.402	1.105	1.141	K-O[1]
2	TDS	122.8	172.1	160.3	178.4	-6.988	-6.381	-7.386	-10.628	1.407	1.105	1.147	K-O
3	PH	0.335	0.379	0.388	0.511	-0.012	0.007	0.013	-0.068	1.247	1.109	1.020	K-U[2]
4	HCO_3	1.023	1.115	1.104	1.152	0.080	-0.029	-0.007	-0.037	1.217	1.005	0.909	K-U
5	CL	0.570	0.641	0.609	0.661	-0.018	-0.027	-0.022	-0.042	1.379	1.025	1.188	[3]IDW
6	SO_4	1.251	1.429	1.412	1.562	-0.235	-0.022	-0.003	-0.086	1.243	1.073	2.040	K-O
7	SUM_Anion	1.746	2.532	2.328	2.617	-0.088	-0.114	-0.135	-0.109	1.403	1.121	1.131	IDW
8	Ca	0.680	0.698	0.717	0.735	0.035	-0.019	-0.005	-0.009	1.300	1.220	1.033	K-U
9	Mg	0.792	0.787	0.762	0.905	0.063	-0.027	-0.009	-0.076	1.354	1.096	1.148	K-O
10	Na	1.304	1.828	1.716	1.824	-0.215	-0.101	-0.160	-0.158	1.883	1.150	1.222	K-O
11	K	0.013	0.015	0.014	0.016	-0.001	-0.001	0.000	-0.001	1.397	1.023	1.201	K-O
12	SUM_Cation	1.760	2.506	2.301	2.560	-0.076	-0.122	-0.152	-0.149	1.462	1.199	1.107	IDW
13	Prc_Na	9.252	10.548	10.498	12.157	-2.354	-0.034	0.092	-1.236	1.341	1.067	2.305	K-O
14	SAR	0.740	0.942	0.899	0.959	-0.139	-0.040	-0.047	-0.083	1.747	1.140	1.239	K-O
15	TH	60.71	63.946	62.451	69.725	4.001	-2.262	-0.942	-3.640	1.328	1.130	1.138	K-O

واحد RMSE در پارامتر EC میلی موس بر متر و در سایر پارامترها میلی اکی والان بر لیتر است.

جدول 2- مقادیر مقایسهای خطا پهنه‌بندی پارامترها در ماه شهریور

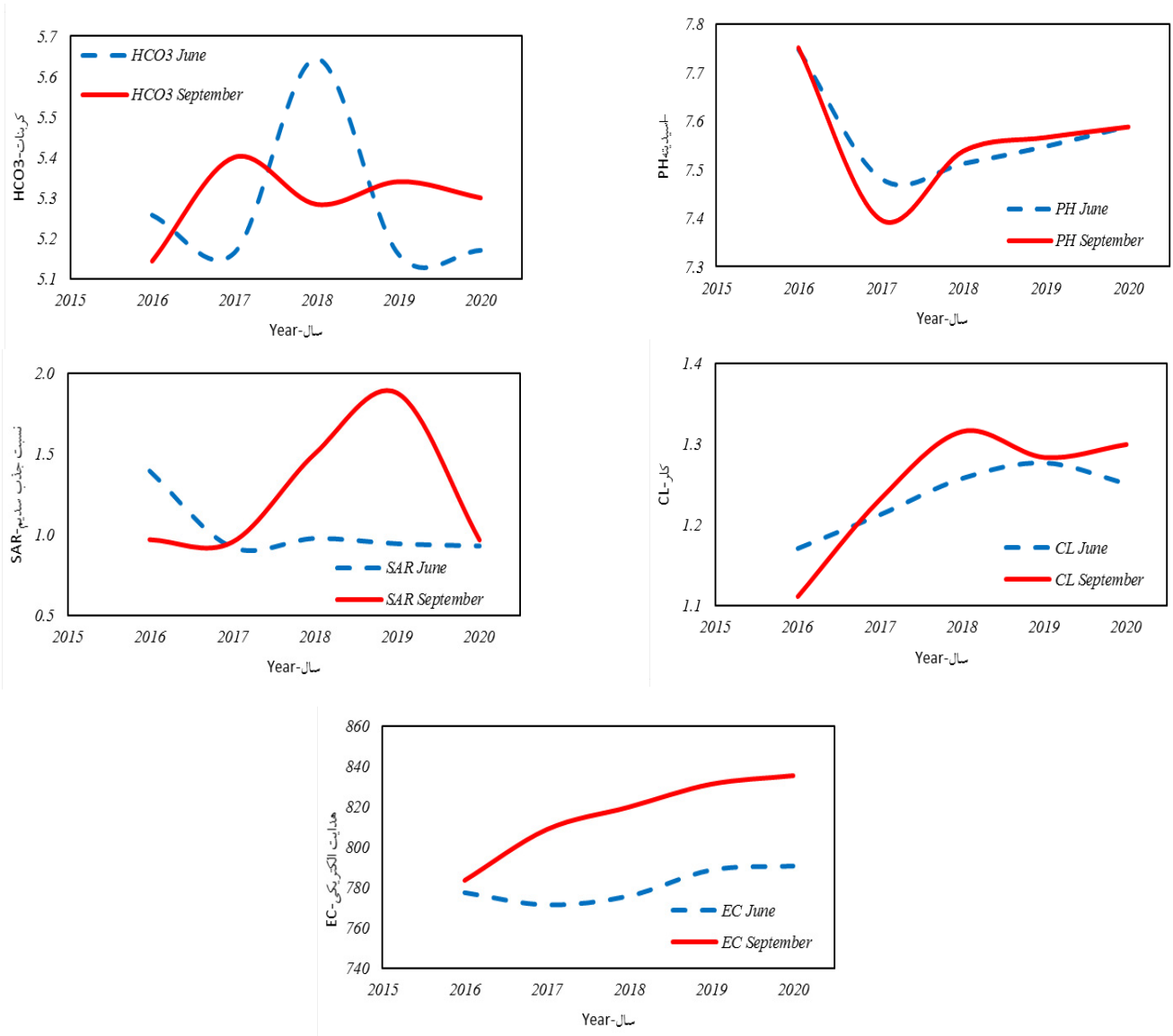
Table 2 - Comparative error values of parameter zoning in September

Number	Name	RMSE[1]				ME[2]				RMSSE[3]			مدل انتخابی
		IDW	K-S	K-O	K-U	IDW	K-S	K-O	K-U	K-S	K-O	K-U	
1	EC	343.6	352.0	341.7	1363.9	10.181	8.577	-2.746	1363.9	1.628	1.475	11.430	K-O[4]
2	TDS	233.6	239.4	232.4	958.1	6.992	5.620	-2.121	958.1	1.648	1.492	11.148	K-O
3	PH	0.243	0.278	0.275	1.382	0.010	0.012	0.009	1.382	1.369	1.270	1.242	K-U[5]
4	HCO_3	1.139	1.241	1.183	2.323	-0.013	0.055	0.028	2.323	1.369	1.248	16.868	[6]IDW
5	CL	0.856	0.868	0.847	6.834	0.043	0.009	-0.013	6.834	1.724	1.507	1.707	K-O
6	SO_4	1.717	1.677	1.658	10.217	0.065	-0.009	-0.064	10.217	3.071	2.569	2.741	K-O
7	SUM_ Anion	3.344	3.444	3.333	15.047	0.076	0.087	-0.014	15.047	1.631	1.465	11.985	K-O
8	Ca	0.854	0.904	0.859	2.486	0.039	0.015	-0.009	2.486	1.290	1.161	7.148	K-O
9	Mg	0.855	0.962	0.923	1.324	0.071	0.039	0.032	1.324	1.340	1.227	18.239	K-O
10	Na	2.094	2.166	2.079	12.331	0.006	0.011	-0.081	12.331	2.838	2.243	2.276	IDW
11	K	0.015	0.016	0.016	0.075	0.000	0.001	0.000	0.075	1.943	1.659	2.314	IDW
12	SUM_ Cation	3.346	3.450	3.334	15.387	0.081	0.093	-0.011	15.387	1.641	1.474	11.458	K-O
13	Prc_Na	10.852	12.047	11.167	37.689	0.240	0.477	-0.118	37.689	1.499	1.324	1.215	K-U
14	SAR	0.988	1.053	0.994	5.576	0.004	0.021	-0.028	5.576	2.126	1.985	1.909	IDW
15	TH	79.692	85.253	80.712	175.193	4.734	2.468	1.417	175.193	1.333	1.183	15.502	K-O

واحد RMSE در پارامتر EC میلی موس بر متر و در سایر پارامترها میلی اکی والان بر لیتر است.

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]



شکل ۳- تغییرات سالانه پارامتر PH، HCO_3 (میلی‌اکی والان برلیتر)، CL (میلی‌اکی والان برلیتر)، SAR (میلی‌اکی والان برلیتر) و EC (میلی موس برمتر) در ماه‌های خرداد و شهریور

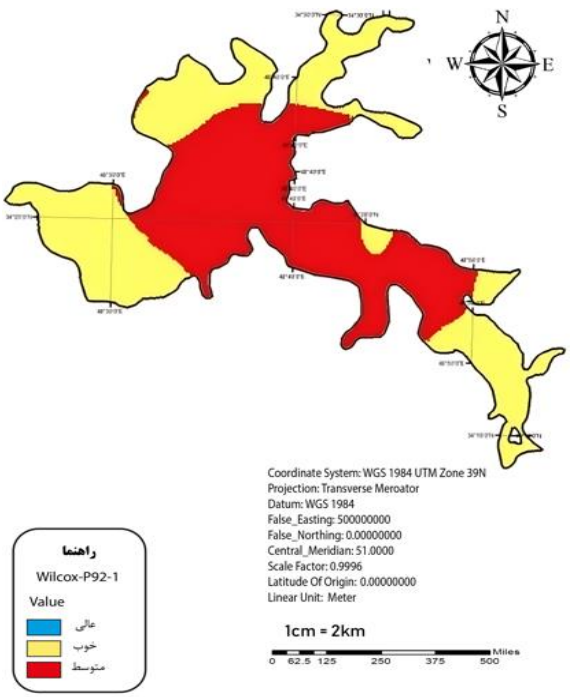
Fig 3 . Annual variations of the parameters pH, HCO_3 (meq/L), CL (meq/L), SAR (meq/L), and EC (mS/cm) in the months of June and September.

پارامتر EC با وجود روند افزایشی در هر دو ماه خرداد و شهریور، اما همواره مقدار بزرگی پارامتر در ماه خرداد کم‌تر از ماه شهریور بوده است. این موضوع می‌تواند مشخص‌کننده افت بزرگ EC در طول هر سال و البته با مقدار کم‌تر از روند کلی افزایشی باشد. این کاهش قاعدتاً چه در پارامتر اخیر و چه دیگر پارامترهای کیفیت آب، به‌علت تغییرات کمی تراز سطح آب در مخزن آبخوان اشباع دشت است که خود در فصول مختلف و ماه‌های مختلف، وابسته به عامل اصلی تغییرات سطح آب زیرزمینی است. فعالیت کشاورزی همچنین خود در صورت در نظر گرفتن بازگشت آب آبیاری به‌صورت تغذیه از سطح زمین به داخل آبخوان و به‌خصوص سطوح بالایی تراز آب آن، می‌تواند به شکل بالا، آن‌چنان که اشاره شد بر روی روند سری زمانی پارامترهای کیفیت آب مؤثر باشد. به‌خصوص این مورد با کم‌تر بودن مقدار و بزرگی پارامترهای کیفی بررسی‌شده در ماه خرداد نسبت به ماه شهریور مشهودتر نیز می‌شود.

با توجه به مطالعات واثق نژاد [۲۵] که بر پایه تحلیل شاخص‌های استاندارد خشکسالی اقلیمی (SPI، SDI و SWI)، شرایط در ناحیه دشت ملایر را مستعد گسترش و تداوم کمبودهای ریزش جوی در سال‌های آتی دانسته‌اند و با توجه به این نکته که عمده دلیل وقوع افزایش برداشت از مخزن ثابت آبخوان دشت ملایر، چاه‌های کشاورزی در هنگام کمبود جریانات سطحی است؛ بنابراین می‌توان کاهش کیفیت آب کشاورزی را در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی انتظار داشت.

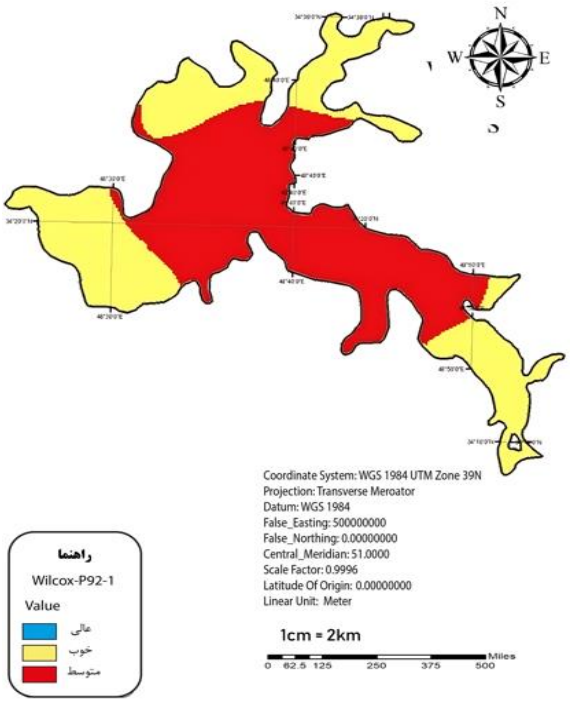
[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]



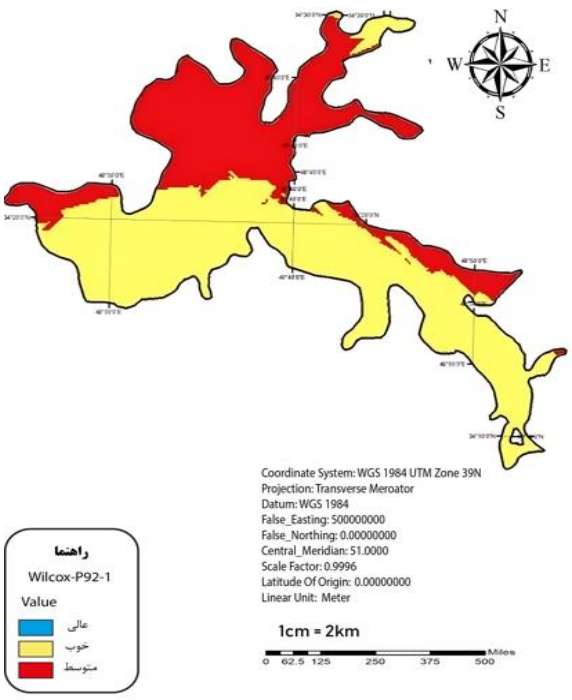
الف- خرداد سال ۱۳۹۵

A. June 2016



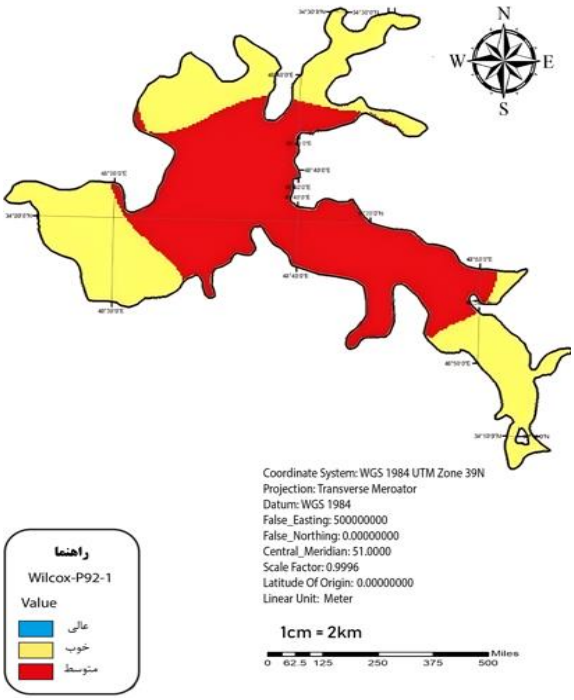
ب- خرداد سال ۱۳۹۹

B. June 2020



پ- شهریور سال ۱۳۹۵

C. September 2016



ت- شهریور سال ۱۳۹۹

D. September 2020

شکل٤- شاخص ویلکاکس، در ماه‌های خرداد و شهریور

Fig 4. Wilcox chart in the months of June and September

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

در هر مورد ابتدا لایه‌های پهنه‌بندی با استفاده از دستور (Rasterize) به شکل رستری استخراج شد؛ سپس به‌عنوان پارامترهای ورودی، هر دو EC و SAR در چهار کلاس استاندارد کیفیت آب کشاورزی (ویلکاکس) تحت عناوین عالی، مناسب، متوسط و نامناسب استخراج شد. برای ایجاد شرایط قیاسی، نقشه‌های استاندارد بهره‌برداری آب کشاورزی، به‌صورت شکل (٤) برای ماه شهریور و خرداد ترسیم شد. در هر مورد از سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۹ به‌عنوان بازه‌های ابتدایی و انتهایی استفاده شد.بر اساس نقشه‌های ترسیم‌شده از شاخص استاندارد کیفیت آب کشاورزی (ویلکاکس) در مجموع برای ابتدای دوره پهنه‌بندی در سال ۱۳۹۵ مساحتی معادل ٤۹/٤ درصد از آبخوان در شرایط کلاس دوم معادل با خوب و مساحتی معادل ٥۰/٦ درصد در شرایط کلاس سوم معادل با متوسط واقع شد. درحالی که در سال ۱۳۹۹ برای ماه خرداد مساحتی معادل ٤٥/٦ درصد از آبخوان در شرایط در شرایط کلاس دوم معادل با خوب و مساحتی معادل ٥٤/۳ درصد در شرایط کلاس سوم معادل با متوسط واقع بود.

به همین ترتیب از طریق محاسبات مکانی مشخص شد که در شهریورماه در مجموع برای ابتدای دوره پهنه‌بندی در سال ۱۳۹۵ مساحتی معادل ٥۸/۱ درصد از آبخوان در شرایط کلاس دوم معادل با خوب و مساحتی معادل ٤۱/۹ درصد در شرایط کلاس سوم معادل با متوسط واقع بود. درحالی که در سال ۱۳۹۹ برای شهریورماه مساحتی معادل ٤٥/۸ درصد از آبخوان در شرایط کلاس دوم معادل با خوب و ٥٤/۲ درصد در شرایط کلاس سوم معادل با متوسط واقع بوده است. در مجموع در خرداد ماه برای ابتدای دوره پهنه‌بندی در سال ۱۳۹۵ نسبت به انتهای دوره آماری در سال ۱۳۹۹ مساحتی از آبخوان که در شرایط کلاس دوم معادل با خوب قرار دارد به میزان ٤/۹ درصد کاهش پیدا کرد. به همین ترتیب مشخص شد که در شهریورماه برای ابتدای دوره پهنه‌بندی نسبت به انتهای دوره آماری، مساحتی از آبخوان که در شرایط کلاس دوم معادل با خوب قرار دارد به میزان ۱۲/۳ درصد کاهش پیدا کرد. بر این اساس می‌توان با استناد به این ارقام، سیر نزولی در کیفیت آب کشاورزی در آبخوان ملایر را به‌خوبی استنباط نمود.

همان‌طور که در شکل (٤) مشاهده می‌شود، کیفیت آب مورد استفاده در کشاورزی در طول پنج‌سال گذشته به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و بخش بزرگی از آبخوان به کلاس کیفی متوسط تنزل پیدا کرده است. آن‌چه قابل توجه است این است که در شکل (٤-ب) به‌عنوان نقشه کلاسه‌بندی شاخص ویلکاکس در شهریورماه سال ۱۳۹۵ تقریباً تفاوت عمده‌ای در توزیع کلاس‌ها مشاهده شد. با توجه به کوتاهی فاصله زمانی این نقشه و ماه خرداد همین سال، علت عمده برای این تفاوت را می‌توان در روش پهنه‌بندی پارامترهای پیوسته ورودی، یعنی SAR و EC دانست. به‌علاوه اگر فرض برداشت‌های فصلی را برای این تغییرات در نظر گرفته شود، قاعدتاً در سال ۱۳۹۹ برای نقشه‌های حاصله نیز این مغایرت باید دیده می‌شد. تفاوت روش‌های پهنه‌بندی با توجه به تأیید خطای اندازه‌گیری و طی مراحل صحت‌سنجی، لزوماً ارزش‌های متفاوت را نشان نداده و می‌تواند بیان‌گر اشتراک و نزدیکی طبقات کلاس شاخص استاندارد باشد.

سلیمانی [۲٤] با استفاده از مدل DRASTIC آسیب‌پذیری کیفی آبخوان دشت ملایر را بررسی نمود که در تشابه بالایی با نقشه‌های پژوهش حاضر، مناطق مختلف دشت در سه دسته آسیب‌پذیر کم، متوسط و زیاد به ترتیب با ارقام نسبی ۱٥/٥، ۷۱/٦٦ و ۱۲/۸٤ درصد قرار می‌گرفت. بنابراین با توجه به استقلال مطالعات می‌توان از نزدیکی نتایج به‌عنوان صحت‌یابی استفاده کرد. به این ترتیب ناحیه‌ای به وسعت سطوح مرتبط چاه‌های مشاهداتی کوسنج خلیل، قلعه آقابیگ، نکیل‌آباد، کرکان، حاجی‌آباد، نمازگاه، توچغاز و حسین‌آباد ناظم در محدوده آسیب‌پذیر واقع می‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تعیین حدود کیفی استاندارد آب کشاورزی و بررسی روند تغییرات غلظت پارامترهای شیمیایی آب زیرزمینی در آبخوان اشباع دشت ملایر، از ابزار سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. همچنین از اسکریپت برنامه‌نویسی به زبان پایتون برای تولید نقشه‌های پیوسته رستری-کلاسه‌بندی شاخص ویلکاکس استفاده شد. بهترین دقت با بهره‌گیری از مقایسه خطای استاندارد از بین روش‌های پهنه‌بندی قطعی IDW و زمین‌آمار Kriging در سال پایه انتخاب شد. مطالعه در بازه زمانی دو دسته خرداد و شهریورماه پنج ساله و برای عناصر کیفی EC، PH، HCO_3، CL و SAR انجام شد. تغییرات مکانی و بزرگی مقدار نقشه‌ها حاکی از آن است که در رقوم کمی انتخابی تحت عناوین CL، HCO_3 و EC در دوره انتهایی نسبت به دوره مشابه اول افت کیفیت با افزایش غلظت وجود داشته است. با این حال در دو پارامتر PH و SAR این مقدار به نسبت دوره مشابه اندکی افت را نشان داد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت آب منطقه‌ای استان همدان به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های کیفیت آب زیرزمینی دشت ملایر قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سمیرا السادات هدایتی: نگارش نسخه اولیه مقاله، مفهوم‌سازی،

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

تحلیل نرم‌افزاری، ترسیم نقشه‌ها

امید بهمنی: راهنمایی، مفهوم‌سازی، مشاوره، بازنگری متن مقاله، کنترل نتایج

پیمان طهماسبی: ویرایش و اصلاح مقاله، تحلیل نتایج و مفهوم‌سازی.

فاطمه دالوند: بررسی مقاله، کنترل نتایج

سید ابوالفضل حسینی: بازنگری متن مقاله، کنترل نتایج

منابع مورد استفاده

1. Abdollahi Mansourkhani, Mehdi, Hossein Mohammadzade, Amini Mohammad, and Farahnaz Azizi. 2019. Assessment of Groundwater Quality Spatial Distribution and Appointment Optimize Network of Shahrkord Plain Aquifer Using Geostatistical Methods. Watershed Management Research 32(2): 60-78. (InPersian).https://doi.org/10.22092/wmej.2019.123678.1159

2. Adeli, Mohsen. 2012. Evaluation of Ground Water Quality in GORGAN Township Using GIS and Geostatistics. Geographical Planning of Space 2(5): 57–74. (In Persian). https://gps.gu.ac.ir/article_5338_en.html

3. Alizadeh, Amin. 2006. Design of Surface Irrigation Systems. Mashhad: Imam Reza University. (July 12, 2024(.(In Persian).

4. Al-Mashagbah, Atef, Rida Al-Adamat, and Elias Salameh. 2012. The Use of Kriging Techniques with in GIS Environment to Investigate Groundwater Quality in the Amman-Zarqa Basin/Jordan. Research Journal of Environmental and Earth Sciences 4(2): 177–85. https://www.airitilibrary.com/Article/Detail/20410492-201202-201507220024-201507220024-177-185

5. Arslan, Hakan. 2012. Spatial and Temporal Mapping of Groundwater Salinity Using Ordinary Kriging and Indicator Kriging: The Case of Bafra Plain, Turkey. Agricultural Water Management 113: 57–63. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.015

6. Barca, E., and G. Passarella. 2008. Spatial Evaluation of the Risk of Groundwater Quality Degradation. A Comparison between Disjunctive Kriging and Geostatistical Simulation. Environmental Monitoring and Assessment 137(1): 261–73. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9758-3

7. Belkhiri, Lazhar, Ammar Tiri, and Lotfi Mouni. 2020. Spatial Distribution of the Groundwater Quality Using Kriging and Co-Kriging Interpolations. Groundwater for Sustainable Development 11: 100473. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100473

8. Chai, T., and R. R. Draxler. 2014. Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE)? – Arguments against Avoiding RMSE in the Literature. Geoscientific Model Development 7(3): 1247–50. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

9. Delbari, Masoomeh, Meysam Amiri, and Masoud Bahraini Motlagh. 2016. Assessing groundwater quality for irrigation using indicator kriging method. Applied Water Science 6(4): 371–81. https://doi.org/10.1007/s13201-014-0230-6

10. Fetouani, S., M. Sbaa, M. Vanclooster, and B. Bendra. 2008. Assessing Ground Water Quality in the Irrigated Plain of Triffa (North-East Morocco). Agricultural Water Management 95(2): 133–42. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.009

11. Ghomishoun, Marzieh, Arash Malekian, Khosro Hosseini, Saeed Gharachelo, and Mohammad Reza Khamoushi. 2012. A survey on spatial variations of groundwater quality in Semnan/ Sorkheh plain using geostatistical techniques. Pasture and desert research of Iran 19(3). (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijrdr.2012.3798

12. Hasani pak, Ali-Asghar. 2010. Geostatistics: Applications in Earth Sciences. Tehran: Tehran University. (In Persian)

13. Jafari, R., and L. Bakhshandehmehr. 2014. Analyzing the Spatial Variations of Groundwater Salinity and Alkalinity in Isfahan Province Using Geostatistics. JSTNAR 18(68): 183–95. (In Persian). dor:20.1001.1.24763594.1393.18.68.17.2

14. Jahanshahi, Afshin, Einillah Rohimoghaddam, and Abdulhamid Dehvari. 2014. Investigating Groundwater Quality Parameters Using GIS and Geostatistics (Case Study: Shahr-Babak Plain Aquifer). Water and Soil Science 24(2): 183–97. (In Persian). https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1676_en.html

15. Kaheh, Maryam Sadat, Hamid Kardan Moghaddam, Mohammadreza Ramezani, and Saman Javadi. 2023. Evaluation of groundwater quality of aquifer based on agricultural consumption (Case study: sari aquifer). Journal of Auifer and Qanat 3(2): 89–97. (In Persian). https://doi.org/10.22077/jaaq.2019.1736.1009

16. Mohammadi, Jahangard. 2006. 2 Pedometry: Spatial statistics. Tehran: Pelk. (In Persian)

17. Rezaei, M., N. Davatgar, K. Tajdari, and B. Abolpour. 2010. Investigation the Spatial Variability of Some Important Groundwater Quality Factors in Guilan, Iran. (In Persian). https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5284

18. Sahebjalal, E, F Dehghany, and M. S Tabatabaeezade. 2013. Investigating Spatio-Temporal Variations of Groundwater Quality Using Kriging Method. JWSS - Isfahan University of Technology 17(65): 51–61. (In Persian). dor:20.1001.1.24763594.1392.17.65.9.1

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]

19. Salari Jazi, Meysam, Heydar Zarei, and Mehrdad Taqavian. 2009. Application and Evaluation of Kriging and Cokriging Methods for Estimating Groundwater Level in Mianab Plain (Water Year 2005-2006). (In Persian)

20. Samadi, Javad. 2017. Spatial-Temporal Modeling of Groundwater Level Variations of Urban and Rural Areas in Kashan Aquifer Using GIS Techniques. Journal of Environmental Science and Technology 1(1): 63. (In Persian). dor:20.1001.1.24763594.1392.17.65.9.1

21. Samin, M., J. Soltani, Z. Zeraatcar, S. A. Moasheri, and N. Sarani. 2012. Spatial Estimation of Groundwater Quality Parameters Based on Water Salinity Data Using Kriging and Cokriging Methods. In International Conference on Transport, Environment and Civil Engineering, , 25–26.

22. Shabani, Mohammad. 2008. Investigation of qualitative changes in groundwater in the Arsanjan Plain. Journal of Natural Geography 3. (In Persian). dor:20.1001.1.20086377.1388.2.3.6.8

23. Shankar, K, G Elangovan, P Balamurugan, and R Saravanan. 2022. Spatial distribution of Groundwater quality assessment using Water Quality Index and GIS techniques in Thanjavur Taluk, Thanjavur District, Tamil Nadu, India. International Journal of Civil, Environmental and Agricultural Engineering: 32–58. https://doi.org/10.34256/ijceae2212

24. Soleimani, S. 2011. Application of DRASTIC, SINTACS, SI and neuro-fuzzy network models for determining groundwater pollution potential sites in Malayer Plain. Bu-Ali Sina. (In Persian).

25. Vaseghnejad, H. 2015. Investigation of the effect of drought on water resources of Malayer Plain. Master's Thesis. Malayer. Malayer (In Persian).

26. Wang, Zhiwei, Fulin Li, Yongfa Xia, Huawei Chen, Kairan Wang, Shidong Fu, and Genxu Wang. 2021. Spatial distribution of groundwater quality in the coastal plain and its relationship with land use and seawater intrusion. Environmental Earth Sciences 80(14): 465. https://doi.org/10.1007/s12665-021-09757-6

[Downloaded from jwmsei.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.22034.19.68.78]