



Comparison of Geostatistical and Hierarchical Methods in Investigating the Quality of Groundwater in the Moghan Plain in Terms of Drinking Uses

Yaser Hoseini ¹^{*}

1- Department of Agricultural Engineering and Technology, Moghan College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*Corresponding Author: y_hoseini@uma.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Groundwater resources play a critical role in supplying drinking water, particularly in arid and semi-arid regions. Therefore, accurate assessment of groundwater quality is essential for sustainable water resource management. In this study, groundwater quality in the Moghan Plain was evaluated and compared using the Water Quality Index (WQI), the Analytic Hierarchy Process (AHP), and geostatistical techniques within a Geographic Information System (GIS) framework. Water quality data from 29 exploitation wells, including pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), total hardness (TH), calcium, magnesium, sodium, potassium, chloride, sulfate, bicarbonate, and nitrate, were analyzed. In the AHP approach, criterion weights were determined through pairwise comparisons and expert judgment, whereas geostatistical analysis was performed using variogram modeling and cokriging interpolation with electrical conductivity as an auxiliary variable. The results showed that the cokriging model with a coefficient of determination (R^2) of 0.96 and a root mean square error (RMSE) of 0.2 was more accurate in estimating the WQI index than the hierarchical method with a coefficient of determination of 0.93 and a root mean square error of 0.3. The AHP results indicated that nitrate, total dissolved solids, and electrical conductivity were the most influential parameters affecting groundwater quality. Spatial distribution maps generated by both approaches revealed that the majority of the study area exhibited poor groundwater quality for drinking purposes, with more than 94% of the plain classified within the poor-quality category. Comparative analysis showed that while AHP is an effective tool for identifying the relative importance of water quality parameters, geostatistical methods provide more accurate spatial predictions due to their ability to account for spatial dependence and estimation uncertainty. Therefore, the integration of multi-criteria decision-making techniques and geostatistical approaches is recommended for groundwater quality assessment and management.
Submit Date: 2026/07/06	
Accept Date: 2026/09/19	
Keywords: Analytic Hierarchy, Process, Cokriging, Geostatistics, Groundwater Quality, Water Quality Index.	

Cite this article: Hoseini, Yaser. (2025). Comparison of Geostatistical and Hierarchical Methods in Investigating the Quality of Groundwater in the Moghan Plain in Terms of Drinking Uses. *Hydrogeology*, 10 (2), 22-43. DOI: <http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73436.1344>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73436.1344>

Publisher: University of Tabriz.

Expanded Abstract

Introduction

Groundwater resources are among the most vital components of the hydrological cycle, particularly in arid and semi-arid regions where surface water availability is limited and highly variable. In such environments, groundwater serves as the primary source of water supply for domestic, agricultural, and industrial uses. However, increasing anthropogenic pressures, including over-extraction, intensive agricultural activities, and land-use changes, have significantly altered both the quantity and quality of groundwater resources in recent decades. The Moghan Plain, located in northwestern Iran, represents one of the most productive agricultural zones in the country. Extensive irrigation-based farming systems, coupled with uncontrolled groundwater abstraction, have placed considerable stress on aquifer systems in this region. As a result, a continuous decline in groundwater levels, along with progressive salinization and contamination, has been reported. These conditions not only threaten drinking water security but also reduce soil productivity and agricultural sustainability. In order to effectively manage groundwater resources, reliable assessment of water quality is essential. The Water Quality Index (WQI) has been widely used as a comprehensive tool that transforms multiple physicochemical parameters into a single numerical value, facilitating interpretation and comparison. However, the spatial heterogeneity of groundwater quality necessitates the integration of WQI with spatial modeling techniques such as Geographic Information Systems (GIS) and geostatistical approaches. Moreover, the incorporation of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques, particularly the Analytic Hierarchy Process (AHP), allows for the systematic weighting of hydrochemical parameters based on their relative importance. Therefore, integrating WQI, AHP, GIS, and geostatistics provides a robust framework for groundwater quality assessment. This study aims to evaluate and compare the performance of AHP-based WQI and simple cokriging approaches in mapping groundwater quality in the Moghan Plain.

Materials and Methods

The study area, Moghan Plain, is characterized by a semi-arid climate with low annual precipitation and high evaporation rates. The aquifer system in this region is heavily exploited for agricultural irrigation, making it highly vulnerable to quality degradation. A total of 29 groundwater samples were collected from production wells distributed across the study area. The physicochemical parameters analyzed included pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), total hardness (TH), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chloride (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), and nitrate (NO_3^-). Laboratory analyses were performed following standard methods recommended by APHA and WHO guidelines. The WQI was computed using a weighted arithmetic index method, where each parameter was assigned a weight based on its relative significance in determining drinking water quality. In the AHP framework, pairwise comparison matrices were constructed to derive normalized weights, and consistency ratios were calculated to ensure logical coherence of expert judgments. For spatial analysis, geostatistical techniques were applied. Experimental variograms were constructed to evaluate spatial dependence of groundwater quality parameters. Simple cokriging was selected as the interpolation method, with EC considered as a secondary variable due to its strong correlation with salinity-related indicators. Data normality was assessed, and appropriate transformations were applied where necessary to satisfy geostatistical assumptions. Model validation was conducted using statistical performance indicators, including coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). Spatial distribution maps of WQI were generated using both AHP-weighted values and cokriging interpolation within a GIS environment, allowing comparative spatial analysis.

Results and Discussion

The comparative evaluation of the two modeling approaches revealed that both methods are capable of capturing the general spatial variability of groundwater quality; however, their predictive accuracy and spatial interpretation differ

significantly. The simple cokriging model demonstrated superior statistical performance, with an R^2 value of 0.96 and an RMSE of 0.2, indicating high predictive accuracy and strong spatial dependence among variables. In contrast, the AHP-based method yielded an R^2 of 0.93 and an RMSE of 0.3, reflecting slightly lower predictive precision but stronger interpretability in terms of decision-making. Spatial distribution maps derived from both methods revealed that groundwater quality in the Moghan Plain is generally poor, with more than 94% of the area classified within the 100–200 WQI range. This indicates a widespread deterioration of groundwater quality, primarily driven by salinization processes and anthropogenic pressures. The northern and upstream regions exhibited relatively better water quality, while central and southern parts showed significantly degraded conditions. The differences between the two approaches are fundamentally related to their methodological structures. Geostatistical methods such as cokriging rely on spatial autocorrelation and mathematical modeling of spatial continuity, making them highly effective in producing smooth and statistically optimized prediction surfaces. On the other hand, the AHP-based approach incorporates expert judgment and assigns weights based on the perceived importance of hydrochemical parameters. This results in more differentiated classification outcomes, particularly in identifying localized zones of varying water quality.

Hydrochemical analysis indicated that EC, TDS, and sodium are the dominant parameters influencing groundwater quality deterioration. Elevated concentrations of these parameters were mainly observed in intensively cultivated areas, suggesting a strong link between agricultural practices and salinization processes. Nitrate contamination was also observed in several locations, particularly in proximity to agricultural fields, indicating the impact of fertilizer application and irrigation return flows.

The spatial patterns derived from geostatistical modeling suggest that groundwater flow direction, evaporation intensity, and land-use patterns play significant roles in controlling the distribution of dissolved ions. Low-lying areas tend to accumulate higher concentrations of salts due to limited drainage and higher evapotranspiration rates. Comparison with previous studies confirms that salinization and nitrate contamination are common issues in arid agricultural regions worldwide. The integration of GIS and WQI proved to be highly effective in identifying pollution hotspots and providing spatially continuous information for management purposes.

Conclusions

The present study demonstrates that integrating WQI, AHP, GIS, and geostatistical techniques provides a comprehensive framework for groundwater quality assessment. The comparative analysis revealed that although the cokriging method offers higher predictive accuracy and better spatial continuity, the AHP-based approach provides more meaningful classification by incorporating the relative importance of water quality parameters. The results clearly indicate that groundwater quality in the Moghan Plain is predominantly poor, largely due to salinity and nitrate contamination. These conditions are driven by a combination of natural geological processes and intense anthropogenic activities, particularly agricultural practices. Overall, geostatistical methods are more suitable for spatial prediction and mapping, whereas AHP-based models are more appropriate for decision-making and management applications. Therefore, a hybrid approach combining both methodologies is recommended for sustainable groundwater management in arid and semi-arid regions. Therefore, an integrated approach combining both methods can provide a powerful framework for sustainable groundwater management in arid and semi-arid regions.

مقایسه روش‌های زمین آماری و سلسله مراتبی در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت مغان از نظر مصارف شرب

یاسر حسینی^{۱*} 

۱- استاد، هیئت علمی گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

نویسنده مسئول: y_hoseini@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در تأمین آب شرب و ضرورت مدیریت پایدار این منابع، ارزیابی دقیق کیفیت آب و شناسایی مناطق دارای محدودیت کیفی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI)، روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و روش‌های زمین آماری در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. داده‌های کیفی ۲۹ حلقه چاه بهره‌برداری شامل پارامترهای pH، هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، سختی کل، کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلرید، سولفات، بی کربنات و نیترات مورد استفاده قرار گرفت. در روش AHP، وزن معیارها براساس مقایسات زوجی و قضاوت کارشناسان تعیین شد، در حالی که در روش زمین آماری، از مدل‌های واریوگرام و تکنیک کوکریجینگ با استفاده از هدایت الکتریکی به عنوان متغیر کمکی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که مدل کوکریجینگ با ضریب تعیین ۰/۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۲ نسبت به روش سلسله مراتبی با ضریب تعیین ۰/۹۳ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۳ از دقت بیشتری در برآورد شاخص WQI برخوردار است. همچنین نتایج AHP بیانگر آن بود که پارامترهای نیترات، کل املاح محلول و هدایت الکتریکی بیشترین تأثیر را در کاهش کیفیت آب زیرزمینی منطقه دارند. نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از هر دو روش نشان داد که بخش عمده منطقه مورد مطالعه دارای کیفیت ضعیف برای مصارف شرب است؛ به طوری که بیش از ۹۴ درصد مساحت دشت در طبقه کیفیت ضعیف قرار دارد. مقایسه نتایج نشان داد که اگرچه روش AHP ابزار مناسبی برای تعیین اهمیت نسبی معیارهای مؤثر بر کیفیت آب است، اما روش زمین آماری به دلیل در نظر گرفتن ساختار فضایی داده‌ها و قابلیت برآورد خطا، از دقت بیشتری در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی برخوردار است. بنابراین استفاده همزمان از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و زمین‌آمار می‌تواند به بهبود مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی کمک نماید.

استناد: حسینی، یاسر. (۱۴۰۵). مقایسه روش‌های زمین آماری و سلسله مراتبی در بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت مغان از نظر مصارف شرب.

DOI: <http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73436.1344> ۲۲-۴۳، (۲)، ۱۰، هیدروژئولوژی،

مقدمه

۶۰ درصد آب مصرفی کشور از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود که این امر موجب فشار شدید بر آبخوان‌ها شده و افت سطح ایستابی و کاهش کیفیت آب را به دنبال داشته است (Noori et al., 2021). این وضعیت در بسیاری از دشت‌های کشور به شکل افت مستمر تراز آب و افزایش تمرکز آلاینده‌ها در آب زیرزمینی مشاهده می‌شود. همچنین تغییر الگوی مصرف آب در بخش کشاورزی و افزایش سطح زیر کشت محصولات آب‌بر، فشار مضاعفی بر منابع محدود آب زیرزمینی وارد کرده است. در سال‌های اخیر، فعالیت‌های انسانی مانند توسعه کشاورزی آبی، استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی، نفوذ فاضلاب‌های شهری و صنعتی و برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی نقش مهمی در تغییر کیفیت آب داشته‌اند (میرشکاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ حسینی و کامرانی، ۱۳۹۷). این عوامل موجب افزایش غلظت یون‌هایی مانند سدیم، کلر، سولفات و نیتрат شده و کیفیت آب را برای مصارف شرب و کشاورزی به شدت تحت تأثیر قرار داده‌اند. از سوی دیگر، فرآیندهای زمین‌شناسی نظیر انحلال کانی‌های تبخیری مانند ژبیس و هالیت نیز در افزایش شوری آب نقش مهمی دارند (Todd, 1980; Fetter, 1999). در بسیاری از مناطق خشک، این فرآیندها در تعامل با شرایط اقلیمی گرم و تبخیر بالا، موجب تشدید تجمع املاح در آبخوان‌ها می‌شوند. در نتیجه، کیفیت منابع آبی به‌صورت تدریجی کاهش یافته و محدودیت‌های جدی برای استفاده پایدار از آن‌ها ایجاد می‌شود. در مطالعات مختلف نشان داده شده است که استفاده از WQI همراه با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) می‌تواند الگوهای مکانی آلودگی را به‌خوبی آشکار کند (نادری و موسوی، ۱۳۹۸؛ حسینی و همکاران، ۱۳۹۹). این ترکیب امکان نمایش پهنه‌های بحرانی را فراهم کرده و تصمیم‌گیری مدیریتی را برای کنترل منابع آلاینده تسهیل می‌کند. همچنین استفاده از این روش‌ها باعث می‌شود تغییرات کیفیت آب در مقیاس مکانی بهتر قابل تحلیل و تفسیر باشد. با توجه به ماهیت نقطه‌ای داده‌های کیفی آب، استفاده از روش‌های زمین‌آمار مانند کریجینگ و کوکریجینگ برای پهنه‌بندی کیفیت آب ضروری است. این روش‌ها با در نظر گرفتن ساختار فضایی داده‌ها، نسبت به روش‌های کلاسیک مانند تیسن و IDW از دقت بالاتری برخوردار هستند (Merdun et al.,

بررسی‌ها نشان می‌دهد که در استان اردبیل بیش از دو هزار حلقه چاه بهره‌برداری وجود دارد و کاهش ذخایر آب زیرزمینی طی سال‌های اخیر، علاوه بر افت تراز آبخوان و کسری مخزن، سبب کاهش کیفیت و افزایش شوری این منابع شده است. چنین تغییراتی نه‌تنها پایداری تأمین آب را تهدید می‌کند، بلکه به شور شدن لایه‌های خاک و افت بهره‌وری اراضی کشاورزی نیز منجر می‌شود. در این میان، شاخص کیفیت آب (WQI) به‌عنوان یکی از جامع‌ترین و پرکاربردترین ابزارها برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، امکان تلفیق پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و هیدروژئوشیمیایی و تبدیل آن‌ها به یک مقدار عددی قابل تفسیر را فراهم می‌سازد (Adimalla and Qian, 2019). به‌همین دلیل، بسیاری از مطالعات داخلی و خارجی بر استفاده از WQI و ترکیب آن با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مانند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) تأکید کرده‌اند، زیرا این روش سبب افزایش دقت مکانی، بهبود تعیین نواحی بحرانی و ارتقای قابلیت مدیریت منابع آب می‌شود. کیفیت آب زیرزمینی تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرآیندهای طبیعی از جمله واکنش آب و سنگ، تبادل یونی، انحلال و رسوب کانی‌ها و همچنین عوامل انسانی قرار دارد؛ از این‌رو، شناخت فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی حاکم بر آبخوان، نقش مهمی در ارزیابی قابلیت استفاده از منابع آب زیرزمینی دارد (محمدزاده و فنودی، ۱۴۰۴). مطالعات انجام‌شده در دشت‌های مختلف نشان داده‌اند که تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی می‌تواند ارزیابی قابلیت استفاده از منابع آب زیرزمینی را با چالش مواجه سازد؛ بنابراین، استفاده از روش‌های مناسب برای تحلیل و نمایش الگوی مکانی کیفیت آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (راد بروجنی و همکاران، ۱۴۰۴). بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مدیریت پایدار منابع آب، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ایران به دلیل متوسط بارندگی پایین (حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال) و توزیع نامتوازن زمانی و مکانی بارش، وابستگی به منابع آب زیرزمینی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. براساس گزارش‌های وزارت نیرو، بیش از

Guleria Mehdinejadani (2025) در دشت قروه-دهگلان استان کردستان نشان داد که غلظت نیترات در برخی منابع آب زیرزمینی از حد مجاز آب شرب فراتر رفته و به‌ویژه برای نوزادان و کودکان خطرات بالقوه بهداشتی ایجاد می‌کند. همچنین، Noori et al. (2021) گزارش کردند که برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها همراه با افزایش شوری و افت کیفیت آب زیرزمینی، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های منابع آب ایران تبدیل شده است. این یافته‌ها بیانگر روند نگران‌کننده کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق کشور و ضرورت پایش مستمر و مدیریت علمی این منابع است. همچنین Al-Mashaqbeh et al. (2022) نشان دادند که ترکیب GIS و WQI می‌تواند الگوی مکانی آلودگی را با دقت بالا مشخص کند. Chen et al. (2021) نیز بیان کردند که وزن‌دهی صحیح پارامترها در مدل‌های AHP باعث افزایش دقت طبقه‌بندی کیفیت آب می‌شود. این مطالعات بر اهمیت استفاده همزمان از روش‌های آماری، مکانی و تصمیم‌گیری چندمعیاره در تحلیل منابع آب تأکید دارند. در مجموع، با توجه به اهمیت دشت مغان به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور و وابستگی شدید آن به منابع آب زیرزمینی، بررسی دقیق کیفیت آب در این منطقه ضروری است. این دشت در سال‌های اخیر تحت تأثیر برداشت بی‌رویه، توسعه کشاورزی و تغییرات اقلیمی با افت کیفیت آب مواجه شده است و نیازمند ارزیابی جامع و علمی می‌باشد. بنابراین در این پژوهش، با تعیین شاخص WQI، با استفاده از روش‌های زمین‌آماري و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان به‌صورت مکانی و کمی ارزیابی شده است. لذا، هدف اصلی این پژوهش، مقایسه کارایی دو رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و روش‌های زمین‌آماري در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان بر اساس شاخص کیفیت آب (WQI) است. نوآوری این تحقیق در ارزیابی هم‌زمان دقت، قابلیت نمایش تغییرات مکانی و توانایی هر دو روش در شناسایی مناطق بحرانی کیفیت آب و ارائه مبنایی مناسب برای مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی منطقه می‌باشد.

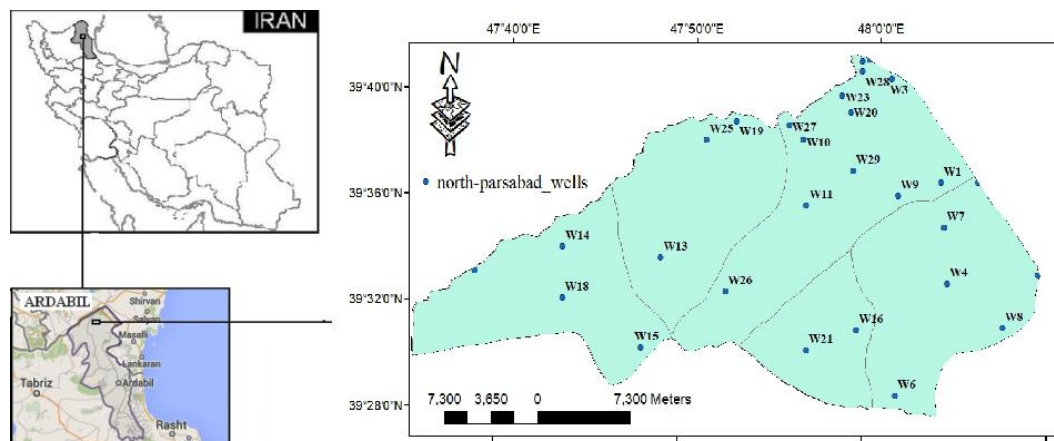
مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه

(2006; Castellini et al., 2019). علاوه بر این، این روش‌ها امکان مدل‌سازی پیوستگی فضایی و شناسایی الگوهای پراکنش آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند. همچنین قابلیت محاسبه خطای تخمین و تحلیل عدم قطعیت از دیگر مزایای مهم این روش‌ها در مطالعات منابع آب زیرزمینی است (Cressie, 1993; Isaaks and Srivastava, 1989). این ویژگی‌ها موجب افزایش اعتمادپذیری نتایج و بهبود دقت پیش‌بینی در مناطق فاقد داده می‌شود. از سوی دیگر، تعیین وزن مناسب برای پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب، یکی از چالش‌های مهم در محاسبه WQI است. در این زمینه، Saaty (2008) روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) را معرفی کرد که امکان تعیین وزن‌های علمی و سازگار را فراهم می‌کند. مطالعات داخلی نشان داده‌اند که ترکیب AHP و GIS دقت طبقه‌بندی کیفیت آب را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (کاظمی و منصوری، ۱۳۹۷؛ فراهانی و رحیمی، ۱۳۹۹). این رویکرد با کاهش خطای تصمیم‌گیری و افزایش دقت وزن‌دهی، نقش مهمی در بهبود نتایج نهایی دارد. همچنین امکان ترکیب آن با سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، انعطاف‌پذیری بالایی در تحلیل‌های محیطی ایجاد می‌کند. مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که کیفیت آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها تحت تأثیر شوری و نیترات قرار دارد. به‌عنوان مثال، در دشت اردبیل، افزایش غلظت یون‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و توسعه شهری گزارش شده است (حسنعلی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱). همچنین نادری و موسوی (۱۳۹۸) نشان دادند که بخش عمده‌ای از آب زیرزمینی در وضعیت نامناسب برای شرب قرار دارد. در دشت قزوین نیز حسینی و همکاران (۱۳۹۸) تأکید کردند که نیترات و شوری از عوامل اصلی کاهش کیفیت آب هستند. این نتایج نشان می‌دهد که روند آلودگی منابع آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق کشور یک روند رو به رشد و نگران‌کننده است. در مطالعات خارجی نیز Al-Ghamdi and Al-Zahrani (2020) نشان دادند که شوری مهم‌ترین عامل افت کیفیت آب در مناطق خشک است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که آلودگی منابع آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های ایران به‌دلیل گسترش فعالیت‌های کشاورزی، توسعه شهری، افزایش غلظت نیترات و سایر آلاینده‌های شیمیایی در حال تشدید است. پژوهش and

ویژگی‌های زمین‌شناسی و توسعه گسترده فعالیت‌های کشاورزی، نقش مهمی در تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی منطقه دارند. به‌منظور ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، از ۲۹ حلقه چاه بهره‌برداری در سطح منطقه نمونه‌برداری انجام شد. عملیات نمونه‌برداری در فصل تابستان ۱۴۰۴ مطابق دستورالعمل‌های استاندارد ارائه شده در روش‌های استاندارد برای آزمایش آب و فاضلاب (APHA, 2017) انجام گرفت. پیش از نمونه‌برداری، آب هر چاه به مدت کافی تخلیه شد تا نمونه‌ای معرف از آبخوان برداشت شود. نمونه‌های آب در بطری‌های پلی‌اتیلنی شسته‌شده جمع‌آوری، در دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد در یخدان نگهداری و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه منتقل شدند. سپس نمونه‌ها مطابق روش‌های استاندارد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل pH، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، کلرید (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و نیتрат (NO_3^-) بودند. موقعیت محدوده مورد مطالعه و پراکنش مکانی چاه‌های نمونه‌برداری در شکل ۱ ارائه شده است.

محدوده مورد مطالعه با وسعت تقریبی ۶۶۹ کیلومتر مربع، بخشی از اراضی دشت مغان در شهرستان پارس‌آباد واقع در استان اردبیل را دربر می‌گیرد. این منطقه در فاصله حدود ۲۳۰ کیلومتری شمال‌غرب شهر اردبیل قرار داشته و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۵۸ تا ۲۵۴ متر متغیر است. بر اساس داده‌های اقلیمی، میانگین بارندگی سالانه منطقه ۲۸۴/۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد است. مطابق طبقه‌بندی آمبرژه، منطقه دارای اقلیم نیمه‌مرطوب معتدل بوده، در حالی‌که بر اساس شاخص دومارتن، در محدوده اقلیم نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. از نظر هیدروژئولوژی، آبخوان دشت مغان عمدتاً از رسوبات آبرفتی دوران کواترنری شامل شن، ماسه، سیلت و رس تشکیل شده و از نوع آبخوان آزاد^۱ است. براساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای اردبیل، عمق سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های آبرفتی استان، در محدوده‌ای حدود ۵ تا ۲۰ متر قرار دارد و در محدوده مورد مطالعه به‌طور متوسط حدود ۱۲ متر است. آب زیرزمینی این دشت عمدتاً برای مصارف کشاورزی، شرب و تا حدودی دامداری مورد استفاده قرار می‌گیرد و اراضی منطقه نیز عمدتاً شامل اراضی زراعی آبی، باغات و مراعات است.



شکل ۱- موقعیت دشت در استان اردبیل و چاه‌های مطالعاتی.

Figure 1- Location of the plain in Ardabil province and study wells.

(Na^+) و پتاسیم (K^+) و آنیون‌های بی‌کربنات (HCO_3^-)، کلرید (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و نیترات (NO_3^-) که غلظت آن‌ها بر حسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر (meq/L) بیان شده بود، مورد استفاده قرار گرفتند. خطای تعادل یونی براساس رابطه (۱)

صحت آنالیزها و محاسبه خطای آزمایش

به‌منظور کنترل کیفیت نتایج آزمایشگاهی، خطای تعادل یونی^۲ (CBE) برای تمامی نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه شد. در این محاسبه، تمامی یون‌های اصلی اندازه‌گیری‌شده شامل کاتیون‌های کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم

²Charge Balance Error

¹Unconfined Aquifer

است، به نیترات، نیتريت و کل املاح محلول، حداکثر وزن ۵ اختصاص داده شده است و وزن ۱ به منیزیم اختصاص داده شده است، زیرا کم‌تر نقش مهمی در کیفیت آب زیرزمینی دارد. به همین ترتیب، وزن‌های بین ۱ تا ۵ به سایر پارامترها اختصاص داده شده است. در مرحله دوم، وزن نسبی از رابطه زیر برای پارامترها، محاسبه می‌شود.

$$W_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (2)$$

که در این رابطه: W_i وزن هر پارامتر، W_i وزن نسبی و n تعداد پارامترهاست.

در مرحله سوم، یک مقیاس رتبه‌بندی کیفیت (q_i) برای هر پارامتر با استفاده از رابطه زیر اختصاص داده می‌شود.

$$q_i = \frac{C_i - C_{ip}}{S_i - C_{ip}} \times 100 \quad (3)$$

که در این رابطه: q_i رتبه کیفیت است. C_i غلظت پارامتر شیمیایی هر نمونه آب (mg/L): S_i استاندارد آب آشامیدنی برای هر پارامتر شیمیایی (mg/L) و C_{ip} : مقدار ایده‌آل هر پارامتر شیمیایی در آب خالص که برای تمام پارامترها صفر در نظر گرفته می‌شود به جز pH که مقدار آن برابر ۷ است. در نهایت شاخص کیفی آب (WQI)، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. که با در نظر گرفتن حدود جدول ۲، کیفیت آب از لحاظ شرب طبقه‌بندی می‌شود.

$$WQI = \sum_{i=1}^N q_i \times W_i \quad (4)$$

محاسبه شد (APHA, 2017). مطابق دستورالعمل‌های استاندارد، اگر مقدار خطای تعادل یونی کمتر از ۵ درصد باشد، نتایج آنالیز شیمیایی از دقت و قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار هستند. نتایج این بررسی نشان داد که مقدار خطای تعادل یونی در تمامی نمونه‌های آب زیرزمینی کمتر از ۰/۳۵ درصد بوده است؛ بنابراین، کلیه نتایج آنالیزهای شیمیایی در مراحل بعدی پژوهش مورد استفاده قرار گرفت.

$$Error\ of\ reaction = \frac{\sum_{i=1}^N Cations - \sum_{i=1}^N Anions}{\sum_{i=1}^N Cations + \sum_{i=1}^N Anions} \quad (1)$$

شاخص کیفی آب (WQI)

شاخص کیفی شاخص کیفی آب (WQI) به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف شرب در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود. مقدار WQI بر اساس تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. اوزان هر پارامتر براساس تأثیر آن بر کیفیت آب در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، شاخص کیفیت آب (WQI) براساس روش ارائه‌شده توسط دردور و همکاران (۲۰۲۱) و مطابق مراحل زیر انجام شد. در مرحله اول، وزن W_i را برای هر یک از دوازده پارامتر فیزیکوشیمیایی، با توجه به اهمیت نسبی آن در کیفیت کلی آب برای اهداف آشامیدنی اختصاص داده می‌شود. پارامترها و مقادیر وزن هر یک از آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که در جدول مشخص

جدول ۱- وزن و اوزان نسبی شاخص‌های کیفی آب در روش WQI (W.H.O (2017)).

Table 1- Weights and relative weights of water quality indicators in the WQI method (W.H.O, 2017).

Relative weight W_i	Weight W_i	Unit	Chemical parameter
0.105	4	-	pH
0.105	4	$\mu S/cm$	EC
0.132	5	mg/L	TDS
0.053	2	mg/L	TH
0.053	2	mg/L	Ca^{2+}
0.026	1	mg/L	Mg^{2+}
0.079	3	mg/L	Na^+
0.079	3	mg/L	Cl^-
0.105	4	mg/L	So_4^{2-}
0.132	5	mg/L	NO_3^-
0.079	3	mg/L	HCO_3
0.052	2	mg/L	K^+
1	34	-	SUM

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب در روش WQI (Adimalla and Qian (2019)).

Table 2- Water quality classification in the WQI method (Adimalla and Qian, 2019).

More than 300	200-300	100-200	50-100	Less than 50	Index range
Inappropriate	Very poor	poor	Good	Excellent	Water status

$$Z^*(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

در رابطه فوق، $Z(x_i)$: مقدار مشاهده شده Z در نقطه i ، وزن یا اهمیت نسبت داده شده به مقدار Z در نقطه و $Z^*(x)$: مقدار تخمین زده شده Z در نقطه x می‌باشد.

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

به منظور تعیین وزن معیارها، از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد. در گام نخست، مسئله و هدف پژوهش، یعنی تعیین میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر کیفیت آب زیرزمینی برای مصارف شرب، تعریف گردید. در مرحله دوم، ماتریس‌های مقایسه زوجی براساس مقیاس قضاوت Saaty, (1980) تشکیل شدند. با توجه به اینکه در این مطالعه ۱۲ معیار برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در نظر گرفته شد، ماتریس مقایسه زوجی به صورت یک ماتریس مربعی با ابعاد 12×12 تنظیم گردید. در گام سوم، به منظور تکمیل و بهبود ماتریس‌های مقایسه زوجی، تعداد $n(n-1)$ قضاوت موردنیاز انجام شد که محاسبات مربوط به آن به صورت خودکار توسط افزونه AHP در نرم‌افزار ArcGIS 10.4 صورت گرفت. در مرحله چهارم، با استفاده از روش بردار ویژه، وزن نسبی هر یک از معیارها محاسبه و اهمیت آن‌ها در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی تعیین شد. در گام پنجم، میزان سازگاری قضاوت‌های انجام‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، شاخص سازگاری (CI) بر اساس رابطه (۵)، شاخص ناسازگاری بر اساس رابطه (۶) و نسبت سازگاری (CR) مطابق رابطه (۷) محاسبه شد (Saaty, 1980). در صورتی که مقدار CR کمتر از ۰/۱ باشد، ماتریس مقایسات زوجی دارای سازگاری قابل قبول تلقی می‌شود؛ در غیر این صورت، لازم است مقایسه‌های انجام‌شده و ضرایب اختصاص‌یافته به معیارها بازنگری شوند تا مقدار نسبت سازگاری به کمتر از حد آستانه کاهش یابد. در نهایت، پس از تعیین ضرایب نهایی تمامی

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش زمین آمار

زمین‌آمار به عنوان روشی برای برآورد متغیرهای مکانی، برخلاف روش‌های کلاسیک، علاوه بر مقادیر اندازه‌گیری‌شده، موقعیت مکانی و ارتباط فضایی داده‌ها را نیز در نظر می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این روش، امکان بررسی ساختار تغییرات مکانی، برآورد خطای تخمین و ارزیابی عدم قطعیت نتایج است. مفاهیم اصلی زمین‌آمار شامل متغیر ناحیه‌ای، نیم‌تغییرنما، واریانس تخمین و روش‌های تخمین مکانی هستند (حسنی‌پاک، ۱۳۷۷). متغیر ناحیه‌ای به متغیری تصادفی گفته می‌شود که مقادیر آن در نقاط مختلف دارای وابستگی مکانی بوده و تغییرات آن تابع فاصله و جهت بین نقاط است. این متغیر را می‌توان به دو مؤلفه جزمی و تصادفی تفکیک کرد:

$$Z(x) = m(x) + y(x) \quad (5)$$

در رابطه فوق، $Z(x)$: مقدار متغیر ناحیه‌ای در نقطه‌ای با مختصات (x) ، $m(x)$: مؤلفه جزمی متغیر ناحیه‌ای و $y(x)$: مؤلفه تصادفی متغیر ناحیه‌ای می‌باشد.

نیم‌تغییرنما یکی از مهم‌ترین ابزارهای زمین‌آمار است که میزان وابستگی مکانی بین داده‌ها را بر اساس فاصله و جهت آن‌ها مشخص می‌کند. این شاخص با استفاده از اختلاف مقادیر متغیر در زوج نقاط مختلف محاسبه می‌شود.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (6)$$

در رابطه فوق، $n(h)$: تعداد جفت نمونه‌های به کار رفته در محاسبات به ازای هر فاصله h است، بنابراین تعداد جفت‌ها تابع h است که معمولاً با افزایش h تعداد جفت‌ها کم می‌شود و $Z(x)$ و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در دو نقطه به مختصات (x) و $(x+h)$ است که به فاصله h از هم قرار دارند. کریجینگ یکی از روش‌های اصلی تخمین زمین‌آمار است که با استفاده از مقادیر معلوم و مدل نیم‌تغییرنما، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. این روش بر پایه میانگین متحرک وزنی بوده و به عنوان یک تخمین گر خطی بدون اریب، بهترین مقدار برآورد را همراه با خطای تخمین ارائه می‌دهد (حسینی، ۲۰۲۳). رابطه کلی کریجینگ به صورت زیر بیان می‌شود:

از روش بردار ویژه محاسبه گردید. همچنین، شاخص سازگاری (CI)، شاخص تصادفی (RI) و نسبت سازگاری (CR) محاسبه شد و با توجه به اینکه مقدار CR کمتر از ۰/۱ بود، سازگاری ماتریس تأیید شد. در مرحله نهایی، وزن‌های حاصل از AHP به لایه‌های طبقه‌بندی شده اختصاص یافت و با استفاده از ابزار همپوشانی وزنی در محیط ArcGIS 10.4، نقشه نهایی پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی استخراج شد. بنابراین، در این مطالعه روش AHP به منظور تعیین وزن نسبی پارامترهای مؤثر و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی به کار گرفته شد و نقشه نهایی کیفیت آب بر اساس همپوشانی وزنی معیارها تهیه گردید.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a} \times W_{(i,j)}}{W_{(i,j)}} \quad (8)$$

$\lambda_{\max}$: میانگین بردار سازگاری، $\bar{a}$: میانگین هندسی ماتریس (i,j) ، $W_{i,j}$: وزن یا اولویت جایگزینی، N : تعداد جایگزین‌های مورد مقایسه.

شاخص ناسازگاری (CI) از فرمول زیر محاسبه می‌گردد.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)} \quad (9)$$

که در آن مقدار n اندازه ماتریس می باشد.

برای محاسبه نرخ ناسازگاری (CR) از فرمول زیر استفاده می‌شود.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

RI: شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی است که توسط برنامه برای هر پارامتر تأثیرگذار محاسبه می‌گردد.

لایه‌ها، عملیات همپوشانی وزنی^۱ در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شد و نقشه نهایی پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس شاخص کیفیت آب (WQI) استخراج و طبقه‌بندی گردید. در مرحله نخست این پژوهش، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل مؤثر و محدودکننده کیفیت آب زیرزمینی تهیه و پس از پردازش، هر یک بر اساس شرایط کیفی به ۹ طبقه مجزا تقسیم‌بندی شدند (جدول ۳). این طبقات به ترتیب شامل وضعیت بسیار بسیار نامطلوب (کلاس ۱)، بسیار نامطلوب (کلاس ۲)، نامطلوب (کلاس ۳)، نسبتاً نامطلوب (کلاس ۴)، متوسط (کلاس ۵)، نسبتاً مطلوب (کلاس ۶)، مطلوب (کلاس ۷)، بسیار مطلوب (کلاس ۸) و عالی (کلاس ۹) هستند. پس از انجام طبقه‌بندی، با در نظر گرفتن میزان تأثیر هر یک از پارامترها در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی، وزن متناسبی برای هر معیار تعیین شد تا سهم نسبی آن در فرآیند تحلیل و تهیه نقشه نهایی کیفیت آب به صورت کمی مشخص شود. به عبارت دیگر، در این پژوهش، برخلاف روش متداول محاسبه WQI برای هر نمونه آب، ابتدا لایه‌های مکانی مربوط به پارامترهای کیفی شامل pH، EC، TDS، TH، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، Na^+ ، K^+ ، Cl^- ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- و NO_3^- در محیط GIS تهیه شدند. سپس هر یک از این لایه‌ها بر اساس روش پیشنهادی (Derdour et al. 2021) و حدود استاندارد کیفیت آب طبقه‌بندی و به کلاس‌های کیفی تبدیل شدند. در ادامه، اهمیت نسبی هر یک از پارامترهای کیفی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) تعیین شد. برای این منظور، ماتریس مقایسه زوجی 12×12 بر اساس مقیاس ۹ درجه‌ای، تشکیل و وزن نهایی هر معیار با استفاده

جدول ۳- مقیاس انجام مقایسه‌های دوتایی در روش AHP.

Table 3- Scale for performing pairwise comparisons in the AHP method.

Judgment of preference	Strong superiority	Very strong and somewhat strong superiority	Very strong	Strong to very strong	superiority Strong	Moderate to Strong superiority	Moderate Equal	Equal to Moderate	Equal superiority
Numeral	9	8	7	6	5	4	3	2	1

(EF) استفاده می‌گردد. بهترین پیش‌بینی‌ها زمانی رخ می‌دهد که آماره‌های ME، RMSE، ϵ و MAE به صفر و EF و R^2 به یک میل نمایند. روابط ۱۱ الی ۱۵ معادلات آماره‌های مذکور را نشان می‌دهند.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

برای ارزیابی روش‌ها، از آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، درصد خطای نسبی (ϵ)، میانگین خطای مطلق^۳ (MAE)، ضریب تبیین^۴ (R^2)، و بهره‌وری مدل

³Mean Absolute Error

⁴Coefficient of Determination

1 - Weighted Overlay

²Root Mean Square Error

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - P_i)^2} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_i - P_i}{Q_i} \right| \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - P_i| \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (14)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 - \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (15)$$

رابطه ارائه شده توسط (Mehdinejadani, 2025) انجام شد. فرم کلی GPI که در مطالعات ارزیابی مدل‌ها استفاده می‌شود به صورت زیر است:

$$GPI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (16)$$

که در این رابطه، W_i : وزن هر معیار ارزیابی، S_i : مقدار استاندارد شده معیار و n : تعداد معیارهای ارزیابی می‌باشد.

نتایج و بحث

بررسی آماری نتایج کیفیت نمونه های آب زیرزمینی

در جدول (۴) نتایج آنالیز شیمیایی نمونه آب، از لحاظ آماری ارائه شده است. کمترین و بیشترین مقدار هدایت الکتریکی نمونه آب چاه‌ها به ترتیب برابر با ۴۶۴ و ۱۶۰۷۰ (میکروموس بر سانتی‌متر) می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، کیفیت آب در دشت مغان به علت آلودگی اراضی کشاورزی و نفوذ به آب زیرزمینی مناسب نمی‌باشد. با توجه به این جدول، یون‌های سولفات، سدیم و پتاسیم تغییرات زیادی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند.

در روابط فوق، N : تعداد نمونه، P_i : مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Q_i : مقادیر واقعی، $\bar{P}$: میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، $\bar{Q}$: میانگین مقادیر واقعی می‌باشد. در این روابط، مقدار واقعی (مشاهده شده) برابر با مقدار WQI محاسبه شده از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های آب زیرزمینی در نقاط نمونه‌برداری بوده و مقدار پیش‌بینی شده برابر با مقدار WQI برآورد شده توسط مدل‌های مورد بررسی (روش‌های زمین‌آمار و تحلیل سلسله مراتبی) در همان نقاط است. به عبارت دیگر، مقادیر مشاهده شده به عنوان داده‌های مرجع و مقادیر تخمین زده شده برای ارزیابی دقت مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر شاخص‌های آماری ذکر شده، به منظور دستیابی به یک معیار جامع برای مقایسه عملکرد مدل‌ها، از شاخص عملکرد کلی^۱ (GPI) نیز استفاده شد. این شاخص با ترکیب چندین معیار آماری خطا و دقت، امکان رتبه‌بندی مدل‌ها را بر اساس عملکرد کلی فراهم می‌کند. مقدار کمتر GPI نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل و قابلیت بیشتر آن در برآورد مقادیر WQI است. روش محاسبه این شاخص مطابق

جدول ۴- مشخصه‌های آماری مؤلفه های مختلف شیمیایی.

Table 4 – Statistical characteristics of various chemical components.

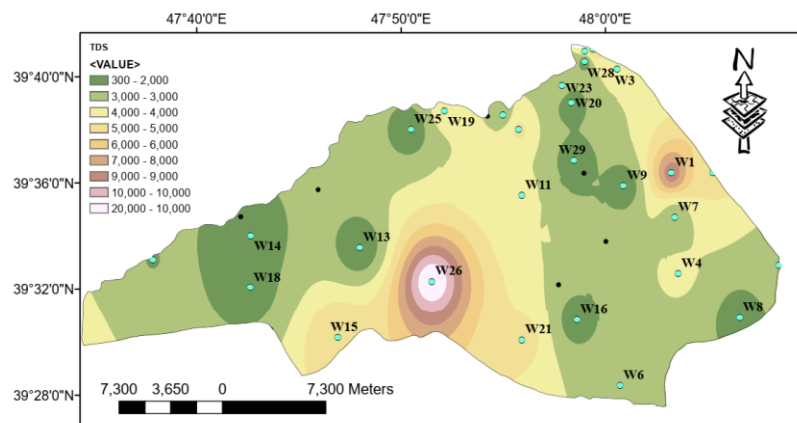
Parameter	EC ($\mu\text{S/cm}$)	T.D.S (mgL^{-1})	PH	Ca (mgL^{-1})	Mg (mgL^{-1})	Na (mgL^{-1})	K (mgL^{-1})	HCO ₃ (mgL^{-1})	CO ₃ (mgL^{-1})	Cl (mgL^{-1})	SO ₄ (mgL^{-1})
Mean	4157.3	2910	7.36	4.31	5.52	32.45	0.07	3.71	0.17	8.26	30.14
Standard deviation	3627.6	2539	1.72	3.81	4.72	31.85	0.37	2.13	0.64	11.99	29.98
Coefficient of variation (%)	87.2	87.26	23.3	88.4	85.5	98.15	528	57.41	376.4	145.1	99.47
Maximum	16070	11249	9.5	12.7	20.2	142	2	8.2	2.5	53.1	143
Minimum	464	324.8	0	0.1	0.4	1.65	0	0.5	0	0.7	0.8
Mode	----	---	8.26	0.7	2.4	-----	0	4	0	1.5	45.2
Median	3330	2331	7.66	3	3.9	23.4	0	3.6	0	3	23.7

Range	15606	1092	9.5	12.6	19.8	140.3	2	7.7	2.5	52.4	142.2
Skewness	1.58	1.58	-3.23	0.61	1.38	1.69	5.37	0.49	3.59	2.5	1.95
Variance	1.3E+7	6E+6	2.95	14.5	22.3	1014	0.14	4.53	0.42	143.7	898.7

نقشه‌های هم‌ارزش پارامترهای موثر بر کیفیت آب زیرزمینی

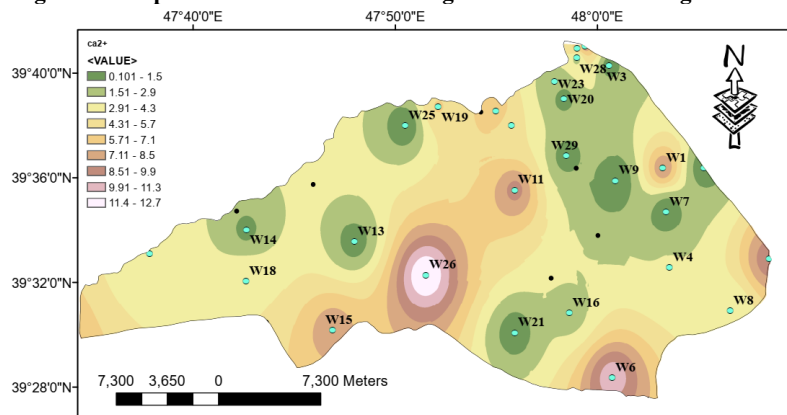
علت این امر انحلال بیشتر کانی‌ها و رسوبات با افزایش فاصله از منشأ آب تغذیه‌ای است. در شکل ۳ نقشه هم‌مقدار یون کلسیم نمونه‌های آب زیرزمینی نشان داده شده است. با توجه به این شکل غلظت کلسیم از بخش شمالی به سمت جنوب و غرب دشت افزایش می‌یابد. علت این موضوع انحلال بیشتر کانی‌های حاوی کلسیم مانند ژیپس در مسیر جریان آب زیرزمینی است. همچنین نقشه هم‌مقدار منیزیم دشت مغان در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار منیزیم در بخش شمالی منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. مقدار منیزیم در این بخش کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در لیتر است. بطور کلی منیزیم از سمت شرق و غرب به سمت مرکز دشت افزایش می‌یابد.

در این بخش جهت بررسی توزیع مکانی متشکله‌های شیمیایی آب زیرزمینی دشت مغان اقدام به تهیه نقشه‌های هم‌میزان پارامترهای مختلف گردید و نقشه‌های هم‌ارزش مجموع املاح و یون‌های اصلی با استفاده از نتایج آنالیز نمونه‌برداری تهیه و مورد بررسی قرار گرفتند. در اشکال ۲ تا ۴، تعدادی از منحنی‌های هم‌ارزش پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت آب را بر اساس شاخص WQI نشان داده شده است. منحنی‌های هم‌ارزش مجموع املاح محلول در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، مقدار املاح آب زیرزمینی از سمت شمال به سمت مرکز و جنوب دشت و در جهت جریان آب زیرزمینی افزایش می‌یابد.



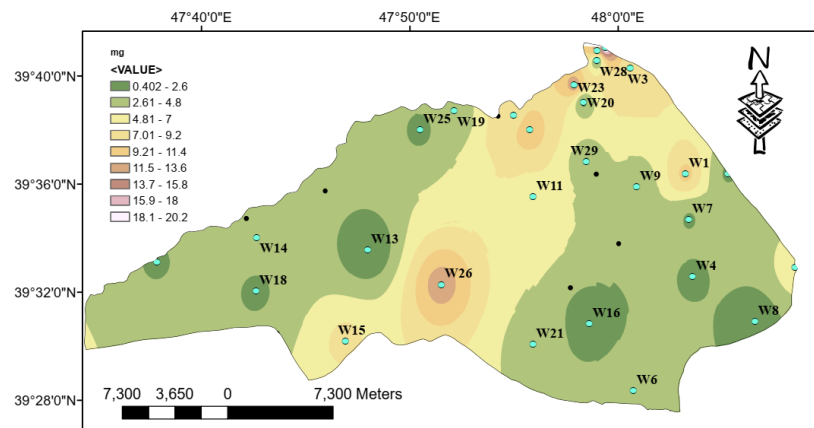
شکل ۲- نقشه هم‌ارزش مجموع املاح آب زیرزمینی دشت مغان.

Figure 2 - Map of the total solute value of groundwater in the Moghan Plain.



شکل ۳- نقشه هم‌ارزش کلسیم آب زیرزمینی دشت مغان.

Figure 3 - Calcium isovalue map of groundwater in the Moghan Plain.



شکل ۴- نقشه هم ارزش منیزیم آب زیرزمینی دشت مغان.
Figure 4 - Map of magnesium isovalue of groundwater in the Moghan Plain.

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از روش زمین آمار

پس از تعیین ضرایب وزنی پارامترهای مؤثر بر کیفیت آب زیرزمینی و اعمال آن‌ها در لایه‌های اطلاعاتی، نقشه‌های هم‌ارزش با یکدیگر تلفیق شدند و شاخص کیفیت آب زیرزمینی (WQI) برای محدوده مورد مطالعه محاسبه گردید. با توجه به اینکه استفاده از روش کوکریجینگ مستلزم نزدیک بودن توزیع داده‌ها به توزیع نرمال است، ابتدا توزیع فراوانی مقادیر شاخص WQI و هدایت الکتریکی (EC) به‌عنوان متغیر کمکی مورد بررسی قرار گرفت. هدایت الکتریکی (EC) به عنوان متغیر کمکی در روش کوکریجینگ انتخاب شد، زیرا این پارامتر ارتباط مستقیمی با غلظت یون‌های محلول و میزان شوری آب داشته و معمولاً همبستگی بالایی با شاخص کیفیت آب (WQI) نشان می‌دهد. همچنین، تغییرات مکانی EC نسبت به بسیاری از پارامترهای شیمیایی از پیوستگی بیشتری برخوردار است که می‌تواند موجب بهبود دقت برآوردهای مکانی در روش کوکریجینگ شود. نتایج نشان داد که توزیع هر دو متغیر نرمال نمی‌باشد؛ از این‌رو، به‌منظور بهبود شرایط داده‌ها برای انجام تحلیل‌های زمین‌آمار، از قابلیت تبدیل داده‌های غیرنرمال به نرمال در افزونه تحلیل زمین‌آمار^۱ نرم‌افزار ArcGIS 10.4 استفاده شد. در این مرحله، تبدیل لگاریتمی به‌کار گرفته شد که موجب نزدیک شدن توزیع

داده‌ها به توزیع نرمال گردید. در ادامه، با استفاده از مختصات UTM چاه‌های نمونه‌برداری، وجود یا عدم وجود روند مکانی داده‌ها در راستاهای X و Y ارزیابی شد. نتایج بیانگر وجود روند فضایی در هر دو جهت بود؛ بنابراین، با توجه به اینکه حذف روند یکی از پیش‌فرض‌های اساسی روش کوکریجینگ محسوب می‌شود، روند موجود از داده‌ها حذف و سپس فرآیند مدل‌سازی زمین‌آمار انجام گرفت. برای بررسی و حذف روند، از ابزار بررسی روند^۲ در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.4 استفاده شد. در این روش، تغییرات مقادیر مشاهده‌شده نسبت به مختصات مکانی نقاط نمونه‌برداری بررسی شده و با استفاده از برازش سطح روند^۳، مؤلفه سیستماتیک داده‌ها مشخص گردید. در صورت مشاهده روند معنی‌دار، مقدار روند برازش‌شده از داده‌های اولیه حذف و نیم‌تغییرنمای داده‌های باقی‌مانده^۴ محاسبه شد. به عبارت دیگر، داده مشاهده‌شده به دو مؤلفه روند و باقیمانده تفکیک گردید و در نهایت پس از حذف روند، تحلیل واریوگرام و انتخاب مدل مناسب نیم‌تغییرنما بر روی داده‌های بدون روند انجام شد. در مرحله بعد، مدل‌های مختلف نیم‌تغییرنما مورد ارزیابی قرار گرفتند و مدلی که کمترین اثر قطعه‌ای^۵ و بهترین برازش را با داده‌ها داشت، به‌عنوان مدل نهایی انتخاب شد. نتایج نشان داد که برای شاخص WQI، مدل Stable با اثر قطعه‌ای صفر و مقدار سقف واریوگرام^۶ برابر با ۰/۸۸، مناسب‌ترین مدل برازش است. همچنین، برای متغیر

^۴Residuals

^۵ Nugget Effect

^۶Sill

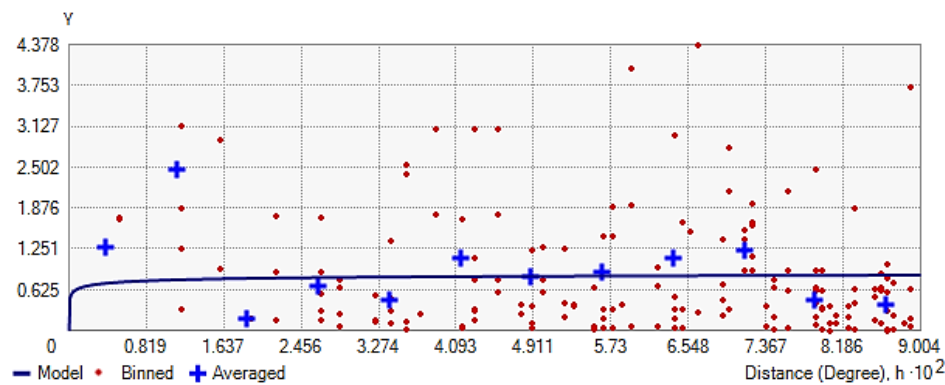
^۱Geostatistical Analysis

^۲Trend Analysis

^۳Trend Surface

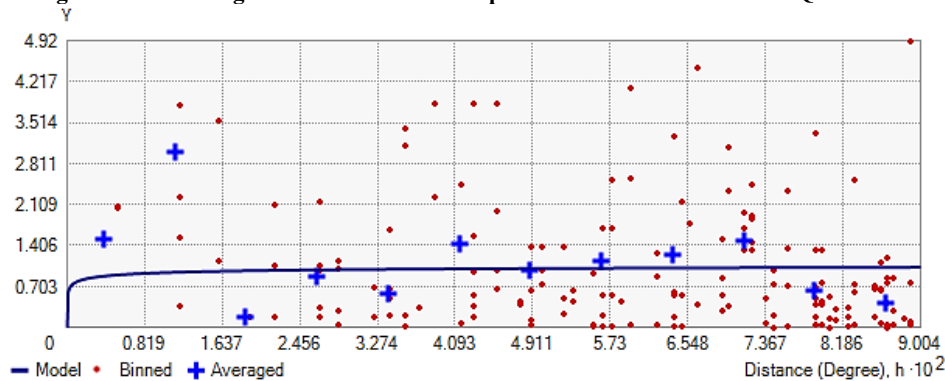
متغیرهای مورد بررسی در منطقه است که قابلیت بالای روش کوکریجینگ را برای برآورد و پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب زیرزمینی تأیید می‌کند (سانترا و همکاران، ۲۰۰۸). نیم‌تغییرنماهای مربوط به شاخص WQI و متغیر کمکی هدایت الکتریکی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند.

کمکی هدایت الکتریکی نیز مدل منتخب دارای اثر قطعه‌ای صفر و سقف واریوگرام برابر با ۱/۰۷ بود. با توجه به اینکه نسبت اثر قطعه‌ای به سقف واریوگرام در هر دو متغیر به مراتب کمتر از ۰/۵ است، می‌توان نتیجه گرفت که مؤلفه ساختاری و وابستگی مکانی داده‌ها بر مؤلفه تصادفی غلبه دارد. این موضوع بیانگر وجود ساختار فضایی قوی و همبستگی مکانی مناسب



شکل ۵-سمی‌واریوگرام بدست آمده در روش کیریجینگ ساده برای متغیر WQI.

Figure 5-Semivariogram obtained in the simple kurtosis method for the WQI variable.



شکل ۶-سمی‌واریوگرام بدست آمده در روش کیریجینگ ساده برای متغیر کمکی هدایت الکتریکی.

Figure 6 - Semivariogram obtained in simple kriging for the auxiliary variable electrical conductivity.

مدل زمین‌آماري و داده‌های سایر نقاط برآورد گردید. در این روش، مقدار مشاهده‌شده به مقدار واقعی حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در نقطه نمونه‌برداری و مقدار پیش‌بینی‌شده به مقدار برآوردشده توسط مدل زمین‌آماري در همان نقطه اشاره دارد. همانطور که در شکل مشخص است، مدل کوکریجینگ ساده از قابلیت خوب و دقت بالایی در پیش‌بینی شاخص WQI برخوردار است، که با نتایج Castellini et al. (2019) مطابقت دارد، ایشان در مطالعه‌ای بیان کرد، با محاسبه نسبت آستانه به اثر قطعه‌ای بیش از ۶۰ درصد، که نشان دهنده ساختار فضایی قوی متغیر ناحیه‌ای در

در نهایت برآورد داده‌ها جهت تعیین بهترین نوع کریجینگ، به روش‌های مختلف کوکریجینگ ساده^۱، کوکریجینگ معمولی^۲ و کوکریجینگ عمومی^۳ صورت گرفت و با توجه به نتایج دقیق‌تر کوکریجینگ ساده، این مدل برای تخمین استفاده شد، در شکل (۷) پراکنش شاخص WQI با استفاده از روش کوکریجینگ ساده در سطح منطقه نشان داده شده است. همچنین در شکل (۸) روش اعتبارسنجی متقابل برای ارزیابی تخمین شاخص WQI ارائه شده است. در روش اعتبارسنجی متقابل، هر یک از نقاط نمونه‌برداری به صورت مستقل حذف شده و مقدار متغیر مورد نظر در محل حذف‌شده با استفاده از

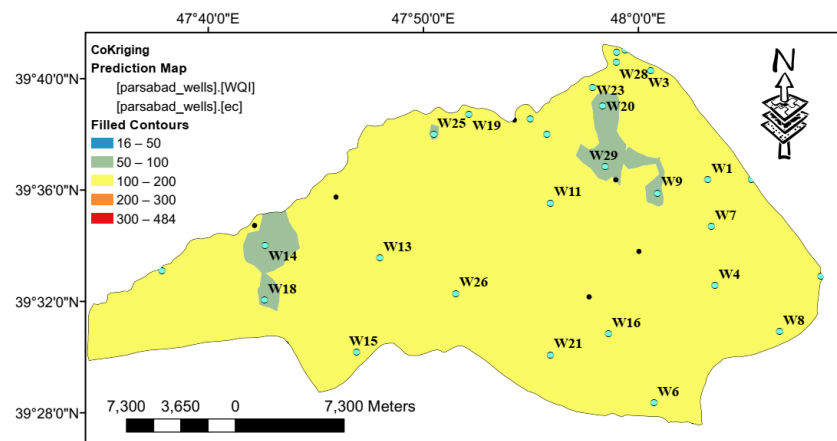
³Universal Co-kriging

¹Simple Co-kriging

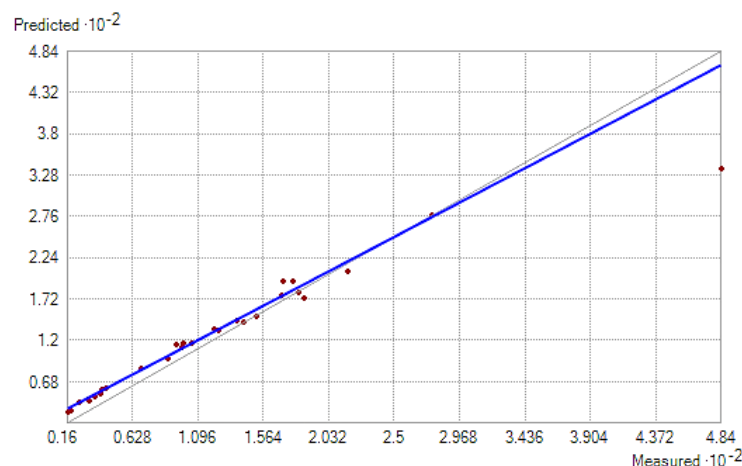
²Ordinary Co-kriging

برای شرب در قسمت شمال شرقی دشت در قسمت پتلو و تکچی و همچنین غرب دشت، در ناحیه کارخانه آسفالت مشاهده می‌شود، لیکن در سایر مناطق دشت، کیفیت آب زیرزمینی از نظر شاخص WQI ضعیف طبقه‌بندی شده است.

منطقه است، می‌توان برآوردهای دقیقی از متغیر ناحیه‌ای ارائه داد. در تحقیق حاضر نیز به دلیل آنکه اتر قطعه‌ای برای دو متغیر ناحیه‌ای برابر صفر محاسبه گردید، برآوردهای دقیقی از متغیرهای ناحیه‌ای انجام شد. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است، وجود منطقه‌ای با کیفیت آب زیرزمینی خوب



شکل ۷- کیفیت آب زیرزمینی منطقه با استفاده از شاخص WQI و روش کوکریجینگ ساده.
Figure 7 - Groundwater quality of the region using the WQI index and the simple cokriging method.



شکل ۸- روش اعتبار سنجی متقابل جهت ارزیابی روش کوکریجینگ ساده.
Figure 8 - Cross-validation method for evaluating the simple co-kriging method.

کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان به‌طور محسوسی تحت تأثیر شوری، تبخیر بالا، بازگشت زه‌آب کشاورزی و ویژگی‌های لیتولوژیکی سازندهای سطحی قرار دارد. نتایج تحلیل‌های کیفی و مکانی نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی مختلفی قرار دارد. این عوامل بر اساس بررسی پراکنش مکانی پارامترهای کیفی، به‌ویژه EC، TDS و یون‌های اصلی، و همچنین تحلیل نقشه‌های پهنه‌بندی GIS شناسایی شدند. افزایش شوری در برخی مناطق با تبخیر بالا، شرایط اقلیمی، ویژگی‌های

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی براساس سیستم سلسله مراتبی
با توجه به تأثیر پارامترها موثر کیفیت آب، براساس نظر کارشناسی و بررسی نرخ ناسازگاری ماتریس اوزان که برابر ۰/۰۳ محاسبه گردید، که نشان دهنده سازگاری اوزان ماتریس سازگاری است (جدول ۵). لذا، با روی هم گذاری پارامترهای موثر بر ارزیابی و تأثیر وزن لایه‌ها در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی منطقه، نقشه نهایی کیفیت آب زیرزمینی منطقه بر اساس شاخص WQI تهیه شد که مطابق شکل (۹) می‌باشد، نتایج حاصل از تحلیل‌های کیفی و مکانی نشان می‌دهد که

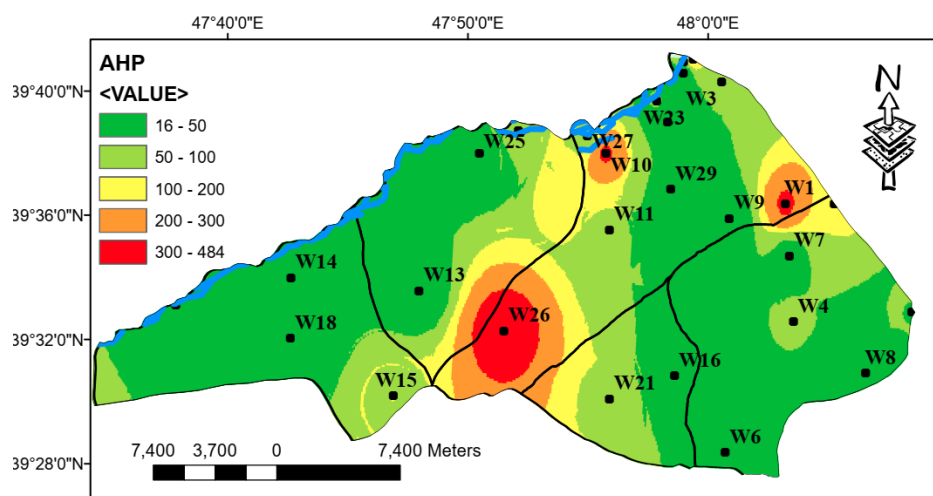
بوده و از شمال به جنوب دشت افزایش می‌یابند؛ پدیده‌ای که به انحلال کانی‌های تبخیری از جمله ژپس و هالیت مرتبط است. افزایش کلرید در نواحی مرکزی و جنوبی دشت بیانگر نقش بازگشت زه‌آب کشاورزی و مصرف نامتوازن کودهای شیمیایی است؛ موضوعی که فراهانی و رحیمی (۱۳۹۹) و کاظمی و منصوری (۱۳۹۷) نیز به آن اشاره کرده‌اند. مقایسه وزن‌های استخراج‌شده از روش AHP نشان داد، پارامترهای TDS و نیترات، بالاترین وزن نسبی (۰/۱۹۴) را کسب کرده‌اند، که نشان‌دهنده حساسیت بالای کیفیت آب نسبت به این متغیرهاست. نقش قابل توجه نیترات در گروه بندی کیفیت آب زیرزمینی، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ کودهای نیتروژنه را برجسته می‌کند؛ نتایج مشابهی در مطالعات نادری و موسوی (۱۳۹۹) و سالاری (۱۴۰۲) گزارش شده است.

لیتولوژیکی سازندهای سطحی و تجمع املاح مرتبط است. همچنین، افزایش نیترات و برخی یون‌های محلول در مناطق کشاورزی، نقش بازگشت زه‌آب و فعالیت‌های انسانی را در کاهش کیفیت آب زیرزمینی نشان می‌دهد. در مجموع، نتایج بیانگر تأثیر همزمان عوامل طبیعی و مدیریتی بر تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی در دشت مغان است. تغییرات قابل توجه TDS از ۳۲۴ تا ۱۱۲۴۹ (میلی گرم بر لیتر) و EC از ۴۶۴ تا ۱۶۰۷۰ ($\mu\text{S}/\text{cm}$)، نشان‌دهنده شرایط غالباً "شور" تا "بسیار شور" در بخش عمده دشت است. این الگو با یافته‌های رستمی و صادقی (۱۴۰۰) و احمدی و کریمی (۱۳۹۸) در سایر دشت‌های نیمه‌خشک کشور مطابقت دارد و تأیید می‌کند که مناطق کشاورزی وابسته به آبیاری سطحی، بیشترین استعداد را در افزایش املاح دارند. بررسی توزیع مکانی یون‌های اصلی نشان داد، سولفات و سدیم دارای بیشترین تغییرات مکانی

جدول ۵- وزن شاخص‌های کیفی آب در روش سلسله مراتبی.

Table 5- Relative Weights of Water Quality Parameters in hierarchical method.

Parameter	Relative Weight (Wi)	Unit
pH	0.113	—
EC	0.113	$\mu\text{S}/\text{cm}$
TDS	0.194	mg/L
TH	0.028	mg/L
Ca^{2+}	0.028	mg/L
Mg^{2+}	0.012	mg/L
Na^{+}	0.059	mg/L
Cl^{-}	0.063	mg/L
SO_4^{2-}	0.113	mg/L
NO_3^{-}	0.194	mg/L
HCO_3^{-}	0.056	mg/L
K^{+}	0.028	mg/L
Total	1	—



شکل ۹- نقشه ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس روش سلسله مراتبی.

Figure 9 - Groundwater quality assessment map based on the hierarchical method.

مقایسه روش زمین آماری و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

همان طور که در جدول ۶ به وضوح نشان داده شده است، مدل کوکریجینگ با ضریب تعیین ۰/۹۶ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۰/۲ نسبت به روش سلسله مراتبی با ضریب تعیین ۰/۹۳ و ریشه میانگین مربعات خطا ۰/۳ از دقت بیش تری در برآورد شاخص WQI برخوردار است. این دقت برآورد از مطالعات انجام شده توسط Agyare et al. (2007) با مجذور میانگین مربعات خطا برابر ۰/۴ و ضریب تبیین برابر ۰/۶ و همچنین Merdun et al. (2006) با ضریب تبیین ۰/۹۵ و مقدار مجذور میانگین مربعات خطا ۰/۴۴ بیش تر است. علاوه بر شاخص های آماری منفرد، شاخص عملکرد کلی (GPI) به منظور مقایسه جامع تر عملکرد روش ها محاسبه شد. نتایج نشان داد که روش زمین آماری با مقدار GPI برابر ۷ عملکرد کلی بهتری نسبت به روش AHP با مقدار GPI برابر ۸ دارد. این نتیجه نشان دهنده برتری نسبی روش زمین آماری در بازسازی الگوی مکانی کیفیت آب زیرزمینی است، اگرچه روش AHP نیز به دلیل قابلیت تلفیق معیارهای متعدد و تولید نقشه پهنه بندی، توانایی مناسبی در ارزیابی فضایی کیفیت آب دارد. بطور کلی می توان گفت ارزیابی به روش کریجینگ، همان طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، نشان می دهد، شاخص WQI در سطح منطقه عموماً در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ قرار داشته و در استفاده از منابع آب زیرزمینی باید این موضوع مورد توجه قرار گیرد. مقایسه نتایج دو روش نشان داد که هر دو رویکرد از دقت آماری بالایی در برآورد شاخص WQI برخوردارند، اما الگوی پهنه بندی آنها تفاوت معنی داری دارد. روش کوکریجینگ ساده با تکیه بر ساختار فضایی داده ها و استفاده از هدایت الکتریکی به عنوان متغیر کمکی، عمده دشت را در کلاس «ضعیف» قرار داد و بیش از ۹۴ درصد منطقه را در محدوده WQI بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ برآورد کرد. این موضوع بیانگر حساسیت بالای روش زمین آماری به روند غالب شوری و املاح محلول در سطح دشت است. در مقابل، روش AHP با لحاظ وزن نسبی پارامترها و قضاوت کارشناسی، تفکیک دقیق تری میان نواحی با کیفیت متفاوت ارائه کرد؛ به طوری که ۴۷ درصد دشت در کلاس «عالی» و ۲۴ درصد در کلاس «خوب» قرار گرفت. تفاوت اصلی دو روش در این است که کوکریجینگ بیشتر بر همبستگی مکانی داده ها متکی است،

در حالی که AHP اهمیت واقعی پارامترها در کیفیت آب شرب را نیز وارد مدل می کند. به همین دلیل، نواحی بحرانی اطراف چاه های W₁، W₁₁ و W₂₆ در نقشه AHP با وضوح بیش تری تفکیک شدند. نتایج حاصل از محاسبه شاخص کیفیت آب در روش AHP نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه دارای تغییرات مکانی قابل توجهی است. بر اساس طبقه بندی WQI، بخش قابل توجهی از نمونه ها در کلاس «متوسط تا نامناسب» قرار گرفتند که نشان دهنده فشار بالای ناشی از فعالیت های انسانی و شرایط زمین شناسی منطقه است. توزیع مکانی WQI بیانگر آن است که نواحی مرکزی و پایین دست دشت دارای کیفیت پایین تری نسبت به نواحی بالادست هستند که این موضوع با جهت جریان آب زیرزمینی و تمرکز فعالیت های کشاورزی همخوانی دارد. همبستگی بالا بین EC، TDS و یون های اصلی با شاخص کیفیت آب، بیانگر ارتباط قوی این پارامترها با تغییرات کیفیت آب است. این یافته با نتایج پژوهش رضایی و پاشایی فر (۱۴۰۰) و همچنین مطالعه حسینی و کریمی (۱۳۹۸) همخوانی دارد که نشان دادند شوری و یون های محلول مهم ترین عوامل افت کیفیت آب در دشت های ایران هستند. همچنین افزایش نیتрат در برخی نقاط، به ویژه در نزدیکی اراضی کشاورزی، بیانگر تأثیر مستقیم مصرف کودهای شیمیایی است که با نتایج میرشکاری و همکاران (۱۳۹۰) مطابقت دارد. نتایج پهنه بندی زمین آماری (کریجینگ) نشان داد که روش های درون یابی مکانی قادرند الگوهای پیوسته تری از توزیع WQI ارائه دهند. نواحی بحرانی عمدتاً در بخش های جنوبی و مرکزی منطقه متمرکز بوده اند. این نتایج با یافته های ملکیان و میردشتوان (۱۳۹۲) و نیز حسینی و کامرانی (۱۳۹۷) مطابقت دارد که تأکید کرده اند روش کریجینگ نسبت به IDW دقت بالاتری در مدل سازی کیفیت آب دارد. در این مطالعه، استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای وزن دهی پارامترها نشان داد که EC و نیترات بیشترین وزن را در محاسبه شاخص نهایی دارند. این نتیجه با پژوهش کاظمی و منصوری (۱۳۹۷) و فراهانی و رحیمی (۱۳۹۹) همسو است که بیان کردند، استفاده از AHP موجب افزایش دقت طبقه بندی کیفیت آب نسبت به روش های وزن دهی ثابت است. همچنین Saaty (2008) نیز تأکید کرده است که AHP با کاهش خطای تصمیم گیری انسانی، نتایج

است. بررسی مقایسه‌ای نشان داد که وضعیت کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه نسبت به دشت‌های مشابه مانند دشت اردبیل (حسن‌علی‌پور و همکاران، ۱۴۰۱) و دشت ارومیه (نادری و موسوی، ۱۳۹۸) در شرایط مشابه یا کمی نامطلوب‌تر قرار دارد. این موضوع نشان‌دهنده فشار شدید ناشی از توسعه کشاورزی و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب عوامل انسانی و طبیعی به‌صورت همزمان موجب افت کیفیت آب زیرزمینی شده است. فعالیت‌های کشاورزی نقش غالب در افزایش نیترات دارند، در حالی که فرایندهای زمین‌شناسی بیش‌تر بر شوری و سختی آب تأثیرگذار هستند. این تفکیک عوامل با نتایج مطالعات Ababakr et al. (2023)، Rezaei et al. (2021) و Masood et al. (2024) یافته‌های Karim et al. (2024) همخوانی دارد. این مطالعات نیز نشان دادند که روش‌های زمین‌آماري همراه با شاخص کیفیت آب (WQI) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ابزارهای مؤثری برای تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی هستند و می‌توانند دقت پهنه‌بندی و شناسایی مناطق بحرانی را افزایش دهند. تفاوت‌های مشاهده‌شده میان نتایج مطالعات مختلف، عمدتاً ناشی از شرایط هیدروژئولوژیکی، ویژگی‌های زمین‌شناسی، نوع کاربری اراضی و تراکم شبکه نمونه‌برداری است.

پایدارتر و قابل اعتمادتر ارائه می‌دهد. مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات خارجی نشان داد که روند افت کیفیت آب در مناطق خشک یک الگوی جهانی است. به‌عنوان مثال، Adimalla and Qian (2019) نیز در مطالعه خود در جنوب هند گزارش کردند که افزایش TDS و EC نقش اصلی در کاهش کیفیت آب زیرزمینی دارد. همچنین Al-Ghamdi and Al-Zahrani (2020) در عربستان سعودی نشان دادند که مناطق کشاورزی بیشترین آلودگی نیتراتی را دارند که دقیقاً با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. نتایج حاصل از تلفیق GIS و WQI نشان داد که این رویکرد توانایی بالایی در شناسایی مناطق بحرانی دارد. این موضوع با یافته‌های Chen et al. (2021) نیز مطابقت دارد که نشان دادند ترکیب GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره موجب افزایش دقت تحلیل‌های مکانی می‌شود. در این تحقیق نیز مشخص شد که استفاده همزمان از WQI و AHP باعث کاهش عدم قطعیت در طبقه‌بندی کیفیت آب شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی، افزایش شوری در بخش‌هایی از منطقه می‌تواند ناشی از انحلال سازندهای تبخیری مانند ژپس و هالیت باشد. این موضوع با نتایج Todd (1980) و Fetter (1999) مطابقت دارد که فرایندهای ژئوشیمیایی را یکی از عوامل اصلی کنترل کیفیت آب زیرزمینی معرفی کرده‌اند. در نواحی با سنگ‌های تبخیری، غلظت یون‌های کلر و سولفات به‌طور قابل توجهی افزایش یافته

جدول ۶- شاخص‌های عملکردی مدل.

Table 6- Model Performance Indicators.

Evaluation model	EF	RMSE (%)	MAE (%)	ϵ %	R ²
geostatistical method	0.92	0.2	0.28	5.6	0.96
Analytic Hierarchy Process (AHP)	0.81	0.3	0.21	3.7	0.93

جدول ۷- مقادیر شاخص WQI مناطق به روش سلسله مراتبی برای مصارف آشامیدنی.

Table 7- WQI-based Classification of Drinking Water Quality.

Area by geostatistical method (km ²)	Area by hierarchical method (km ²)	Water Quality	WQI Range
0	320	Excellent	<50
35	159	Good	50–100
634	90	Poor	100–200
0	75	Very Poor	200–300
0	25	Unsuitable	>300
669	669	–	Total

نتیجه گیری

مصرف کودهای شیمیایی و برنامه ریزی آبیاری در منطقه قرار گیرد. به طور کلی می توان گفت، کاربرد روش سلسله مراتبی در وزن دهی پارامترها، موجب افزایش دقت ارزیابی کیفیت آب شد و نشان داد که استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره می تواند عدم قطعیت در تحلیل ها را کاهش دهد. همچنین به کارگیری GIS در کنار WQI امکان نمایش دقیق تر الگوهای مکانی کیفیت آب را فراهم ساخت. نتایج زمین آماری نیز نشان داد که روش کریجینگ توانایی بالایی در پهنه بندی پیوسته کیفیت آب دارد و می تواند مناطق بحرانی را با دقت مناسبی شناسایی کند. ترکیب این روش ها موجب شد تا ارزیابی جامع تر و قابل اعتمادتری از وضعیت کیفیت آب ارائه شود. به طور کلی، یافته های این تحقیق نشان می دهد که مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه نیازمند کنترل برداشت، مدیریت مصرف کودهای شیمیایی و توجه به شرایط زمین شناسی است. نتایج این پژوهش می تواند به عنوان ابزاری کاربردی برای مدیران منابع آب و تصمیم گیران منطقه در شناسایی نواحی دارای کیفیت نامطلوب آب زیرزمینی و اولویت بندی اقدامات حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، استفاده از روش مناسب پهنه بندی کیفیت آب می تواند نقش مؤثری در برنامه ریزی پایش منابع آب، مدیریت بهره برداری پایدار و کاهش مخاطرات ناشی از افت کیفیت آب زیرزمینی داشته باشد.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح پژوهشی یا شماره قرارداد ۱۴۰۴/۵/۱۳۴۶۴ استخراج گردیده است و بدینوسیله از ایشان تشکر و قدردانی می گردد.

منابع

احمدی، ر.، کریمی، ع.، ۱۳۹۸. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در دشتهای نیمه خشک ایران و شناسایی عوامل مؤثر بر آن. مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶(۲): ۸۹-۱۰۴.
حسنی پاک، ع.، ا.، ۱۳۷۷. زمین آمار (ژئو استاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران.
حسن علی پور، م.، احمدی، ر.، قاسمی، س.، ۱۴۰۱. تحلیل فضایی کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از GIS و شاخص WQI. مجله محیط زیست ایران، ۱۸(۴): ۲۳۳-۲۴۴.

در این پژوهش کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان با تلفیق شاخص WQI، روش زمین آماری و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) ارزیابی و مقایسه شد. نتایج نشان داد که هر دو روش قادر به بازسازی الگوی مکانی کیفیت آب هستند، اما ماهیت و کاربرد آن ها متفاوت است. کوکریجینگ ساده به دلیل بهره گیری از ساختار فضایی داده ها و متغیر کمکی هدایت الکتریکی، دارای دقت آماری بالاتری بود و برای پیش بینی نقطه ای شاخص WQI مناسب ارزیابی شد. اگرچه روش کوکریجینگ ساده بر اساس شاخص های آماری عملکرد بهتری نشان داد، اما معیارهای آماری تنها میزان تطابق مقادیر پیش بینی شده با داده های مشاهده ای را در نقاط نمونه برداری ارزیابی می کنند و لزوماً بیانگر انطباق کامل الگوی مکانی با فرآیندهای مؤثر بر کیفیت آب نیستند. روش کوکریجینگ عمده براساس ساختار همبستگی مکانی بین داده های اندازه گیری شده و متغیر کمکی (EC) عمل می کند، در حالی که روش مبتنی بر AHP علاوه بر داده های اندازه گیری شده، اهمیت نسبی عوامل مؤثر بر کیفیت آب مانند شوری، نیترات، مواد محلول و سایر پارامترهای کیفی را نیز در فرآیند پهنه بندی لحاظ می کند. بنابراین، برتری روش AHP از نظر واقع گرایی مکانی به دلیل در نظر گرفتن روابط علت-معلولی و دانش کارشناسی درباره عوامل کنترل کننده کیفیت آب است. به عبارت دیگر، کوکریجینگ توانایی بالاتری در بازسازی مقادیر در نقاط فاقد داده دارد، در حالی که AHP قادر است اثر نسبی عوامل مؤثر بر کیفیت آب را در پهنه بندی فضایی منعکس نماید. از این رو، انتخاب روش مناسب باید علاوه بر شاخص های آماری، براساس سازگاری نتایج با شرایط هیدروژئولوژیکی و فرآیندهای حاکم بر منطقه نیز انجام شود. براساس نتایج نهایی، شوری و نیترات مهم ترین عوامل کنترل کننده کیفیت آب زیرزمینی دشت مغان هستند و تمرکز نواحی نامطلوب در اطراف چاه های W_1 ، W_{11} و W_{26} مشاهده شد. اختلاف میان دو روش نشان می دهد که اتکای صرف به درون یابی زمین آماری می تواند کیفیت برخی نواحی را کم تر یا بیش تر از واقع برآورد کند، در حالی که وزن دهی چندمعیاره در AHP این محدودیت را تا حد زیادی کاهش می دهد. این رویکرد می تواند مبنای تعیین اولویت های حفاظتی، کنترل

خشک و نیمه‌خشک ایران. مجله علوم کشاورزی ایران، ۴۲(۲): ۷۰-۵۵.

نادری، م.، موسوی، ف.، ۱۳۹۸. تحلیل مکانی کیفیت آب زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از GIS و WQI. مجله منابع آب ایران، ۲۴(۲): ۱۴۰-۱۵۸.

References

- Ababakr, F. A., Ahmed, K. O., Amini, A., Karami Moghadam, M., and Gökçekuş, H., 2023. Spatio-temporal variations of groundwater quality index using geostatistical methods and GIS. *Applied Water Science*, 13, Article 206.
- Adimalla, N., and Qian, H., 2019. Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) and GIS techniques in a semi-arid region of South India. *Environmental Earth Sciences*, 78(3): 1-14.
- Agyare, W.A., Park, S.J., and Vlek, P.L.G., 2007. Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity. *Vadose Zone Journal*, 6(2): 423-431.
- Ahmadi, R., Karimi, A., 2019. Assessment of groundwater quality in Iranian dry plains and identification of two factors on it. *Iranian Journal of Water Resources Research*, 16(2): 89-104. [In Persian]
- Al-Ghamdi, S.G., and Al-Zahrani, M.A., 2020. Assessment of groundwater quality in arid regions using WQI approach. *Journal of Arid Environments*, 178: 104166.
- Al-Mashaqbeh, I.A., Ghadban, A.N., and Shatanawi, M.R., 2022. Spatial distribution of groundwater quality using GIS and water quality index in arid environments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(6): 412.
- APHA (American Public Health Association), 2017. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd Edition, Washington, DC
- Ardabil Regional Water Authority (ARWA), 2014. *Hydrogeological Report of Ardabil Province Aquifers*. Ardabil, Iran.
- Chen, Y., Li, X., and Wang, J., 2021. Improved water quality assessment using AHP-based weighting and GIS integration. *Journal of Hydrology*, 603: 127123.
- Cressie, N., 1993. *Statistics for Spatial Data*. Wiley, New York.
- Derdour, A., Guerine, L., and Allali, M., 2021. Assessment of drinking and irrigation water quality using WQI and SAR method in arid regions. *Sustainable Water Resources Management*.
- Fetter, C.W., 1999. *Contaminant Hydrogeology* (2nd ed.). Prentice Hall.

- حسینی، ع.، کامرانی، م.، ۱۳۹۷. کاربرد روش‌های زمین‌آمار در تحلیل و پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی. مجله علوم زمین ایران، ۲۱(۱): ۷۲-۵۵.
- حسینی، ع.، کریمی، ر.، موسوی، ح.، ۱۳۹۸. بررسی نقش نیترا در آلودگی منابع آب زیرزمینی دشت قزوین. *نشریه علوم و مهندسی آب و خاک ایران*، ۳۲(۲): ۱۱۸-۱۰۱.
- راد بروجنی، ن.، طباطبائی، س.ح.، رادفر، م.، میرعباسی نجف‌آبادی، ر.، ۱۴۰۴. مطالعه برخی متغیرهای کیفی آب زیرزمینی دشت شهرکرد در یک دوره آماری ۲۰ ساله. *نشریه هیدروژئولوژی*، ۱۰(۱): ۷۷-۹۱.
- رضایی، م.ح.، پاشایی‌فر، م.، ۱۴۰۰. بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی ایران و چالش‌های بهره‌برداری پایدار. مجله منابع طبیعی ایران، ۷۳(۱): ۳۴-۱۵.
- پاشایی‌فر، م.، رضایی، م.ح.، نادری، س.، ۱۴۰۱. اثر برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها بر کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی. *مجله پژوهش‌های منابع آب ایران*، ۲۸(۳): ۶۷-۸۵.
- رستمی، ف.، صادقی، م.، ۱۴۰۰. تحلیل کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص WQI و GIS در دشت‌های نیمه‌خشک ایران. *مجله منابع آب ایران*، ۲۲(۱): ۴۵-۶۰.
- سالاری، ح.، ۱۴۰۲. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت شیراز با استفاده از شاخص WQI و GIS. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۰(۲): ۱۲۰-۱۳۸.
- کاظمی، ح.، منصوری، ع.، ۱۳۹۷. کاربرد روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی. *مجله مهندسی آب و خاک ایران*، ۲۵(۴): ۲۰۱-۲۱۸.
- فراهانی، ا.، رحیمی، ر.، ۱۳۹۹. تلفیق GIS و AHP در ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت‌های ایران. *نشریه سنجش از دور و GIS ایران*، ۱۱(۲): ۹۵-۱۱۲.
- قربانی، س.، کریمی، ع.، ۱۳۹۸. بررسی تأثیر ویژگی‌های زمین‌شناسی بر کیفیت آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران. *مجله زمین‌شناسی کاربردی ایران*، ۱۵(۳): ۷۷-۹۴.
- ملکیان، ع.، میردشتوان، س.، ۱۳۹۲. مقایسه روش‌های مختلف زمین‌آمار در پهنه‌بندی کیفیت آب زیرزمینی. *مجله علوم آب ایران*، ۹(۱): ۳۳-۵۰.
- محمدزاده، ح.، فنودی، ف.، ۱۴۰۴. ارزیابی تکامل هیدروژئوشیمیایی و فرآیندهای واکنش آب و سنگ در آبخوان مرزی درگز. *نشریه هیدروژئولوژی*، ۱۰(۱): ۱۲-۳۴.
- میرشکاری، م.، حسینی، ع.، رضایی، ح.، ۱۳۹۰. اثر فعالیت‌های کشاورزی بر کیفیت آب‌های زیرزمینی در مناطق

- Mehdinejadani, B., 2025. A novel inverse model insensitive to initial guesses for estimating parameters of continuous time random walk-truncated power law model. *Journal of Hydrology*, 658, 133206.
- Merdun, H., Ozer, C., Meral, R., and Apan, M., 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*, 90: 108–116.
- Mirshekari, M., Hosseini, A., Rezaei, H., 2011. The effect of agricultural activities on groundwater quality in arid and semi-arid regions of Iran. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 42(2): 55–70. [In Persian]
- Mohammadzadeh, H., and Fanoudi, F., 2025. Hydrogeochemical evolution and water-rock interaction processes in the Dargaz border aquifer. *Hydrogeology*, 10(1): 12–34. [In Persian]
- Naderi, M., Mousavi, F., 2019. Mechanical analysis of groundwater quality in Urmia plain using GIS and WQI. *Iranian Journal of Water Resources*, 24(2): 140–158. [In Persian]
- Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., and Madani, K., 2021. Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 118(25), e2024221118.
- Pashaeifar, M., Rezaei, M.H., Naderi, S., 2010. The effect of excessive extraction from aquifers on the reduction of groundwater resources quality. *Iranian Journal of Water Resources Research*, 28(3): 67–85. [In Persian]
- Rad Boroujeni, N., Tabatabaei, S.H., Radfar, M., and Mirabbasi Najafabadi, R., 2025. Study of some groundwater quality variables in the Shahrekord Plain over a 20-year statistical period. *Hydrogeology*, 10(1): 77–91. [In Persian]
- Rezaei, M., Zare, M., and Ardejani, F.D., 2021. Impacts of groundwater overexploitation on water quality in arid regions. *Science of the Total Environment*, 754: 142186.
- Rezaei, M.H., Pashaeifar, M., 2009. Studying the status of Iran's groundwater resources and the challenges of sustainable exploitation. *Iranian Journal of Natural Resources*, 73(1): 15–34. [In Persian]
- Rostami, F., Sadeghi, M., 2011. Groundwater quality analysis using WQI index and GIS in semi-arid plains of Iran. *Journal of Iranian Water Resources*, 22(1): 45–60. [In Persian]
- Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Farahani, A., Rahimi, R., 2019. Comparison of GIS and AHP in groundwater quality assessment of Iranian plains. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 11(2): 95–112. [In Persian]
- Isaaks, E.H., and Srivastava, R.M., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press.
- Ghorbani, S., Karimi, A., 2019. Studying the effect of geological characteristics on groundwater quality in arid regions of Iran. *Iranian Journal of Applied Geology*, 15(3): 77–94. [In Persian]
- Guleria, A., and Mehdinejadani, B., 2025. Groundwater quality evaluation and human health risk assessment of nitrate using deterministic and probabilistic approaches in Qorveh-Dehgolan region, Kurdistan province, Iran. *International Journal of Environmental Health Research*.
- Hassani Pak, A. A., 2000. *Geostatistics (Geostatistics)*. Tehran University Press. [In Persian]
- Hassanalipour, M., Ahmadi, R., Ghasemi, S., 2012. Spatial analysis of groundwater quality in the Ardabil plain using GIS and WQI index. *Iranian Journal of Environment*, 18(4): 233–244. [In Persian]
- Hoseini, Y., 2023. Optimization of saturated hydraulic conductivity estimation using kriging in drainage networks. *Appl Water Sci* 13, 94.
- Hosseini, A., Karimi, R., Mousavi, H., 2019. Studying the role of nitrate in groundwater resources of Qazvin plain. *Iranian Journal of Water and Soil Science and Engineering*, 32(2): 101–118. [In Persian]
- Hosseini, A., Kamrani, M., 2018. Application of geostatistics methods in the analysis and zoning of groundwater quality. *Iranian Journal of Earth Sciences*, 21(1): 55–72. [In Persian]
- Karim, M. R., Arham, M. A. A., Shorif, M. J. U., Ahsan, A., Al-Ansari, N., Islam, M. S., Rahman, M. M., and Hasan, M. M., 2024. GIS based geostatistical modelling and trends analysis of groundwater quality for suitable uses in Dhaka division. *Scientific Reports*, 14, 17449.
- Kazemi, H., Mansouri, A., 2018. Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in groundwater quality zoning. *Journal of Water and Soil Engineering*, 25(4): 201–218. [In Persian]
- Malekian, A., Mirdashtavan, S., 2013. Comparison of different geostatistical methods in groundwater quality zoning. *Iranian Journal of Water Sciences*, 9(1): 33–50. [In Persian]
- Masood, M. U., Rashid, M., Haider, S., Naz, I., Pande, C. B., Heddarn, S., Alshehri, F., Elkhachy, I., Ahsan, A., and Sammen, S. S., 2024. Exploring Groundwater Quality Assessment: A Geostatistical and Integrated Water Quality Indices Perspective. *Water*, 16(1), 138.

Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1): 83–98.

Salari, H., 2012. Groundwater quality assessment of Shiraz plain using WQI index and GIS. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 30(2): 120–138. [In Persian]

Todd, D.K., and Mays, L.W., 2005. *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). Wiley.

Tsai, F.T-C., and Li, X., 2008. Multiple parameterizations for hydraulic conductivity identification. *Groundwater*, 46(6): 851–864.

WHO, 2017. *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). World Health Organization.