



Lorestan University

Applied Research in Natural Resources Engineering

Journal Homepage: <https://arne.lu.ac.ir/>



Investigation of Groundwater Quality Changes in the Mashhad Plain for Agricultural Purposes

Mohammad Naderianfar¹ and Hadi Dehghan²

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Jiroft University Corresponding author. Email: Naderian.mohamad@ujiroft.ac.ir
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Kashmar Higher Education Center.

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 28 February 2026 Received in revised form 13 June 2026 Accepted 30 May 2026 Available online 30 June 2026 Keywords: Water table decline, qualitative parameters, kriging method, GIS software	Groundwater quality is as important and essential as its quantity for usability in various applications. Therefore, qualitative monitoring of groundwater resources is of paramount importance, and classification of groundwater quality in different regions for drinking and agricultural purposes greatly aids land-use planners and the protection of groundwater resources. In this study, qualitative and quantitative data from the 2015–2016 and 2019–2020 water years for the groundwater of the Mashhad Plain were used. The spatial and temporal variations of groundwater quality parameters in the Mashhad Plain were investigated using ordinary kriging and point cokriging methods within a GIS environment. Temporal changes in groundwater quality of the Mashhad Plain indicated a decline in groundwater quality from the 2015–2016 water year to the 2019–2020 water year. Furthermore, the groundwater quality map of the plain for agricultural purposes showed that 70% of the total groundwater in the Mashhad Plain was suitable to moderately suitable for agriculture, while 30% was unsuitable. Currently, some areas of this plain are at risk of salinization. If groundwater from these areas is used for agricultural purposes, these regions will require special management measures, including the cultivation of salt-tolerant plants and proper drainage.
Cite this article: Naderianfar, M., & Dehghan, H., (2026). Investigation of Groundwater Quality Changes in the Mashhad Plain for Agricultural Purposes. <i>Applied Research in Natural Resources Engineering</i>, 1 (1), https://doi.org/10.22034/arne.2026.1.1.9	
 © Author(s) retain the copyright. DOI: https://doi.org/10.22034/arne.2026.1.1.9 Publisher: University of Lorestan.	

Introduction

Groundwater quality is as essential as its quantity for determining usability across various applications, particularly in arid and semi-arid regions where surface water resources are limited. In Iran, which is situated in the arid and semi-arid belt of the world, water scarcity coupled with declining quality poses a significant obstacle to agricultural and economic development. The Mashhad Plain, located in Khorasan Razavi Province, is one of Iran's most important agricultural regions, yet it faces critical groundwater challenges including continuous water table decline, increasing salinity, and deteriorating water quality. These issues arise from excessive groundwater extraction, intensive agricultural activities, and insufficient attention to water quality monitoring. The qualitative assessment of groundwater resources is of paramount importance for land-use planning and resource protection, as water quality parameters are influenced by factors including recharge rates, discharge patterns, evaporation, temperature, chemical reactions, and seasonal pollution. Numerous studies have examined groundwater quality in various regions; however, comprehensive spatial and temporal assessments of groundwater quality specifically for agricultural purposes remain limited. This study aims to investigate spatiotemporal changes in groundwater quality in the Mashhad Plain using geographic information systems (GIS) and geostatistical methods, with particular emphasis on identifying areas suitable for agricultural applications. By analyzing qualitative and quantitative data from the 2015-2016 and 2019-2020 water years, this research seeks to provide practical tools for water resource managers, land-use planners, and agricultural policymakers to enable sustainable groundwater management and informed decision-making regarding irrigation water suitability across the plain.

Methodology

This study utilized qualitative and quantitative groundwater data from 95 deep wells across the Mashhad Plain, collected during the 2015-2016 and 2019-2020 water years, obtained from Iran's Water Resources Management Company. Key water quality parameters including Electrical Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS), Sodium Adsorption Ratio (SAR), Total Hardness (TH), and major cations and anions were analyzed. Spatial and temporal variations of groundwater quality were investigated using ordinary kriging and point cokriging geostatistical methods within a GIS environment. Cokriging, which incorporates auxiliary variables to improve estimation accuracy, was preferred for generating continuous surface maps. Model performance was evaluated using Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Bias Error (MBE), with lower values indicating higher prediction accuracy. For agricultural water quality classification, EC and SAR values were categorized according to standard irrigation water quality classes (C1-C4 for salinity and S1-S4 for sodium hazard). Spatial layers for EC and SAR were overlaid to produce comprehensive agricultural suitability maps. Additionally, integrated maps combining drinking and agricultural water quality were generated through overlay analysis in GIS, enabling identification of areas suitable for both uses, suitable only for agriculture, moderately suitable, or unsuitable for both purposes, providing a comprehensive framework for water resource planning.

Results and Discussion

Geostatistical analysis demonstrated that point cokriging outperformed ordinary kriging for all parameters, as evidenced by consistently lower RMSE and MBE values, confirming the effectiveness of using auxiliary variables to enhance estimation precision. Temporal analysis revealed a significant decline in groundwater quality from the 2015-2016 to the 2019-2020 water years. Agricultural suitability mapping showed that 77% of groundwater was suitable for agriculture in 2015-2016, decreasing to 70% by 2019-2020, representing a substantial loss of approximately 10% of suitable water resources over four years. Currently, some areas of the plain are at risk of salinization, with 30% of total groundwater classified as unsuitable for agricultural purposes. These areas require special management measures including cultivation of salt-tolerant crops and proper drainage systems. The decline in groundwater quality is primarily attributed to continuous water table decline caused by excessive extraction, which concentrates dissolved solids, coupled with intensive agricultural activities and inadequate management practices. Integrated suitability maps for both drinking and agricultural purposes showed that suitable areas for both uses decreased from 18% in 2015-2016 to 12.5% in 2019-2020, while unsuitable areas increased from 23% to 30% over the same period. Areas suitable only for agriculture remained relatively stable at approximately 22-24.5%, and moderately suitable areas decreased from 37% to 33%. These findings indicate that if current trends continue, high-quality groundwater suitable for both drinking and agriculture may become increasingly scarce in this productive plain. The spatial patterns revealed that degradation is most pronounced in areas with intensive cultivation and proximity to urban centers. Regions currently at risk of salinization require immediate management interventions, including adoption of efficient irrigation methods, controlled fertilizer application, and implementation of groundwater recharge programs.

Conclusion

This study demonstrates that groundwater quality in the Mashhad Plain has significantly declined over the four-year period from 2015-2016 to 2019-2020, with approximately 30% of current groundwater resources unsuitable for agricultural use and increasing areas at risk of salinization. The cokriging method proved more accurate than ordinary kriging for spatial interpolation of groundwater quality parameters, confirming the value of incorporating auxiliary variables in similar studies. The GIS-based approach developed in this research provides an effective framework for groundwater quality monitoring and mapping in moderately sized plains, offering practical tools for identifying priority areas requiring management interventions. To mitigate further degradation, several measures are essential: implementation of treated wastewater reuse for agriculture, reduction of extraction by regulating and decommissioning excessive wells, adoption of efficient irrigation technologies, controlled use of chemical fertilizers to prevent contamination, and implementation of groundwater recharge programs to balance water budgets and prevent continued water table decline. Areas with unsuitable groundwater quality require cultivation of salt-tolerant crops and proper drainage management. The integrated suitability maps developed in this study serve as valuable decision-support tools for agricultural planners, water resource managers, and land-use policymakers. Continued monitoring using the established GIS-based framework is essential for tracking future quality changes and evaluating the effectiveness of management interventions, ultimately supporting sustainable groundwater management in the Mashhad Plain and similar agricultural regions across Iran.



پژوهش های کاربردی مهندسی منابع طبیعی

Journal Homepage: <https://arne.lu.ac.ir/>

دانشگاه لرستان

بررسی تغییرات کیفیت آب های زیرزمینی دشت مشهد به منظور مصارف کشاورزی

محمد نادریان فر^۱ و هادی دهقان^۲^۱ گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جیرفت، نویسنده مسئول. رایانامه: Naderian.mohamad@ujiroft.ac.ir^۲ دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، مرکز آموزش عالی کاشمر.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹ کلیدواژه ها: افت سطح ایستابی، پارامترهای کیفی، روش کریجینگ، نرم افزار GIS	کیفیت آب زیرزمینی به اندازه کمیت آن، جهت قابل استفاده بودن آن در مصارف مختلف مهم و ضروری است. از این رو پایش کیفی منابع آب زیرزمینی از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است و تقسیم بندی کیفیت آب های زیرزمینی در مناطق مختلف با هدف مصارف شرب و کشاورزی به طراحان کاربری اراضی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی کمک شایانی می کند. در این مطالعه از داده های کیفی و کمی سال های ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۹-۱۳۹۸ آب های زیرزمینی دشت مشهد استفاده شد. پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت مشهد از نظر مکانی و زمانی با استفاده از روش های کریجینگ معمولی و کوکریجینگ نقطه ای در محیط GIS بررسی شدند. تغییرات زمانی کیفیت آب های زیرزمینی دشت مشهد نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی از سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تا سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ کاهش یافته است. همچنین نقشه کیفیت آب های زیرزمینی دشت برای مصارف کشاورزی نشان داد که ۷۰ درصد از کل آب های زیرزمینی دشت مشهد برای کشاورزی مطلوب تا متوسط و ۳۰ درصد آن نامطلوب بود. در حال حاضر بعضی از نواحی این دشت در خطر شور شدن قرار دارند. اگر آب های زیرزمینی این نواحی برای اهداف کشاورزی استفاده شوند، این نواحی به مراقبت های ویژه ای از جمله کشت گیاهان مقاوم به شوری و زهکشی مناسب دارند.

استناد: نادریان فر، محمد و دهقان، هادی. (۱۴۰۵). بررسی تغییرات کیفیت آب های زیرزمینی دشت مشهد به منظور مصارف کشاورزی. پژوهش های کاربردی مهندسیمنابع طبیعی، ۱ (۱)، ۱۰۹-۱۲۰. <https://doi.org/10.22034/arne.2026.1.1.9>

نویسندگان ©

ناشر: انتشارات دانشگاه لرستان.

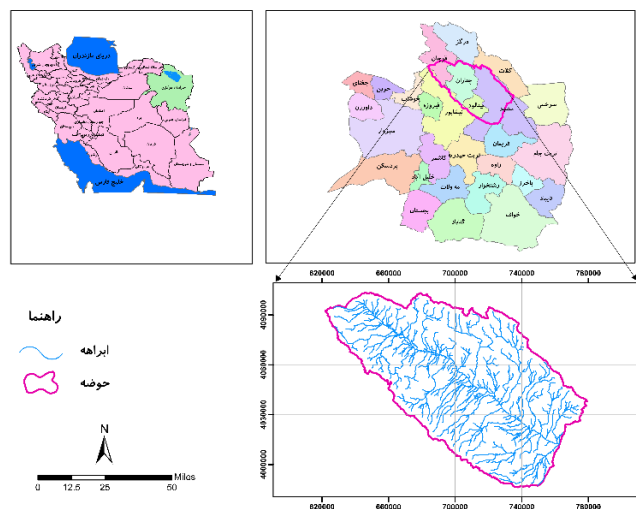
مقدمه

افت سطح آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق آب از مهمترین مشکلات موجود در نواحی کشاورزی است که با زوال کیفیت آب و تأثیر بر کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی می تواند باعث متروکه شدن مزارع گردد. در کشورهایی مانند ایالات متحده آمریکا و استرالیا (هیل، ۱۹۸۰)، عدم توجه به مشکلات یاد شده و مدیریت ضعیف منابع آب زیرزمینی باعث کیفیت نامناسب آب و خاک در برخی از مناطق و عدم امکان استفاده از آنها برای کشاورزی شده است. منابع آب زیرزمینی، به عنوان ذخیره ارزشمند و زیربنایی توسعه کشورها، همواره مدنظر بوده و در این راستا تلاش گردیده است تا ضمن شناخت توانایی های این منابع میزان مصرف آنها نیز معلوم گردد. کشور ایران در منطقه خشک و نیمه خشک جهان واقع شده است و کمبود آب با کیفیت مناسب یکی از موانع توسعه اقتصادی و کشاورزی است، که شناخت کیفیت آب را ضروری می سازد. ارزیابی کیفی منابع آب از جمله آب های زیرزمینی یکی از مباحث بسیار مهم در طرح های توسعه منابع آب کشور می باشد. در حالی که همگام با توسعه منابع آب فعالیت گسترده ای برای تغییرات کیفی آن صورت نگرفته است. حفظ کیفیت منابع آب با توجه به روند تخریبی رو به رشدشان امری اجتناب ناپذیر است. کیفیت آب های سطحی و زیرزمینی به واسطه سهولت تخلیه پساب های صنعتی و خانگی با روند تخریبی رو به رشدی مواجه هستند. به طور کلی املاح آب های سطحی و زیرزمینی نسبت به زمان ثابت نبوده و تحت تأثیر عواملی چون میزان تغذیه، تخلیه، تبخیر، دما، واکنش های شیمیایی، میکروبی و یا آلودگی های فصلی می باشد. به همین لحاظ نمونه برداری های مکرر و بررسی تغییرات کیفی آب در طول یک دوره توصیه می شود. یکی از اهداف آب شناسی، تأمین آب با ویژگی ها و معیارهای کیفی مناسب برای مصارف خاص است. کمبود آب یکی از مسائل حیاتی در بسیاری از نقاط کشور از جمله دشت مشهد می باشد. از طرف دیگر به دلیل محدودیت منابع آب از جنبه های کمی و کیفی، بیشتر مصارف شرب و کشاورزی از منابع آب زیرزمینی تأمین می شوند. بنابراین نیاز به مدیریت کمی و کیفی مؤثر آب زیرزمینی بیش از هر زمان دیگری در این منطقه احساس می شود. ولایتی (۱۳۷۹) در مقاله ای با عنوان مهمترین عوامل مؤثر بر تغییرات کیفی آبخوان دشت نیشابور بیان داشت که کیفیت آب آبخوان دشت نیشابور از نظر تیپ در نقاط مختلف آن متفاوت است. سه عامل مهم یعنی سازندهای زمین شناسی، اقلیم حاکم بر منطقه و افت مستمر سطح آب زیرزمینی آبخوان، در اثر اضافه برداشت توسط چاه های عمیق در این رابطه نقش مؤثر دارند. بدین صورت که رسوبات تخریبی میوسن که دارای املاح قابل حل زیادی هستند در بخش جنوب شرقی حوضه و نیز در حاشیه ارتفاعات شمالی و جنوبی پراکنده هستند. بالا بودن درجه حرارت هوا در سطح دشت منجر به تبخیر زیاد آب زیرزمینی می شود. در نهایت اینکه افت مستمر سطح آب زیرزمینی آبخوان بطور مداوم از سال ۱۳۷۱ به این طرف در اثر اضافه برداشت توسط چاه های عمیق، باعث افزایش املاح گشته و سبب شور شدن منابع آب زیرزمینی شده است. ایشان تنها راه جلوگیری از شور شدن آبخوان دشت نیشابور را کنترل برداشت از آبخوان بیان کرد. آنبازگان و نیر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی تغییرات مکانی عناصر شیمیایی آب زیرزمینی را در دشت پانول بررسی کردند (آنبازگان و نیر، ۲۰۰۴). صالح و همکاران ماتریس همبستگی را بین خصوصیات فیزیکی شامل میزان کلسیت، دولومیت، گچ و هالیت در آب زیرزمینی و خصوصیات شیمیایی شامل اسیدیت و نسبت جذبی سدیم آب زیرزمینی ارائه دادند. آنها بر تأثیر فعالیت های کشاورزی روی غلظت آب زیرزمینی تأکید کردند (صالح و دیگران، ۱۹۹۹). در تحقیقی که توسط بیات ورکشی و فصیحی (۱۳۹۶) انجام شد با استفاده از روش پیشنهادی، تغییرات غلظت نیترات را بررسی کردند. آنها با استفاده از سن آب زیرزمینی برای تفسیر غلظت نیترات در چاه های کشاورزی رابطه ای بین زمان نفوذ و نسبت آلودگی نیترات آب زیرزمینی پیدا کردند. نتایج آنها با افزایش نیترات مشاهده ای در ۳۰ سال گذشته مطابقت خوبی داشت. کانل و همکاران با بررسی تغییرات زمانی- مکانی و فاکتورهای مؤثر در مدیریت آب های زیرزمینی در دره کاتماندو نپال دریافتند که آلودگی مناطق روستایی کمتر از مناطق شهری می باشد. همچنین آنها گزارش کردند که غلظت فسفر کل در آب های زیرزمینی مناطق روستایی بیشتر از آب های سطحی می باشد (کانل و دیگران، ۲۰۰۸). محمدی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی کیفیت آب های زیرزمینی دشت قزوین گزارش کردند که در فصول تر سال های مورد مطالعه، کیفیت آب زیرزمینی دشت کاهش یافته است. بطوری که با افزایش افت سطح آب مقادیر EC و TDS آب های زیرزمینی دشت قزوین روند نزولی داشته اند. با بررسی مکانی پارامترهای کیفی آب های زیرزمینی محدوده مطالعه مشخص شد که ۱۰ درصد از کل سطح آب های زیرزمینی دشت مذکور برای مصارف شرب و کشاورزی

مطلوب و ۶ درصد از آن برای این مصارف نامطلوب می‌باشد. همچنین ۰/۴ درصد از کل آب زیرزمینی فقط برای کشاورزی مطلوب و ۸۳/۶ درصد آن از کیفیت متوسط برخوردار است. یزدان پناهی و همکاران (۱۳۹۷) تغییرات زمانی - مکانی آب زیرزمینی را در دشت مشهد بررسی کردند. نتایج نشان داد کلاس غالب آب زیرزمینی در دشت مشهد به ترتیب، برای مصارف کشاورزی، C2S1 و C3S1 و برای مصارف شرب خوب و متوسط طبقه‌بندی شد. با این حال در مطالعه آنها نقشه مناطق مناسب برای مصارف شرب و کشاورزی تعیین نشده بود. همچنین مطالعاتی توسط سایر محققین (رحیمی و دیگران، ۱۳۹۵؛ همایون نژاد و دیگران، ۱۳۹۵؛ بیات ورکشی و فصیحی، ۱۳۹۶؛ طالبی و دیگران، ۱۳۹۶؛ علیپور و دیگران، ۱۳۹۶) در مناطق مختلف برای ارزیابی کیفیت آب از نقطه نظر شرب، کشاورزی و صنعت انجام شده است. بدلیل اهمیت بسزای منابع آب زیرزمینی، تحلیل زمانی و مکانی کیفی این منابع، می‌تواند کمک شایانی به مدیران و برنامه‌ریزان برای استفاده از این منابع آبی کند. بنابراین تحقیق حاضر با هدف بررسی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی دشت مشهد با استفاده از نرم افزار ARCGIS به منظور تعیین مناطق دارای منابع آب مناسب برای مصارف کشاورزی و تهیه نقشه های شوری و نقشه یکپارچه آب زیرزمینی دشت مشهد انجام شد.

مواد و روش ها

دشت مشهد با وسعت ۹۹۰۹ کیلومترمربع در شمال استان خراسان رضوی در بین طول جغرافیایی ۲۲' - ۵۸' تا ۵۳' - ۵۹' طول شرقی و ۵' - ۳۵' تا ۰۳' - ۳۷' عرض شمالی قرار دارد. این محدوده در حوضه آبریز قره‌قوم قرار گرفته و ۲۲/۵ درصد وسعت حوضه قره‌قوم را در ایران شامل می‌گردد. این حوضه، منطقه‌ای کوهستانی است بطوری که ۳۵ درصد آن دشت و بقیه شامل ارتفاعات و تپه‌ماهور می‌باشد. حداکثر ارتفاع حوضه در قله بینالود ۳۲۴۹ متر و حداقل در محل خروجی ۸۸۰ متر و ارتفاع متوسط آن ۱۸۰۰ متر از سطح دریا است. این حوضه از شمال و شمال غرب به ارتفاعات هزارمسجد و الله اکبر با روند شمال غرب به جنوب شرق، از سمت شرق به رودخانه تنگل‌شور و دشت نریمانی، از جنوب و جنوب غربی به کوه‌های بینالود با روند شمال غرب به جنوب شرق به موازات ارتفاعات شمالی و از شمال غرب به حوضه آبریز رودخانه اترک محدود می‌شود. دشت مشهد توسط رودخانه سیلابی کشف رود با روند شمال غرب - جنوب شرق و شاخه‌های فرعی ریزنده به آن به طول حدود ۱۶۰ کیلومتر زهکشی می‌شود. در مجموع، اقلیم کلی منطقه نیمه‌خشک بوده و میزان بارندگی متوسط سالیانه دراز مدت (۳۰ ساله، ۶۹-۱۳۶۸ الی ۹۹-۱۳۹۸) در محدوده مطالعاتی مشهد حدود ۲۵۵/۱ میلیمتر در سال می‌باشد. دما بر عکس بارندگی از سمت غرب به سوی شرق از ۹/۱ به ۱۷/۱ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. شکل ۱ موقعیت محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این تحقیق از نتایج تجزیه شیمیایی ۹۵ عدد چاه عمیق استفاده شده است که خلاصه‌ای از این نتایج در جدول ۱ آمده است. داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر از شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است. در جدول (۱) EC بر حسب میکرو موس بر سانتی‌متر، SAR بر حسب میلی‌اکی‌والان بر مول و بقیه پارامترها بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند.



شکل ۱. موقعیت دشت مشهد

جدول ۱. خلاصه نتایج بررسی اولیه آماری چاه های مورد مطالعه

متغیر	تعداد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات (%CV)
سختی کل (TH)	۹۵	۱۱۰۰	۹۰	۴۰۹/۲۸	۲۴۵/۱۶	۰/۵۹
نسبت جذبی سدیم (SAR)	۹۵	۴۶/۱۸	۱۷/۰	۲۸/۴	۱۸/۴	۹۷/۰
کاتیون	۹۵	۶۰/۷	۳/۳	۱۷/۸۵	۱۴/۷	۰/۳۴
پتاسیم (K)	۹۵	۲/۳	۰	۰۹/۰	۳۶/۰	۰۲/۰
سدیم (Na)	۹۵	۴۵	۳/۰	۵۸/۹	۶۷/۱۰	۲/۱۲۲
منیزیم (Mg)	۹۵	۱۴	۳/۰	۱/۴	۱۷/۳	۳۳/۰
کلسیم (Ca)	۹۵	۳/۹	۱	۰۷/۴	۰۱/۲	۴۹/۰
آنیون	۹۵	۶۰/۹	۳/۵	۱۸/۰۱	۱۴/۷۲	۳/۶۱
سولفات (So4)	۹۵	۱/۲۸	۴/۰	۴۵/۷	۷/۶	۰۳/۱
کلر (Cl)	۹۵	۵/۳۸	۵/۰	۴۹/۶	۱۵/۸	۰۵/۲
کربنات (Hco3)	۹۵	۵/۷	۲	۹۷/۳	۰۶/۱	۹۸/۱۱
بی کربنات (CO3)	۹۵	۱	۰	۰۸/۰	۲۳/۰	۰۱/۰
اسیدیته (PH)	۹۵	۵/۸	۴/۷	۰۵/۸	۲/۰	۰۲/۰
کل املاح محلول (TDS)	۹۵	۳۷۸۰	۲۶/۱۹۰	۱۸/۱۰۹۳	۷/۹۱۰	۰۷/۱۱۳
هدایت الکتریکی (EC)	۹۵	۶۰۰۰	۳۰۲	۲/۱۷۳۵	۵/۱۴۴۵	۳۲/۱

روش های تحلیل مکانی

در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات کیفیت آب های زیرزمینی دشت مشهد از نظر مکانی و زمانی، روش های کریجینگ معمولی و کوکریجینگ نقطه ای در محیط GIS مورد استفاده قرار گرفت. روش کریجینگ روشی است که ساختار همبستگی مکانی پدیده ها را در برآورد مکانی، مورد استفاده قرار می دهد. در روش کریجینگ معمولی می توان محدوده مشخصی از نقاط را در میان یابی برای هر نقطه مقصد در نظر گرفت. در زمین آمار نیز می توان به روش کوکریجینگ براساس همبستگی بین متغیرهای مختلف تخمین زد، این خصوصیت می تواند باعث دقت بیشتر تخمین ها و صرفه جویی هزینه ها (با نمونه برداری کمتر) شود. از نظر تئوری، کوکریجینگ نسبت به روش های کریجینگ یک متغیر، ارجحیت دارد. حتی وقتی از همه متغیرها به اندازه کافی نمونه در دسترس باشد، باز هم کوکریجینگ ترکیبی، از کریجینگ یک متغیر دقیق تر است (پن و دیگران، ۱۹۹۳). لازم بذکر است که مختصات نقاط نمونه برداری شده در سیستم UTM می باشد. رابطه عمومی این روش ها به شرح معادله ۱ است (حسنی پاک، ۱۳۷۷):

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

که در آن $Z^*(x_i)$ ، مقدار تخمینی متغیر، λ_i ، وزن یا اهمیت نمونه i ام، $Z(x_i)$ ، مقدار مشاهده شده متغیر، n ، تعداد نقاط نمونه برداری و x_i ، موقعیت نقاط مشاهده شده می باشد.

کریجینگ

روش کریجینگ روشی است که ساختار همبستگی مکانی پدیده ها را در برآورد مکانی مورد استفاده قرار می دهد. در این روش دقت تخمین بستگی به واریوگرام استخراجی از داده ها دارد که به صورت رابطه ۲ نشان داده شده است:

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

که در آن γ ، واریوگرام تجربی، $n(h)$ ، تعداد جفت نقاط به ازای هر فاصله h ، $Z(x)$ ، متغیر مشاهداتی، $Z(x+h)$ ، متغیر مشاهداتی به فاصله h می باشد (حسنی پاک، ۱۳۷۷). فرمول کلی روش کریجینگ مانند سایر تخمین گر ها به صورت رابطه ۳ تعریف می شود:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (3)$$

که در آن، $Z^*(x_i)$ مقدار تخمینی متغیر، λ_i وزن یا اهمیت نمونه i ام، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر می‌باشد (حسینی پاک، ۱۳۷۷).

کوکریدجینگ

در روش کوکریدجینگ از یک متغیر کمکی جهت تخمین بهتر متغیر اصلی استفاده می‌شود. فرم کلی معادلات کوکریدجینگ به شکل زیر است (رابطه ۴):

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^v \sum_{i=1}^{n_l} \lambda_{il} \gamma_{lv}(x_i, x_j) - \alpha_v = \gamma_{uv}(x_j, x) \\ \sum_{i=1}^{n_l} \lambda_{il} = \begin{cases} 1, 1 = u \\ 0, 1 \neq u \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

که در آن u و v متغیرهای کوواریته اولیه و ثانویه‌اند. در روش کوکریدجینگ تغییرات u و v دارای همبستگی متقاطع است. برای آنالیز کوکریدجینگ سمی واریوگرام متقاطع باید در ابتدا تعیین شود. در هر نقطه u و v اندازه‌گیری شده باشد و سمی واریوگرام متقاطع با معادله زیر (رابطه ۵) برآورد می‌شود (حسینی پاک، ۱۳۷۷):

$$\gamma_{uv} = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_u(x_i) - Z_u(x_i + h)][Z_v(x_i) - Z_v(x_i + h)] \quad (5)$$

نسبت $\frac{Nugget}{Sill}$ برای طبقه‌بندی وابستگی مکانی استفاده می‌شود. اگر نسبت $\frac{Nugget}{Sill}$ برای یک متغیر کمتر از ۰/۲۵ باشد، این متغیر دارای همبستگی مکانی بالا و اگر این نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ باشد دارای همبستگی مکانی محدود و اگر بالاتر از ۰/۷۵ باشد دارای همبستگی مکانی ضعیف است (لیو و دیگران، ۲۰۰۶). در این تحقیق به منظور ارزیابی روش‌های درونیابی از دو پارامتر آماری RMSE و MBE استفاده شد. RMSE مجذور میانگین مربعات خطای روش استفاده و MBE انحراف نتایج را نشان می‌دهد. در شرایطی که مقدار این پارامترها برابر صفر و یا نزدیک صفر باشد، نشان‌دهنده این است که روش استفاده، واقعیت را خوب شبیه‌سازی می‌کند و با فاصله یافتن از صفر، دقت کم و یا زیاد بودن انحراف را نشان می‌دهد. نحوه محاسبه پارامترهای MBE و RMSE به شرح معادله‌های ۶ و ۷ است:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i) \quad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

که در آنها S_i مقادیر پیش‌بینی شده، M_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌های بکار رفته می‌باشد.

تهیه نقشه‌های کیفیت آب‌های زیرزمینی

برای تحلیل کیفیت آب کشاورزی از جدول ۲ استفاده شد (علیزاده، ۱۳۸۳). با توجه به این جدول آب‌ها از نظر شوری با نمایه EC در چهار کلاس (گروه) و از نظر زیان حاصله از سدیم با نمایه SAR نیز در چهار کلاس قرار می‌گیرند.

جدول ۲. کلاس های شوری (EC)

کلاس	SAR (eq/mole)	کلاس	EC (dS/m)
S ₁ (کم)	< ۱۰	C ₁ (کم)	< ۰/۲۵
S ₂ (متوسط)	۱۰ - ۱۸	C ₂ (متوسط)	۲۵/۰ - ۷۵/۰
S ₃ (زیاد)	۱۸ - ۲۶	C ₃ (زیاد)	۲۵/۲ - ۷۵/۰
S ₄ (خیلی زیاد)	< ۲۶	C ₄ (خیلی زیاد)	< ۲۵/۲

تهیه نقشه کیفیت آب های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی

در این مطالعه کیفیت شیمیایی آب های زیرزمینی دشت مشهد با هدف کشاورزی نیز بررسی شد. کیفیت آب، نوع خاک و شیوه کشت نقش مهمی را در اینکه آیا منطقه ای برای کشاورزی مطلوب است یا نه بازی می کنند. خصوصیات شیمیایی بطور مشخص بر روی مطلوبیت آب برای کشاورزی تأثیر می گذارند. حجم اضافی سدیم کیفیت آب را برای کشاورزی نامطلوب می سازد. به منظور تهیه نقشه کیفیت آب برای هدف کشاورزی، نقشه های شوری و SAR روی هم قرار گرفت و نقشه نهایی تهیه گردید.

تهیه نقشه یکپارچه کیفیت آب های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی

پس از تهیه جداگانه نقشه های کیفیت آب های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی، آنالیز هم پوشانی این دو نقشه با نرم افزار GIS انجام گردید. با هم پوشانی این دو نقشه، امکان بررسی کیفیت آب های زیرزمینی در مناطق زیر میسر می گردد: (۱) مناطق مطلوب برای شرب و کشاورزی، (۲) مناطق مطلوب فقط برای کشاورزی، (۳) مطلوبیت متوسط برای کشاورزی و (۴) نامطلوب برای کشاورزی و شرب

نتایج و بحث

تحلیل مکانی پارامترهای کیفیت آب های زیرزمینی

در این پژوهش از داده های سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ و دو روش میانابایی کریجینگ معمولی و کوکریجینگ نقطه ای به منظور تخمین نقشه های کیفیت آب در دشت مشهد استفاده شد. همچنین نتایج ارزیابی دو روش کریجینگ معمولی و روش کوکریجینگ نقطه ای با استفاده از پارامترهای آماری RMSE و MBE در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. RMSE و MBE روش های زمین آماری در تخمین مقادیر پارامترهای کیفیت آب

روش	پارامتر	SAR	CI	EC	TDS	TH
کریجینگ معمولی	RMSE	۲/۲۲	۳/۷۶	۵۳۲/۵	۳۶۵/۳	۱۱۲/۱
	MBE	۰/۸۰۷	-۰/۶۰۴	-۴۷/۸۶	-۳۱/۲۳	۱/۵۲
کوکریجینگ نقطه ای	RMSE	۱/۲۷	۲/۷۷	۶۸۳	۲۶۱/۴	۹۱/۲۶
	MBE	۰/۰۷۴	-۰/۴۰۱	-۲۰/۵۱	-۵/۳۲	-۱/۴۱

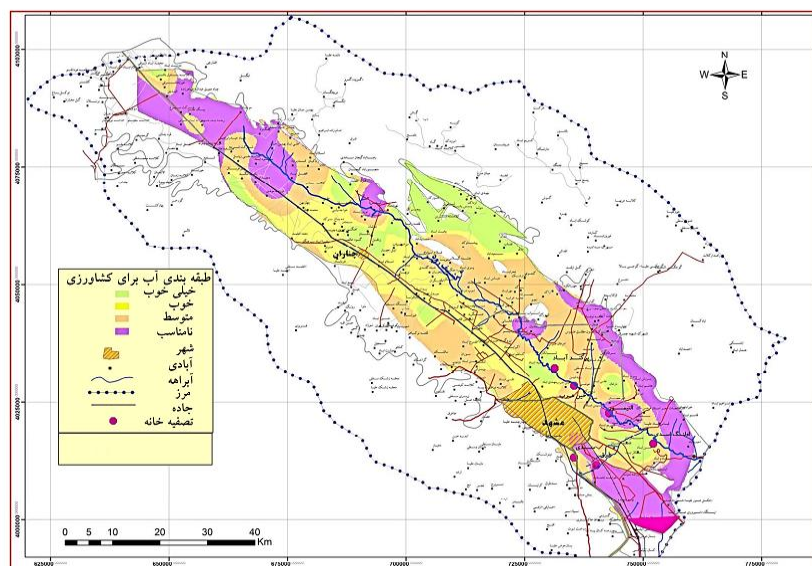
جدول ۳ نشان می دهد که RMSE و MBE حاصل از تخمین پارامترهای کیفیت آب به روش کوکریجینگ نقطه ای کمتر از روش کریجینگ معمولی می باشد، به همین دلیل نقشه درون یابی پارامترهای کیفیت آب، به روش کوکریجینگ نقطه ای و با استفاده از امکانات نرم افزاری زمین آمار نرم افزار GIS تهیه گردید.

نقشه آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی

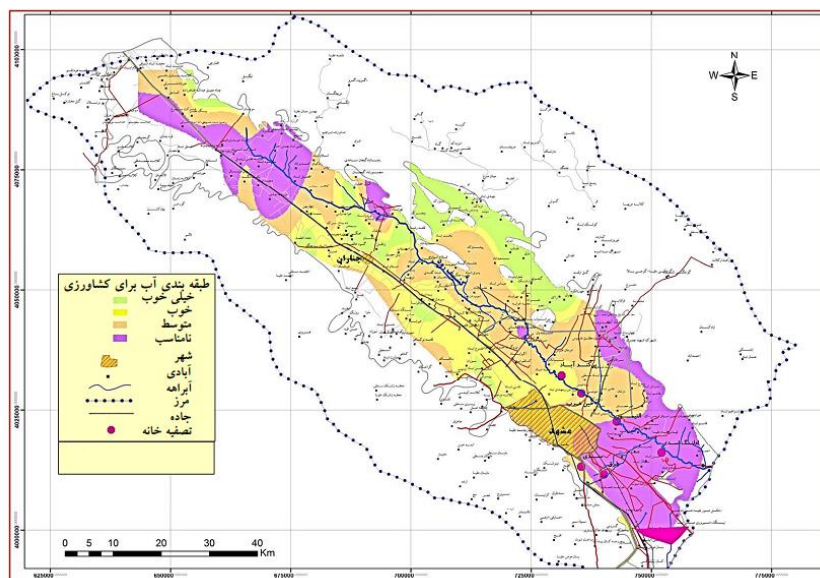
بعد از تهیه نقشه‌های SAR و شوری و روی هم قرار دادن آن‌ها، نقشه کیفیت آب‌های زیرزمینی به منظور مصارف کشاورزی بدست آمد (شکل‌های ۲ و ۳). شکل‌های ۲ و ۳ نشان دادند که میزان منابع آب زیرزمینی دشت مشهد که برای کشاورزی مناسب می‌باشند، در سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ حدود ۷۷ درصد و در سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ حدود ۷۰ درصد می‌باشد به عبارتی از سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تا سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ حدود ۱۰ درصد از منابع آب مناسب برای کشاورزی در دشت مشهد کاهش یافته و حدود ۳۰ درصد به منابع آب نامناسب برای کشاورزی اضافه شده است. محمدی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت قزوین گزارش کردند که ۱۰/۴ درصد از کل آب‌های زیرزمینی دشت قزوین برای کشاورزی مطلوب، ۸۳/۶ درصد آن متوسط و ۶ درصد آن نامطلوب می‌باشد.

نقشه یکپارچه کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی

از هم‌پوشانی دو نقشه کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی و شرب، نقشه یکپارچه کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی تهیه گردید. به منظور بررسی روند تغییرات زمانی پارامترهای کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت مشهد نقشه‌های یکپارچه کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی برای سال‌های آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۹-۱۳۹۸ تهیه شد (شکل‌های ۴ و ۵). شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که در سال‌های آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۹-۱۳۹۸ به ترتیب ۱۸ و ۱۲/۵ درصد از کل سطح آب‌های زیرزمینی دشت برای مصارف شرب و کشاورزی مطلوب و ۲۳ و ۳۰ درصد از آن برای این مصارف نامطلوب می‌باشد. همچنین در سال‌های آبی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۹-۱۳۹۸ به ترتیب حدود ۲۲ و ۲۴/۵ درصد از کل سطح آب‌های زیرزمینی فقط برای کشاورزی مطلوب و ۳۷ و ۳۳ درصد آن متوسط می‌باشد. مناطق مشخص شده کیفیت آب زیرزمینی با هدف مصارف شرب و کشاورزی به طراحان کاربری اراضی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی کمک شایانی می‌کند.

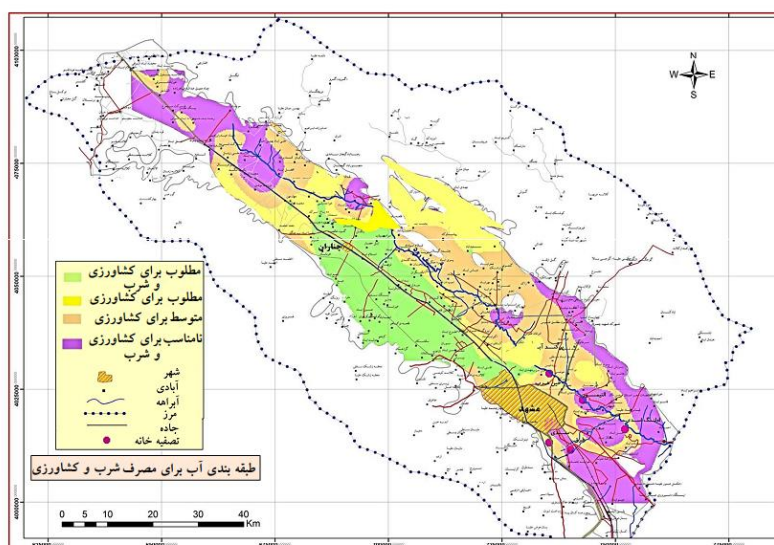


شکل ۲. نقشه درون‌یابی شوری و کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی دشت مشهد، سال ۹۵-۱۳۹۴

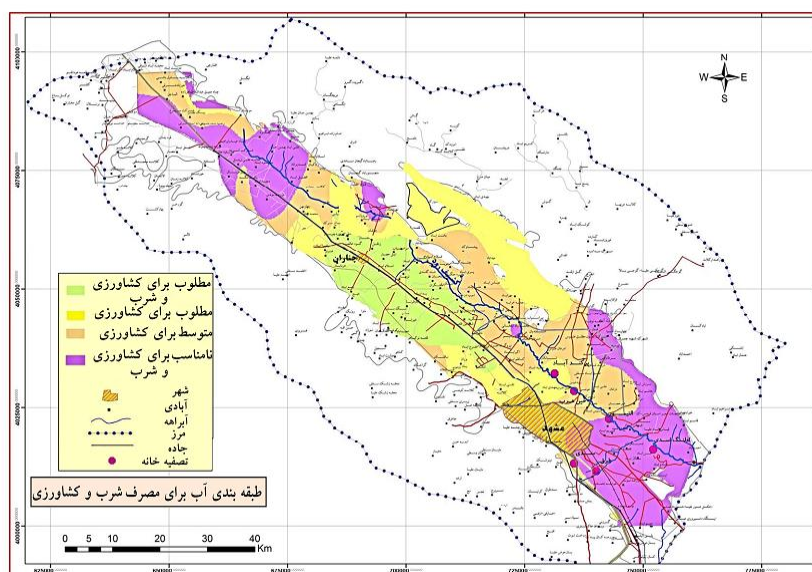


شکل ۳. نقشه درون یابی شوری و کیفیت آب های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی دشت مشهد، سال ۹۹-۱۳۹۸

همان طور که در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می شود با گذشت زمان سطح آب های مطلوب برای مصارف کشاورزی و شرب کاسته شده و همچنین سطح آب های نامطلوب برای این مصارف افزایش یافته است. به عبارتی از سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تا سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ حدود ۳۰ درصد از منابع آب مناسب برای کشاورزی و شرب در دشت مشهد کاهش و ۳۰ درصد منابع آب نامناسب برای کشاورزی و شرب در دشت مشهد افزایش یافته است. با ادامه این روند ممکن است در چند سال آینده آبی با کیفیت مطلوب برای کشاورزی و شرب در دشت مشهد که یکی از دشت های حاصل خیز کشور می باشد، وجود نداشته باشد. از این رو نیاز به مدیریت صحیح در رابطه با مصرف کودهای شیمیایی و روش های آبیاری مناسب الزامی است. محمدی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی کیفیت آب های زیرزمینی دشت قزوین گزارش کردند که ۱۰ درصد از کل سطح آب های زیرزمینی دشت مذکور برای مصارف شرب و کشاورزی مطلوب و ۶ درصد از آن برای این مصارف نامطلوب می باشد. همچنین ۰/۴ درصد از کل آب زیرزمینی فقط برای کشاورزی مطلوب و ۸۳/۶ درصد آن از کیفیت متوسط برخوردار است.



شکل ۴. نقشه یکپارچه کیفیت آب های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی دشت مشهد، سال ۹۵-۱۳۹۴



شکل ۵. نقشه یکپارچه کیفیت آب‌های زیرزمینی برای مصارف شرب و کشاورزی دشت مشهد، سال ۹۹-۱۳۹۸

نتیجه گیری

در این مطالعه پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی دشت مشهد از نظر مکانی و زمانی بررسی شدند. آنالیز شیمیایی روی نمونه‌های آب زیرزمینی دشت مشهد که در مکان‌ها و زمان‌های مختلف گرفته شده‌اند، انجام شد. تغییرات زمانی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت مشهد نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی از سال آبی ۹۵-۱۳۹۴ تا سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ کاهش یافته است. همچنین نقشه کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت برای مصارف کشاورزی نشان داد که ۷۰ درصد از کل آب‌های زیرزمینی دشت مشهد برای کشاورزی مطلوب تا متوسط و ۳۰ درصد آن نامطلوب بود. در حال حاضر بعضی از نواحی این دشت در خطر شور شدن قرار دارند. اگر آب‌های زیرزمینی این نواحی برای اهداف کشاورزی استفاده شوند، این نواحی به مراقبت‌های ویژه‌ای از جمله کشت گیاهان مقاوم به شوری و زهکشی مناسب دارند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش مبتنی بر GIS می‌تواند برای تهیه نقشه‌های کیفیت آب زیرزمینی دشت‌های نسبتاً کوچک مورد استفاده قرار بگیرد. با جایگزینی پساب تصفیه شده و کاهش بهره‌برداری از طریق چاه‌ها و خارج نمودن تعدادی از آنها از مدار بهره‌برداری می‌توان نسبت به تعدیل بیلان، جلوگیری از تشدید افت سطح آب زیرزمینی و نشست زمین که خود منجر به کاهش نفوذپذیری و ضریب قابلیت انتقال می‌شود، جلوگیری نمود.

References

- Alipour, A., Rahimi, J., & Azarnivand, A. (2017). Investigation of groundwater quality for drinking and agricultural purposes: A prerequisite for land use planning in arid and semi-arid regions of Iran. *Rangeland and Watershed Management, Journal of Natural Resources of Iran*, 70(2), 423-434.
- Alizadeh, A. (2004). *Water quality in irrigation*. Astan Quds Razavi Publications, Mashhad, 96 p.
- Anbazhagan, S., & Nair, A. M. (2004). Geographic information system and groundwater quality mapping in Panvel Basin, Maharashtra, India. *Environmental Geology*, 45, 753-761.
- Bayat Varkeshi, M., & Fasihi, R. (2017). Monitoring the trend of groundwater quality changes in four plains of Gilan Province over a 12-year period. *Journal of Health and Environment*, 10(4), 547-558.
- Hasani Pak, A. A. (1998). *Geostatistics*. University of Tehran Press, 182 p.
- Hillel, D. (2013). *Fundamentals of soil physics*. Academic press.
- Homayoun Nejad, A., Amiri, P., & Piri, A. (2016). Assessment of water quality of Chah Nimeh reservoirs in Zabol for drinking and agricultural purposes (based on Schoeller and Wilcox diagrams). *Environmental Science and Technology*, 18(1), 1-12.
- Kannel, P. R., Lee, S., & Lee, Y. S. (2008). Assessment of spatial-temporal patterns of surface and ground water qualities and factors influencing management strategy of groundwater system in an urban river corridor of Nepal. *Journal of Environmental Management*, 86(4), 595-604.

- Liu, D., Wang, Z., Zhang, B., Song, K., Li, X., Li, J., ... & Duan, H. (2006). Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China. *Agriculture, ecosystems & environment*, 113(1-4), 73-81.
- Mohammadi, M., Mohammadi Ghalehni, M., & Ebrahimi, K. (2011). Temporal and spatial variations of groundwater quality in Qazvin Plain. *Journal of Water Research of Iran*, 8, 41-52.
- Pan, G., Gaard, D., Moss, K., & Heiner, T. (1993). A comparison between cokriging and ordinary kriging: case study with a polymetallic deposit. *Mathematical Geology*, 25, 377-398.
- Rahimi, M., Besharat, S., & Verdinejad, V. R. (2016). Assessment of groundwater quality of Ardabil aquifer for drinking and agricultural purposes. *Journal of Environment and Water Engineering*, 2(4), 360-375.
- Saleh, A., Al-Ruwaih, F., & Shehata, M. (1999). Hydrogeochemical processes operating within the main aquifers of Kuwait. *Journal of Arid Environments*, 42(3), 195-209.
- Talebi, B., Sajadi, N., & Sharmed, T. (2017). Assessment of drinking and agricultural water quality in springs of the northern region of Qazvin Plain. *Journal of Marine Science and Technology Research*, 12(2), 1-16.
- Valayati, S. (2000). The most important factors affecting the quality changes of Nishapur Plain aquifer. *Geographical Research Quarterly*, 15.
- Yazdan Panahi, A., Akbari, M., & Behrang Manesh, M. (2018). Investigation of temporal-spatial variations of quantitative and qualitative groundwater parameters using geostatistical methods in Mashhad Plain. *Watershed Management Extension and Development Journal*, 6(20), 25-35.