

Assessment of groundwater quality vulnerability to Nitrate contamination under climate change using the DRASTIC model and Geographic Information System (GIS) in the Isfahan Plain

Mohammadreza Raeisidehkordi¹ 

1. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. E-mail: mohammadreza.raeisi@srbiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 May 2026
Revised 10 Jun 2026
Accepted 25 Jun 2026
Published 30 Jun 2026

Keywords:
Groundwater,
Climate Change,
DRASTIC Model,
Quality Vulnerability,
Water Resources Management.

ABSTRACT

Objective: This study aimed to evaluate the vulnerability of groundwater quality in the Isfahan Plain aquifer to nitrate contamination under climate change using the DRASTIC model integrated into a Geographic Information System (GIS) framework.

Method: To achieve this objective, the seven principal DRASTIC parameters, including depth to groundwater, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity, were analyzed. Climate data were derived from CMIP6 global climate models under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and were subsequently incorporated to adjust the climate-sensitive parameters of the vulnerability model.

Results: The results indicated that the DRASTIC vulnerability index under baseline conditions ranged from 83 to 218, with approximately 23% of the plain classified as having high to very high vulnerability. A correlation coefficient of 0.84 was obtained between the vulnerability index and measured nitrate concentrations, demonstrating the strong predictive capability of the model in identifying contamination-prone areas. Projections for the year 2050 revealed that the vulnerability index is expected to increase by approximately 9% under the RCP4.5 scenario and by 17% under the RCP8.5 scenario. This increase is primarily attributed to reduced precipitation, declining groundwater levels, and decreased natural aquifer recharge.

Conclusion: The findings suggest that climate change is likely to exacerbate nitrate contamination risks and threaten the long-term groundwater quality sustainability of the Isfahan Plain aquifer. Therefore, implementing policies aimed at reducing nitrogen fertilizer application, optimizing cropping patterns, and establishing continuous nitrate monitoring systems in high-risk areas should be prioritized within regional water resources management strategies.

Cite this article: Raeisidehkordi MR. Assessment of groundwater quality vulnerability to Nitrate contamination under climate change using the DRASTIC model and Geographic Information System (GIS) in the Isfahan Plain. *Water Resources and Climate Change*. (2026); 2(2): 1-14. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.14199.1035>.

Introduction

Groundwater constitutes the principal source of water supply for domestic, agricultural, and industrial purposes in the arid and semi-arid regions of Iran. Over recent decades, rapid agricultural expansion, excessive application of nitrogen-based fertilizers, and continuous population growth have significantly increased nitrate contamination in many aquifer systems. The Isfahan Plain, located in central Iran, is among the country's most important and intensively exploited aquifers.

This aquifer is currently experiencing severe groundwater depletion accompanied by elevated nitrate concentrations. In addition to anthropogenic pressures, climate change has further exacerbated groundwater vulnerability through alterations in precipitation and temperature regimes, thereby affecting groundwater recharge, evapotranspiration rates, and contaminant transport processes.

Assessing the spatial and temporal vulnerability of groundwater resources to nitrate contamination under changing climatic conditions is therefore crucial for sustainable water resources management. Among the available assessment approaches, the DRASTIC model, developed by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), is one of the most widely adopted index-based methods for evaluating intrinsic groundwater vulnerability. When integrated with Geographic Information Systems (GIS), the DRASTIC model provides an effective framework for spatial analysis and the identification of areas susceptible to groundwater contamination.

The present study aims to assess the groundwater quality vulnerability of the Isfahan Plain aquifer to nitrate contamination under both current and projected climate conditions. To this end, the DRASTIC model was implemented within a GIS environment, and its climate-sensitive parameters were modified using projections derived from CMIP6 climate models under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The specific objectives of this study are to develop groundwater vulnerability maps for present and future conditions, identify contamination-prone areas, and propose practical management strategies to mitigate nitrate pollution and enhance the long-term protection and sustainability of groundwater resources in the region.

Method

The DRASTIC model, originally developed by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA), was employed to evaluate the susceptibility of groundwater resources in the Isfahan Plain to nitrate contamination. This widely used index-based approach assesses intrinsic groundwater vulnerability through seven hydrogeological and environmental parameters: depth to groundwater (D), net recharge (R), aquifer media (A), soil media (S), topography (T), impact of the vadose zone (I), and hydraulic conductivity (C). Each parameter was assigned a specific rating and weight according to its relative contribution to contaminant transport and

attenuation processes within the subsurface environment. The overall DRASTIC Index (DI) was calculated using a weighted linear combination of the seven parameters.

The datasets required for model implementation were obtained from various national and regional sources. Groundwater level data were acquired from the Isfahan Regional Water Authority, while historical climatic records were obtained from the Iran Meteorological Organization. Future climate projections were derived from CMIP6 climate models. Soil and aquifer characteristics were extracted from the Natural Resources Organization and FAO databases.

In addition, a Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model with a spatial resolution of 30 m was utilized to derive slope and topographic characteristics. All spatial datasets were processed, standardized, converted into raster format, and integrated within the ArcGIS 10.x environment using the Weighted Overlay technique.

To evaluate the potential impacts of climate change on groundwater vulnerability, future precipitation and temperature projections for the 2050 horizon were extracted under the RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios. The projected climatic changes were incorporated into the DRASTIC framework by modifying the climate-sensitive parameters, particularly net recharge (R) and depth to groundwater (D), to represent anticipated changes in recharge conditions and groundwater levels. Consequently, separate vulnerability maps were generated for the baseline period (2010–2020) and for future conditions under both climate scenarios.

Model validation was conducted through statistical comparison between the calculated DRASTIC vulnerability indices and observed nitrate concentrations obtained from 32 monitoring wells distributed throughout the study area. The predictive performance of the model was assessed using Pearson's correlation coefficient, complemented by spatial correspondence analysis between identified high-vulnerability zones and measured nitrate concentrations.

Results

The DRASTIC model results under baseline climatic conditions (2010–2020) indicated that the groundwater vulnerability index (DI) across the Isfahan Plain ranged from 83 to 218. According to the standard DRASTIC classification, approximately 23% of the study area was classified as high or very high vulnerability. Spatial analysis conducted in the GIS environment revealed a distinct north-to-south decline in vulnerability levels, with the highest indices concentrated in the northern and northeastern sectors of the plain, particularly in the Khorasgan, Dolatabad, and Borkhar regions.

Sensitivity analysis demonstrated that depth to groundwater (D) and net recharge (R) were the most influential parameters affecting groundwater vulnerability, contributing approximately 28% and 24% of the total model variance, respectively. Validation of the model outputs against observed nitrate concentrations from 32 monitoring wells revealed a strong positive correlation ($r = 0.84$, $p < 0.01$), indicating a high degree of agreement between the

predicted vulnerability patterns and actual groundwater quality conditions. These results confirm the robustness and predictive capability of the DRASTIC model for identifying nitrate-prone areas within the study region.

To assess the potential impacts of climate change, the DRASTIC model was recalculated using temperature and precipitation projections derived from CMIP6 climate models under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the mid-century period (2050). The projections indicated an average annual temperature increase of approximately 1.8 °C under RCP4.5 and 3.4 °C under RCP8.5, accompanied by reductions in annual precipitation of 12% and 25%, respectively.

These climatic changes resulted in lower groundwater recharge rates and a progressive decline in groundwater levels, with the depth to groundwater increasing by approximately 0.2–0.4 m yr⁻¹. Consequently, the mean DRASTIC vulnerability index increased by approximately 9% under the RCP4.5 scenario and 17% under the RCP8.5 scenario relative to baseline conditions.

The generated vulnerability maps revealed a substantial expansion of high-risk areas under future climate scenarios. The proportion of the plain classified as highly vulnerable increased from 23% under current conditions to more than 40% under the RCP8.5 scenario. The most pronounced increases were observed in the northern and central parts of the aquifer, where intensive agricultural activities combined with relatively shallow groundwater levels enhance nitrate leaching and contaminant migration. In contrast, the southern portions of the plain exhibited comparatively lower vulnerability due to deeper groundwater tables and the predominance of fine-grained, clay-rich soils that reduce contaminant transport.

Overall, the findings suggest that climate change is likely to not only intensify nitrate contamination risks but also alter the spatial distribution of groundwater vulnerability across the Isfahan Plain aquifer, thereby increasing the complexity of future groundwater management and protection strategies.

Conclusion

The findings of this study demonstrate that the integration of the DRASTIC model with GIS, combined with climate change projections, provides a robust and reliable framework for evaluating groundwater vulnerability to nitrate contamination under both current and future environmental conditions.

The Isfahan Plain aquifer, one of the most strategically important groundwater resources in central Iran, exhibited vulnerability levels ranging from moderate to very high, with approximately 23% of the study area classified as highly vulnerable under baseline conditions. The strong correlation observed between the DRASTIC vulnerability index and measured nitrate concentrations ($r = 0.84$) further confirms the model's effectiveness in identifying contamination-prone zones.

Future climate projections indicate that groundwater vulnerability is likely to increase substantially by 2050. The average DRASTIC Index is projected to rise by approximately 9% under the RCP4.5 scenario and 17% under the RCP8.5 scenario, primarily as a consequence of reduced groundwater recharge and declining groundwater levels. The projected expansion of highly vulnerable areas, particularly in the northern and central sectors of the plain, highlights the increasing threat of nitrate contamination under future climatic conditions.

These findings underscore the necessity of adopting adaptive and proactive groundwater management strategies to address the combined pressures of climate change and anthropogenic activities. Priority actions should include optimizing nitrogen fertilizer application, promoting the use of slow-release fertilizers, enhancing irrigation management practices, and establishing continuous groundwater quality monitoring networks supported by GIS-based decision-support systems.

Incorporating vulnerability assessments into regional water resources planning can improve the resilience, sustainability, and long-term protection of groundwater resources, thereby supporting water security in arid and semi-arid regions facing increasing environmental stress.

Declarations

Ethical Approval

The paper is not currently being considered for publication elsewhere. All authors have been personally and actively involved in substantial work leading to the paper, and will take public responsibility for its content.

Competing interests

Conflict of Interest – None

Availability of data and materials

Data will be made available upon request.

Authors Contributions

Mohammadreza Raeisidehkordi performed the calculations. He approved the analytical methods. He supervised the findings of this work. Mohammadreza Raeisidehkordi discussed the results and contributed to the final version of the paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی آب‌های زیرزمینی به آلودگی نترات تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل DRASTIC و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در دشت اصفهان

محمد رضا رئیسی دهکردی[✉]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. رایانامه: mohammadreza.raeisi@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۹ کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، مدل DRASTIC، آسیب‌پذیری کیفی، مدیریت منابع آب.	هدف: در این پژوهش، آسیب‌پذیری کیفی آب‌های زیرزمینی دشت اصفهان نسبت به آلودگی نترات تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل DRASTIC در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارزیابی شد. روش: برای این منظور، هفت پارامتر اصلی مدل شامل عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص، جنس محیط آبدار، نوع خاک، توپوگرافی، اثر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های اقلیمی از مدل‌های جهانی CMIP6 تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 استخراج و برای تعدیل پارامترهای اقلیمی مدل به کار گرفته شد. یافته‌ها: نتایج نشان دادند که شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC در شرایط پایه بین ۸۳ تا ۲۱۸ متغیر بوده و حدود ۲۳ درصد از سطح دشت در طبقات «زیاد» و «بسیار زیاد» قرار دارد. ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و غلظت نترات اندازه‌گیری شده برابر با ۰/۸۴ به دست آمد که بیانگر دقت بالای مدل در پیش‌بینی نواحی آلوده است. در افق ۲۰۵۰، شاخص آسیب‌پذیری در سناریوی RCP4.5 حدود ۹ درصد و در سناریوی RCP8.5 حدود ۱۷ درصد افزایش یافت. این افزایش ناشی از کاهش بارندگی، افت سطح ایستابی و کاهش تغذیه طبیعی آبخوان است. نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییر اقلیم با افزایش تمرکز نترات، پایداری کیفی منابع آب زیرزمینی دشت اصفهان را تهدید می‌کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود اعمال سیاست‌های کاهش مصرف کودهای نیتروژنی، اصلاح الگوی کشت و ایجاد سامانه‌های پایش پیوسته نترات در مناطق پرخطر در دستور کار مدیریت منابع آب قرار گیرد.
استناد: رئیسی دهکردی محمد رضا. ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی آب‌های زیرزمینی به آلودگی نترات تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل DRASTIC و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در دشت اصفهان. <i>منابع آب و تغییر اقلیم</i>. ۱۴۰۵؛ ۲(۲): ۱-۱۴. https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.14199.1035	

۱- مقدمه

آب های زیرزمینی به عنوان یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعتی در مناطق خشک و نیمه خشک ایران از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند [۱]. افزایش جمعیت، توسعه ناپایدار کشاورزی و استفاده بی رویه از کودهای شیمیایی نیتروژنه موجب افزایش آلودگی نیتراتی در آبخوان ها شده است. نیترات یکی از متداول ترین آلاینده های آب زیرزمینی است که در اثر نفوذ کودهای شیمیایی، فاضلاب های خانگی و پساب های صنعتی وارد سفره های آب می شود [۲]. براساس استاندارد سازمان جهانی بهداشت^۱ (WHO)، غلظت نیترات در آب آشامیدنی نباید از ۵۰ میلی گرم بر لیتر تجاوز کند، چرا که مقادیر بالاتر می تواند منجر به بروز بیماری هایی در انسان گردد [۳]. از سوی دیگر، پدیده تغییر اقلیم در دهه های اخیر با تغییر در میانگین دما، بارش و الگوهای تبخیر، شرایط آب شناسی و ژئوشیمیایی آبخوان ها را دگرگون کرده است [۴]. تغییر در شدت و توزیع بارش، افزایش تبخیر و کاهش تغذیه طبیعی سفره ها می تواند موجب تغییر در مسیر و میزان انتقال آلاینده ها از سطح زمین به ناحیه اشباع شود. در چنین شرایطی، پیش بینی رفتار آینده آلاینده ها و ارزیابی آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی در برابر تغییر اقلیم، از اولویت های اصلی مدیریت پایدار منابع آب محسوب می شود [۵].

دشت اصفهان، به عنوان یکی از دشتهای مرکزی ایران، با وسعتی قابل توجه و اقلیم خشک تا نیمه خشک، طی سال های اخیر با افت شدید سطح آب زیرزمینی و افزایش غلظت آلاینده هایی از جمله نیترات مواجهه بوده است. این دشت به دلیل تمرکز فعالیت های کشاورزی، استقرار صنایع متعدد و تراکم جمعیتی بالا، در معرض خطر آلودگی فزاینده قرار دارد [۶]. گزارش های شرکت آب منطقه ای اصفهان نشان می دهد در برخی نقاط این

دشت، غلظت نیترات از حد مجاز ملی فراتر رفته است. در کنار فشارهای انسانی، تغییرات اقلیمی نیز می تواند از طریق کاهش بارندگی مؤثر و افزایش دمای متوسط سالانه، پویایی آلاینده های نیتراتی را تشدید کند [۷].

برای ارزیابی میزان آسیب پذیری آب های زیرزمینی، مدل های مختلفی توسعه یافته است. از میان این مدل ها، مدل DRASTIC یکی از پرکاربردترین روش های شاخص محور است که توسط سازمان حفاظت محیط زیست^۲ (EPA) آمریکا معرفی شده و براساس هفت پارامتر اصلی شامل عمق سطح ایستابی (D)، میزان تغذیه خالص (R)، جنس محیط آبدار (A)، نوع خاک (S)، توپوگرافی (T)، اثر منطقه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) شاخص آسیب پذیری را محاسبه می کند [۸]. تلفیق این مدل با سامانه اطلاعات جغرافیایی^۳ (GIS) امکان تحلیل مکانی و پهنه بندی مناطق پرخطر را فراهم می سازد [۹].

با توجه به اهمیت آب های زیرزمینی در تأمین نیازهای مختلف دشت اصفهان و تهدید روزافزون ناشی از آلودگی نیترات، این پژوهش با هدف ارزیابی آسیب پذیری کیفی آب های زیرزمینی دشت اصفهان نسبت به آلودگی نیترات تحت تأثیر تغییر اقلیم انجام شده است. بدین منظور، از مدل DRASTIC در محیط GIS استفاده و ضرایب مدل متناسب با سناریوهای اقلیمی آینده (RCP4.5 و RCP8.5) تعدیل شد تا نقشه های آسیب پذیری فعلی و آینده تولید و مناطق بحرانی شناسایی شود. نتایج این پژوهش می تواند به عنوان ابزاری علمی برای تصمیم گیری در مدیریت مصرف کود، برنامه ریزی کاربری اراضی و حفاظت کیفی آبخوان اصفهان مورد استفاده قرار گیرد.

در سال های اخیر پژوهش های متعددی در زمینه ارزیابی آسیب پذیری کیفی آب های زیرزمینی با تمرکز بر آلودگی نیترات و اثرات تغییر اقلیم انجام شده است. نتایج بیش تر مطالعات نشان می دهد که مدل DRASTIC در

^۱ World Health Organization^۲ Environmental Protection Agency^۳ Geographic Information System

داده های محلی و شاخص های کیفی مانند نیترات بازنگری شوند [۱۱]. در مطالعه ای اخیر، عشاقری^۵ و همکاران با به کارگیری نسخه ای تعدیل شده از مدل DRASTIC و تحلیل فضایی در GIS، آسیب پذیری آب های زیرزمینی را در یک محدوده تحصیلی ارزیابی کردند. یافته ها نشان دادند که وزن دهی مجدد پارامترها، به ویژه پارامترهای مرتبط با کاربری اراضی و نفوذپذیری سطحی، می تواند توان پیش بینی مدل را افزایش دهد. نتایج به صورت نقشه های پهنه بندی ارائه شد که نواحی دارای کاربری کشاورزی و فعالیت انسانی بالا را به عنوان مناطق با آسیب پذیری زیاد به نمایش گذاشت. نویسندگان بر این نکته تأکید کردند که برای کاهش خطر آلودگی آب زیرزمینی، تدوین راهبردهای مدیریت کاربری اراضی باید همراه با تحلیل مدل های آسیب پذیری انجام شود [۱۲]. در پژوهش آرافا^۶ و همکاران با استفاده از مدل اصلاح شده DRASTIC-LU و GIS، میزان آسیب پذیری آب های زیرزمینی در منطقه دلتای نیل ارزیابی شد. نتایج نشان دادند بخش قابل توجهی از منطقه در طبقات «زیاد» و «بسیار زیاد» آسیب پذیری قرار دارد و پارامترهای «عمق سطح ایستابی» و «میزان تغذیه خالص» بیشترین اثر را در شاخص نهایی داشته اند. همبستگی میان مقادیر نیترات و شاخص آسیب پذیری نیز حاکی از دقت بالای مدل در پیش بینی مناطق مستعد آلودگی است. این تحقیق بر اهمیت تلفیق کاربری زمین با مدل های هیدروژئولوژیکی برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی در مناطق کشاورزی تأکید دارد [۱۳]. در پژوهشی که توسط نجاتی جهرمی و همکاران انجام شد، منشاء آلودگی نیترات در آب های زیرزمینی آبخوان دشت ورامین با بهره گیری از ایزوتوپ های پایدار نیتروژن ($N-NO_3^{15}$) و اکسیژن ($O-NO_3^{18}$) و تحلیل های هیدروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که دو منبع اصلی آلودگی شامل فاضلاب های خانگی و صنعتی و همچنین کودهای حیوانی و آلی خاک بوده و سهم فاضلاب در افزایش

ترکیب با GIS ابزار مؤثری برای شناسایی مناطق مستعد آلودگی به شمار می آید.

در مطالعه ای که توسط حامد^۴ و همکاران انجام شد، روش مدل شاخص آسیب پذیری کیفی آب های زیرزمینی DRASTIC با بهره گیری از GIS در منطقه محل دفن زباله «کانی قیرزاله»، واقع در حوضه مرکزی اربیل، شمال عراق، به کار گرفته شد تا پهنه بندی آسیب پذیری آبخوان صورت گیرد. نتایج نشان دادند که منطقه مذکور به چهار طبقه آسیب پذیر (خیلی کم: ۱۶/۹۷ درصد؛ کم: ۲۷/۶۷ درصد؛ متوسط: ۳۶/۵۵ درصد؛ زیاد: ۱۸/۸۱) تقسیم شد، و تحلیل حساسیت تک پارامتری نشان داد که پارامترهای ناحیه غیراشباع و جنس محیط آبدار بیشترین تأثیر را در شاخص نهایی داشته اند. هم چنین، همبستگی بین غلظت نیترات و نقشه شاخص با ضریب پیرسون $r = 0.72$ محاسبه شد که نشانگر عملکرد مناسب مدل در تشخیص نواحی مستعد آلودگی می باشد [۱۰]. در پژوهش جوادی و همکاران با عنوان تعدیل مدل DRASTIC برای پهنه بندی آسیب پذیری کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از اندازه گیری های نیترات در نواحی کشاورزی نشان داده شد که استفاده از نسخه تنظیم شده مدل DRASTIC که وزن هر پارامتر براساس ارتباط آن با غلظت نیترات بازتعیین شده است، دقت تشخیص نواحی دارای پتانسیل آلودگی نیترات را به طور قابل ملاحظه ای نسبت به نسخه اصلی افزایش می دهد. نویسندگان در محدوده آبخوان آستانه (شمال ایران) با نمونه برداری از ۱۳ چاه و تحلیل ضریب همبستگی بین شاخص آسیب پذیری و نیترات، دریافتند که ضریب اصلاح شده مدل (۰/۶۸) بسیار بیش تر از ضریب نسخه اصلی (۰/۲۳) است و این بیانگر بهبود عملکرد مدل در ارزیابی منابع آب تحت فشار کشاورزی است. این مطالعه به روشنی تأکید می کند که برای ارزیابی آسیب پذیری کیفی، تنها استفاده از وزن های استاندارد مدل DRASTIC کافی نیست، بلکه لازم است وزن ها و رتبه ها براساس

^۶- Arafa^۴- Hamed^۵- Ashagrie

زیرزمینی است. با این حال، اغلب پژوهش‌ها تأثیر تغییر اقلیم را به صورت مستقیم در پارامترهای مدل لحاظ نکرده‌اند، در حالی که تغییر در الگوهای بارش و دما می‌تواند به طور چشمگیری بر تغذیه و نوسانات سطح ایستابی اثرگذار باشد. از این رو، ضرورت دارد ارزیابی آسیب‌پذیری در چارچوب سناریوهای اقلیمی آینده انجام گیرد تا درک دقیق‌تری از پویایی نیترا در آبخوان‌ها حاصل شود. بر این مبنا، پژوهش حاضر با تمرکز بر دشت اصفهان، به عنوان یکی از مهم‌ترین آبخوان‌های کشور که با افت شدید سطح ایستابی و افزایش غلظت نیترا مواجه است، به بررسی آسیب‌پذیری کیفی آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم می‌پردازد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مطالعه

دشت اصفهان در بخش مرکزی ایران و در محدوده جغرافیایی 32° تا 33° عرض شمالی و 51° تا 52° طول شرقی واقع شده است. این دشت بخشی از حوضه آبریز زاینده‌رود محسوب می‌شود و حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد. میانگین ارتفاع از سطح دریا حدود ۱۵۵۰ متر است و اقلیم منطقه براساس طبقه‌بندی دوما رتن در گروه اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد. میانگین بارش سالانه ۱۲۰ تا ۱۳۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۶ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. به منظور شناسایی محدوده مکانی دشت اصفهان و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری، نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه تهیه شد (شکل ۱). این نقشه شامل موقعیت دشت در سطح ملی، مرز استان اصفهان، عوارض طبیعی عمده مانند رودخانه زاینده‌رود، و موقعیت چاه‌های اندازه‌گیری نیترا است.

غلظت نیترا بیش‌تر از سایر منابع بود. دامنه غلظت نیترا در نمونه‌ها بین ۴ تا $59/8$ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده و در برخی نقاط از حد مجاز استانداردهای کیفی فراتر رفته بود. براساس نتایج ایزوتوپی، فرآیندهای نیتریفیکاسیون در بخش‌های مرکزی و دنیتریفیکاسیون در نواحی غربی و جنوبی آبخوان غالب بوده‌اند. یافته‌های این مطالعه اهمیت بررسی دقیق منابع آلودگی و به‌کارگیری راه‌کارهای مدیریتی در کنترل نیترا و حفاظت کیفی آب‌های زیرزمینی را در مناطق کشاورزی و شهری نشان دادند [۱۴]. در این مطالعه، اسکریپت‌های^۷ و همکاران به ارزیابی آسیب‌پذیری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در منطقه آستانه-کوچصفهان با استفاده از ترکیب دو شاخص DRASTIC (برای آبخوان) و WRASTIC (برای منابع سطحی) در محیط GIS پرداختند. نخست وزن‌ها و رتبه‌های هر پارامتر توسط روش‌های تحلیل سلسله‌مراتبی^۸ (AHP) و آنتروپی تعیین شد تا بیشینه همبستگی با غلظت نیترا حاصل شود؛ سپس شاخص‌ها محاسبه و پهنه‌بندی شدند. نتایج نشان دادند که پارامتر کاربری صنعتی برای شاخص WRASTIC و عمق سطح آب زیرزمینی برای شاخص DRASTIC بیش‌ترین تأثیر را داشتند و ضریب همبستگی با غلظت نیترا برای DRASTIC معادل $0/61$ و برای WRASTIC معادل $0/58$ بود. دامنه شاخص WRASTIC بین ۱۷ تا ۴۶ و شاخص DRASTIC بین ۱۱۹ تا ۱۸۰ به‌دست آمد. این پژوهش به‌عنوان اولین مطالعه تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در کشور، اهمیت شناسایی نواحی با خطر بالا و مدیریت کیفی یک پارچه منابع آب را در مناطق کشاورزی و صنعتی خشکی‌زده برجسته کرده است [۱۵].

با توجه به مرور مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل DRASTIC در ترکیب با GIS یکی از مؤثرترین ابزارها برای ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی آب‌های

⁸- Analytic Hierarchy Process

⁷- Askarbiouki

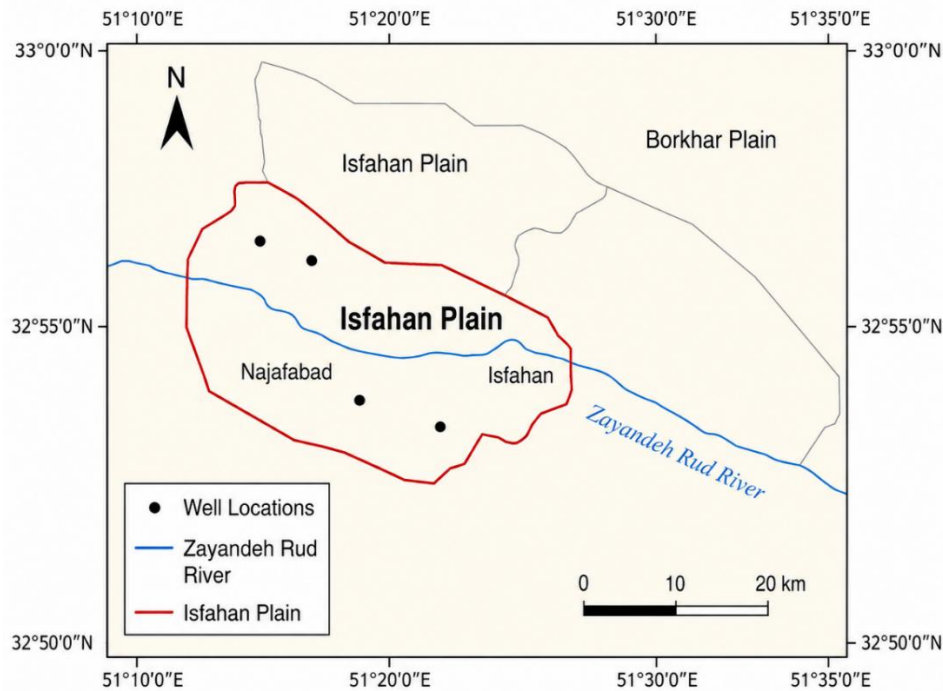


Figure 1. Geographical location of the study area (Isfahan Plain)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (دشت اصفهان)

۳) فعالیت های گسترده کشاورزی و صنعتی در منطقه، پتانسیل بالایی برای آلودگی نترات ایجاد کرده اند.

۴) وجود داده های هیدروژئولوژیکی و اقلیمی کافی، این منطقه را به گزینه ای مناسب برای مدل سازی مکانی و اقلیمی تبدیل کرده است.

بنابراین دشت اصفهان نمونه ای شاخص از یک سامانه آب زیرزمینی در مناطق خشک ایران، به ویژه در دشتهایی با فشار استخراجی شدید، به شدت آسیب پذیر است و مطالعه ای در سطح ملی این شکنندگی را نشان داده است [۱۸].

۲-۲- مدل و روش ارزیابی آسیب پذیری

برای ارزیابی آسیب پذیری کیفی آب های زیرزمینی در برابر آلودگی نترات، از مدل DRASTIC استفاده شد. این مدل یکی از معتبرترین و پر کاربردترین روش های

منبع اصلی تأمین آب در دشت اصفهان، آب های زیرزمینی است که از آبرفت های آبرفتی-رسی و سازندهای کواترنری تشکیل شده اند [۱۶]. به دلیل برداشت مداوم از چاه های مجاز و غیرمجاز، در دو دهه اخیر سطح ایستابی آبخوان با افتی بیش از ۱۰ متر مواجه بوده است. از سوی دیگر، غلظت نترات در بخش هایی از آبخوان از حد مجاز ملی (۵۰ میلی گرم در لیتر) فراتر رفته است. این افزایش به طور مستقیم با گسترش اراضی کشاورزی و مصرف بی رویه کودهای نیتروژنی در ارتباط است [۱۷].

اهمیت انتخاب دشت اصفهان در این پژوهش در چند نکته اساسی نهفته است:

- ۱) این دشت یکی از بحرانی ترین آبخوان های ایران از نظر افت سطح آب و کیفیت منابع آب است.
- ۲) بخش عمده ای از نیاز آبی شهر اصفهان و نواحی صنعتی اطراف از همین آبخوان تأمین می شود.

در این مطالعه، با توجه به ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی دشت اصفهان، مقادیر وزن و رتبه پارامترها در محیط GIS وارد شده و نقشه‌های مربوطه تولید شدند.

انتخاب مدل DRASTIC بر پایه چند ملاحظه علمی و کاربردی انجام شد:

(۱) نخست آن که DRASTIC از شناخته‌شده‌ترین

مدل‌های جهانی در زمینه ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی است و در بیش از ۵۰ کشور مورد استفاده قرار گرفته است.

(۲) ساختار ساده اما جامع آن، امکان تلفیق داده‌های مختلف در محیط GIS را فراهم می‌کند و برای مناطقی که داده‌های دقیق شیمیایی یا عددی در دسترس نیستند، بسیار مناسب است.

(۳) مدل DRASTIC به راحتی با داده‌های اقلیمی و سناریوهای تغییر اقلیم قابل تعدیل است، به طوری که در پژوهش حاضر، پارامترهای تغذیه خالص (R) و عمق سطح ایستابی (D) با استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی پروژه CMIP6 در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بازتنظیم شده‌اند. در نهایت، این مدل از نظر مدیریتی برای برنامه‌ریزان منابع آب، ابزاری کاربردی برای شناسایی نواحی بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی محسوب می‌شود.

۲-۳- داده‌ها و پردازش مکانی

برای اجرای مدل، داده‌های مختلف از منابع معتبر گردآوری و در محیط ArcGIS 10.x آماده‌سازی شدند. داده‌ها شامل اطلاعات هیدروژئولوژیکی، اقلیمی، خاک و زمین‌شناسی بودند. جدول ۲ نوع داده‌ها و منابع آن‌ها را نشان می‌دهد.

شاخص‌محور در جهان است که توسط EPA معرفی شد [۱۹].

مدل DRASTIC بر پایه هفت پارامتر اصلی محیطی و هیدروژئولوژیکی بنا شده است که عبارت‌اند از: عمق سطح ایستابی (D)، تغذیه خالص (R)، جنس محیط آبدار (A)، نوع خاک (S)، توپوگرافی (T)، اثر ناحیه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C). هریک از این پارامترها با توجه به نقش آن در نفوذ و انتقال آلاینده‌ها در محیط زیرزمینی، دارای وزن و رتبه مشخصی است [۲۰ و ۲۱]. شاخص آسیب‌پذیری (DI) براساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$DI = C_w C_r + I_w I_r + T_w T_r + S_w S_r + A_w A_r + R_w R_r + D_w D_r \quad (1)$$

که در آن، W = وزن هر پارامتر و r = رتبه آن هستند.

مقادیر حاصل بین ۲۳ تا ۲۳۰ متغیر بوده و به چهار طبقه آسیب‌پذیری (کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد) تقسیم می‌شود. جدول ۱ وزن و رتبه اختصاص داده‌شده به پارامترهای مدل DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- وزن و رتبه پارامترهای مدل DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی.

Table 1. Weight and rating assigned to the DRASTIC parameters for groundwater vulnerability assessment.

Parameter	Description	Rating Range	Weight
D	Depth to water table (m)	1-10	5
R	Net recharge (mm/year)	1-9	4
A	Aquifer media	1-10	3
S	Soil media	1-10	2
T	Topography (%)	1-10	1
I	Impact of vadose zone	1-10	5
C	Hydraulic conductivity (m/day)	1-10	3

مناطق خوراسگان، دولت آباد و برخوار، بیشترین مقادیر شاخص را داشته اند.

نتایج حاصل از تحلیل لایه های مؤلفه ای مدل نشان دادند که عمق سطح ایستابی (D) و تغذیه خالص سالانه (R) بیشترین تأثیر را بر آسیب پذیری دارند و به ترتیب ۲۸ و ۲۴ درصد از واریانس کلی شاخص را تبیین می کنند. بررسی داده های غلظت نترات چاه های مشاهده ای (دوره ۲۰۱۹-۲۰۱۵) نشان داد که میانگین نترات در کل دشت برابر با $52/6 \text{ mg/L}$ و در برخی نقاط شمالی تا بیش از 85 mg/L افزایش می یابد. ضریب همبستگی پیرسون بین DI و غلظت نترات برابر با $r = 0.84$ ($p < 0.01$) محاسبه شد که بیانگر ارتباط آماری قوی میان شاخص مدل و وضعیت واقعی آلودگی است. این مقدار از همبستگی نسبت به نتایج پژوهش های مشابه در دشت های مشهد ($r = 0.78$) و قزوین ($r = 0.73$) بالاتر است و نشان دهنده کارایی مدل در شرایط اقلیمی خشک دشت اصفهان است. به منظور بررسی تغییرات غلظت نترات در آب زیرزمینی دشت اصفهان، آمار توصیفی داده های برداشت شده از چاه های مشاهداتی در جدول ۳ ارائه شده است. این داده ها مبنای ارزیابی صحت مدل و تحلیل مکانی آسیب پذیری آبخوان می باشند.

جدول ۳- آمار توصیفی غلظت نترات (mg/L) در آب زیرزمینی دشت اصفهان

No. of Samples	Std. Dev.	Mean (mg/L)	Max (mg/L)	Min (mg/L)	Statistic
32	12.7	46.3	87.5	8.2	Nitrate (NO_3^-)

به منظور بررسی الگوی فضایی آسیب پذیری آب زیرزمینی در دشت اصفهان، شاخص DRASTIC برای شرایط فعلی و سناریوی اقلیمی آینده محاسبه شد. نتایج حاصل به صورت نقشه های پهنه بندی در شکل ۲ ارائه شده است. همان طور که در شکل ۲ (الف) مشاهده می شود،

جدول ۲- داده های ورودی مدل و منابع آنها

Data type	Source
Depth to water table	Isfahan regional water company
Precipitation and temperature	Meteorological organization and CMIP6 data
Soil & aquifer media	Natural resources organization and FAO maps
Topography	Digital elevation model (DEM, SRTM 30m)
Hydraulic conductivity	Regional pumping studies

تمامی لایه ها در محیط GIS به رستر با تفکیک مکانی یکسان تبدیل و با روش Weighted Overlay ترکیب شدند. خروجی مدل DRASTIC، نقشه شاخص آسیب پذیری (DI) بود که در چهار طبقه کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم شد.

برای بررسی اثر تغییر اقلیم، تغییرات پیش بینی شده دما و بارش از مدل های اقلیمی به پارامترهای تغذیه خالص و عمق آب زیرزمینی اعمال شد. در نهایت، نقشه های آسیب پذیری فعلی و آینده تولید و با داده های غلظت نترات اندازه گیری شده در چاه های منطقه مقایسه شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل شاخص آسیب پذیری کیفی فعلی

مدل DRASTIC در شرایط اقلیمی پایه (دوره آماری ۲۰۲۰-۲۰۱۰) نشان داد که مقدار شاخص آسیب پذیری DRASTIC در دشت اصفهان بین ۸۳ تا ۲۱۸ متغیر است. براساس تقسیم بندی استاندارد، مقادیر کم تر از ۱۰۰ به عنوان آسیب پذیری کم، ۱۰۰ تا ۱۴۰ متوسط، ۱۴۰ تا ۱۸۰ زیاد و بیش از ۱۸۰ بسیار زیاد در نظر گرفته شد.

تحلیل فضایی در محیط GIS نشان داد که توزیع مکانی DI از شمال به جنوب دارای گرادین کاهشی است. بخش های شمالی و شمال شرقی دشت، به ویژه حوالی

نشان‌دهنده افزایش قابل توجه پهنه‌های با آسیب‌پذیری بالا و بسیار بالا است که بیانگر تشدید پتانسیل آلودگی آبخوان تحت تأثیر تغییرات اقلیمی می‌باشد.

بخش عمده‌ای از دشت اصفهان در شرایط فعلی در محدوده آسیب‌پذیری متوسط تا بالا قرار دارد که به‌طور عمده در نواحی مرکزی و مجاور رودخانه زاینده‌رود متمرکز است. در سناریوی اقلیمی آینده (RCP4.5)، نقشه شکل ۲ (ب)

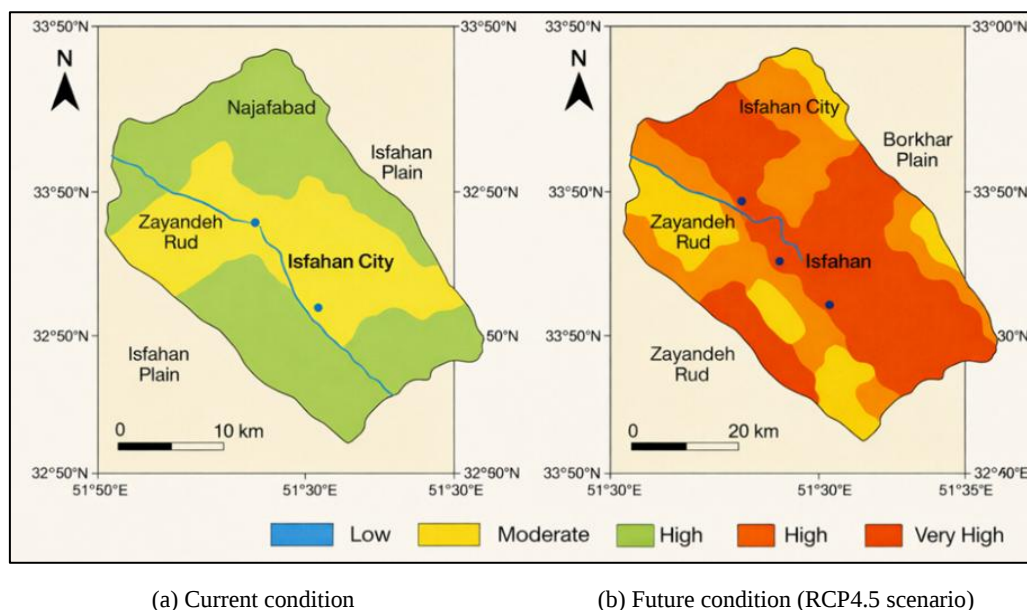


Figure 2. Spatial distribution of groundwater vulnerability index (DRASTIC model) in the Isfahan Plain under (a) current conditions and (b) future climate scenario (RCP4.5).

شکل ۲- پراکنش فضایی شاخص آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مدل DRASTIC در دشت اصفهان تحت شرایط (الف) فعلی و (ب) سناریوی اقلیمی آینده (RCP4.5)

پس از تصحیح سوگیری^۹ و برون‌یابی مکانی در مقیاس حوضه به‌کار رفتند.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، میانگین دمای سالانه در سناریوی RCP4.5 حدود ۱/۸ درجه سانتی‌گراد و در سناریوی RCP8.5 حدود ۳/۴ درجه سانتی‌گراد نسبت به میانگین بلندمدت افزایش می‌یابد. همچنین بارش سالانه در سناریوی اول حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد و در سناریوی دوم تا ۲۵ درصد کاهش نشان می‌دهد.

این تغییرات اقلیمی باعث کاهش تغذیه طبیعی آبخوان و افت سطح ایستابی در محدوده ۰/۲ تا ۰/۴ متر در سال می‌شود. در نتیجه، مقدار شاخص DRASTIC به‌صورت میانگین ۹ درصد در سناریوی RCP4.5 و ۱۷ درصد در سناریوی RCP8.5 نسبت به وضعیت پایه

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که غلظت نیتрат در برخی نقاط از حد مجاز استاندارد ملی (۵۰ میلی‌گرم بر لیتر) فراتر رفته است. این مسئله بیانگر تأثیر فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ کودهای نیتروژنی بر کیفیت آب زیرزمینی دشت اصفهان است. در ادامه، نقشه آسیب‌پذیری منطقه براساس مدل DRASTIC ارائه شده است (شکل ۳).

۲-۳- تحلیل اثر تغییر اقلیم بر آسیب‌پذیری

به‌منظور بررسی اثر تغییر اقلیم، خروجی مدل‌های اقلیمی پروژه CMIP6 تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای افق ۲۰۵۰ مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مدل‌های GFDL-ESM4 و MPI-ESM1-2HR

^۹- Bias

عمده در طبقات کم تا زیاد قرار دارد و نواحی با آسیب‌پذیری بالا در اطراف شهر اصفهان و امتداد رودخانه زاینده‌رود متمرکز هستند.

در سناریوی آینده، با افزایش دما و کاهش بارندگی، میزان آسیب‌پذیری در بیش‌تر بخش‌های دشت به‌ویژه نواحی شمالی و مرکزی به‌طور محسوسی افزایش یافته و در طبقه زیاد تا بسیار زیاد قرار گرفته است. این تغییرات بیانگر تأثیر مستقیم تغییر اقلیم بر تغذیه و تراز آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش پتانسیل آلودگی نیتراتی در آینده است.

افزایش یافت. افزایش شاخص آسیب‌پذیری به‌طور عمده ناشی از دو عامل است:

(۱) کاهش پارامتر R (تغذیه خالص) به‌دلیل افت بارندگی مؤثر؛

(۲) افزایش پارامتر D (عمق سطح ایستابی) که به‌صورت غیرمستقیم احتمال تمرکز آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد.

در شکل ۳ نقشه‌های حاصل از مدل DRASTIC برای شرایط فعلی و آینده (سناریوی اقلیمی RCP8.5) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شاخص آسیب‌پذیری کیفی DRASTIC در وضعیت فعلی به‌طور

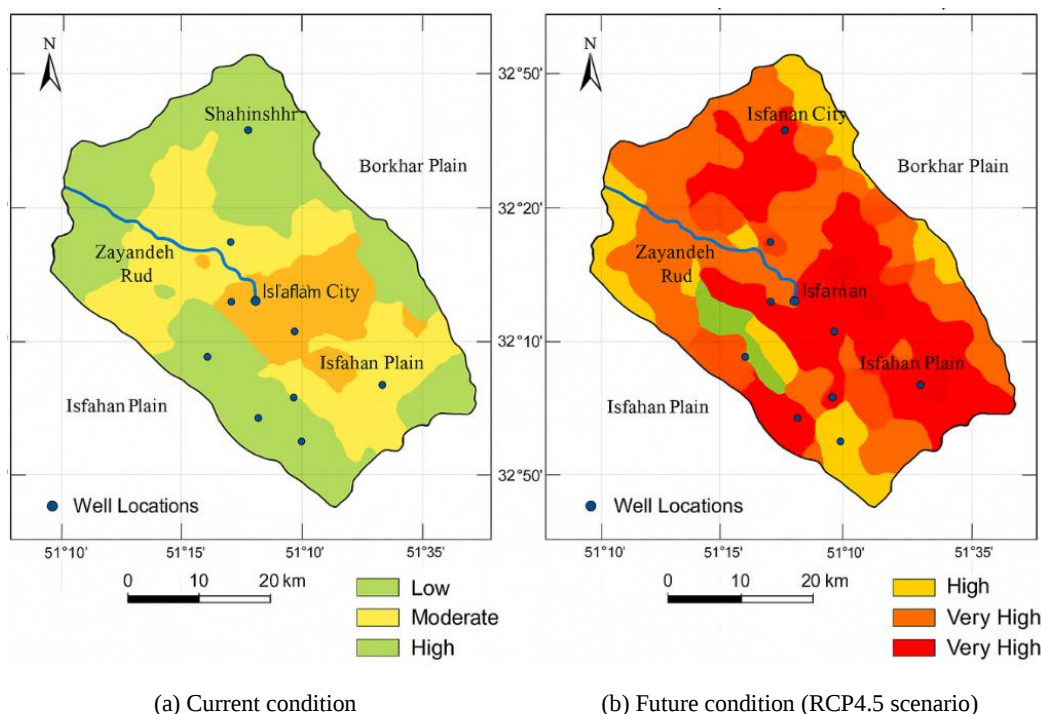


Figure 3. Groundwater vulnerability map under current and future (RCP8.5) conditions in the Isfahan Plain

شکل ۳- نقشه شاخص آسیب‌پذیری کیفی آب‌های زیرزمینی در شرایط فعلی و آینده (سناریوی RCP8.5) در دشت اصفهان

و مناطق شمالی بیش‌ترین افزایش آسیب‌پذیری را تجربه خواهند کرد. در مقابل، نواحی جنوبی دشت به‌دلیل عمق بیش‌تر سطح ایستابی و وجود خاک‌های رسی، هم‌چنان در محدوده آسیب‌پذیری پایین باقی مانده‌اند. در مجموع، تغییر الگوی آسیب‌پذیری فضایی در افق آینده، ضرورت

براساس نقشه‌های ارائه شده در شکل ۳، مساحت نواحی با آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد از حدود ۲۳ درصد در شرایط فعلی به بیش از ۴۰ درصد در سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابد. این روند نشان می‌دهد که تغییر اقلیم سبب تغییر مکانی و گسترش پهنه‌های بحرانی شده

تدوین راهبردهای سازگاری اقلیمی و مدیریت مصرف کودهای نیتروژنی را در دشت اصفهان دوچندان می‌کند. براساس یافته‌های مدل، تغییر اقلیم نه تنها احتمال آلودگی را افزایش می‌دهد، بلکه باعث تغییر مکانی کانون‌های آلودگی نیز می‌شود؛ به گونه‌ای که در افق ۲۰۵۰، مرکز گرانی آلودگی از شرق اصفهان به سمت شمال غربی (برخوار و شاهین شهر) جابجا خواهد شد. به منظور بررسی

تأثیر تغییر اقلیم بر شاخص آسیب پذیری کیفی آب‌های زیرزمینی، پارامترهای مؤثر مدل DRASTIC تحت سناریوهای اقلیمی آینده (RCP4.5 و RCP8.5) بازبینی و مقادیر میانگین شاخص در هر سناریو محاسبه شد. در جدول ۴، تغییرات میانگین شاخص DRASTIC در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰) ارائه شده است.

جدول ۴- تغییرات میانگین شاخص DRASTIC تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

Table 4. Changes in mean DRASTIC index under different climate change scenarios

Scenario	Δ Temperature (°C)	Δ Precipitation (%)	Δ Recharge (%)	Mean DRASTIC Index
Baseline (2010–2020)	–	–	–	132.4
RCP4.5 (2050)	+1.8	-12	-9	144.3
RCP8.5 (2050)	+3.4	-25	-18	155.0

براساس نتایج جدول ۴، در هر دو سناریوی اقلیمی افزایش دما و کاهش بارش موجب افزایش آسیب پذیری کیفی آب زیرزمینی در دشت اصفهان شده است. در سناریوی RCP4.5 میانگین شاخص DRASTIC حدود ۹ درصد و در سناریوی RCP8.5 حدود ۱۷ درصد نسبت به وضعیت پایه افزایش یافته است. این روند بیانگر آن است که با تشدید اثرات تغییر اقلیم، کاهش تغذیه طبیعی و افت سطح ایستابی، مناطق مرکزی و شرقی دشت بیشترین افزایش آسیب پذیری را تجربه خواهند کرد.

۳-۳- بحث تحلیلی و تفسیر مدیریتی

نتایج مدل DRASTIC در این پژوهش به طور آشکار نشان می‌دهند که آسیب پذیری آبخوان اصفهان تابعی از ترکیب پیچیده عوامل اقلیمی، هیدروژئولوژیکی و انسانی است. از منظر علمی، افزایش شاخص آسیب پذیری را می‌توان نتیجه مستقیم تغییر در موازنه ورودی-خروجی

سامانه آب زیرزمینی دانست. در شرایط تغییر اقلیم، کاهش بارش موجب افت تغذیه و در نتیجه افزایش زمان ماند آلاینده‌ها در ناحیه غیراشباع می‌شود. هم‌زمان، افزایش دما منجر به تشدید تبخیر و تغلیظ نترات در آب‌های سطحی و نفوذی می‌شود.

این فرآیندها باعث افزایش گرادیان هیدرولیکی معکوس در نواحی کم‌عمق شده و به انتقال سریع‌تر آلاینده به ناحیه اشباع منجر می‌شوند. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل نشان دادند که در صورت افزایش تنها ۱۰ درصد در عمق سطح ایستابی، DI حدود ۴/۵ درصد افزایش می‌یابد. این رابطه غیرخطی بیانگر حساسیت بالای سامانه به تغییرات اقلیمی است.

از دیدگاه مدیریتی، نواحی با DI بیش از ۱۸۰ باید به عنوان مناطق حفاظت کیفی بحرانی^{۱۰} معرفی شوند. در این مناطق، اجرای سیاست‌هایی نظیر کاهش مصرف کود نیتروژنی، استفاده از کودهای با رهش آهسته^{۱۱}، اصلاح

^{۱۰}- Critical Protection Zones

^{۱۱}- Slow Release Fertilizers

تحلیل سناریوهای اقلیمی نشان داد که تغییر اقلیم اثر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش آسیب پذیری کیفی دارد. در سناریوی RCP4.5 شاخص DRASTIC به‌طور میانگین ۹ درصد و در سناریوی RCP8.5 حدود ۱۷ درصد افزایش یافت. بیش‌ترین تغییرات در مناطق شمالی و شمال شرقی دشت، به‌ویژه در اراضی کشاورزی با بافت خاک سبک و سطح ایستابی کم عمق مشاهده شد. این نتایج تأیید می‌کند که افزایش دما و کاهش بارندگی به‌طور هم‌زمان باعث کاهش تغذیه، افت سطح ایستابی و تمرکز آلاینده‌ها می‌شود.

از منظر مدیریتی، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تغییر اقلیم اثر مضاعفی بر ناپایداری کیفی منابع آب زیرزمینی دارد و در صورت تداوم روند فعلی مصرف کودهای نیتروژنی و برداشت بی‌رویه از آبخوان، احتمال عبور گسترده غلظت نترات از حد مجاز بسیار زیاد است. بنابراین، برای کنترل روند آلودگی در دشت اصفهان، مجموعه‌ای از اقدامات مدیریتی و سیاستی پیشنهاد می‌شود:

(۱) کاهش مصرف کودهای نیتروژنی و اصلاح الگوی

مصرف: تدوین رهنمودهای بهینه‌سازی کوددهی متناسب با نیاز واقعی گیاه و شرایط خاک. استفاده از کودهای با رهایش آهسته و جایگزینی بخشی از کود شیمیایی با کودهای آلی.

(۲) مدیریت هوشمند آبیاری و تغذیه مصنوعی:

استفاده از فناوری‌های سنجش از دور برای پایش کاربری اراضی و طراحی الگوی آبیاری متناسب با ظرفیت واقعی آبخوان. اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در نواحی با نفوذپذیری بالا برای جبران کاهش تغذیه طبیعی در اثر تغییر اقلیم.

الگوی کشت و کنترل برداشت چاه‌ها ضروری است. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود سامانه‌های پایش خودکار نترات^{۱۲} در چاه‌های شرب این نواحی نصب شود تا تغییرات فصلی به‌صورت بلادرنگ کنترل شود.

در سطح برنامه‌ریزی کلان، نتایج این مطالعه می‌تواند در تدوین مدل‌های مدیریت یک پارچه منابع آب^{۱۳} (IWRM) برای مناطق خشک ایران مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از مدل DRASTIC به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار در سامانه‌های GIS محور، امکان شناسایی و اولویت‌بندی مناطق پرخطر را برای نهادهای مدیریتی فراهم می‌سازد. از منظر علمی، یافته‌های این تحقیق مؤید آن است که رویکردهای کلاسیک ارزیابی آسیب پذیری باید با متغیرهای اقلیمی ترکیب شوند تا بتوانند پاسخگوی پویایی سامانه‌های هیدروژئولوژیکی در دهه‌های آینده باشند. بنابراین، توسعه مدل‌های ترکیبی مانند DRASTIC-SWAT یا DRASTIC-MODFLOW برای آینده پیشنهاد می‌شود تا هم فرایند فیزیکی و هم اثرات اقلیمی به‌صورت هم‌زمان شبیه‌سازی شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان دادند که ارزیابی آسیب پذیری کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از DRASTIC، ابزاری مؤثر برای تحلیل خطر آلودگی نترات در مقیاس منطقه‌ای است. دشت اصفهان به‌دلیل شرایط خاص هیدروژئولوژیکی و اقلیمی، یکی از آسیب‌پذیرترین آبخوان‌های مرکزی ایران محسوب می‌شود. شاخص آسیب‌پذیری محاسبه شده در وضعیت فعلی در محدوده ۸۳ تا ۲۱۸ متغیر بوده و حدود ۲۳ درصد از مساحت دشت در طبقه «زیاد» و «بسیار زیاد» قرار دارد. ارتباط آماری قوی بین مقادیر شاخص DRASTIC و غلظت نترات اندازه‌گیری‌شده ($r = 0.84$) بیانگر کارایی مدل در شناسایی نواحی مستعد آلودگی است.

¹³- Integrated Water Resources Management

¹²- Online Nitrate Sensors

کارآمد در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ایران باشد. تلفیق این مدل با داده‌های سنجش از دور و سامانه‌های تصمیم‌یار می‌تواند در طراحی سیاست‌های حفاظت کیفی و تخصیص بهینه منابع آبی در شرایط تغییر اقلیم نقش کلیدی ایفا کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان کلیه اصول اخلاقی مرتبط با انجام و انتشار پژوهش علمی را رعایت کرده‌اند. تمام مراحل گردآوری، تحلیل و ارائه داده‌ها مطابق با استانداردهای اخلاق پژوهش انجام شده و هیچ‌گونه جعل، تحریف یا استفاده نادرست از منابع صورت نگرفته است.

مشارکت نویسندگان

آقای محمدرضا رئیسی دهکردی به‌عنوان نویسنده مسئول، تمام محاسبات را انجام داد و روش‌های تحلیلی را محاسبه کرد و نتایج را بحث نمود و تدوین کل پژوهش برعهده ایشان بوده است.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی یا سازمانی در انجام این پژوهش وجود ندارد.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی خاصی از نهادهای دولتی، خصوصی یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

(۳) ایجاد سامانه پایش کیفی پیوسته: نصب حسگرهای خودکار سنجش نیترات در چاه‌های شرب و کشاورزی و طراحی پایگاه داده مکانی GIS برای پایش زمان‌مند تغییرات غلظت.

(۴) تعیین و حفاظت از مناطق بحرانی: براساس نقشه شاخص آسیب‌پذیری، نواحی با $DI \geq 180$ باید به‌عنوان مناطق حفاظت آب زیرزمینی^{۱۴} تعریف و بهره‌برداری کشاورزی در آن‌ها محدود شود.

(۵) پایش و بازنگری برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم: نتایج نشان می‌دهند که تغییر اقلیم می‌تواند در بازه ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد بر افزایش خطر آلودگی نیتراتی مؤثر باشد. از این‌رو لازم است برنامه‌های سازگاری اقلیمی در سطح حوضه زاینده‌رود بازنگری و اجرا شوند.

از دیدگاه پژوهشی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده:

(۱) از مدل‌های عددی فرآیندی مانند MODFLOW-NWT یا SWAT- برای شبیه‌سازی دقیق‌تر جریان و انتقال آلاینده استفاده شود.

(۲) متغیرهای بیوشیمیایی نظیر ظرفیت احیای خاک، دمای خاک و زمان ماند نیترات در ناحیه غیراشباع نیز به مدل اضافه شود.

(۳) اثر تغییرات کاربری اراضی و سناریوهای توسعه کشاورزی در کنار تغییر اقلیم بر آسیب‌پذیری آبخوان تحلیل شود.

در مجموع، نتایج این پژوهش بیانگر آن است که مدل DRASTIC با رویکرد تعدیل اقلیمی می‌تواند ابزاری

References

¹⁴- Groundwater Protection Zones

- [1] Alipour A, Rahimi J, Azarnivand A. Groundwater quality analysis for drinking and agricultural purposes-a prerequisite for land use planning in the arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Range and Watershed Management*. 2017; 70(2): 423-434. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.208937.1021> [In Persian].
- [2] Kahrizi, E. Hydrogeological assessment and uncertainty analysis of the groundwater model of the Khorramabad Plain Aquifer. *Water Resources and Climate Change*. 2025; 1(3): 23-40. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.13170.1018> [In Persian].
- [3] Fewtrell L. Drinking-water nitrate, methemoglobinaemia, and global burden of disease: A discussion. *Environmental Health Perspectives*. 2004; 112(14): 1371-1374. <https://doi.org/10.1289/ehp.7216>.
- [4] Haji-Aghajany S, Amerian Y, Amiri-Simkooei A. Impact of climate change parameters on groundwater level: Implications for two subsidence regions in Iran using geodetic observations and artificial neural networks. *Remote Sensing*. 2023; 15(6): 1555. <https://doi.org/10.3390/rs15061555>.
- [5] Rezaei M. An overview of the effects of climate change on watersheds and adaptation strategies. *Integrated Watershed Management*. 2025; 5(1): 37-58. <https://doi.org/10.22034/iwm.2024.2026335.1147> [In Persian].
- [6] Homayunpur B, Goodarzi M, Zehtabian Q, Motamedvaziri B, Ahmadi H. Assessing climate change impacts on groundwater fluctuation in Borkhar Plain, Isfahan. *Watershed Engineering and Management*. 2023; 14(4): 465-480. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.353543.1880> [In Persian].
- [7] Asadi E, Nasiran A, Khedrigaribvand H, Kahyani S. Detection of climate change using precipitation extreme indices (Case study: Najaf Abad city, Esfahan Province). *Geography and Human Relationships*. 2023; 6(1): 379-400. <https://doi.org/10.22034/gahr.2023.379092.1787> [In Persian].
- [8] Hassanzadeh M, Momeni Reghabadi M, Robati A. Vulnerability of Hajiabad plain aquifer based on DRASTIC and SINTACS models. *Hydrogeomorphology*. 2021; 8(26): 183-202. <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.45261.1584> [In Persian].
- [9] Samadi J. Assessment of Kashan aquifer-land use composite vulnerability impact on groundwater pollution using DRASTIC method and degradation model. *Iran-Water Resources Research*. 2015; 11(1): 13-21.
- [10] Hamed MH, Dara RN, Kirlas MC. Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based DRASTIC method in the Erbil Dumpsite area (Kani Qirzhala), Central Erbil Basin, North Iraq. *Journal Groundwater Science and Engineering*. 2024; 12(1): 16-33. <https://doi.org/10.26599/JGSE.2024.9280003>.
- [11] Javadi S, Kavehkar N, Mousavizadeh MH, Mohammadi K. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using Nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2011; 13(2): 239-249.
- [12] Ashagrie WA, Tarkegn TG, Ray RL, Tefera GW, Demessie SF, Tsegaye L, Adem AA, Worqlul AW, van Oel PR, Adgo E, Haileslassie A, Dile YT, Mekonnen M, Chukalla AD. Assessing the vulnerability of groundwater to pollution under different land management scenarios using the modified DRASTIC model in Bahir Dar City, Ethiopia. *Heliyon*. 2025; 11:e42660. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42660>.
- [13] Arafa NA, Salem ZES, Ghorab MA, Soliman ShA, Abdeldayem AL, Moustafa YM, Ghazala HH. Evaluation of groundwater sensitivity to pollution using GIS-based modified DRASTIC-LU model for sustainable development in the Nile Delta Region. *Sustainability*. 2022; 14(22): 14699. <https://doi.org/10.3390/su142214699>.
- [14] Nejati Jahromi Z, Nassery HR, Nakhaei M, Alijani F. Tracing the sources of groundwater nitrate contamination using the nitrogen and oxygen isotopes of nitrate in Varamin aquifer. *Iranian-Water Resources Research*. 2018; 14(5): 469-482 [In Persian].
- [15] Asgarbioki N, Sharafati A, Kardan Moghadam H. Integrated vulnerability assessment of surface and groundwater resources by combining two indices DRASTIC and WRASTIC. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 2024; 54(11): 1715-1732. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.356270.669463>.
- [16] Ghafari S., Moradi H., Modares R. Comparison of temporal and spatial changes of groundwater level in Isfahan-Borkhar, Najafabad and Chadegan Plains. *Physical Geography Research*. 2018; 50(1): 141-160. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.226430.1006999> [In Persian].

- [17] Raeisi Dehkordi MR, Yeganeh Mazhar AH. Optimization of aquifers' hydrodynamic coefficients by numerical modeling (Case study: Damaneh-Daran Plain Aquifer). *Water and Soil Management and Modeling*. 2023; 3(1): 262-278. <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11683.1155> [In Persian].
- [18] Noori R, Maghrebi M, Jessen S, Bateni SM, Heggy E, Javadi S, Noury M, Pistre S, Abolfathi S, Aghakouchak A. Decline in Iran's groundwater recharge. *Nature Communications*. 2023; 14: 5746. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42411-2>.
- [19] Torkashvand M, Ebrahimi S, Moradi HR, Huttunen I. Groundwater vulnerability to nitrate contamination from fertilizers using modified DRASTIC frameworks. *Water*. 2023; 15(17): 3134. <https://doi.org/10.3390/w15173134>.
- [20] AmelSadeghi, M. Integration of Physics-Based Models and Machine Learning for Groundwater Quality Prediction: MODFLOW and SVM. *Water Resources and Climate Change*, 2026; 2(1): 37-44. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15670.1033>.
- [21] Eskandari, M. B., Rahimi, N. Groundwater balance analysis for assessing the sustainability of the Izeh plain aquifer using IDW and Thiessen polygon methods. *Water Resources and Climate Change*, 2026; 2(1): 1-12. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2026.15186.1032>.