



Groundwater Vulnerability Assessment Using a GIS-Based DRASTIC Method in the Garmsar Aquifer, Iran

Hamideh Derakhshan¹ | Arash Malekian^{1*}  | Shahram Khalighi Sigaroodi¹ 

1. Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Correspond E-mail: malekian@ut.ac.ir

Article Info

Abstract

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 18 Nov. 2025

Revised: 24 Dec. 2025

Accepted: 04 Jan. 2026

Published online: 01 Oct. 2026

Keywords:

Groundwater,

Overlap index,

Pollution potential,

Sensitivity Analysis.

Groundwater resources are vital sources of water supply in many regions of the world. Owing to its geographical and climatic characteristics, the Garmsar Plain is highly dependent on groundwater, particularly for agricultural irrigation and drinking water supply. In this study, the DRASTIC model was used to assess the intrinsic vulnerability of groundwater to contamination in the Garmsar Plain. The model incorporates seven parameters: depth to groundwater, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity. These parameters were integrated in a GIS environment using the overlay index method to calculate the final vulnerability index for the aquifer under study. The resulting DRASTIC vulnerability index ranged from 54 to 145. Approximately 9% of the study area was classified as having no pollution potential, 39% as having very low potential, 30% as having low potential, 17% as having low-to-moderate potential, and 5% as having moderate-to-high vulnerability. Sensitivity analysis was also conducted to evaluate the model results and identify the parameters that contributed most to the estimated groundwater vulnerability. Based on the parameter-removal and single-parameter sensitivity analysis methods, the impact of the vadose zone exhibited the highest sensitivity according to both methods.

Cite this article: Derakhshan, H., Malekian, A., Khalighi Sigaroodi, Sh. (2026). Groundwater Vulnerability Assessment Using a GIS-Based DRASTIC Method in the Garmsar Aquifer, Iran. *Journal of Range & Watershed Management*, 79 (3), 415-435. DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.395437.1833>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: Groundwater is one of the most critical resources for drinking, agricultural, and industrial purposes, particularly in arid and semi-arid regions. The expansion of human activities and industrial development has increased environmental pressures, including the risk of water pollution. Climate change may further exacerbate these pressures by altering hydrological processes and groundwater recharge patterns, potentially threatening water security in arid and semi-arid regions. Groundwater quality is influenced by various factors, including aquifer lithology and anthropogenic activities. Because groundwater contamination is generally more difficult and costly to detect, monitor, and remediate than surface water pollution, an effective groundwater protection strategy involves identifying potential pollution sources and vulnerable zones, preparing groundwater vulnerability maps, and implementing appropriate management measures. Aquifer vulnerability refers to the susceptibility of groundwater to contamination from pollutants originating at or near the land surface. Among the various methods developed to assess groundwater vulnerability, the DRASTIC model has been widely applied because of its relatively straightforward data requirements, compatibility with geographic information systems (GIS), and applicability to regional-scale assessments. The model evaluates groundwater vulnerability using seven hydrogeological parameters: depth to groundwater, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity. However, the relative influence of these parameters can vary considerably across study areas depending on local hydrogeological and environmental conditions. Sensitivity analysis can therefore help identify the parameters that contribute most to the resulting vulnerability index and assess the robustness of the model outcomes. In this context, the present study applies the GIS-based DRASTIC model, together with sensitivity analysis, to assess groundwater vulnerability in the Garmsar aquifer, Iran. The study aims to delineate groundwater vulnerability zones and identify the parameters that exert the greatest influence on the estimated vulnerability under local conditions. The findings are expected to provide a scientific basis for prioritizing groundwater protection measures and supporting sustainable aquifer management.

Materials and Methods: The study area is the Garmsar plain, covering approximately 532 km² of alluvial deposits formed by the Hableh Rud River and its alluvial fan, located in western Semnan province, about 110 km southeast of Tehran. The plain is bordered by highlands to the north and west, the Deh Namak plain to the east, and the central Iranian desert to the south. The region has an arid to desert climate, with average annual precipitation of about 140 mm, and the aquifer is recharged primarily by the perennial Hableh Rud River. The aquifer is unconfined throughout most of the plain. The DRASTIC model integrates seven hydrogeological parameters: depth to water table (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 relative weight (1–5, reflecting its importance to contamination potential) and a rating (1–10) according to standard DRASTIC classification tables. Input data were obtained from 31 observation wells, piezometric records, soil and geological maps, and a digital elevation model, compiled in Excel and processed in a GIS environment (ArcGIS). Continuous raster layers for each parameter were generated mainly through Kriging and Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation, selected according to best data fit. The seven rated and weighted layers were overlaid to compute the final DRASTIC vulnerability index using the formula $D_i = \sum (W_j \times R_j)$, where W_j and R_j denote the weight and rating of each parameter, respectively. To evaluate the relative influence of each parameter, two complementary sensitivity analyses were performed: the parameter-removal method, which measures the variation in the vulnerability index when each parameter is sequentially excluded, and the single-parameter (effective weight) method, which compares each parameter's theoretical weight with its actual contribution to the final index.

Results and Discussion: Depth to the water table ranged from about 7 m in the southern part of the plain to roughly 130 m in the north, with areas deeper than 30 m assigned the lowest rating. Net recharge averaged 22 mm/year, reaching up to 290 mm/year in places, while permeability decreased from the center toward the southern and marginal zones as sediments became finer-grained. The aquifer media were dominated by coarse sand and gravel in the north (high ratings) and by clayey deposits in the south and west (low ratings); a similar spatial pattern was observed for soil texture, with sandy soils in the north and saline clay soils in the south and west. Slope across most of the plain was very low, increasing overall vulnerability potential, while vadose-zone sediments were coarse-grained in the north, northeast, and central areas and finer in the south and west. Hydraulic conductivity ranged from about 50 m/day in the northeast to 6 m/day elsewhere, with moderate values prevailing across most of the plain. The final DRASTIC vulnerability index, obtained by overlaying all seven rated layers, ranged from 54 to 145 and was classified into five vulnerability categories: no potential (9% of the area), very low potential (39%), low potential (30%), low-to-moderate potential (17%), and moderate-to-high potential (5%). The highest-vulnerability zones were concentrated in the northern plain, associated with coarse-grained soils, high recharge, coarse aquifer media, and a highly permeable vadose zone, whereas the southern and western areas, characterized by fine-grained sediments and low permeability, exhibited markedly lower vulnerability. Sensitivity analysis

using the parameter-removal method identified the vadose zone (I) as the most influential parameter, with a mean variability index of 2.64%, while the aquifer media (A) parameter showed the lowest sensitivity (0.6%). The single-parameter analysis confirmed this finding: the vadose zone's mean effective weight (27.52%) exceeded its theoretical weight (21.7%), indicating that this parameter contributes more strongly to vulnerability in Garmsar than assumed by the standard DRASTIC weighting scheme. These findings are consistent with comparable studies elsewhere. In the Kirkuk aquifer (Iraq) and the central Erbil basin, vadose-zone characteristics and coarse aquifer media similarly dominated vulnerability outcomes, with index ranges closely matching those obtained here. Studies in Pakistan, the Natanz plain, and the Hamedan-Bahar plain likewise reported that areas with permeable soils and high hydraulic conductivity coincided with elevated vulnerability, and that DRASTIC outperformed alternative index (e.g., SI, GOD, SINTACS) in correlating with nitrate contamination data. Collectively, these comparisons confirm both the reliability of DRASTIC for regional vulnerability mapping and the need to recalibrate parameter weights, particularly for the vadose zone, to reflect local geological and climatic conditions. Recent literature also suggests that integrating DRASTIC with optimization techniques and artificial intelligence approaches (e.g., genetic algorithms, fuzzy logic, machine learning) can further reduce model uncertainty and improve predictive accuracy.

Conclusion: The GIS-based DRASTIC model effectively delineated groundwater vulnerability zones across the Garmsar Plain, identifying the northern part of the study area, characterized by coarse-grained soils, high recharge, and a highly permeable vadose zone, as most susceptible to contamination, while the finer-grained southern and western zones showed lower vulnerability. Sensitivity analysis demonstrated that the seven DRASTIC parameters do not contribute equally to the vulnerability index; the vadose zone consistently emerged as the dominant factor, with its effective weight exceeding its theoretical (generic) weight. This discrepancy indicates a limitation in applying DRASTIC's standard weighting scheme without local calibration and highlights the importance of region-specific sensitivity analysis when adapting global models to local hydrogeological settings. Practically, the resulting vulnerability map offers a valuable tool for land-use planning and the design of targeted protective measures, particularly given the intensive agricultural activity and associated fertilizer and pesticide use in the Garmsar Plain. Theoretically, the results support growing evidence that coupling DRASTIC with optimization or artificial intelligence techniques can enhance its accuracy. Future studies should validate the model against actual contamination indicators such as nitrate concentrations, incorporate climate change and land-use change scenarios, and assess model uncertainty to refine groundwater protection strategies for the region.

Keywords: Groundwater, DRASTIC, Vulnerability, Garmsar plain, Sensitivity analysis

Article Type: Research Article

Conflicts of interest: The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



دوره ۷۹ (۳)

شاپا الکترونیکی: ۷۷۹۵-۲۴۲۳

نشریه مرتع و آبخیزداری



ارزیابی آسیب پذیری آبخوان گرمسار با استفاده از مدل دراستیک در محیط GIS

حمیده درخشان^۱ | آرش ملکیان^{۱*} | شهرام خلیقی سیگارودی^۱

۱. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

رایانامه: malekian@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹

کلیدواژه‌ها:

آب زیرزمینی،
آنالیز حساسیت،
پتانسیل آلودگی،
شاخص همپوشانی.

منابع آب زیرزمینی به عنوان یکی از منابع حیاتی تامین آب در بسیاری از مناطق جهان از اهمیت بالایی برخوردارند. دشت گرمسار نیز به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی خود، به ویژه در تامین آب کشاورزی و شرب، وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارد. در این پژوهش، مدل دراستیک برای ارزیابی پتانسیل آسیب پذیری کیفی منابع آب زیرزمینی در دشت گرمسار به کار گرفته شد. این مدل با بهره گیری از هفت پارامتر اصلی شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی، به تحلیل جامع آسیب پذیری کیفی منابع آب زیرزمینی می پردازد. با تلفیق هفت نقشه معیار به کار رفته در مدل دراستیک با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی به روش همپوشانی شاخص، شاخص نهایی آسیب پذیری آبخوان مورد مطالعه، محاسبه شد. بر این اساس شاخص نهایی آسیب پذیری دراستیک بین ۵۴ تا ۱۴۵ قرار گرفت. حدود نه درصد منطقه مورد مطالعه بدون پتانسیل آلودگی، ۳۹ درصد دارای پتانسیل خیلی کم، ۳۰ درصد پتانسیل کم، ۱۷ درصد دارای پتانسیل کم تا متوسط و پنج درصد دارای پتانسیل آسیب پذیری متوسط تا زیاد می باشد. همچنین تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر و تک پارامتر برای بررسی دقیق تر نتایج و شناسایی مولفه های موثرتر بر آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی به کار گرفته شد و نتایج حاصل نشان داد پارامتر اثر منطقه ی غیراشباع بیشترین تاثیر را در تعیین آسیب پذیری منطقه دارد.

استناد: درخشان؛ حمیده، ملکیان؛ آرش، خلیقی سیگارودی؛ شهرام (۱۴۰۵). ارزیابی آسیب پذیری آبخوان گرمسار با استفاده از مدل دراستیک در محیط GIS. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۹ (۳)، ۴۱۵-۴۳۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jrwm.2025.395437.1833>



© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

۱. مقدمه

توسعه‌ی روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی سهم عمده‌ای در آلودگی‌های زیست محیطی به ویژه آب دارد (Rahman, 2008). علاوه بر این تغییرات آب و هوایی در طی چند دهه‌ی گذشته، به تدریج فشار بر سیستم هیدرولوژیکی را تشدید و خطرهای بالقوه‌ی ناشی از آب آشامیدنی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با تغذیه‌ی فصلی و تخلیه‌ی قابل توجهی از آب‌های زیرزمینی همراه است، ایجاد کرده است (Re et al, 2014; zeng et al, 2016). کیفیت آب زیرزمینی می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلف نظیر جنس مواد سازنده آبخوان و یا فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی و صنعت تغییر یابد (Soyaslan, 2020). منابع آب زیرزمینی به شکل‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آن‌ها نسبت به آب‌های سطحی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. همچنین، به دلیل استمرار آلودگی در این منابع، بهترین روش جلوگیری از آلودگی آن‌ها، شناسایی منابع آلوده کننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد (Babiker et al, 2005; Knodel et al, 2007). از این رو، حفاظت از آب‌های زیرزمینی و پیشگیری از آلودگی، پیش نیازهای اساسی برای مدیریت کارآمد آب‌های زیرزمینی و پیشرفت اجتماعی-اقتصادی یک منطقه است (Zhang et al, 2021).

ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و خطرپذیری سلامت انسان، می‌تواند ابزار مفیدی برای بهره‌برداری و مدیریت آب‌های زیرزمینی باشد (Huang et al, 2018). مفهوم آسیب‌پذیری آبخوان برای اولین بار توسط مارگات^۱ (۱۹۶۸) با اشاره به پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی به وسیله‌ی منابع آلاینده‌ی سطحی ارائه شد. آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به ویژگی‌های ذاتی یک سفره اشاره دارد و احتمال نزدیک شدن آلاینده‌ها به یک مکان خاص در سیستم آب زیرزمینی پس از ورود به بالاترین سطح آبخوان به عنوان حساسیت آب‌های زیرزمینی به آلودگی شناخته می‌شود (Koon et al, 2023). برای ارزیابی آن، روش‌های زیادی بر پایه‌ی روش‌های کمی ابداع شده است (Civita, 1993). ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای برآورد آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی، استفاده از مدل‌های وزن‌دهی است. در این روش‌ها مشخصه‌ها بر اساس تأثیری که بر آلودگی آب زیرزمینی دارند، امتیازدهی می‌شوند (LeGrand, 1964). محبوب‌ترین و پرکاربردترین روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، روش دراستیک است که اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط الر^۲ و همکاران به وسیله‌ی سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا و انجمن چاه‌های آب آمریکا، برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی مطرح شد (Rezig et al, 2022 و El Yousfi et al, 2023). روش دراستیک بر هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی، یعنی عمق تا سطح آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، اثر منطقه اشباع و هدایت هیدرولیکی متکی است (Metwally et al, 2023). از مزایای این روش می‌توان اندک بودن نسبی داده‌های لازم، سهولت حصول داده‌ها، دقت آماری، هزینه‌ی کم و استفاده در مناطق وسیع را نام برد (Aller et al, 1987; Rosen, 1994).

مطالعات مختلفی در جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل دراستیک صورت گرفته است که در ادامه به چند مورد از آن اشاره می‌شود. مسعود حامد^۳ و همکاران (۲۰۲۴) ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش دراستیک مبتنی بر GIS در شمال عراق را مورد پژوهش قرار داده‌اند و نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها نشان داده است که منطقه به چهار کلاس آسیب‌پذیری بسیار کم (۱۶/۹۷ درصد)، کم (۲۷/۶۷ درصد)، متوسط (۳۶/۵۵ درصد) و زیاد (۱۸/۸۱ درصد) طبقه‌بندی شده است. و همچنین نتایج تحلیل حساسیت تک پارامتری نشان داد که از بین هفت پارامتر دراستیک، ناحیه غیراشباع و محیط آبخوان بیشترین تأثیر را داشتند. برا^۴ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS در حوضه رودخانه نانگاسای هند با تأکید ویژه بر آلودگی‌های کشاورزی، پرداخته‌اند. در نقشه‌ی حاصل از بررسی آن‌ها آسیب‌پذیری به پنج کلاس

1. Margat
2. Aller
3. Hamed
4. Bera

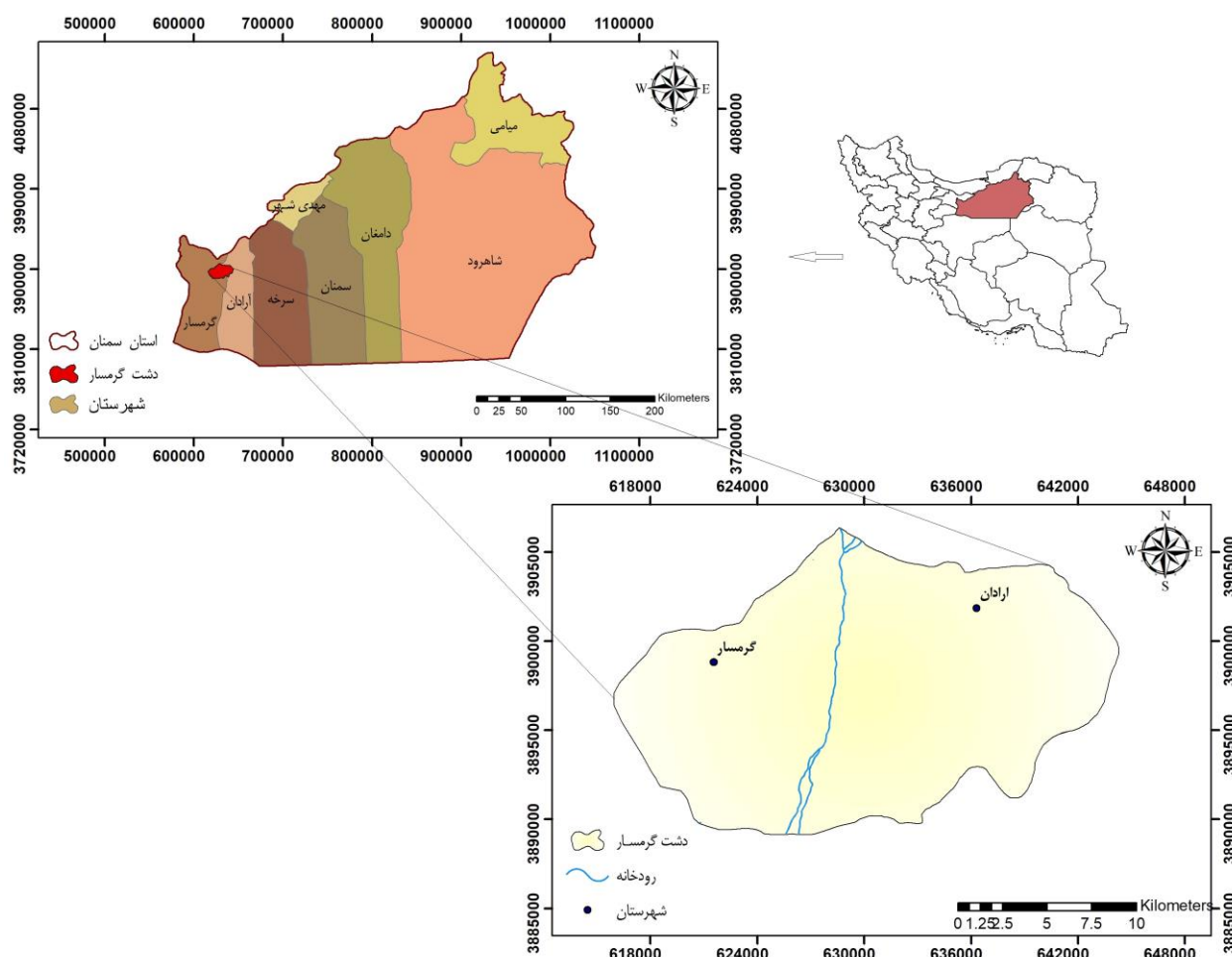
طبقه‌بندی شد که در مناطق جنوبی و جنوب شرقی حوضه، میزان آلودگی بالای آب‌های زیرزمینی مشاهده شده است. ایشان معتقدند این نقشه می‌تواند به عنوان نقشه پایه برای مدیریت آلودگی آب‌های زیرزمینی و برنامه‌ریزی آن مورد استفاده قرار گیرد. اسحاقی ایل‌بیگی^۱ و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه‌ی آسیب‌پذیری آبخوان سبزوار (شمال شرق ایران) با استفاده از مدل دراستیک پرداخته‌اند. مطالعات آن‌ها نشان داد مقدار عددی مدل دراستیک در منطقه مورد مطالعه بین ۸۱ تا ۱۵۹ (از آسیب‌پذیری کم تا آسیب‌پذیری زیاد) است و در نقشه دراستیک به دست آمده مناطق مرکزی دشت سبزوار دارای آسیب‌پذیری بالاتری هستند و باید اقدامات مدیریتی برای جلوگیری از آلودگی احتمالی انجام شود. امانپور^۲ و همکاران (۲۰۲۲) اقدام به ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی شهرستان کارون با استفاده از مدل دراستیک و سنتیکس نموده‌اند که نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که شاخص آسیب‌پذیری مدل دراستیک بین ۶۸ تا ۲۱۵ و شاخص آسیب‌پذیری مدل سنتیکس بین ۵۲ تا ۱۹۵ متغیر است و همچنین میزان همبستگی نقشه‌ی نیترا آب زیرزمینی با مدل‌های دراستیک و سنتیکس به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۵۱ بوده که بیانگر قابلیت بالاتر مدل دراستیک برای آبخوان منطقه مورد مطالعه‌ی آن‌ها بوده است. صباغ^۳ و همکاران (۲۰۲۰) در یک بررسی به ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت نکارود با استفاده از مدل دراستیک پرداختند. در این تحقیق آسیب‌پذیری خیلی زیاد ۱۷/۳۳ درصد از مساحت منطقه و ظرفیت آسیب‌پذیری کم ۵۲/۹۷ درصد را شامل شد. نتایج آزمون همبستگی نشان داد که ارتباط مدل دراستیک با مقادیر نیترا، اسیدیته و هدایت الکتریکی به ترتیب ۰/۶۱۰، ۰/۲۵۴ و ۰/۲۷۷ بوده است. صحت سنجی مدل دراستیک و تعیین ضریب همبستگی بین مقادیر مدل، مشخص شد مدل دراستیک و صحت سنجی با عناصر کیفی یک راهبرد علمی برای مطالعه و تعیین حساسیت آبخوان منطقه می‌باشد. در پژوهش حاضر، به منظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری و ارائه گزینه‌های مدیریتی مناسب برای حفاظت آبخوان دشت گرمسار، مدل دراستیک در این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه و شناخت مناطق با پتانسیل آلودگی در منطقه می‌تواند در مدیریت منابع آبی و تهیه نقشه خطر، مفید واقع شود. تا کنون در این منطقه، مطالعه‌ای با این سطح از تحلیل مکانی و انطباق محلی صورت نگرفته است. این مطالعه با تأکید بر قابلیت‌های تفسیرپذیر و عملیاتی مدل، سعی دارد ابزاری کارآمد برای برنامه‌ریزی منابع آب ارائه دهد. مقایسه تطبیقی با مطالعات بین‌المللی اخیر، چارچوبی برای نقد عملکرد مدل و ارزیابی دقت آن در مقیاس محلی فراهم کرده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی دشت گرمسار با وسعتی در حدود ۵۳۲ کیلومتر مربع بر روی آب‌رفت رودخانه حبله رود و مخروط افکنه‌ی آن قرار گرفته است. این دشت با موقعیت جغرافیایی ۵۲°۱۱ تا ۵۲°۳۵ طول شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵°۰۴ تا ۳۵°۱۸ شمالی در غرب استان سمنان و در فاصله ۱۱۰ کیلومتری جنوب شرقی تهران واقع شده است (شکل ۱). دشت گرمسار از شمال به ارتفاعات قریلک، سولک و تنگه بن کوه، از شرق به دشت ده نمک، از غرب به ارتفاعات تخت رستم و از جنوب به کویر مرکزی ایران محدود می‌شود. این دشت قطب اصلی کشاورزی در منطقه می‌باشد. بنابراین بررسی جریان‌ات زیرزمینی این دشت که سهم قابل توجهی از منابع تأمین آب را برعهده دارد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. دشت گرمسار در جنوب رشته کوه البرز و در نزدیکی کویر مرکزی ایران قرار گرفته و دارای آب و هوای خشک و کویری می‌باشد. میانگین بارندگی ایستگاه گرمسار حدود ۱۴۰ میلی‌متر در سال برآورد می‌گردد. منبع اصلی تغذیه‌ی دشت گرمسار، رودخانه دائمی و پر آب حبله‌رود است که از کوه‌های پیرامون فیروزکوه سرچشمه می‌گیرد. به طور کلی به دلیل وسعت بیشتر آبخوان آزاد در منطقه، در مطالعات انجام شده، آبخوان دشت گرمسار را از نوع آزاد در نظر می‌گیرند.

1. Eshaghi Ilbeygi
2. Amanpour
3. Sabbagh



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

۲-۲. مدل دراستیک

به منظور اجرای مدل دراستیک در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در منطقه‌ی دشت گرمسار، مراحل آماده‌سازی نقشه‌ها، وزن‌دهی و تلفیق اعمال شده است. داده‌های مورد نیاز برای تهیه‌ی مشخصه‌های دراستیک از منابع مختلف و با فرمت‌های گوناگون جمع‌آوری گشته‌اند. پایگاه اطلاعاتی برای داده‌های با فرمت نقطه‌ای ابتدا در محیط نرم‌افزار اکسل تهیه شد، سپس به محیط GIS آورده شد. عبارت DRASTIC مخفف پارامترهایی است که در سیستم هیدروژئولوژیکی کنترل کننده‌ی آلودگی آب زیرزمینی می‌باشند. این پارامترها شامل: عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه (R)، مواد تشکیل دهنده‌ی آبخوان (A)، نوع خاک (S)، توپوگرافی (T)، اثر منطقه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی آبخوان (C) می‌باشد. برای تعیین اهمیت نسبی هر کدام از عوامل هفتگانه‌ی استفاده شده در مدل، هر پارامتر نسبت به سایر عوامل ارزیابی می‌شود، به طوری که به هر کدام با توجه به اهمیت تأثیر در آلودگی، یک وزن نسبی از یک تا پنج، تعلق می‌گیرد، که پنج مؤثرترین و یک کم اثرترین آن‌هاست (جدول ۱).

هر یک از پارامترهای مدل دراستیک خود به بازه‌هایی تقسیم می‌شوند که نسبت تأثیر هر بازه بر روی آسیب‌پذیری آبخوان متفاوت است. به بازه‌های هر یک از پارامترهای هیدروژئولوژیکی نیز یک رتبه از یک تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود (جدول ۲ تا ۸).

جدول ۱. وزن نسبی پارامترهای مدل دراستیک (الر و همکاران، ۱۹۸۷)

وزن نسبی	پارامتر
۵	عمق آب زیرزمینی (D)
۴	تغذیه خالص (R)
۳	محیط آبخوان (A)
۲	محیط خاک (S)
۱	توپوگرافی (T)
۵	محیط غیراشباع (I)
۳	هدایت هیدرولیکی (C)

۲-۲-۱. عمق سطح ایستابی^۱ (D)

پارامتر عمق سطح ایستابی از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده و تعیین کننده عمقی است که آلوده کننده بایستی طی کند تا به سطح ایستابی برسد (Soyaslan, 2020). هر چه عمق سطح ایستابی بیشتر باشد، زمان بیشتری طول می کشد تا مواد آلاینده به آبهای زیرزمینی برسند. در نتیجه در اثر همکنشهای طبیعی از قبیل تجزیهی شیمیایی، جذب و پخش، امکان پالایش مواد آلاینده افزایش می یابد. بنابراین سطوح ایستابی عمیق تر شانس آلودگی کمتری دارند (Stigter et al, 2006). به منظور تهیهی این لایه، از اطلاعات آماری عمق آب زیرزمینی ۳۱ حلقه چاه مشاهدهای حفاری شده در دشت گرمسار استفاده شد. ابتدا موقعیت و عمق سطح ایستابی چاههای موجود در منطقه به محیط اکسل وارد شد و در ادامه در محیط GIS برای ایجاد لایه هم ارزش عمق تا سطح ایستابی از روش درونیایی کریجینگ استفاده شد و بر اساس جدول ۲ رتبه بندی گردید و نقشه ی مورد نظر به دست آمد (شکل ۲).

۲-۲-۲. تغذیه خالص^۲ (R)

تغذیه عبارت است از حجم آبی که در واحد سطح سفره (برای یک دوره ی یک ساله) به درون زمین نفوذ کرده و موجب انتقال ماده ی آلوده کننده به صورت عمودی تا سطح ایستابی می گردد. این پارامتر حجم آبی را که موجب پراکنش و رقیق سازی آلوده کننده در مناطق اشباع و غیراشباع می گردد، کنترل می کند. معمولاً هر چقدر تغذیه بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی نیز بیشتر است. نوسانات سطح آب در هر چاه می تواند معرف نوسان سطح آب در بخشی از مساحت آبخوان باشد و با در نظر گرفتن این مساحت ها و افت و خیزهای حاصله در چاه ها در هر ماه می توان به یک عدد که مشخص کننده نوسان سطح ایستابی آبخوان در ماه مورد نظر است رسید و با به دست آوردن ۱۲ عدد در هر سال نمودار روند تغییرات سطح ایستابی آبخوان تهیه خواهد شد. در این تحقیق لایه ی تغذیه ی آبخوان مطابق رابطه ی ۱ از حاصل ضرب نقشه ی رستری آبدهی ویژه ی دشت در نقشه ی رستری نوسان تراز سطح آب زیرزمینی، در محیط GIS، با استفاده از روش درونیایی IDW با بهترین برازش نقاط، تهیه گردید.

$$\Delta V = A \times S_y \times dh/dt \quad (1)$$

که در آن A مساحت محدوده ی مورد مطالعه، S_y آبدهی ویژه و dh/dt نوسان تراز سطح ایستابی می باشد.

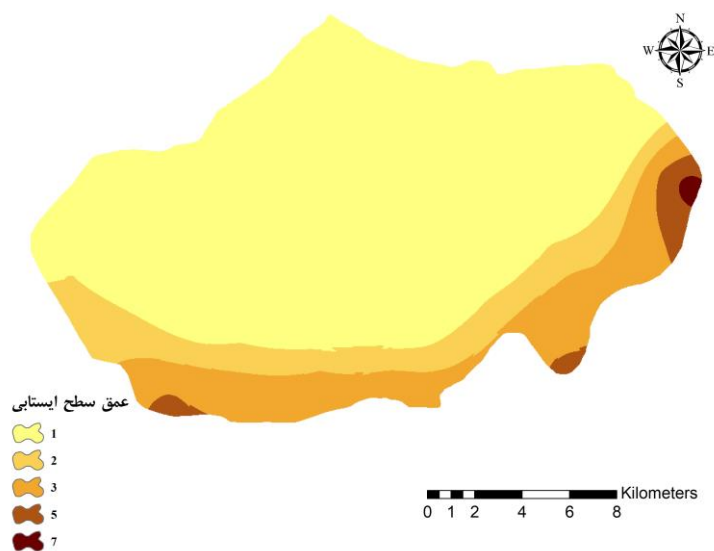
نقشه ی تغذیه بر اساس جدول رتبه بندی الر و همکاران جدول (۳) کلاس بندی شد (شکل ۳).

1. Depth to water table

2. Net Recharge

جدول ۲. رتبه‌بندی و وزن‌دهی عمق سطح ایستابی (الر و همکاران، ۱۹۸۷)

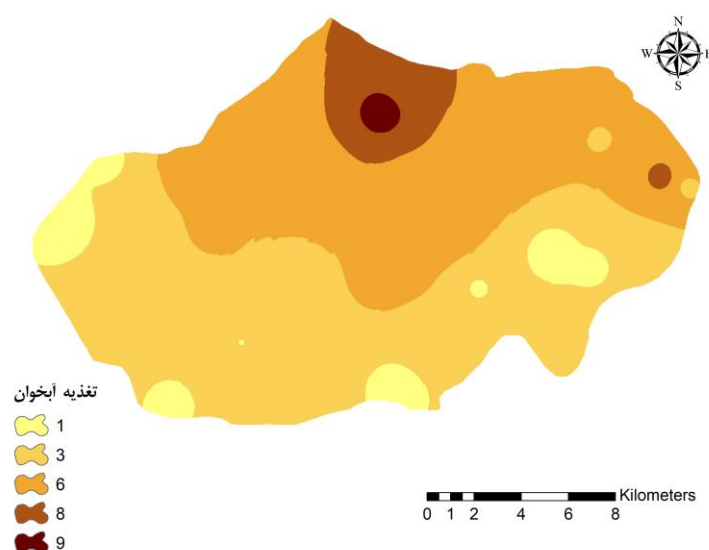
عمق سطح ایستابی (متر)	
رتبه	محدوده
۱۰	۰ - ۱/۵
۹	۱/۵ - ۴/۵
۷	۴/۵ - ۹
۵	۹ - ۱۵
۳	۱۵ - ۲۳
۲	۲۳ - ۳۰
۱	>۳۰
وزن نسبی: ۵	



شکل ۲. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده عمق آب سطحی دشت گرمسار

جدول ۳. رتبه‌بندی و وزن‌دهی تغذیه خالص (الر و همکاران، ۱۹۸۷)

تغذیه خالص (میلی‌متر بر سال)	
رتبه	محدوده
۱	۰ - ۵۰
۳	۵۰ - ۱۰۰
۶	۱۰۰ - ۱۸۰
۸	۱۸۰ - ۲۵۰
۹	>۲۵۰
وزن نسبی: ۴	



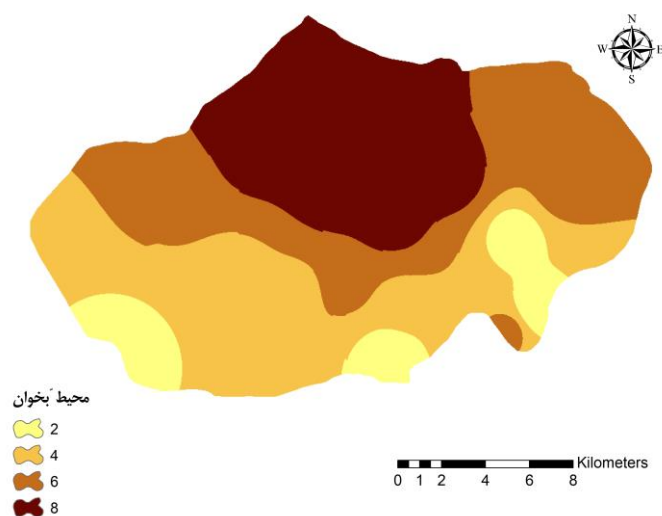
شکل ۳. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده تغذیه خالص

۲-۳-۲. محیط آبخوان^۱ (A)

محیط آبخوان نقش اصلی در مسیر و حرکت آلاینده‌ها ایفا می‌کند. هرچه اندازه رسوبات بزرگ‌تر باشد، نفوذپذیری بیشتر و ظرفیت کاهش آلودگی کمتر خواهد بود در نتیجه آسیب‌پذیری بیشتری دارند (Baalousha, 2010)، برای تهیه این لایه از اطلاعات ستون چاه‌ها (پیزومترها) در محدوده دشت استفاده شد و با توجه به جدول ۴ رتبه‌بندی گردید (شکل ۴).

جدول ۴. رتبه‌بندی و وزن‌دهی محیط آبخوان

محیط آبخوان	
رتبه	محدوده
۱-۳	شیل توده‌ای
۲-۵	سنگ آذرین یا دگرگونی
۳-۵	سنگ آذرین یا دگرگونی هوازه
۴-۶	رسوبات یخچالی
۵-۹	ماسه سنگ لایه لایه، سنگ آهک و توالی شیل‌ها
۴-۹	ماسه سنگ توده‌ای
۴-۹	سنگ آهک توده‌ای
۴-۹	ماسه و گراول
۲-۱۰	بازالت
۹-۱۰	سنگ آهک کارستی
وزن نسبی: ۳	



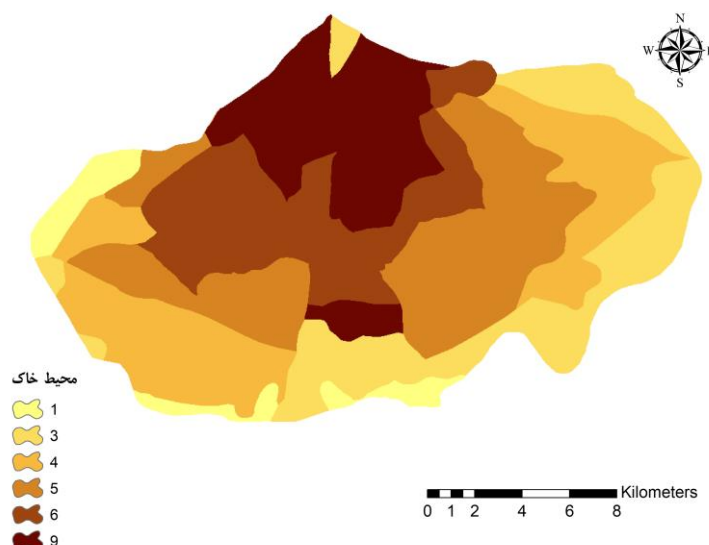
شکل ۴. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده محیط آبخوان

۲-۲-۴. محیط خاک^۱ (S)

به بخش هوازده‌ی بالایی منطقه‌ی غیراشباع گفته می‌شود که تا حد نفوذ ریشه‌ی گیاهان ادامه دارد. محیط خاک تأثیر بسیار مهمی در رسیدن تغذیه موثر به سطح ایستابی و بر چگونگی حرکت آلوده کننده دارد. محیط خاک بر حسب رده‌بندی بافتی آن مشخص و براساس پتانسیل آلودگی امتیازبندی می‌شود (جدول ۵). به طور کلی هر قدر اندازه‌ی ذرات تشکیل دهنده‌ی خاک ریزتر و نفوذپذیری خاک کمتر و درصد مواد آلی و ضخامت خاک بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. در این تحقیق برای تهیه نقشه خاک منطقه از اطلاعات پیزومترها و نیز نقشه خاک منطقه استفاده گردید (شکل ۵).

جدول ۵. رتبه‌بندی و وزن‌دهی محیط خاک

لایه خاک	
رتبه	محدوده
۱۰	نازک یا نبود لایه خاک
۱۰	گراول
۹	ماسه
۸	کود گیاهی (پیت)
۷	رس فشرده/ متراکم
۶	لوم ماسه‌ای
۵	لوم
۴	لوم سیلتی
۳	لوم رسی
۲	کود گیاهی
۱	رس غیر متراکم
وزن نسبی: ۲	



شکل ۵. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده محیط خاک

۲-۲-۵. توپوگرافی^۱ (T)

لایه توپوگرافی که تغییرات شیب سطح زمین را نشان می‌دهد، نقش مهمی در حرکت آلوده کننده و نگهداری آن بر سطح زمین دارد. علاوه بر آن توپوگرافی بر گسترش خاک و در نتیجه بر میرایی آلوده کننده‌ها نیز مؤثر است. برای تهیه‌ی نقشه‌ی شیب از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد و نقشه رستری درصد شیب از آن محاسبه و استخراج شده و بر اساس جدول ۶ رتبه‌بندی گردید (شکل ۶).

۲-۲-۶. محیط غیر اشباع^۲ (I)

شامل قسمت قرار گرفته مابین سطح ایستابی و محیط خاک می‌شود که اساساً غیراشباع بوده و یا به طور ناپیوسته اشباع می‌باشد و عبور و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه‌ی اشباع کنترل می‌کند. برای تهیه‌ی این لایه از مدل با استفاده از اطلاعات چاه‌های منطقه، نوع و جنس مواد تشکیل دهنده منطقه غیراشباع مشخص شد و با استفاده از روش درونیابی IDW با بهترین برازش نقاط، نقشه رستری منطقه غیراشباع تهیه گردید و نقشه‌ی به دست آمده بر اساس جدول ۷ رتبه‌بندی گردید (شکل ۷).

۲-۲-۷. هدایت هیدرولیکی^۳ (C)

توانایی مواد تشکیل دهنده‌ی آبخوان در انتقال آب، هدایت هیدرولیکی نامیده می‌شود؛ که به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم در لایه‌ی آبدار (تخلخل مؤثر) بستگی دارد. هدایت هیدرولیکی حرکت آلاینده و پخش آن را از نقطه‌ی نفوذ تا رسیدن به منطقه‌ی اشباع کنترل می‌نماید. بنابراین، هر چه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود (Saravanan, 2023). برای به دست آوردن این لایه از اطلاعات موجود در منطقه شامل قابلیت انتقال و ضخامت بخش اشباع استفاده شد. بدین ترتیب که این اطلاعات به محیط ArcGIS وارد شد. به منظور ایجاد لایه‌ی رستری هدایت هیدرولیکی، نقشه رستری ضریب قابلیت انتقال بر نقشه رستری ضخامت اشباع آبخوان تقسیم شد و لایه‌ی موردنظر بدست آمد و با توجه به جدول ۸ رتبه‌بندی گردید (شکل ۸).

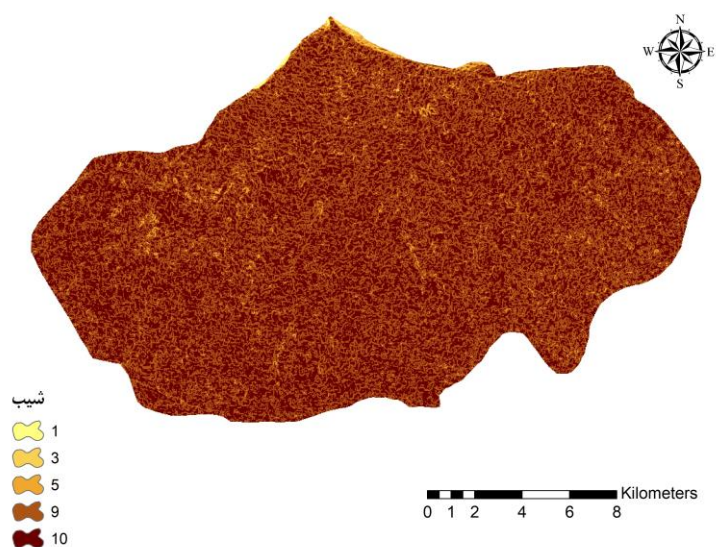
1. Topography

2. Impact of vadose zone

1. Hydraulic conductivity

جدول ۶. رتبه‌بندی و وزن‌دهی توپوگرافی (الر و همکاران، ۱۹۸۷)

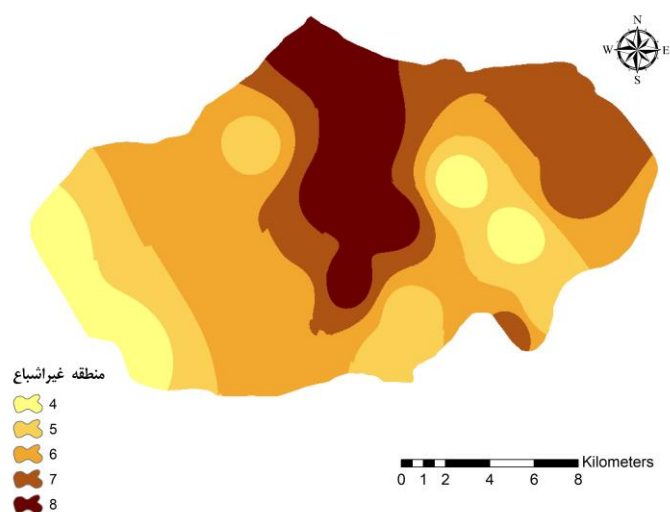
شیب (درصد)	
رتبه	محدوده
۱۰	۰ - ۲
۹	۲ - ۶
۵	۶ - ۱۲
۳	۱۲ - ۱۸
۱	>۱۸
وزن نسبی: ۱	



شکل ۶. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده توپوگرافی (شیب درصد)

جدول ۷. رتبه‌بندی و وزن‌دهی منطقه غیر اشباع

منطقه غیر اشباع	
رتبه	محدوده
۱-۲	سیلت / رس
۲-۵	شیل
۲-۷	سنگ آهک
۴-۸	ماسه سنگ
۴-۸	سنگ آهک لایه لایه، ماسه سنگ، شیل
۴-۸	ماسه و گراول با مقدار زیادی سیلت و رس
۲-۸	سنگ دگرگونی یا آذرین
۶-۹	ماسه و گراول
۲-۱۰	بازالت
۸-۱۰	سنگ آهک کارستی
وزن نسبی: ۵	

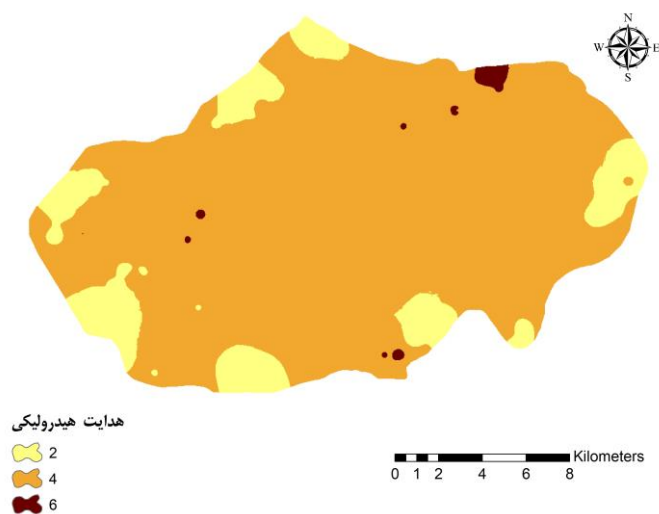


شکل ۷. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده منطقه غیراشباع

جدول ۸. رتبه‌بندی و وزن‌دهی هدایت هیدرولیکی (الر و همکاران، ۱۹۸۷)

هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	
رتبه	محدوده
۱	۰/۰۴ – ۴/۱
۲	۴/۱ – ۱۲/۳
۴	۱۲/۳ – ۲۸/۷
۶	۲۸/۷ – ۴۱
۸	۴۱ – ۸۲
۱۰	>۸۲

وزن نسبی: ۳



شکل ۸. نقشه‌ی رتبه‌بندی شده هدایت هیدرولیکی

۲-۲-۸. تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه آسیب‌پذیری

در نهایت، پس از جمع‌آوری و رقومی کردن اطلاعات هیدروژئولوژیکی، هفت عامل نامبرده برای تهیه نقشه‌ی آسیب‌پذیری با یکدیگر همپوشانی و تلفیق گردید و یک لایه‌ی جدید به نام شاخص دراستیک (شکل ۹)، مطابق رابطه ۲ بدست آمد.

$$D_i = \sum (W_j \times R_{ij}) \quad (2)$$

D_i : مقدار نهایی شاخص دراستیک در پیکسل i ام، W_j : وزن پارامتر j و R_{ij} : رتبه پارامتر j می‌باشد.

۲-۳. تحلیل حساسیت مدل دراستیک

برخی از دانشمندان معتقدند که برای ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آب‌های زیرزمینی با تعداد کمتری از پارامترها و با دقت بیشتر و هزینه کمتر می‌توان به نتایجی معادل مدل دراستیک دست یافت (Barber et al, 1993). در طی این مرحله، پارامترهای ورودی مدل تغییر داده می‌شوند و عکس‌العمل سیستم نسبت به این تغییرات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نتیجه میزان حساسیت هر پارامتر مشخص می‌شود. میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای به کار برده شده جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت گرمسار با استفاده از روش تحلیل حساسیت حذف پارامتر و تک پارامتری انجام گرفت.

۲-۳-۱. آنالیز حساسیت حذف پارامتر

این روش، حساسیت نقشه‌ی آسیب‌پذیری را نسبت به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و از رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید (Lodwick et al, 1990).

$$S = (|V/N - V'/n| / V) \times 100 \quad (3)$$

که در این رابطه S میزان حساسیت، V و V' شاخص آسیب‌پذیری بدون حذف و با حذف پارامتر N و n تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه‌ی V و V' می‌باشد.

۲-۳-۲. آنالیز حساسیت تک پارامتری

در این روش اثر هر کدام از پارامترهای دراستیک بر روی شاخص آسیب‌پذیری بررسی می‌شود. این آنالیز حساسیت برای مقایسه‌ی وزن واقعی هر یک از پارامترها با وزن تئوری اختصاص داده شده در مدل تحلیلی انجام می‌شود. وزن موثر یا وزن واقعی با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد (Napolitano & Fabbri, 1996).

$$W = (P_r P_w / V) \times 100 \quad (4)$$

که در آن W وزن پارامتر موثر، P_r و P_w رتبه و وزن هر کدام از پارامترها و V شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. نقشه‌های معیار دراستیک

در این پژوهش، پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به روش دراستیک، نقشه‌های معیار تهیه و رتبه‌بندی آن‌ها در محیط GIS انجام گرفت. بررسی عمق سطح ایستابی نشان می‌دهد که این مقدار در بخش جنوبی دشت گرمسار حدود ۷ متر و در نواحی شمالی تا ۱۳۰ متر متغیر است. با توجه به معیار رتبه‌بندی، مناطق دارای عمق بیش از ۳۰ متر، رتبه‌ی ۱ را دریافت کرده‌اند، که بیانگر وسعت قابل توجه مناطق با سطح آب زیرزمینی عمیق در این منطقه است. میزان تغذیه‌ی خالص در دشت برابر با ۲۲ میلی‌متر در سال بوده و حداکثر مقدار آن به حدود ۲۹۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. بررسی تغییرات نفوذپذیری در سطح دشت نشان

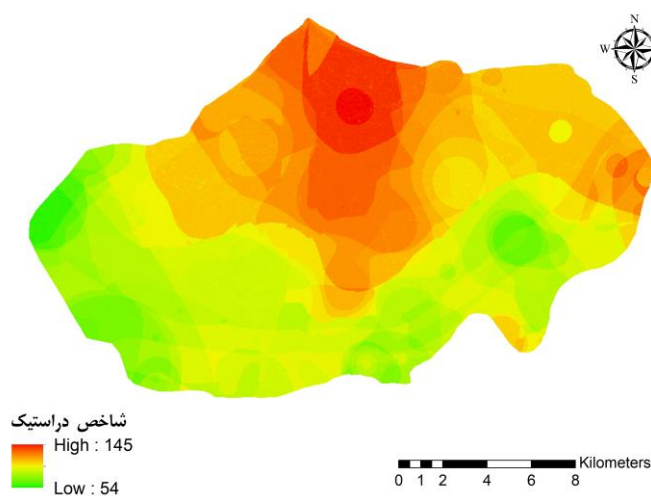
می‌دهد که با حرکت از مرکز به بخش‌های جنوبی و حاشیه‌ای، به دلیل ریزدانه‌تر شدن رسوبات، میزان نفوذپذیری کاهش یافته و بخش عمده‌ای از دشت دارای رتبه‌های ۱ و ۳ است. تحلیل جنس بخش اشباع آبخوان نشان می‌دهد که در شمال دشت رسوبات درشت‌دانه‌ای از جنس شن و ماسه غالب بوده و رتبه‌ی ۸ را دارا هستند، در حالی که در نواحی جنوبی و غربی ترکیبات رسی غالب بوده و رتبه‌های ۴ و ۲ را به خود اختصاص داده‌اند. مطابق نقشه‌ی بافت خاک، بخش شمالی دشت عمدتاً شامل خاک‌های ماسه‌ای است که رتبه‌ی ۹ را دریافت کرده‌اند، در حالی که مرکز دشت عمدتاً دارای خاک‌های لومی و لومی ماسه با رتبه‌های ۵ و ۶ می‌باشد. همچنین، در مناطق جنوبی و غربی دشت، خاک‌های رسی شور پراکنده شده که دارای رتبه‌های ۳ و ۱ هستند. بررسی شیب زمین نشان می‌دهد که بخش عمده‌ی دشت دارای شیب بسیار کم است، که منجر به افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری می‌شود. رسوبات بخش اشباع که لایه‌ی فوقانی آبخوان را تشکیل می‌دهند، در مناطق شمالی، شمال شرقی و مرکزی عمدتاً درشت‌دانه بوده و رتبه‌های بالایی دارند؛ این امر موجب افزایش آسیب‌پذیری آبخوان می‌شود. با حرکت به سمت بخش‌های جنوبی و غربی، رسوبات ریزدانه‌تر شده و رتبه‌های ۴ و ۵ را دریافت کرده‌اند. تغییرات هدایت هیدرولیکی در منطقه از حدود ۵۰ متر در روز در بخش شمال شرقی تا حدود ۶ متر در روز متغیر بوده و بخش عمده‌ی دشت دارای هدایت هیدرولیکی متوسط می‌باشد.

۲-۳. شاخص آسیب‌پذیری دراستیک

شاخص نهایی دراستیک که از تلفیق و هم پوشانی نقشه‌های معیار به دست آمد بین ۵۴ تا ۱۴۵ قرار گرفت (شکل ۹). بیشترین عدد شاخص در محدوده‌ی شمالی و کمترین مقدار آن در قسمت‌های جنوبی و غربی می‌باشد. برای درک بهتر شاخص آسیب‌پذیری باید روشی را انتخاب کرد تا آسیب‌پذیری آبخوان به خوبی نمایش داده شود و مقایسه‌ی بین نواحی متفاوت به طور هم زمان امکان‌پذیر گردد. در این روش شاخص آسیب‌پذیری با در نظر گرفتن مرزهای قراردادی به بازه‌هایی تقسیم می‌شود (جدول ۹). محدوده‌ی شاخص دراستیک در دشت گرمسار به پنج گروه تقسیم‌بندی شد. همانطور که در جدول ۱۰ آمده است نه درصد از منطقه مورد مطالعه بدون پتانسیل آلودگی، ۳۹ درصد دارای پتانسیل خیلی کم، ۳۰ درصد پتانسیل کم، ۱۷ درصد دارای پتانسیل کم تا متوسط و ۵ درصد دارای پتانسیل آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد می‌باشد. نواحی با پتانسیل آسیب‌پذیری بالا در قسمت‌های شمالی قرار گرفته است که بافت خاک و طبقات زیرین از نوع درشت دانه بوده و رتبه‌ی بالایی را به خود اختصاص داده است. نواحی جنوبی و غربی که دارای رسوبات دانه ریز از سطح تا کف می‌باشند، دارای پتانسیل آسیب‌پذیری کم می‌باشد. شکل ۱۰ نقشه‌ی طبقه‌بندی شده‌ی آسیب‌پذیری آبخوان دشت گرمسار را نشان می‌دهد.

جدول ۹. رده‌بندی شاخص آسیب‌پذیری دراستیک (الر و همکاران، ۱۹۸۷)

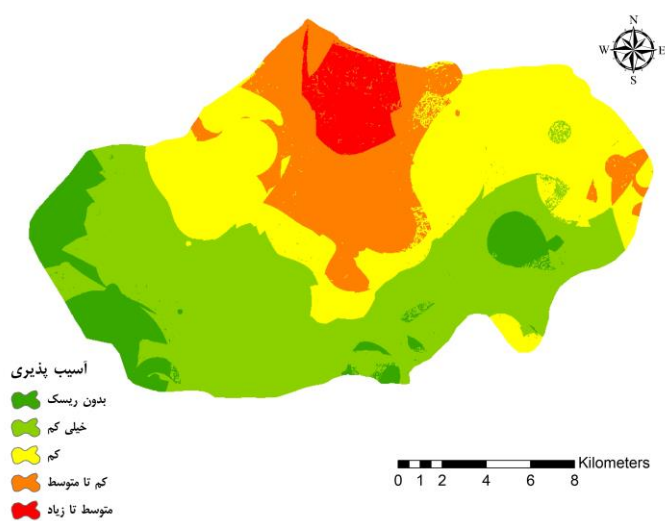
شاخص آسیب‌پذیری دراستیک	
پتانسیل آسیب‌پذیری	محدوده
بدون پتانسیل	۷۹ >
خیلی کم	۸۰-۹۹
کم	۱۰۰-۱۱۹
کم تا متوسط	۱۲۰-۱۳۹
متوسط تا زیاد	۱۴۰-۱۵۹
زیاد	۱۶۰-۱۷۹
خیلی زیاد	۱۹۹-۱۸۰
کاملاً مستعد آلودگی	۲۰۰ <



شکل ۹. نقشه‌ی شاخص آسیب‌پذیری دشت گرمسار بر اساس مدل دراستیک

جدول ۱۰. شاخص دراستیک برای دشت گرمسار

شاخص آسیب‌پذیری دراستیک			
درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	محدوده	پتانسیل آسیب‌پذیری
۹	۲۹	۵۴-۷۹	بدون پتانسیل
۳۹	۱۲۴	۸۰-۹۹	خیلی کم
۳۰	۹۸	۱۰۰-۱۱۹	کم
۱۷	۵۳	۱۲۰-۱۳۹	کم تا متوسط
۵	۱۶	۱۴۰-۱۴۵	متوسط تا زیاد



شکل ۱۰. نقشه‌ی کلاس‌بندی شده آسیب‌پذیری آبخوان دشت گرمسار بر اساس مدل دراستیک

۳-۳. تحلیل حساسیت حذف پارامتر و تک پارامتری

نتایج آماری حاصل از آنالیز حساسیت به روش حذف پارامتر، نشان می‌دهد که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر روی شاخص آسیب‌پذیری، محیط غیراشباع با میانگین شاخص تغییرپذیری ۲/۶۴ می‌باشد که این موضوع به دلیل اهمیت زیاد پارامتر I و وزن زیاد آن در روش دراستیک و خصوصیات منطقه‌ی غیراشباع آبخوان دشت گرمسار می‌باشد. آسیب‌پذیری آبخوان با میانگین حساسیت ۰/۶ درصد کمترین حساسیت را نسبت به حذف پارامتر محیط آبخوان نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۱. نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف پارامتر در دشت گرمسار

پارامتر حذف شده	حساسیت شاخص تغییرپذیری (درصد) (S)			
	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
D	۱/۰۱	۱/۸	۱/۰۴	۰/۵۵
R	۱/۱۴	۱/۵۲	۰/۸	۰/۲۶
A	۱/۳۱	۰/۳۷	۰/۶۳	۰/۶۶
S	۱/۷۵	۰/۵۴	۰/۸۷	۰/۸۵
T	۰/۸۳	۱/۲۳	۱/۰۹	۰/۲۸
I	۳/۷۹	۲/۲۱	۲/۶۴	۱/۱۱
C	۰/۵۳	۱	۰/۸۷	۰/۳۳

نتایج تحلیل حساسیت تک پارامتر نشان می‌دهد که وزن موثر و تئوری پارامترهای دراستیک کاملاً بر هم منطبق نیستند و در بعضی موارد تفاوت‌های قابل توجهی با هم دارند. با توجه به جدول ۱۲ پارامتر محیط غیراشباع با میانگین وزن موثر ۲۷/۵۲ درصد به عنوان مهم‌ترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری شناسایی شده است و با نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف پارامتر هم‌خوانی دارد. میانگین وزن موثر این پارامتر کمی بیشتر از وزن تئوری اختصاص داده شده به آن توسط مدل دراستیک می‌باشد.

جدول ۱۲. نتایج آماری تحلیل حساسیت تک پارامتری در دشت گرمسار

پارامتر	وزن تئوری	وزن تئوری (درصد)	میانگین وزن موثر (درصد)
D	۵	۲۱/۷	۹/۱۷
R	۴	۱۷/۴	۱۸/۳۴
A	۳	۱۳/۰۴	۱۶/۵۱
S	۲	۸/۷	۹/۱۷
T	۱	۴/۳۵	۸/۲۵
I	۵	۲۱/۷	۲۷/۵۲
C	۳	۱۳/۰۴	۱۱

۴. بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت گرمسار با استفاده از مدل دراستیک انجام شد. شاخص نهایی آسیب‌پذیری، حاصل از هم‌پوشانی نقشه‌های هفت‌گانه مدل، در بازه‌ای بین ۵۴ تا ۱۴۵ قرار داشت. بر اساس نقشه نهایی، نواحی شمالی دشت به علت دارا بودن خاک درشت‌بافت، نرخ بالای تغذیه، محیط آبخوان و محیط غیراشباع با نفوذپذیری بالا، در طبقه آسیب‌پذیری متوسط تا زیاد قرار گرفتند. در مقابل، نواحی جنوبی و غربی به دلیل ریزبافت بودن رسوبات و نفوذپذیری پایین، آسیب‌پذیری کمتری نشان دادند.

در تحلیل حساسیت انجام‌شده، پارامتر محیط غیراشباع (I) بیشترین تأثیر را بر شاخص نهایی داشت. این موضوع هم در روش حذف پارامتر و هم در تحلیل وزن مؤثر مشهود بود. اختلاف معنادار میان وزن نظری و وزن مؤثر این پارامتر، بر اهمیت تحلیل‌های محلی و لزوم بومی‌سازی مدل دراستیک در شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی خاص تأکید دارد.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی و خارجی، کارایی مدل دراستیک را در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها تأیید می‌کند. در مطالعه مونیر^۱ و همکاران (۲۰۲۵) در آبخوان کرک پاکستان، بیش از ۵۰ درصد منطقه در طبقه آسیب‌پذیری بالا و بسیار بالا قرار گرفت. عواملی مانند عمق کم سطح ایستابی، نرخ بالای تغذیه و محیط آبخوان درشت دانه که مشابه با شرایط شمال گرمسار بودند، در افزایش آسیب‌پذیری مؤثر گزارش شدند. این هم‌راستایی نتایج، بیانگر عملکرد پایدار مدل دراستیک در مناطق با ویژگی‌های زمین‌شناسی مشابه است.

در پژوهش حامد و همکاران (۲۰۲۴) در حوزه مرکزی اربیل (شمال عراق)، شاخص دراستیک در بازه‌ای بین ۵۳ تا ۱۵۰ گزارش شد و نواحی آسیب‌پذیر عمدتاً در جنوب، جنوب‌شرق و شمال منطقه پراکنده بودند. ویژگی‌هایی مانند لایه‌های شنی غیراشباع و توپوگرافی مسطح، از عوامل اصلی افزایش آسیب‌پذیری در آن منطقه گزارش شدند که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارند.

مطالعه اسدسلطانی و احمدی ندوشن^۲ (۲۰۲۱) در دشت نطنز نیز نشان داد که حدود ۲۲ درصد از منطقه در طبقه آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد. این نواحی عمدتاً در اطراف شهر بادرود و در مناطقی با خاک نفوذپذیر و هدایت هیدرولیکی بالا قرار گرفته‌اند؛ شرایطی که با ویژگی‌های خاک‌شناسی شمال دشت گرمسار شباهت دارد و بر هم‌راستایی نتایج تأکید می‌کند.

در مطالعه عروجی^۳ (۲۰۱۹) در دشت همدان-بهار نیز با مقایسه چهار مدل مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری، مشخص شد که مدل DRASTIC بالاترین هم‌خوانی را با داده‌های آلودگی نیترا داشته و عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های SI، GOD و SINTACS ارائه کرده است. همچنین حدود ۷/۱ درصد از سطح دشت در طبقه آسیب‌پذیری زیاد قرار گرفت که این وضعیت به دلیل نفوذپذیری بالای آبخوان ناشی از ماهیت رسوبات منطقه غیراشباع گزارش شده است.

یافته‌های مربوط به تحلیل حساسیت در پژوهش حاضر با نتایج مطالعه حامد و همکاران (۲۰۲۴) نیز هم‌راستا است؛ آن‌ها نیز گزارش کردند که پارامترهای محیط غیراشباع و عمق سطح ایستابی بیشترین نقش را در تعیین میزان آسیب‌پذیری ایفا می‌کنند. همچنین در مطالعه کرلاس^۴ و همکاران (۲۰۲۲) در ناحیه‌ای مدیترانه‌ای با اقلیم خشک، تحلیل حساسیت نشان داد که در مناطقی با لایه‌های ماسه‌ای و نفوذپذیر، وزن مؤثر پارامتر محیط غیراشباع ممکن است تا ۳۰ درصد افزایش یابد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که گرچه ساختار مدل دراستیک ثابت است، اما وزن‌دهی به پارامترها باید متناسب با شرایط زمین‌شناسی و اقلیمی هر منطقه تنظیم شود.

با وجود اینکه مدل دراستیک همچنان یکی از مدل‌های پرکاربرد برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها محسوب می‌شود، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ادغام روش‌های نوین می‌تواند دقت و کارایی آن را افزایش دهد. به‌عنوان مثال، بردبار^۵ و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی نشان داده‌اند که ترکیب مدل دراستیک با روش‌های بهینه‌سازی و مدل‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک و منطق فازی، می‌تواند دقت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها را بهبود بخشد. آن‌ها تأکید کردند که استفاده از این رویکردهای ترکیبی، ضمن کاهش عدم قطعیت مدل، توانایی آن در شناسایی نواحی پرخطر را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

در همین راستا، استفاده از فناوری‌های نوین مانند یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های داده‌محور نیز در مطالعاتی همچون پژوهش‌های الزین^۶ و همکاران (۲۰۲۳) و فناخ^۷ و همکاران (۲۰۲۵) پیشنهاد شده است. این روش‌ها با درک بهتر از روابط

1. Muneer

2. Asadsoltani & Ahmadi Nadoushan

3. Oroji

4. Kirlas

5. Bordbar

6. Elzain

7. Fannakh

غیرخطی و پیچیده میان متغیرهای هیدروژئولوژیکی، می‌توانند دقت مدل دراستیک را در پیش‌بینی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و اعتبارسنجی نتایج به‌طور قابل توجهی بهبود دهند.

با توجه به رونق کشاورزی در دشت گرمسار و مصرف بالای کودها و سموم شیمیایی، احتمال ورود آلاینده‌ها به آبخوان افزایش یافته است. بنابراین، اجرای راهبردهای حفاظتی، پایش مداوم سطح ایستابی و تغییرات کاربری اراضی، و نیز مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی در این منطقه ضروری به نظر می‌رسد.

در نهایت، این پژوهش ضمن تأیید عملکرد مدل دراستیک در شرایط منطقه‌ای، بر لزوم استفاده از تحلیل‌های حساسیت محلی و بهینه‌سازی مدل با روش‌های ترکیبی تأکید دارد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، اثرات تغییر اقلیم، سناریوهای مختلف بهره‌برداری، و ارزیابی عدم قطعیت مدل نیز مدنظر قرار گیرد. این نتایج می‌توانند مبنای تصمیم‌گیری مدیران منابع آب برای حفاظت از منابع زیرزمینی در دشت گرمسار قرار گیرند.

References

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R.J., & Hackett, G. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency Report. EPA600/2-EP87/036.
- Amanpour, S., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2022). Groundwater Vulnerability Assessment Using DRASTIC and SINTACS Models in GIS (Case Study: Karun Township). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(30): 34- 50. (In Persian)
- Asadsoltani, A., & Ahmadi Nadoushan, M. (2022). Assessment of the pollution potential of groundwater in Khaledabad Badrood aquifer using DRASTIC model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(33), 39-58. (In Persian)
- Baalousha, H. (2010). Assessment of groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural Water Management*. 97:240-246.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., Hiyama, T. & Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer Vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*. Vol. 345: 127-140.
- Barber, C., L. E. Bates, R. Barron & H. Allison. (1993). Assessment of the relative vulnerability of groundwater to pollution: A review and background paper for the conference workshop on vulnerability assessment. *Journal of Australian Geology and Geophysics* 14(2-3): 147-154.
- Bera, A. Mukhopadhyay, B. P. Chowdhury, P. Ghosh, A. & Biswas, S. (2021). Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Volume 214, 112085.
- Bordbar, M., Rezaie, F., Bateni, S. M., Jun, C., Kim, D., Busico, G., Kardan Moghaddam, H., Paryani, S., Panahi, M., & Valipour, M. (2024). Global review of modification, optimization, and improvement models for aquifer vulnerability assessment in the era of climate change. *Current Climate Change Reports*, 9(1), 45-67.
- Civita, M. (1993). Ground water vulnerability maps: a review. In: Proc. IX symposium on pesticide chemistry "degradation and mobility of xenobiotics", Placenza, Italy, Edizioni "Biagini", Lucca, Italy, pp 587-631.
- El Yousfi Y, Himi M, Aqnouy M, et al. (2023). Pollution vulnerability of the ghiss nekkor alluvial aquifer in Al-hoceima (morocco), using GIS-based DRASTIC model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(6): 4992.
- Elzain, H. E., Chung, S. Y., Venkatramanan, S., Selvam, S., Ahemd, H. A., Seo, Y. K., Bhuyan, M. S., & Yassin, M. A. (2022). Novel machine learning algorithms to predict the groundwater vulnerability index to nitrate pollution at two levels of modeling, *Chemosphere* 314(3):137671.
- Eshaghi Ilbeygi S., Z. Ganji Norouzi, V. Dorostkar, M. H. Movahednejad, & M. Atari. (2022). Vulnerability Assessment of Sabzevar Aquifer (Northeast of Iran) Using Drastic Model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*.1(16): 255-266. (In Persian)
- Fannakh, A., Károly, B., Fannakh, M., & Farsang, A. (2025). Assessment and Validation of Shallow Groundwater Vulnerability to Contamination Based on Fuzzy Logic and DRASTIC Method for Sustainable Groundwater Management in Southeast Hungary. *Water*, 17(5), 739.
- Hamed, M.H, Dara R.N., & Kirlas M.C. (2024). Groundwater vulnerability assessment using a GIS-based DRASTIC method in the Erbil Dumpsite area (Kani Qirzhala), Central Erbil Basin, North Iraq. *Journal of Groundwater Science and Engineering*. 12(1): 16-33

- Huang Y., Zuo R., Li J., Wu J., Zhai Y. & Teng Y. (2018). The spatial and temporal variability of groundwater vulnerability and human health risk in the Limin District, Harbin, China. *Water*. International Conference on Tropical Hydrology and Caribbean Water resources, San Juan de Puerto Rico. 279-289.
- Kirlas, M.C., Karpouzou, D.İ., Georgiou, P.E., et al. (2022). A comparative study of groundwater vulnerability methods in a porous aquifer in Greece. *Applied Water Science*, 12(6): 123.
- Knodel, K., Lange, G., & Voigt, H. J., (2007). *Environmental Geology, Handbook Field Methods and Case Studies*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1357p.
- Koon, AB, Anornu, GK, Dekongmen, BW, et al. (2023). Evaluation of groundwater vulnerability using GIS-based DRASTIC model in Greater Monrovia, Montserrado County, Liberia. *Urban Climate*, 48: 101427.
- LeGrand, H.E. (1964). System for evaluating the contamination potential of some waste sites. *Journal of American Water Works Association*. 56, 959-974.
- Lodwick, W.A., Monson, W., & Svoboda, L., (1990). Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. *International Journal of Geographical Information Systems* 4 (4): 413- 28.
- Margat, J. (1968). *Vulnerability of groundwater to pollution*. Orléans, France: BRGM Publication 68 SGL 198 HYD.
- Metwally, M.I, Armanuos, A.M, & Zeidan, B.A. (2023). Comparative study for assessment of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC methods applied to central Nile Delta, Egypt. *International Journal of Energy and Water Resources*, 7(2): 175-190.
- Muneer M, Khan MA, Shinwari FU, Ahmed I, Siyar SM, Alshehri F & Shahab M. (2025). Assessment of groundwater intrinsic vulnerability using GIS-based DRASTIC method in district Karak, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Front. Water*. 7:1540703.
- Napolitano, P., & Fabbri, A.G., (1996). Single parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. in: Kovar K, Nachtnebel HP (eds) *Proc HydroGIS: application of geographical information systems in hydrology and water resources management*, IAHS Publ. 235, IAHS, Wallingford, UK 559-566
- Oroji, B., (2019). Groundwater vulnerability assessment with using GIS in Hamadan-Bahar plain, Iran. *Applied Water Science*. 9:196.
- Rahman, A. (2008). A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, Vol. 28: 32-53.
- Re V, Sacchi E, Mas-Pla J, Mencia A. & El Amrani N. (2014). Identifying the effects of human pressure on groundwater quality to support water management strategies in coastal regions: A multi-tracer and statistical approach (Bou-Areg region, Morocco). *Science of the Total Environment*. 500-501: 211-223.
- Rezig A, Marinangeli L, & Saggai S. (2022). Comparative study for assessing vulnerability to pollution in El Asnam plain, North of Algeria. *Water Supply*, 22(6): 5894-5914.
- Rosen, L.A. (1994). A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Groundwater* 32(2): 278-285.
- Sabbagh, S.D. morovati, M. Panahandeh, M. & Tazeh, M. (2020). Assessment of groundwater vulnerability in Nekarod plain using DRASTIC model. *Iranian Water Research Journal*. 14 (1) Number 36: 141-152. (In Persian)
- Soyaslan, İ.İ. (2020). Assessment of groundwater vulnerability using modified DRASTIC-Analytical Hierarchy Process model in Bucak Basin, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*. 13(21):1127.
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L. & Carvalho Dill, A. M. M. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater assessment method in comparison with in to agricultural regions in the south of Portugal. *Journal of Hydrology*. 14: 79-99.
- Zeng X, Wu J, Wang D. & Zhu X. (2016). Assessing the pollution risk of a groundwater source field at western Laizhou Bay under seawater intrusion. *Environmental Research*. 148: 586-594.
- Zhang, Q., Li, P., Lyu, Q., Ren, X., & He, S. (2021). Groundwater contamination risk assessment using a modified DRATICL model and pollution loading: A case study in the Guanzhong Basin of China. *Chemosphere*, 291, 132695.