Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Winter 2026, Vol. 15(4): 20 - 38

Research Article

Assessment of Groundwater Resources Sustainability in Varamin Plain with Emphasis on Sustainability Indicators

Hamid Reza Nassery[1]*, Parisa Latifi[1], Zahra Kayhomayoon[2], Farshad Alijani[1]

1- Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

Keywords: *Quantitative hydrogeological and Environmental Index, DRASTIC, Intrinsic Vulnerability, Varamin Plain.*

1-Introduction

The quality and quantity of groundwater have often been challenged due to population growth, urban development, agricultural expansion, and economic growth in recent decades. The quantitative and qualitative limitations of groundwater resources have led to competition for its use, resulting in the vulnerability and instability of aquifers (Sarami et al., 2024). In this study, using quantitative groundwater indicators and environmental indicators and integrating the results of the indicators with weighting methods, the overall stability of the Varamin Plain aquifer has been calculated. The values of the indicators have also been used to evaluate the restoration and balancing plan in the Varamin Plain aquifer. The Varamin Plain aquifer is located in the southeast of Tehran Province, and the area of this plain is 971 square kilometers. (Figure 1). The main river in this area is the Jajroud River, which originates from the northern heights of the plain and flows southward.

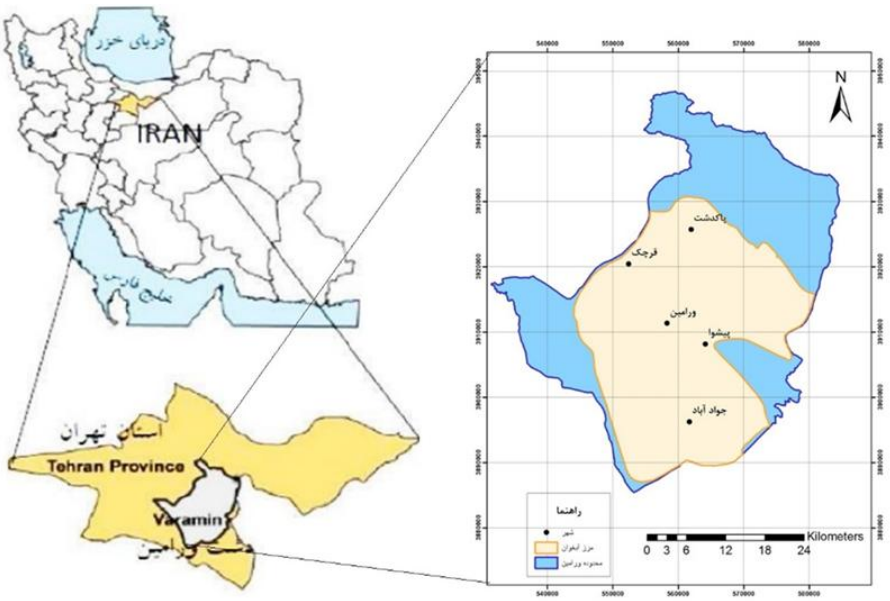


Fig. 1. Petrographic properties of the samples

* Corresponding author: h-nassery@sbu.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2026.49892.2520
Received: 2025-06-08
Accepted: 2026-01-07

ISSN: 2717-0764

Overuse of groundwater resources, recent droughts, unauthorized well drilling, and sources of groundwater pollution have caused the situation of the Varamin Plain aquifer to become critical. There is a main free aquifer in the Varamin Plain, and the wells are located in this layer. The maximum thickness of the aquifer in the north of the Varamin Plain is 300 meters, and the minimum thickness of the alluvium in the southwest of the Varamin Plain is 150 meters. The Varamin Plain is recharged by rainfall, main waterways, wastewater from the South Tehran Treatment Plant, and subsurface recharge. The depth of groundwater in the main aquifer is between 30-170 meters below the ground surface, and the general direction of groundwater flow in the region is from northwest to southeast (Nejatijahromi et al., 2018). In the northern part of the Varamin Plain, the aquifer's transport capacity is estimated to be more than 3,000 square meters per day.

2-Material and methods

Groundwater sustainability indices are defined as measurable variables that provide information about the groundwater system in an understandable way. Accordingly, in this study, a framework for assessing aquifer sustainability has been established by presenting groundwater quantitative sector indices and environmental indices in the form of the DPSIR (Driving forces- Pressures- State- Impacts- Response) model. The sustainability number calculated for each index determines the level of sustainability in the Varamin study area in the context related to the index. Also, by combining the results of the indices using weighting methods, the overall level of sustainability in the study area in question has been obtained. To prepare the intrinsic vulnerability and risk maps, it was necessary to collect and prepare data, rate them, weight them, and integrate them. The quantitative hydrogeological indices calculated to assess the sustainability of the Varamin Plain aquifer are: per capita renewable groundwater resources index (I GWR), water withdrawal to groundwater recharge ratio index (I Ab/R), extraction to exploitable groundwater resources ratio index (I Ab/E), groundwater demand index to total surface and groundwater resources (I GWS), groundwater storage change index in a study period (I (ΔH)i), groundwater storage change index comparing short-term and long-term periods (I (ΔH)1, 2), water level trend index in aquifer observation wells (I GMN), and monitoring network coverage rate index (I SV). The relationship and component of each index, as well as the values related to each index and the DPSIR model framework of the indices, are defined in Table 1. The mentioned indices have been calculated according to the available information and data, using the relationship related to each index.

The environmental indicators that have been calculated to assess the sustainability of the Varamin Plain aquifer are: Groundwater Resources Drought Index (GRI), Groundwater Vulnerability Index (Iv), Stress Index (Is), Average Change Index of Agricultural Areas and Urban Population (I VAP), Percentage of Basin Covered with Natural Vegetation (I AV), and Ratio of Non-Conventional Water Supply to Conventional Water Supply (I NC). The relationship and component of each indicator, as well as the values related to each indicator and the DPSIR model framework of the indicators, are also defined in Table 2. The mentioned indicators have been calculated according to the available information and data, using the relationship related to each indicator.

The DRASTIC method has been used to determine the vulnerability of the Varamin Plain aquifer. The processing, integration, and analysis of the data required for the DRASTIC model, as well as the display of the results, at different stages of the work, have been carried out in the GIS software environment.

To determine the weights of the parameters in the DRASTIC method, the Analytical Hierarchy Process (AHP) has been used (Saaty, 1980). For this purpose, the seven parameters considered in the DRASTIC model have been prioritized, the criteria have been compared pairwise with each other, and their importance to each other has been determined. The input of the pairwise comparison matrix is the determined weights, and its output is the relative weights related to the criteria.

ISSN: 2717-0764
CC BY

Table 1. Calculations of quantitative indicators and scores for each indicator

Quality Index	Index	Index Score
I GWR (Renewable groundwater resources Index)	97	0
I Ab/R (Total groundwater abstraction/ Groundwater recharge Index)	135.7	0
I Ab/E (Total groundwater abstraction/ Exploitable groundwater resources Index)	235.6	0
I GWS (Degree of groundwater participation in water supply for all uses index)	58	25
I (ΔH) i (Variation in groundwater storage index)	10.5	0
I (ΔH)1, 2 (Variation in the groundwater depletion in the period studied, relative to the long-term average index)	20.8	0
I SV (vulnerability of the groundwater supply index)	34	25
I GMN (The coverage of groundwater monitoring network index)	200	100

Table 2. Calculations of environmental indicators and scores for each indicator

Environmental Index	Index	Index Score
GRI (groundwater resources Index)	0.02	50
Iv (Groundwater vulnerability index)	22	75
I s (Groundwater stress index)	2.7	0
I VAP (Averaged variation of basin agricultural area and urban population in the period analyzed index)	20.6	0
I AV (Percent of basin area under natural vegetation index)	0	0
I NC (Non-conventional water resources supply, relative to the conventional water resources in the period studied)	34	100

3-Results and discussions

According to vulnerability maps, the highest level of vulnerability, which is the critical level, is observed in the center of the aquifer, i.e., the area around Varamin, Pishva, and East Pakdasht. The reason for the high vulnerability of these areas is higher recharge, flatter topography, coarser grain of the aquifer environment, unsaturated soil, and environment, and higher hydraulic conductivity than other areas. The lowest level of vulnerability is observed around West Pakdasht, Qarchak, and Javad Abad. According to the risk map, many parts of the center and west of the Varamin Plain aquifer are highly risky. This is while the risk decreases towards the southern and western borders. So that the southwest of the area has the lowest risk. However, from the center to the east of the area, the risk increases and then decreases. The highest risk is observed in the central part of the aquifer area and between the cities of Varamin, Pishva, and Qarchak. In the north of the aforementioned area, that is, in Pakdasht, the risk is highest. The reason for the high risk in these areas is the use of residential and industrial lands. The risk decreases towards the southern tip of the aquifer area (towards Javad Abad). Based on the results of calculating the groundwater withdrawal and recharge index, considering the index value and the score related to this value, the Varamin Plain aquifer is unstable, and the withdrawal rate from this aquifer is not consistent with the aquifer recharge rate. The results of calculating the ratio of total withdrawal to total groundwater resources indicate that the Varamin Plain aquifer is not sustainable, considering the index value and the score related to this value, and that groundwater resources in this plain are being over-extracted, and if decisions are not taken to improve this situation, the aquifer will face more serious problems. The results of calculating the change index in groundwater storage in a comparison of two short-term and long-term periods indicate that the Varamin Plain aquifer is not sustainable, considering the index value and the score related to this value, and the drop in groundwater level due to excessive groundwater extraction could be the reason for this issue.

Based on the results of calculating groundwater vulnerability indices using the DRASTIC model, the Varamin Plain aquifer is unstable, considering the index value and the score related to this value, because the annual water consumption is not proportional to the amount of renewable groundwater, and

ISSN: 2717-0764

groundwater resources are being overexploited. According to the results of calculating the average index of changes in the level of agricultural areas and urban population, the Varamin Plain aquifer is unstable. The level of agricultural areas and the population living in the study area are not proportional to the groundwater resources available in the plain, and the overexploitation of the aquifer has made the Varamin Plain aquifer unsustainable. Calculating the sustainability of the Varamin Plain aquifer by examining quantitative and environmental indicators and integrating these indicators using the AHP method shows that the study area is not sustainable and requires urgent management measures to protect groundwater resources. If these measures and solutions are not implemented quickly and management plans and policies are not adopted, irreparable damage will be inflicted on the studied aquifer.

4-Conclusion

The final vulnerability map, which was prepared by combining seven information layers in a GIS environment, shows that, in general, the northeastern, central, and western regions of the region are highly vulnerable. The potential for contamination is lower in the northwest, east, and south. The areas around Varamin and Pishva are highly vulnerable. The reason for the high vulnerability of these areas is higher nutrition, flatter topography, coarser particles in the aquifer environment, unsaturated soil, and environment, and higher hydraulic conductivity than other areas. Also, the areas of Pakdasht, Javadabad, and Qarchak have medium to low contamination potential. According to the vulnerability map, it can be said that many parts of the western, central, and northeastern regions of the aquifer area are highly vulnerable. This is while the risk decreases toward the eastern, northwest, and southern borders of the region. The risk is also low in the southwestern part of the aquifer. The highest level of risk is in the central part of the aquifer and between the cities of Varamin, Pishva, Qarchak, and Pakdasht. In the southeast of the area, that is, in the south of Javadabad, the level of risk decreases. The reason for the high risk in these areas is the use of residential and industrial lands. The level of risk decreases towards the eastern edge of the aquifer. The Varamin Plain aquifer is in a non-sustainable state in terms of quantitative and environmental indicators. The integration of quantitative and environmental sustainability indicators shows that in the Varamin Plain aquifer, the sustainability of groundwater resources is low, and between zero and 25. The status of the Varamin Plain aquifer, according to the sustainable indicators, indicates the need for urgent management measures to protect groundwater resources.

5-References

Nejatijahromi, Z., Nassery, H.R., Nakhaei, M., Alijani, F., 2018. Assessment of the quality of groundwater for drinking purposes in the Varamin aquifer: heavy metals contamination. Iranian Journal of Health and Environment 10(4), 559-72.

Saaty, T.L., 1980. The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority. Resource Allocation. RWS Publications, USA.

Sarami-Foroushani, T., Balali, H., Movahedi, R., Partelow, S., 2024. Indicator assessment of groundwater resource sustainability: Using the framework of socio-ecological systems in Hamedan -Bahar Plain, Iran, Journal of Hydrology: Regional Studies, 54, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101889

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Nassery, H., Latifi, P., Kayhomayoon, Z., Alijani, F., 2026. Assessment of Groundwater Resources Sustainability in Varamin Plain with Emphasis on Sustainability Indicators. Adv. Appl. Geol. 15 (4), 20-38.
DOI: 10.22055/aag.2026.49892.2520
https://aag.scu.ac.ir/article_20531.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

ارزیابی پایداری منابع آب‌زیرزمینی دشت ورامین با تاکید بر شاخص‌های پایداری

حمیدرضا ناصری
دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.
پریسا لطیفی
دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.
زهرا کی همایون
گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
فرشاد علیجانی
دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.
h-nassery@sbu.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

چکیده

ارزیابی تاب‌آوری آبخوان‌ها بر اساس شاخص‌های تاب‌آوری منابع آب، برای حفاظت آبخوان‌ها در برابر رخدادهای آینده ضروری است. در پژوهش حاضر از شاخص‌های تاب‌آوری برای ارزیابی تاب‌آوری منابع آب‌زیرزمینی دشت ورامین در برابر تنش‌ها و آسیب‌های وارده، استفاده شده است. بدین منظور شاخص هیدروژئولوژی کمی و شاخص‌های محیط زیستی مدل مفهومی DPSIR به کار گرفته شده است. همچنین برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ورامین از روش DRASTIC استفاده شده است. نرخ‌بندی و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS انجام شده، سپس نقشه آسیب‌پذیری ذاتی و نقشه خطرپذیری به دست آمده است. تاب‌آوری نهایی شاخص هیدروژئولوژی کمی و شاخص محیط زیستی توسط روش میانگین‌گیری وزنی AHP مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نقشه آسیب‌پذیری، بخش‌های شمال شرقی، مرکزی و بخشی از غرب دشت آسیب پذیری بالایی دارند و در بخش‌های شمال‌غربی، شرقی و جنوبی پتانسیل آلودگی کمتر است. نقشه خطرپذیری آبخوان نیز نشان می‌دهد که بخش‌های زیادی از غرب، مرکزی و شمال شرقی گستره آبخوان دارای خطرپذیری بالایی است. ارزیابی آبخوان دشت ورامین با استفاده از نتایج به دست آمده از شاخص هیدروژئولوژی کمی و شاخص محیط زیستی، بیانگر آن است که این آبخوان از نظر تاب‌آوری در وضعیت غیرتاب‌آور قرار دارد و نیازمند اقدامات سریع مدیریتی برای حفاظت از منابع آب‌زیرزمینی است.

واژه‌های کلیدی: *شاخص هیدروژئولوژی کمی و محیط زیستی، DRASTIC، آسیب‌پذیری ذاتی، دشت ورامین*

۱-مقدمه

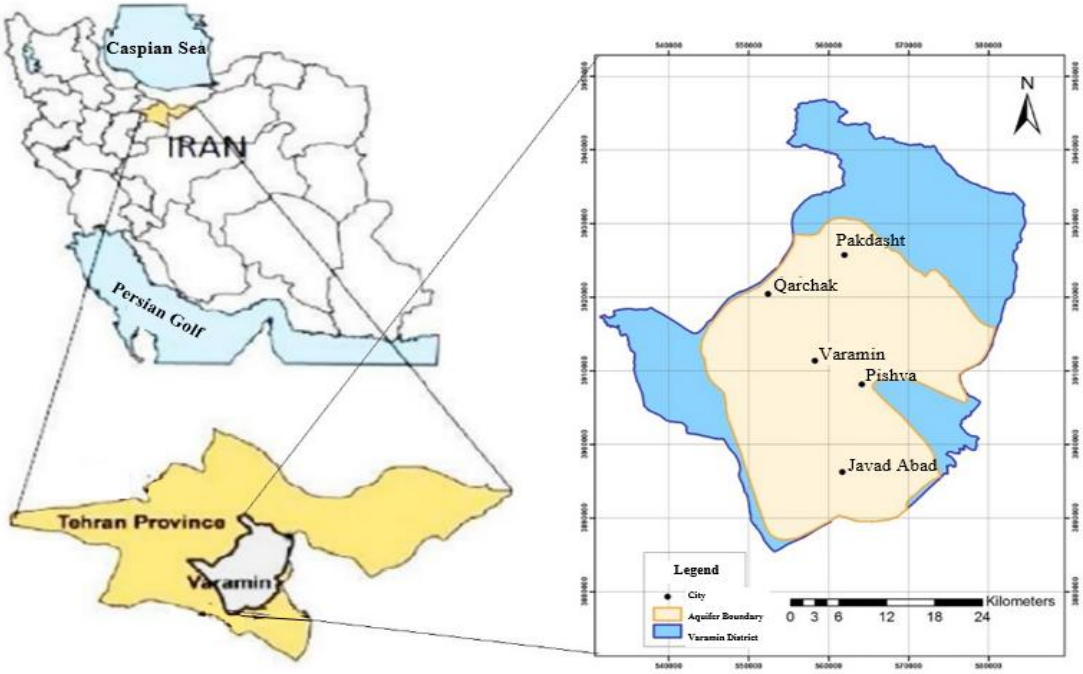
کیفیت و کمیت آب‌های زیرزمینی اغلب به دلیل رشد جمعیت، توسعه شهرها، گسترش کشاورزی و رشد اقتصادی در دهه‌های اخیر دچار چالش شده است. محدودیت کمی و کیفی منابع آب‌زیرزمینی سبب ایجاد رقابت برای استفاده از آن شده و نتیجه آن آسیب‌پذیری و ناپایداری آبخوان‌ها است (Sarami et al., 2024). در چنین شرایطی، شناخت وضعیت کنونی و آتی آبخوان و ارزیابی وضعیت تاب‌آوری آن برای بهره‌برداری مطمئن از منابع آب‌زیرزمینی الزامی است. بدین منظور از شاخص‌های ارزیابی وضعیت پایداری منابع آب‌زیرزمینی استفاده می‌شود (Borden and Goodwin, 2022, Ananda et al., 2023, Troy et al., 2023, Bozorgzadeh and Mousavi, 2023). مطالعات نشان می‌دهد که در ارزیابی پایداری منابع آب‌زیرزمینی باید پنج هدف اصلی شامل: جلوگیری از کاهش منابع آب‌زیرزمینی (کمیت آب‌های زیرزمینی)، حفاظت آب‌های زیرزمینی از آلودگی (کیفیت آب‌زیرزمینی)، حفاظت از حیات اکوسیستم، دستیابی به رفاه اقتصادی و اجتماعی و اعمال مدیریت مناسب، دنبال شود (Samani, 2021). به منظور شناسایی و کمی‌کردن شاخص‌ها برای ارزیابی پایداری منابع آب‌زیرزمینی از چارچوب ارزیابی تاب‌آوری منابع آب‌زیرزمینی GSAA (Approach Assessment Sustainability Groundwater) استفاده می‌شود. مراحل کاربرد این چارچوب شامل مؤلفه‌های ۱) شناسایی مسئله؛ ۲) مدل مفهومی DPSIR (نیروی محرکه، فشار، وضعیت، تاثیر و پاسخ)؛ ۳) تعریف شاخص‌های پایداری آب‌زیرزمینی؛ ۴) ایجاد ارتباط بین نتایج و ۵) ارتباط بین ذینفعان است. عدد پایداری محاسبه‌شده برای

هر شاخص، نشان‌دهنده میزان پایداری در یک گستره مطالعاتی است (Gordon Groundwater Consultancy, 2011). در توسعه شاخص‌های قابل اعتماد آب‌زیرزمینی ایجاد یک مدل مفهومی از رفتار آبخوان، اهمیت بسیاری دارد. سه مولفه مهم برای ایجاد یک مدل مفهومی از سیستم آب‌زیرزمینی و توسعه شاخص‌های قابل اعتماد آب‌زیرزمینی، عبارتند از: ۱) ارتباطات تحلیلی ساده بین مولفه‌های سیستم آب‌زیرزمینی و محاسبه بیلان آب‌زیرزمینی، ۲) شناسایی عوامل مختلف تاثیرگذار بر سیستم آب‌های زیرزمینی و ۳) تعیین نیازهای داده‌ای (Vrba and Lipponen, 2007). در این مطالعه با استفاده از شاخص‌های کمی آب‌زیرزمینی و شاخص‌های محیط زیستی و ادغام نتایج شاخص‌ها با روش‌های وزن‌دهی، میزان پایداری کلی در آبخوان دشت ورامین محاسبه شده است. از مقادیر شاخص‌ها برای ارزیابی طرح احیا و تعادل‌بخشی در آبخوان دشت ورامین نیز استفاده شده است.

۲-گستره مورد مطالعه

آبخوان دشت ورامین با وسعت ۹۷۱ کیلومتر مربع در جنوب شرقی استان تهران واقع است (شکل ۱). رودخانه اصلی این گستره، رودخانه جاجرود است که از ارتفاعات شمال دشت به سمت جنوب دشت جریان دارد. در حال حاضر به دلیل ساخت سد ماملو و تامین بخشی از آب شرب شهر تهران، تنها در سه تا چهار ماه از نیمه اول سال بخشی از جریان رودخانه مذکور وارد شبکه ورامین می‌شود. رودخانه شور نیز در غرب و جنوب منطقه جریان دارد و فصلی است و در تمام طول سال فاضلاب‌های بالادست در آن جریان دارند. منابع آب‌زیرزمینی آبخوان دشت ورامین تأمین‌کننده آب شرب، صنعت و بخش زیادی از آب کشاورزی است. بخش دیگری از آب مورد نیاز کشاورزی از طریق فاضلاب تصفیه‌شده تهران (از سال ۱۳۸۲) با حجم تقریبی ۱۱۵ میلیون متر مکعب در سال تامین می‌شود که این آب از تصفیه‌خانه جنوب شرق تهران به ایستگاه چهارگاه منتقل و سپس وارد کانال آبیاری ورامین می‌شود. تعداد چاه‌های فعال در منطقه بر اساس آخرین آمار تأییدشده شرکت مدیریت منابع آب ایران ۲۲۰۷ حلقه با حجم تخلیه ۴۱۳ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (Iran Water Resources Management Company, 2021). استفاده بیش از حد از منابع آب‌زیرزمینی، خشکسالی‌های اخیر، حفر چاه‌های غیرمجاز و منابع آلوده‌کننده آب‌های زیرزمینی، سبب بحرانی‌شدن وضعیت آبخوان دشت ورامین شده است. رخنمون‌های زمین‌شناسی گستره دشت ورامین شامل سازند کرج (قدیمی‌ترین سازند)، قرمز بالایی، هزاردره، کهریزک و آبرفت‌های کنونی (جدید ترین سازند) می‌باشند. در ارتفاعات شمالی دشت ورامین سازند کرج می‌باشد که نفوذپذیری آن متوسط تا ضعیف است. قرمز بالایی، هزاردره و کهریزک در شمال شرقی گستره رخنمون دارند. در شرق این گستره، ارتفاعات پیشوا پتانسیل تغذیه‌کنندگی ناچیزی دارند. در کل سازندهای شمالی گستره دشت ورامین، چندان تاثیری در تغییر کیفیت آبخوان دشت ورامین ندارند، اما در بخش‌های غربی و جنوب غرب این گستره، رخنمون‌های مارن، ژیپس، پهنه‌های رسی با ترکیبات سولفاته و ماسه‌سنگ وجود دارند که باعث تخریب کیفیت آب می‌شوند. آبخوان ورامین در نیمه جنوبی دشت دو لایه است. از جنوب تا بخش میانی، از ضخامت میان لایه‌های ریز دانه کم می‌شود. آبخوان تحت فشار جنوب دشت ورامین، به صورت تدریجی و میان انگشتی به لایه آبخوان آزاد تبدیل می‌شود. در بخش جنوبی لایه آزاد کم ضخامت بالایی، به علت بهره‌برداری بیش از اندازه و افت سطح آب، عملاً از بین رفته به طوری که برداشت اصلی از آبخوان زیرین انجام می‌شود و رفتار آبخوان تحت فشار در بخش جنوبی مشابه آبخوان آزاد شده است. در کل در دشت ورامین یک آبخوان آزاد اصلی وجود دارد که چاه‌ها در این لایه قرار دارند. بیشترین ضخامت آبخوان در شمال دشت ورامین ۳۰۰ متر و کمترین ضخامت آبرفت در جنوب غربی دشت ورامین ۱۵۰ متر است. تغذیه دشت ورامین توسط بارندگی، آبراهه‌های اصلی، پساب تصفیه‌خانه جنوب تهران و تغذیه زیرسطحی است. عمق آب‌زیرزمینی در آبخوان اصلی بین ۱۷۰-۳۰ متر زیر سطح زمین است. جهت عمومی جریان آب‌زیرزمینی در منطقه از شمال‌غرب به سمت جنوب‌شرق است (Nejatijahromi et al., 2018). در بخش شمالی دشت ورامین، مقدار قابلیت انتقال آبخوان تا بیش از ۳۰۰۰ مترمربع در روز برآورد می‌شود. مقدار قابلیت انتقال آبخوان از میانه شمالی مخروط افکنه جاجرود به سمت پیرامون آن به دلیل کاهش ضخامت لایه آبدار و دانه ریز شدن آبرفت‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. ضخامت آبرفت در غرب دشت به شدت کاهش پیدا می‌کند و آبرفت نیز دانه‌ریز است. به همین دلیل قابلیت انتقال در بخش غربی دشت پایین است، این مقدار در منطقه قرچک و کناره‌های رود شور به کمتر از ۱۰۰ مترمربع

در روز می‌رسد (Mahab Ghods Consulting Engineers, 1996).



شکل ۱ موقعیت آبخوان گستره دشت ورامین
Fig 1. Varamin plain aquifer

۳-روش کار

شاخص‌های تاب‌آوری آب‌زیرزمینی به صورت متغیرهای قابل اندازه گیری تعریف می‌شوند که اطلاعات مربوط به سیستم آب-زیرزمینی را به صورت قابل درک، ارائه می‌دهند. بر این اساس، در این مطالعه با ارائه شاخص‌های بخش کمی آب‌زیرزمینی و شاخص‌های محیط زیستی در قالب مدل DPSIR (Driving forces- Pressures- State- Impacts- Response) چارچوبی برای ارزیابی پایداری آبخوان، تعیین شده است. عدد پایداری محاسبه‌شده برای هر شاخص، میزان تاب‌آوری در گستره مطالعاتی ورامین در زمینه مرتبط با شاخص را تعیین کرده است. همچنین با تلفیق نتایج شاخص‌ها توسط روش‌های وزن‌دهی، میزان تاب‌آوری کلی در گستره مطالعاتی مورد نظر بدست آمده است. برای تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری ذاتی و خطرپذیری، نیاز به جمع آوری و آماده‌سازی داده‌ها، نرخ‌بندی، وزن‌دهی و تلفیق آن‌ها بوده است (شکل ۲). شاخص‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر در ادامه توضیح داده شده است.

۳-۱- شاخص‌های هیدروژئولوژی کمی:

برای ارزیابی تاب‌آوری آبخوان دشت ورامین از شاخص‌های هیدروژئولوژی کمی زیر استفاده شده است:

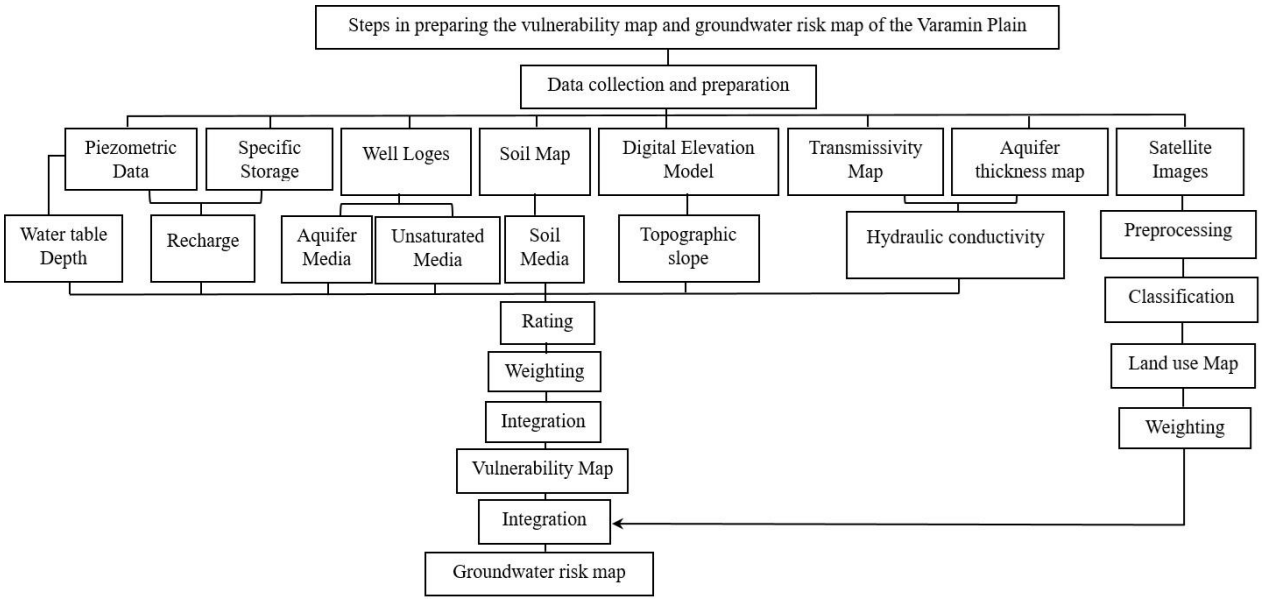
۳-۱-۱- شاخص سرانه منابع تجدیدپذیر آب زیرزمینی (IGWR):

این شاخص مقدار سالانه منابع آب‌زیرزمینی تجدیدپذیر نسبت به جمعیت را در سطح ملی یا منطقه‌ای بیان می‌کند. این شاخص برای محاسبه میزان آب شرب بهداشتی، آب برای مصارف کشاورزی (به ویژه برای آبیاری)، صنعت و زیست بوم موجود در یک منطقه، بکار می‌رود (Vrba and Lipponen, 2007). روابط ۱ و ۲ برای محاسبه شاخص سرانه منابع تجدید-پذیر آب‌زیرزمینی (Renewable groundwater resources Index or IGWR) استفاده می‌شود:

$$IGWR = GWR / (\sum P) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$GWR = R + S - BF + In - Out + AR \quad \text{(رابطه ۲)}$$

مجموع تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارش در گستره مورد مطالعه (مترمکعب در سال)، S: نفوذ از منابع آب سطحی (مترمکعب در سال)، BF: جریان آب‌های زیرزمینی به رودخانه‌ها (مترمکعب در سال)، In: جریان‌های ورودی زیرزمینی از آبخوان‌های مجاور(مترمکعب در سال)، Out: جریان‌های خروجی زیرزمینی به آبخوان‌های مجاور (مترمکعب در سال)، AR: تغذیه مصنوعی (مترمکعب در سال)، GWR: مقدار کل سالانه منابع آب‌زیرزمینی تجدیدپذیر (مترمکعب در سال)، ∑P: جمعیت ساکن در گستره مطالعاتی.



شکل ۲ روندنمای ارزیابی آسیب‌پذیری و خطرپذیری آبخوان دشت ورامین
Fig 2. Flowchart of assessing the vulnerability and risk of the Varamin Plain aquifer

۳-۱-۲- شاخص نسبت میزان برداشت آب به تغذیه آب‌زیرزمینی (I Ab/R):

از رابطه ۳ برای محاسبه شاخص نسبت میزان برداشت آب به تغذیه آب‌زیرزمینی (Total groundwater abstraction/ Groundwater recharge Index or I Ab/R) استفاده می‌شود.

$$I\ Ab/R = (\sum Ab) / (\sum R) \times 100 \quad \text{(رابطه ۳)}$$

∑Ab: مجموع برداشت منابع آب‌زیرزمینی (مترمکعب در سال)، ∑R: مجموع تغذیه منابع آب‌زیرزمینی (مترمکعب در سال).

سه سناریو برای تفسیر مقادیر این شاخص پیشنهاد شده است: سناریوی اول میزان برداشت کمتر از میزان تغذیه و میزان این شاخص کمتر از ۱۰۰ درصد باشد (وضعیت تاب‌آوری)؛ سناریوی دوم میزان برداشت بیشتر از میزان تغذیه و میزان شاخص بیشتر از ۱۰۰ درصد باشد (وضعیت ناتاب‌آوری)؛ و در سناریوی سوم میزان برداشت برابر با تغذیه باشد و میزان این شاخص ۱۰۰ درصد باشد، لازم به ذکر است که سناریوی برداشت برابر با تغذیه به معنای توسعه پایدار آب‌زیرزمینی نیست (Samani et al., 2020).

۳-۱-۳- شاخص نسبت برداشت به منابع آب‌زیرزمینی قابل بهره‌برداری (I Ab/E):

برای محاسبه میزان آب قابل بهره‌برداری فرض می‌شود که تغییرات حجم مخزن قرار است در ۲۵ سال جبران شود، این تغییرات به عدد ۲۵ تقسیم می‌شود تا سهم جبران برای یک سال محاسبه شود. سپس عدد به دست آمده از مقدار آب تجدیدپذیرکسر می‌شود. ۶۰ درصد این میزان جدید آب تجدیدپذیر به عنوان میزان آب قابل بهره‌برداری درنظر گرفته می‌شود. از رابطه ۴ برای محاسبه شاخص نسبت برداشت به آب‌زیرزمینی قابل بهره‌برداری (I Ab/ E Total groundwater abstraction/ Exploitable groundwater resources Index or) استفاده می‌گردد.

I Ab/E = (∑Ab) / (∑ E) ×100 (رابطه ۴)

∑Ab: مجموع برداشت منابع آب‌زیرزمینی (مترمکعب در سال)، ∑E: مجموع منابع آب‌زیرزمینی قابل بهره‌برداری (مترمکعب در سال).

۳-۱-۴- شاخص تقاضای آب‌زیرزمینی به کل منابع سطحی و زیرزمینی (I GWS):

این شاخص میزان تقاضا برای آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب در همه موارد کاربری را مشخص می‌کند، یعنی تقاضای آب‌های زیرزمینی در مقایسه با کل آب‌ها (آب‌های سطحی و زیرزمینی) قرار می‌گیرد (Vrba and Lipponen, 2007; Hirata et al., 2007). از رابطه ۵ برای محاسبه شاخص تقاضای آب-زیرزمینی به کل منابع سطحی و زیرزمینی (Degree of groundwater participation in water supply for all uses index or I GWS) استفاده می‌شود.

I GWS = (∑Ab) / (∑GW +∑S) × 100 (رابطه ۵)

∑Ab: مجموع برداشت منابع آب‌زیرزمینی (مترمکعب در سال)، ∑GW: مجموع منابع آب‌زیرزمینی موجود (مترمکعب در سال)، ∑S: مجموع منابع آب سطحی موجود (مترمکعب در سال)

۳-۱-۵- شاخص تغییر در ذخیره آب‌زیرزمینی در یک دوره مطالعاتی (I (ΔH)i):

در این شاخص وضعیت سطح آب‌زیرزمینی در ماه مورد نظر (در این مطالعه شهریور ۹۷ در نظر گرفته شده است)، نسبت به سطح آب در کمترین و بیشترین مقدار در طول دوره مطالعاتی برآورد می‌شود. از رابطه ۶ برای محاسبه شاخص تغییر در ذخیره آب‌زیرزمینی در یک دوره مطالعاتی (Variation in groundwater storage index or I(ΔH)i) استفاده شده است.

$$I(\Delta H)i = \frac{H\,i - H\,min}{H\,max - H\,min} \times 100$$ (رابطه ۶)

H i: سطح آب‌زیرزمینی در ماه: i، H max: حداکثر سطح آب‌زیرزمینی در دوره مطالعاتی، H min: حداقل سطح آب-زیرزمینی در دوره مطالعاتی

۳-۱-۶- شاخص تغییر در ذخیره آب‌زیرزمینی در مقایسه دو دوره کوتاه مدت و بلند مدت (I (ΔH)1, 2):

در این شاخص بررسی تغییر در ذخیره آب‌زیرزمینی در آبخوان، از مقایسه میانگین سطح آب‌زیرزمینی در یک دوره کوتاه مدت و در یک دوره بلند مدت انجام می‌شود (Senent-Aparicio et al., 2015). در این پژوهش دوره کوتاه مدت از مهر ۹۴ تا شهریور ۹۷ و دوره بلند مدت از مهر ۸۴ تا شهریور ۹۷ در نظر گرفته شده است. در این مقایسه دو حالت ممکن است حاصل شود؛ در حالت اول میانگین سطح آب‌زیرزمینی در یک دوره بلند مدت بیشتر از میانگین سطح آب‌زیرزمینی در یک دوره کوتاه مدت می‌باشد، که در این حالت برای محاسبه شاخص از رابطه ۷ و در حالت برعکس آن، برای محاسبه شاخص از رابطه ۸ استفاده می‌شود. روابط ۷ و ۸ برای محاسبه شاخص تغییر در ذخیره آب‌زیرزمینی در مقایسه دو دوره کوتاه مدت و بلند مدت (Variation in the groundwater depletion in the period studied, relative to the long-term average index or I(ΔH)1,2) عبارتند از:

If H S < H L $I(\Delta H)1 = \frac{H\,s - H\,L\,min}{H\,L - H\,L\,min} \times 100$ (رابطه ۷)

If H S > H L $I(\Delta H)2 = \frac{H\,s - H\,L}{H\,L\,Max - H\,L} \times 100$ (رابطه ۸)

H S: میانگین سطح آب‌زیرزمینی در یک دوره کوتاه مدت، H L: میانگین سطح آب‌زیرزمینی در دوره طولانی مدت، H L Max: حداکثر سطح آب‌زیرزمینی در دوره طولانی مدت، H L min: حداقل سطح آب‌زیرزمینی در دوره طولانی مدت.

۳-۱-۷- شاخص روند سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان (I GMN):

این شاخص بر اساس روند سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای تعیین می‌شود (Policy Research Initiative, 2007). در این شاخص از روند آب‌های زیرزمینی، با تعیین اینکه در چند چاه سطح آب در حال افزایش یافتن، در چند چاه سطح آب بدون تغییر و در چند چاه سطح آب در حال کاهش یافته است، استفاده شده است. رابطه ۹ برای محاسبه شاخص روند سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان (vulnerability of the groundwater supply index or I sv) بکار می‌رود.

$$I\,sv = \frac{r + 0.5\,n}{\Sigma\,A} \times 100$$ (رابطه ۹)

r: تعداد چاه‌هایی که سطح آب آفزایش یافته است، n: تعداد چاه‌هایی که سطح آب تغییری نداشته است، ΣA : تعداد کل چاه‌های موجود در گستره مطالعاتی

۳-۱-۸- شاخص نرخ پوشش شبکه پایش (I SV):

از این شاخص برای ارزیابی توانایی شبکه پایش در ایجاد داده‌های مربوط به سطح آب‌زیرزمینی در گستره مورد مطالعه استفاده می‌شود. در این شاخص برای محاسبه مساحتی از گستره مطالعاتی که تحت پوشش شبکه پایش قرار دارد، تعداد چاه‌های مشاهده‌ای در ۲۵ کیلومتر مربع (مناسب‌ترین حالت برای پایش کمی آبخوان، در نظرگرفتن یک چاه مشاهده‌ای در هر ۲۵ کیلومتر مربع از آبخوان است) ضرب شده است و مساحت حاصل به مساحت کل گستره مطالعاتی تقسیم شده است. از رابطه ۱۰ برای محاسبه شاخص نرخ پوشش شبکه پایش(The coverage of groundwater monitoring network index or I GMN) استفاده می‌شود.

$$I\ GMN = \frac{A\ GMN}{\Sigma A} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۰)}$$

A GMN: مساحتی از گستره مطالعاتی که تحت پوشش شبکه پایش قرار دارد (متر مربع)، ΣA: کل مساحت گستره مطالعاتی

امتیازات مربوط به هر شاخص و چارچوب مدل DPSIR شاخص‌ها در جدول ۱ تعریف شده است. شاخص‌های ذکر شده با توجه به اطلاعات و داده‌های در دسترس، توسط رابطه مربوط به هر شاخص، محاسبه شده‌اند.

جدول ۱ محاسبات شاخص‌های کمی و امتیازات هر شاخص

Table 1. Calculations of quantitative indicators and scores for each indicator

Quality Index	Index	Index Score
I GWR (Renewable groundwater resources Index)	97	0
I Ab/R (Total groundwater abstraction/ Groundwater recharge Index)	135.7	0
I Ab/E (Total groundwater abstraction/ Exploitable groundwater resources Index)	235.6	0
I GWS (Degree of groundwater participation in water supply for all uses index)	58	25
I (ΔH)i (Variation in groundwater storage index)	10.5	0
I (ΔH)1, 2 (Variation in the groundwater depletion in the period studied, relative to the long-term average index)	20.8	0
I SV (vulnerability of the groundwater supply index)	34	25
I GMN (The coverage of groundwater monitoring network index)	200	100

۳-۲- شاخص‌های محیط زیستی:

برای ارزیابی تاب‌آوری آبخوان دشت ورامین از شاخص‌های محیط زیستی زیر استفاده شده است:

۳-۲-۱- شاخص خشکسالی منابع آب‌زیرزمینی (GRI):

شاخص خشکسالی آب‌زیرزمینی به عنوان شاخص مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی آب و زمین‌شناسی معرفی شده است. این شاخص از یک مدل توازن آب ساده ایجاد شده است (Mendicino et al., 2008). بر اساس این شاخص می‌توان وضعیت خشکسالی آب‌زیرزمینی را تعیین کرد. برای محاسبه شاخص خشک‌سالی منابع آب‌زیرزمینی(GRI)، از رابطه ۱۱ استفاده می‌شود.

$$GRI = \frac{D\ y,m - \mu\ D,m}{\delta\ D,m} \qquad \text{(رابطه ۱۱)}$$

D y,m: تراز سطح ایستابی در ماه m از سال y ؛ μ D,m: میانگین داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال؛ δ D,m: انحراف معیار داده‌های سطح ایستابی ماه m برای D سال

۳-۲-۲- شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی (Iv):

روش DRASTIC توسط انجمن ملی آب‌زیرزمینی با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالت متحده ایجاد شده است (Aller et al., 1987). در این روش هفت عامل قابل اندازه گیری برای سیستم هیدروژئولوژیک برآورد می‌شود (Babiker et al., 2005). این عوامل شامل عمق آب‌زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی یا شیب سطح زمین، مواد تشکیل‌دهنده زون غیراشباع و هدایت هیدرولیکی هستند. بعد از تعیین مناطق مستعد آلودگی، شاخص آسیب‌پذیری محاسبه می‌شود. برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری (Groundwater vulnerability index or Iv)، از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود.

$$I\ v = \frac{\Sigma\ Av}{\Sigma\ A} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۲)}$$

Σ Av: مساحتی از گستره مطالعاتی که پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی دارد (مترمربع)؛ Σ A: کل مساحت گستره مطالعاتی (مترمربع).

۳-۲-۳- شاخص تنش (Is):

برای بررسی انواع فشارهای اعمال‌شده بر روی زیست‌بوم، شاخص تنش طراحی شده است. در این شاخص اگر نسبت GWR/C بیشتر از ۰/۴ باشد. امتیاز این شاخص صفر در نظر گرفته می‌شود و اگر این نسبت صفر باشد، امتیاز ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه شاخص تنش (Stress index or I s) از رابطه ۱۳ استفاده می‌شود.

$$\boldsymbol{I\,s} = \frac{\mathbf{0.4} - (\frac{C}{GWR})}{\mathbf{0.4}} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۳)}$$

C: مقدار آب مصرفی سالانه (مترمکعب)، GWR: منابع آب‌زیرزمینی تجدیدپذیر (مترمکعب)

۳-۲-۴- شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری (I VAP):

برای محاسبه شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری(Averaged variation of basin agricultural area and urban population in the period analyzed index or I VAP) از روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ استفاده می‌شود.

$$\Delta\, AA = \frac{AA\ End - AA\ Start}{AA\ Start} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۴)}$$

$$\Delta\, P = \frac{P\ End - P\ Start}{P\ Start} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۵)}$$

$$I\ VAP = \frac{\Delta\, AA + \Delta\, P}{2} \qquad \text{(رابطه ۱۶)}$$

Start: جمعیت و مساحت مناطق کشاورزی در زمان آغازین دوره مطالعاتی؛ End: جمعیت و مساحت مناطق کشاورزی در زمان پایانی دوره مطالعاتی؛ AA: مساحت زمین‌های کشاورزی (مترمربع)؛ Δ P: تغییرات جمعیت

۳-۲-۵- شاخص درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی (I AV):

شاخص درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی(Percent of basin area under natural vegetation index or Av) برای بررسی وضعیت محیط زیستی در گستره مطالعاتی تعریف می‌شود (Senent -Aparicio et al., 2015). اگر درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی در این شاخص کمتر از ۵ درصد باشد، امتیاز صفر است و اگر این درصد بیشتر از ۴۰ درصد باشد، امتیاز به ۱۰۰ خواهد رسید. این شاخص از روش سنجش از دور قابل بررسی می‌باشد.

۳-۲-۶- شاخص نسبت تأمین منابع آب غیرمتعارف به منابع آب متعارف (I NC):

شاخص نسبت تأمین منابع آب غیرمتعارف به منابع آب متعارف، رفتار جامعه در برابر جبران کمبود آب با استفاده از منابع آب غیرمتعارف در گستره مطالعاتی را ارزیابی می‌کند (Senent-Aparicio et al., 2015). منابع آب غیرمتعارف در یک گستره مطالعاتی شامل؛ آب تصفیه‌شده فاضلاب، شیرین‌سازی آب شور، بارورسازی ابرها، استخراج آب از مه، استحصال آب باران، آب‌های ژرف و آب انتقالی از حوضه‌های دیگر، در نظر گرفته شود. برای محاسبه شاخص نسبت تأمین منابع آب غیرمتعارف به منابع آب متعارف (Non-conventional water resources supply, relative to the conventional water resources in the period studied index or I NC) از رابطه ۱۷ استفاده می‌شود.

$$\boldsymbol{I\ NC} = \frac{\boldsymbol{V\ NC}}{\boldsymbol{V\ C}} \times 100 \qquad \text{(رابطه ۱۷)}$$

V C: حجم منابع آب متعارف در گستره مطالعاتی (مترمکعب)؛ V NC: حجم منابع آب غیرمتعارف مورد استفاده در گستره مطالعاتی (مترمکعب)

امتیازات مربوط به هر شاخص و چارچوب مدل DPSIR شاخص‌ها نیز در جدول ۲ تعریف شده است. شاخص‌های ذکر شده با توجه به اطلاعات و داده‌های در دسترس، توسط رابطه مربوط به هر شاخص، محاسبه شده‌اند.

به منظور تعیین آسیب‌پذیری آبخوان دشت ورامین از روش DRASTIC استفاده شده است. پردازش، تلفیق و تحلیل داده‌های مورد نیاز برای مدل DRASTIC و همچنین نمایش نتایج، در مراحل مختلف کار، در محیط نرم افزار GIS انجام شده است (جدول ۳).

جدول ۲ محاسبات شاخص‌های محیط زیستی و امتیازات هر شاخص

Table 2. Calculations of environmental indicators and scores for each indicator

Environmental Index	Index	Index Score
GRI (groundwater resources Index)	0.02	50
Iv (Groundwater vulnerability index)	22	75
I s (Groundwater stress index)	2.7	0
I VAP (Averaged variation of basin agricultural area and urban population in the period analyzed index)	20.6	0
I AV (Percent of basin area under natural vegetation index)	0	0
I NC (Non-conventional water resources supply, relative to the conventional water resources in the period studied index)	34	100

جدول ۳ داده‌های استفاده شده برای اجرای مدل DRASTIC در آبخوان دشت ورامین

Table 3. Data used to run the DRASTIC model in the Varamin Plain aquifer

Parameter	Data Sources	Format
Depth to water table	Piezometric data in 2018, well logs, hydrogeological reports	Point
Net Recharge	Precipitation, evapotranspiration, water table level, aquifer storage coefficient	Point/Chart
Aquifer media	81 productions well logs, hydrogeological and geological reports and maps	Point/Chart
Soil media	Land Capability Map (1/250000)	Vector
Topography	Digital elevation model (1/25000)	Point/Raster
Vadose zone	production well logs, geological reports	Point/Chart
Hydraulic Conductivity	Pumping test data, estimation based on aquifer media	Point

برای تعیین وزن پارامترها در روش DRASTIC، از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP: Analytical Hierarchy Process) استفاده شده است (Saaty, 1980). بدین منظور هفت پارامتر مورد نظر در مدل DRASTIC اولویت‌بندی شده، معیارها دوبه‌دو با یکدیگر مقایسه گردیده و اهمیت آنها نسبت به یکدیگر تعیین شده است. ورودی ماتریس مقایسه زوجی، وزن‌های تعیین شده و خروجی آن وزن‌های نسبی مربوط به معیارها می‌باشد (جدول ۴).

۴-نتایج و بحث

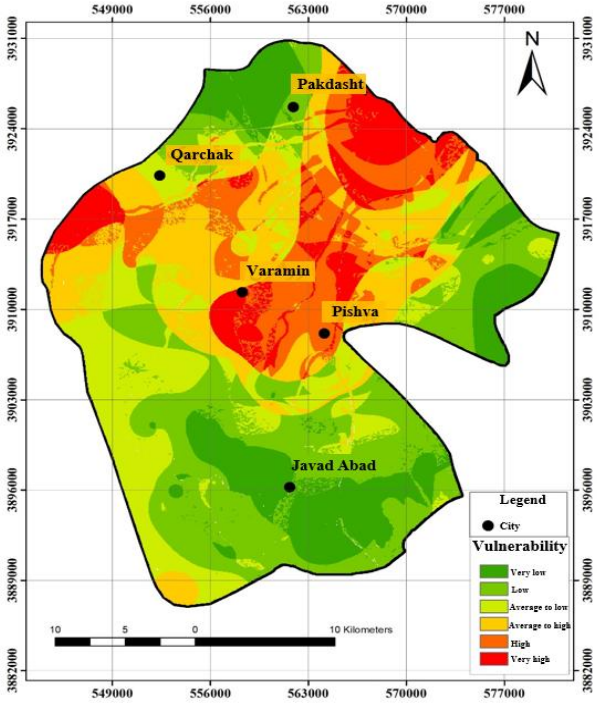
در این مطالعه شاخص‌های معرفی شده برای ارزیابی پایداری آبخوان ورامین به کار گرفته شده و کاربرد شاخص‌ها در گستره مطالعاتی بر اساس داده‌های موجود بررسی شده است. نتایج حاصل در ادامه به تفکیک شاخص‌ها بررسی شده است.

۴-۱- تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه آسیب‌پذیری ذاتی

با استفاده از نقشه‌های نرخ بندی شده و تلفیق آن‌ها با یکدیگر نقشه آسیب‌پذیری تهیه شده است (شکل ۳). با توجه به نقشه‌های موجود، نیمه شرقی آبخوان دارای آسیب‌پذیری کمتری نسبت به نیمه غربی آن است. البته در بخش شمال‌غربی و بخش بسیار کوچکی در زبانه جنوب‌شرقی آبخوان، میزان آسیب‌پذیری از کم تا متوسط متغیر است. بیشترین میزان آسیب‌پذیری که همان میزان بحرانی است، در مرکز آبخوان یعنی گستره شهر ورامین، پیشوا و شرق پاکدشت قابل مشاهده است. علت آسیب‌پذیری زیاد این گستره‌ها، تغذیه بیشتر، توپوگرافی مسطح‌تر، دانه‌درشت بودن ذرات محیط آبخوان، خاک و محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی بیشتر نسبت به دیگر گستره‌ها است. کمترین میزان آسیب‌پذیری در اطراف غرب پاکدشت، قرچک و جواد آباد دیده می‌شود.

جدول ۴ وزن پارامترهای مدل DRASTIC حاصل از روش AHP
Table 4. Weights of DRASTIC model parameters resulting from the AHP method

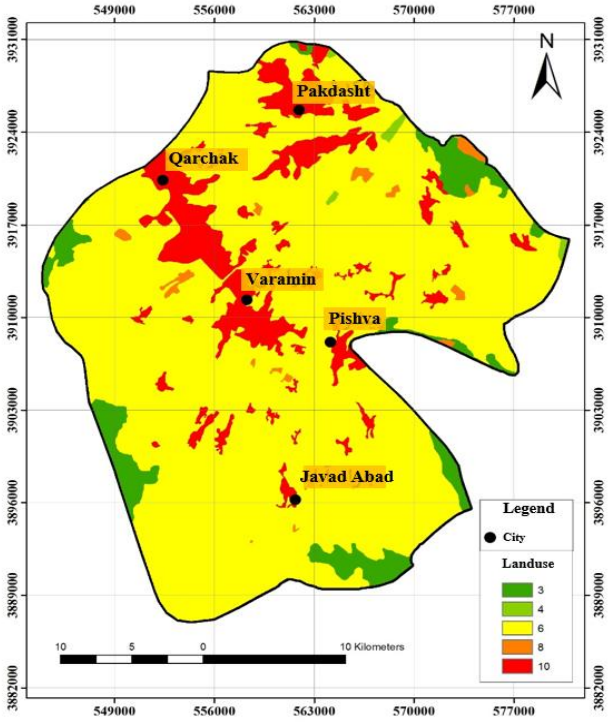
Parameter	Weighting
D: Depth to water table	0.262
R: net Recharge	0.157
I: Impact of vadose zone media	0.093
C: hydraulic Conductivity of the aquifer	0.073
A: Aquifer media	0.047
S: Soil media	0.021
T: Topography	0.014



شکل ۳ نقشه آسیب‌پذیری ذاتی گستره آبخوان دشت ورامین
Fig 3. Vulnerability map of the Varamin aquifer

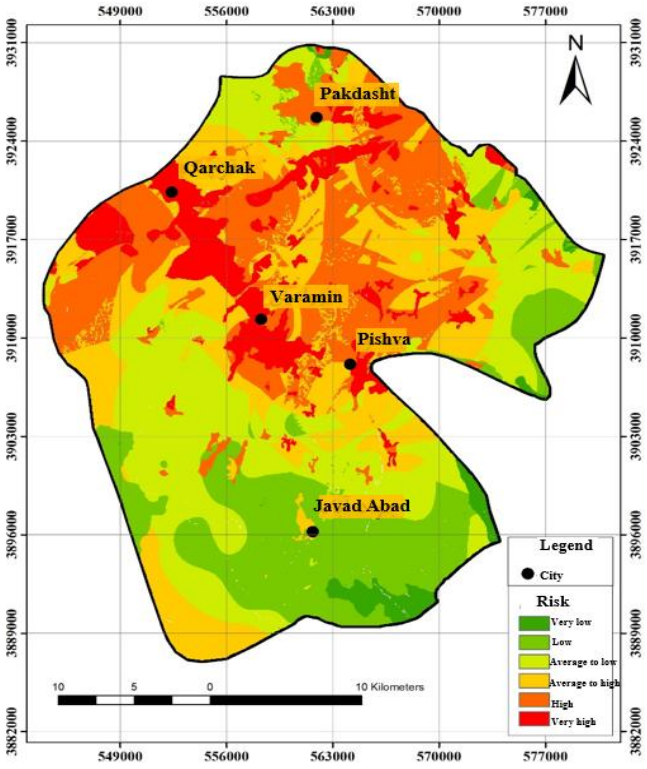
۴-۲- ترکیب نقشه کاربری اراضی با نقشه DRASTIC اصلاح شده و تهیه نقشه خطرپذیری

به دلیل اینکه نقشه آسیب‌پذیری ذاتی فقط نواحی آسیب‌پذیر را نشان می‌دهد، لازم است تا با اضافه‌کردن لایه کاربری اراضی، نقشه خطرپذیری نیز تهیه شود تا بتوان گستره مورد مطالعه را بهتر و دقیق‌تر بررسی کرد. گستره مورد مطالعه عمدتاً شامل بخش‌های زراعی و مسکونی است. بخش‌های صنعتی، زمین‌های کشاورزی، باغات، مراتع و زمین‌های بایر نیز در این گستره وجود دارند. براین اساس ابتدا نقشه نرخ‌بندی‌شده کاربری اراضی گستره آبخوان دشت ورامین تهیه شده (شکل ۴)، سپس با افزودن آن به نقشه DRASTIC با وزن‌های اصلاح شده AHP نقشه خطرپذیری به‌دست آمده است (شکل ۵).



شکل۴ نقشه نرخ‌بندی شده کاربری اراضی گستره آبخوان دشت ورامین

Fig. 4. Landuse rating map of the Varamin aquifer



شکل ۵ نقشه خطرپذیری گستره آبخوان دشت ورامین

Fig 5. Risk map of the Varamin aquifer

با توجه به نقشه خطرپذیری، بخش‌های زیادی از مرکز و غرب گستره آبخوان دشت ورامین دارای خطرپذیری بالایی است. این در حالی است که به طرف مرزهای جنوبی و غربی از میزان خطرپذیری کاسته می‌شود. به طوری که در جنوب غربی گستره کمترین میزان خطرپذیری وجود دارد، اما از مرکز به سمت شرق گستره، میزان خطرپذیری افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین میزان خطرپذیری در بخش مرکزی گستره آبخوان و بین شهرهای ورامین، پیشوا و قرچک قابل مشاهده است. در شمال بخش مذکور، یعنی در پاکدشت، بالاترین میزان خطرپذیری است. علت خطرپذیری زیاد این بخش‌ها، اراضی مسکونی و صنعتی است. به سمت زبانه جنوب گستره آبخوان (به طرف جوادآباد) از میزان خطرپذیری کاسته می‌شود.

۴-۳- نتایج ارزیابی و محاسبه شاخص‌های کمی

شاخص‌های کمی به کار گرفته شده در این مطالعه، طبق نتایجی که از محاسبه آن‌ها حاصل شده، ارزیابی شده است. نتایج محاسبه شاخص سرانه منابع آب تجدیدپذیر نشانگر این است که آبخوان دشت ورامین با توجه به مقدار شاخص و امتیاز مربوط به این مقدار، ناپایدار است و میزان منابع آب تجدیدپذیر متناسب با جمعیت این گستره مطالعاتی نیست. استفاده بیش از حد از منابع آب‌زیرزمینی، این منابع حیاتی و با ارزش را با خطرات جدی روبرو خواهد کرد. براساس نتایج محاسبه شاخص میزان برداشت و تغذیه آب‌زیرزمینی، آبخوان دشت ورامین ناپایدار است و میزان برداشت از این آبخوان با میزان تغذیه آبخوان هماهنگی ندارد. نتایج محاسبه شاخص نسبت کل برداشت به کل منابع آب‌زیرزمینی نشانگر این است که آبخوان دشت ورامین با توجه به مقدار شاخص و امتیاز مربوط به این مقدار، تاب‌آوری ندارد و از منابع آب‌زیرزمینی این دشت بیش از اندازه برداشت می‌شود، بنابراین اگر برای بهبود این وضعیت تصمیماتی اتخاذ نشود آبخوان با مشکلات جدی‌تری روبرو خواهد شد. نتایج محاسبه شاخص تقاضای آب‌زیرزمینی به کل منابع سطحی و زیرزمینی نشان می‌دهد که آبخوان دشت ورامین از تاب‌آوری پایین برخوردار است به این دلیل که از منابع آب‌زیرزمینی بیش از اندازه بهره‌برداری شده و باعث پایین افتادن سطح آب‌زیرزمینی آبخوان دشت ورامین شده است.

براساس نتایج محاسبه شاخص تغییر در ذخیره آب-زیرزمینی در دوره مطالعاتی، آبخوان دشت ورامین پایدار نبوده و سطح آب‌زیرزمینی آبخوان افت کرده است. نتایج محاسبه شاخص تغییر در ذخیره آب‌زیرزمینی در مقایسه دو دوره کوتاه مدت و بلند مدت نشانگر این است که آبخوان دشت ورامین با توجه به مقدار شاخص و امتیاز مربوط به این مقدار، تاب‌آور نیست و افت سطح آب‌زیرزمینی در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، می‌تواند دلیل این موضوع باشد. نتایج محاسبه شاخص روند سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای آبخوان نشان داده است که آبخوان دشت ورامین از تاب‌آوری پایین برخوردار است به این دلیل که تعداد چاه‌هایی که سطح آب در آن‌ها افزایش داشته است کمتر از تعداد کل چاه‌های موجود در گستره مطالعاتی است. با توجه به نتایج محاسبه شاخص نرخ پوشش شبکه پایش، آبخوان دشت ورامین با توجه به مقدار شاخص و امتیاز مربوط به این مقدار، پایدار است که دلیل آن توزیع مناسب پیزومترها نسبت به کل مساحت گستره مطالعاتی و پوشش مناسب شبکه پایش آب‌زیرزمینی این آبخوان است.

۴-۴- نتایج ارزیابی و محاسبه شاخص‌های محیط زیستی

در پژوهش حاضر از شش شاخص ارائه شده در رده شاخص‌های محیط زیستی استفاده شده است. نتایج محاسبه شاخص خشکسالی منابع آب‌زیرزمینی نشان داده است که آبخوان دشت ورامین با توجه به مقدار شاخص و امتیاز مربوط به این مقدار، از تاب‌آوری متوسط برخوردار است و در صورت ادامه روند برداشت بیش از حد از آبخوان، در این گستره مطالعاتی خشکسالی حاکم خواهد شد و غیر تاب‌آوری محیط زیستی این آبخوان را به دنبال خواهد داشت. براساس نتایج محاسبه شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی که توسط مدل DRASTIC انجام شده است، آبخوان دشت ورامین نسبتا پایدار است و مساحت گستره آسیب‌پذیر که توسط نقشه خطرپذیری بدست آمده است، نسبت به کل مساحت گستره مطالعاتی، از درصد کمتری برخوردار است. نتایج محاسبه شاخص تنش نشانگر این است که آبخوان دشت ورامین با توجه به مقدار شاخص و امتیاز مربوط به این مقدار، ناپایدار است. زیرا میزان آب مصرفی سالانه متناسب با میزان آب‌زیرزمینی تجدیدپذیر نیست و از منابع آب-زیرزمینی بیش از حد بهره‌برداری می‌شود.

با توجه به نتایج محاسبه شاخص میانگین تغییرات سطح مناطق کشاورزی و جمعیت شهری، آبخوان دشت ورامین ناپایدار است. سطح مناطق کشاورزی و جمعیت ساکن در گستره مطالعاتی، با منابع آب‌زیرزمینی موجود در دشت متناسب نیست و باعث تاب‌آور نبودن آبخوان دشت ورامین

توسط بهره‌برداری بیش از حد از آبخوان شده است. نتایج محاسبه شاخص درصد حوضه تحت پوشش گیاهی طبیعی با استفاده نقشه کاربری اراضی دشت ورامین، نشانگر این است که این گستره فاقد پوشش گیاهی طبیعی است. بنابراین آبخوان دشت ورامین باتوجه به این شاخص ناپایدار است. نتایج محاسبه شاخص نسبت تامین منابع غیرمتعارف آب به منابع متعارف آب نشان می‌دهد که آبخوان دشت ورامین پایدار است و از منابع آب غیرمتعارف برای جبران کمبود آب در گستره مطالعاتی استفاده شده است.

۴-۵- ترکیب و ادغام شاخص‌های کمی و محیط زیستی

برای ترکیب و ادغام شاخص‌ها، مانند مقایسه زوجی روش DRASTIC، نیاز به ارزش‌گذاری و وزن‌دهی شاخص‌های کمی و محیط زیستی است. این وزن‌ها در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده اند.

جدول ۵ ارزش‌گذاری شاخص‌های کمی نسبت به هم

Table 5. Valuing quantitative indicators relative to each other

	I GWR	I AB/E	I AB/R	I (dH)i	I GWS	I (dH)1	I SV	I GMN	AHP
I GWR	1								0.313
I AB/E	3	1							0.213
I AB/R	3	2	1						0.185
I (dH)i	4	3	3	1					0.122
I GWS	4	4	4	3	1				0.084
I (dH)1	5	6	6	5	4	1			0.044
I SV	7	7	8	7	7	4	1		0.024
I GMN	9	8	9	9	8	6	4	1	0.015

جدول ۶ ارزش‌گذاری شاخص‌های محیط زیستی نسبت به هم

Table 6. Valuing quantitative indicators relative to each other

	I V	GRI	I VAP	I S	I AV	I NC	AHP
I V	1						0.426
GRI	3	1					0.296
I VAP	5	4	1				0.137
I S	5	6	3	1			0.077
I AV	7	8	5	3	1		0.042
I NC	8	9	8	6	4	1	0.022

۴-۵-۱- ترکیب و ادغام شاخص‌های هیدروژئولوژی کمی بر اساس میانگین‌گیری ساده و میانگین وزنی AHP لایه‌ها

ادغام شاخص‌ها از طریق یک روش میانگین‌گیری ساده برای رسیدن به عدد نهایی در ارزیابی پایداری کمی آبخوان ورامین انجام شد. امتیازات مربوط به همه شاخص‌های کمی و میانگین بدست آمده از آن‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. بر این اساس گستره آبخوان دشت ورامین در وضعیت ناپایدار قرار دارد. همچنین ادغام شاخص‌های هیدروژئولوژی کمی از طریق روش AHP برای رسیدن به عدد نهایی در ارزیابی پایداری کمی آبخوان ورامین صورت گرفت. امتیازات مربوط به همه شاخص‌های کمی، وزن به دست آمده از روش AHP برای هر شاخص و میانگین وزنی حاصل از آن در جدول ۸ ارائه شده است.

۴-۵-۲- ترکیب و ادغام شاخص‌های محیط زیستی بر اساس میانگین‌گیری ساده و میانگین وزنی AHP لایه‌ها

ادغام شاخص‌ها از طریق یک روش میانگین‌گیری ساده برای رسیدن به عدد نهایی در ارزیابی پایداری گستره آبخوان ورامین صورت گرفت. امتیازات مربوط به همه شاخص‌های محیط

زیستی و میانگین حاصل از آنها در جدول ۹ ارائه شده است. بر این اساس گستره آبخوان دشت ورامین در پایداری پایین قرار دارند. همچنین ادغام شاخص‌ها از طریق یک روش میانگین-گیری وزنی برای رسیدن به عدد نهایی در ارزیابی پایداری محیط زیستی گستره آبخوان ورامین صورت گرفته است. امتیازات مربوط به همه شاخص‌های محیط زیستی، وزن به دست آمده از روش AHP برای هر شاخص و میانگین وزنی حاصل از آن در جدول ۱۰ ارائه شده است.

۴-۵-۳- ترکیب شاخص‌های کمی و محیط زیستی بر اساس میانگین وزنی AHP

ادغام شاخص‌های کمی و محیط زیستی، از روش میانگین‌گیری وزنی AHP برای رسیدن به عدد نهایی در ارزیابی پایداری گستره مورد مطالعه انجام شد. در این روش بیشترین امتیاز به شاخص کمی و کمترین امتیاز مربوط به شاخص محیط زیستی است. امتیازات مربوط به شاخص‌ها، وزن به دست آمده از روش AHP برای هر شاخص و میانگین وزنی حاصل از آن در جدول ۱۱ ارائه شده است. بر اساس این جدول گستره آبخوان ورامین در محدوده ناپایداری قرار دارد.

۴-۶- ارزیابی تاب‌آوری آبخوان دشت ورامین

محاسبه تاب‌آوری آبخوان دشت ورامین از طریق بررسی شاخص‌های کمی و محیط زیستی صورت گرفت. برای ادغام این شاخص‌ها از روش AHP استفاده شد. میانگین وزنی که از این طریق بدست آمد، نشانگر این است که گستره مورد مطالعه تاب‌آور نیست و نیاز به اقدامات مدیریتی سریع برای حفاظت از منابع آب‌زیرزمینی دارد. اگر این اقدامات و چاره اندیشی‌ها به سرعت انجام نشوند و برنامه‌های مدیریتی و سیاست‌ها اتخاذ نشود، آسیب‌های جبران ناپذیری بر آبخوان مورد مطالعه وارد خواهد شد.

جدول ۷ امتیاز همه شاخص‌های کمی و میانگین آن‌ها
Table 7. Score of all quantitative indicators and their average

Quantitative indicators	I GWR	I Ab/R	I Ab/E	I GWS	I (ΔH)i	I (ΔH)1	I SV	I GMN	Mean	Final Score
Score	0	0	0	25	0	0	25	100	18.7	0-25

جدول ۸ امتیاز همه شاخص‌های کمی و امتیاز میانگین وزنی AHP برای شاخص‌های هیدروژئولوژی کمی
Table 8. Score of all quantitative indicators and AHP weighted average score for quantitative hydrogeological indicators

Quantitative indicators	I GWR	I Ab/E	I Ab/R	I GWS	I (ΔH) i	I (ΔH)1	I SV	I GMN	AHP Weighted average	Final Score
Index	0.273	0.232	0.198	0.082	0.099	0.064	0.033	0.019	0.5	0-25
Score	0	0	0	25	0	0	25	100		

جدول ۹ امتیاز همه شاخص‌های محیط زیستی و میانگین آن‌ها
Table 9. Score of all environmental indicators and their average

Environmental indicators	GRI	I v	I s	I VAP	I AV	I NC	Mean	Final Score
Score	50	75	0	0	0	100	37.5	25-50

جدول ۱۰ امتیاز همه شاخص‌های محیط زیستی و امتیاز میانگین وزنی AHP برای این شاخص‌ها
Table 10. Score of all environmental indicators and AHP weighted average score for environmental indicators

Environmental indicators	GRI	I v	I s	I VAP	I AV	I NC	AHP Weighted average	Final Score
Index	0.284	0.375	0.097	0.167	0.049	0.027	7.5	0-25
Score	50	75	0	0	0	100		

جدول ۱۱ امتیاز شاخص‌های کمی و محیط زیستی و امتیاز میانگین وزنی AHP این شاخص‌ها

Table 11. Scores of quantitative indicators and environmental indicators and the AHP weighted average score of these indicators

	AHP new weight	Weighted average	Final weighted average	Final Score
Quantitative indicators	0.75	0.5	2.1	0-25
Environmental indicators	0.25	7.5		

۵-نتیجه‌گیری

نقشه نهایی آسیب‌پذیری که از تلفیق هفت لایه اطلاعاتی در محیط GIS تهیه شده است، نمایانگر این است که به طور کلی بخش‌های شمال‌شرقی، مرکزی و بخشی از غرب منطقه آسیب-پذیری بالایی دارند. پتانسیل آلودگی در بخش‌های شمال غربی، شرق و جنوبی کمتر است. اطراف شهر ورامین و پیشوا دارای آسیب‌پذیری زیاد می‌باشند. علت آسیب‌پذیری زیاد این بخش-ها، تغذیه بیشتر، توپوگرافی مسطح‌تر، دانه‌درشت بودن ذرات محیط آبخوان، خاک و محیط غیراشباع و هدایت هیدرولیکی بیشتر نسبت به دیگر بخش‌ها است. همچنین نواحی پاکدشت، جوادآباد و قرچک دارای پتانسیل آلودگی متوسط تا کم می-باشند. با توجه به نقشه خطرپذیری می‌توان گفت که بخش‌های زیادی از غرب، نواحی مرکزی و شمال شرقی گستره آبخوان دارای خطرپذیری بالایی است. این در حالی است که به طرف مرزهای شرقی، شمال‌غربی و جنوب منطقه از میزان خطرپذیری کاسته می‌شود. در بخش جنوب‌غربی آبخوان نیز میزان خطرپذیری پایین است. بیشترین میزان خطرپذیری در بخش مرکزی آبخوان و بین شهرهای ورامین، پیشوا، قرچک و پاکدشت است. در جنوب‌شرقی گستره یعنی در جنوب جوادآباد میزان خطرپذیری کم می‌شود. علت خطرپذیری زیاد این بخش‌ها، کاربری اراضی مسکونی و صنعتی است. به سمت زبانه شرقی گستره آبخوان از میزان خطرپذیری کاسته می‌شود. گستره آبخوان دشت ورامین از لحاظ شاخص‌های کمی و محیط زیستی، در وضعیت غیر تاب‌آور قرار دارد. ادغام شاخص‌های پایداری کمی و محیط زیستی نشان می‌دهد که در آبخوان دشت ورامین پایداری منابع آب‌زیرزمینی پایین و بین صفر تا ۲۵ است. وضعیت آبخوان دشت ورامین با توجه به شاخص‌های تاب‌آوری نمایانگر نیاز به اقدامات سریع مدیریتی برای حفاظت از منابع آب‌زیرزمینی است.

مراجع

Aller, L.T., Bennett, H.J.R., Lehr, R., Petty, J., Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using geo-hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency Report. EPA600/2- EP87/036.

Ananda, F., Nofrizal, N., Yoswaty, D., Farida, L., Hamidy, R., 2023. Integrating environmentally friendly management of water resources toward ecological and socioeconomic sustainability. International Journal of Energy Economics and Policy 13 (3), 73–79. https://doi.org/10.32479/ijeep.14310

Babiker, I.S., Mohamed, M.A., Hiyama, T., Kato, K., 2005: A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, and central Japan. Science of the Total Environment 345(1-3), 127-140.

Borden, C., Goodwin, P., 2022. A framework tool for conceptualizing integrated water resources for sustainable water management. River 1 (1), 60–79. https://doi.org/10.1002/rvr2.14.

Bozorgzadeh, E., Mousavi, S.J., 2023. Water-constrained green development framework based on economically allocable water resources. Scientific Reports 13 (1), 5306, 1-15. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31550-7

Gordon Groundwater Consultancy, 2011. Sustainable Groundwater Management: Preliminary Approach for Assessing the Sustainability of Groundwater, submitted to CCME Water Management Development Committee, p. 48.

Hirata, R., Suhogusoff, A., Fernandes, A., 2007. Groundwater resources in the State of São Paulo (Brazil): the application of indicators. Anais da Academia Brasileira de Ciências 79(1), 141-152.

Iran Water Resources Management Company, 2021. Hydrographic database of groundwater levels in Iranian plains.

Mahab Ghods Consulting Engineers, 1996. Report on groundwater studies in the Varamin Plain.

Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P., 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. Journal of Hydrology 357(3-4), 282-302.

Nejatijahromi, Z., Nassery, H.R., Nakhaei M., Alijani F., 2018. Assessment of the quality of groundwater for drinking purposes in Varamin aquifer: heavy metals contamination. Iranian Journal of Health and Environment 10(4), 559-72.

Policy Research Initiative, 2007. Canadian Water Sustainability Index (CWSI) project report. Government of Canada.

Regional water company of Tehran, 2021. Evaluation report of the water resources restoration and balancing plan for the Varamin study area.

Saaty, T.L., 1980. The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority. Resource Allocation. RWS Publications USA.

Samani, S., 2021, Assessment of groundwater sustainability and management plan formulations through the integration of hydrogeological, environmental, social, economic and policy indices, Groundwater for Sustainable Development 15, 100681. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100681.

Samani, S., Roozbahani, R., Kavoosi Heydari, A., Kardan Moghaddam, H., 2020. A Framework for Indicator-Based Water Sustainability Assessment. Journal of Water and Sustainable Development 7(1), 49-60. DOI: 10.22067/jwsd.v7i1.80946.

Sarami-Foroushani, T., Balali, H., Movahedi, R., Partelow, S., 2024. Indicator assessment of groundwater resource sustainability: Using the framework of socio-ecological systems in Hamedan -Bahar Plain, Iran, Journal of Hydrology: Regional Studies 54, 1-18. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101889.

Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., García-Aróstegui, J., Bielsa-Artero, A., Domingo-Pinillos, J., 2015. Evaluating groundwater management sustainability under limited data availability in semiarid zones. Water 7(8), 4305-4322.

Troy, T.J., Bowling, L.C., Jame, S.A., Lee, C.I., Liu, J., Perry, C., Richter, B., 2023. Envisioning a sustainable agricultural water future across spatial scales. Environmental Research Letters 18 (8), 1-11. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ace206

Vrba, J., Lipponen, A., 2007. Groundwater resources sustainability indicators. UNESCO, IAEA, IAH. IHP-VI, Series on Groundwater.