Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Spring 2024: Vol 2, Issue 1
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783456

Review Article

Reviewing the evaluation methods for determining aquifer vulnerability in Iran using the Drastic method

Mohammadreza Pakbaz[1]*, Mehran Iranpour Mobarake[2]

1 Department of Civil Engineering, Aqiq non-profit institute, Isfahan, Iran.
2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lanjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author: mohammadrezapakbaz5257@gmail.com
© The Author)s(2024

Received: 04 Nov 2023 Accepted: 27 Jun 2024 Published: 14 Jul 2024

Extended Abstract

Extended Abstract

Introduction

Groundwater is a critical resource, especially in arid and semi-arid regions, where it serves as the primary source of freshwater. However, the increasing contamination of groundwater due to human activities such as agriculture, industry, and urbanization has become a significant concern. Preventing groundwater pollution is essential, as remediation is often costly and complex. One effective approach to managing groundwater resources is assessing their vulnerability to contamination. This study evaluates the vulnerability of aquifers in 12 regions across Iran using the DRASTIC model, a widely used method for assessing groundwater vulnerability. The results provide valuable insights for decision-makers to implement preventive measures and manage groundwater resources sustainably.

Materials and Method

The DRASTIC model was employed to assess groundwater vulnerability in 12 selected regions of Iran. The model evaluates 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 weight and rating based on its influence on groundwater vulnerability. Geographic Information System (GIS) tools were used to integrate and analyze spatial data, creating vulnerability maps for each region. Sensitivity analysis was conducted to determine the relative importance of each parameter, and the model was validated using nitrate concentration data from groundwater samples.

Results and Discussions

The results revealed varying levels of groundwater vulnerability across the studied regions. Areas with high vulnerability were primarily located in regions with shallow water tables, high recharge rates, and permeable aquifer media. Sensitivity analysis indicated that the depth to the water table and the impact of the vadose zone were the most influential parameters in determining vulnerability. The validation process using nitrate concentrations showed a strong correlation between high vulnerability zones and areas with elevated nitrate levels, confirming the model's accuracy. The study also highlighted the importance of land use in influencing groundwater contamination, with agricultural and industrial areas showing higher vulnerability due to the presence of pollutants such as fertilizers and industrial waste.

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Spring 2024: Vol 2, Issue 1
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783456

Conclusion

The DRASTIC model proved to be an effective tool for assessing groundwater vulnerability in the studied regions of Iran. The results underscore the need for targeted management strategies to protect vulnerable aquifers from contamination. Preventive measures, such as regulating agricultural practices, controlling industrial discharges, and implementing land-use planning, are essential to safeguard groundwater resources. The findings also emphasize the importance of continuous monitoring and the use of advanced tools like GIS for sustainable groundwater management. Future research should focus on refining the DRASTIC model by incorporating additional parameters and validating it in diverse hydrogeological settings to enhance its applicability and accuracy.

Keywords: Groundwater, Vulnerability, Iran, Aquifer, Drastic

Extended Abstract

Technical Strategies in Water Systems
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
ISSN (Online): 2981-1449
Spring 2024: Vol 2, Issue 1, 83-102
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783456

Review Article

Reviewing the evaluation methods for determining aquifer vulnerability in Iran using the Drastic method

Mohammadreza Pakbaz[1]*, Mehran Iranpour Mobarake[2]

1 Department of Civil Engineering, Aqiq non-profit institute, Isfahan, Iran.
2 Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Lanjan Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

Corresponding Author: mohammadrezapakbaz5257@gmail.com
© The Author(s) 2024

Received: 04 Nov 2023 Accepted: 27 Jun 2024 Published: 14 Jul 2024

Abstract

Determining the vulnerability and risk of groundwater is necessary for groundwater management. Cleaning up polluted groundwater is a costly undertaking. Various factors degrade groundwater quality, including point sources and diffuse sources of pollution, often linked to human activities that allow pollutants to enter aquifers. Therefore, it is necessary to use suitable and affordable methods to prevent pollution of groundwater resources at the source. The purpose of this research is to evaluate the methods of determining the vulnerability of aquifers using the drastic model in 12 regions located in some parts of Iran. The evaluation of each region is presented based on different indicators which help the removing pollution executors of underground water systems in order to choose, reuse or present new methods. In addition, the challenges and research gaps of the existing plains were evaluated in the explanation of each method, which can be the subject of future research works.

***Keywords**:* Groundwater, Vulnerability, Iran, Aquifer, Drastic

مجله راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی
https://sanad.iau.ir/journal/tsws
شاپا الکترونیکی: ۲۹۸۱-۱۴۴۹
بهار ۱۴۰۳، دوره دو، شماره۱، ۱۰۲-۸۳
https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.783456

مقاله مروری

مروری بر ارزیابی روش‌های تعیین آسیب‌پذیری برخی از آبخوان‌های ایران به روش دراستیک

محمدرضا پاکباز [۱*]، مهران ایرانپور مبارکه [۲]

۱. گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی عقیق، اصفهان، ایران.
۲. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لنجان، اصفهان، ایران.

نویسنده مسئول: mohammadrezapakbaz5257@gmail.com
© The Author(s) 2024

دریافت:۱۴۰۲/۰۸/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۷ چاپ: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

چکیده

برای مدیریت آب زیرزمینی، تعیین آسیب‌پذیری و ریسک آب زیرزمینی اجتناب ناپذیر است. همچنین رفع آلودگی آب زیرزمینی، هزینه‌های زیادی را در بر خواهد داشت، از این‌رو لازم است از روش‌های مناسب و مقرون به صرفه برای پیشگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی استفاده گردد. از جمله عواملی که سبب کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌گردد؛ وجود منابع مهم آلاینده‌های منتشر شده و نقطه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی در سطح زمین و نفوذ این آلاینده‌ها به آبخوان‌هاست. به همین منظور جلوگیری از آلودگی این آب‌ها در مدیریت منابع آب زیرزمینی، ضروری است. هدف این پژوهش ارزیابی روش‌های تعیین آسیب‌پذیری آبخوان‌ها با استفاده از مدل دراستیک در ۱۲ منطقه واقع در برخی نقاط کشور ایران است. ارزیابی هر منطقه بر اساس شاخص‌های متفاوتی ارائه شده است که به مجریان برطرف‌کننده آلودگی‌های سیستم‌های آب زیرزمینی در جهت انتخاب، استفاده مجدد و یا ارائه روش‌های جدید کمک می‌کند. به‌علاوه در توضیح هر روش، چالش‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی دشت‌های موجود مورد بررسی قرار گرفتند که می‌توانند موضوع کارهای تحقیقاتی در آینده باشند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آسیب‌پذیری، ایران، آبخوان، دراستیک

۱- مقدمه

امروزه مسائل زیست محیطی با رشد روز افزون تکنولوژی، صنعتی‌تر شدن جهان، رشد جمعیت و کاهش سریع منابع سالم آب، افزایش یافته‌اند. از سوی دیگر از گذشته به دلیل اهمیت آب در سلامت انسان، به منابع آب و مسائل مربوط به آن توجه شده است(Azad et al., 2011). به همین منظور به دلیل محدود بودن منابع آب سطحی، آب زیرزمینی تنها منبع قابل اعتماد آب شیرین در بسیاری از کشورهای دنیا محسوب می‌شود (Mahmoudpour et al., 2021). آب زیرزمینی یکی از منابع مهم و برجسته تامین آب در تمامی کشورها، بخصوص در مناطق خشک و نیمه خشک به‌حساب می‌آید. آلودگی منابع آب به یکی از معضلات جدی در سراسر جهان طی چند دهه گذشته تبدیل شده است(Umar et al., 2009; Hamza et al., 2007; Neshat et al., 2014). در بیشتر مناطق ایران که جزء مناطق خشک و نیمه خشک جهان است (Dixon 2005)، امروزه بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باعث کاهش شدید سطح آب گردیده و نیز آلاینده‌های مختلفی به سفره‌های آب زیرزمینی از طریق فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری، وارد شده است(Sadat-Noori & Ebrahimi, 2016; Knödel et al., 2007; Dixon 2005; Aller et al., 1987) یکی از روش‌های پیشگیری آلودگی آب زیرزمینی، شناسایی مناطقی است که مستعد آلودگی بالا می‌باشند و با به‌دست آوردن این اطلاعات می‌توان منطقه را از لحاظ آسیب‌پذیری، پهنه‌بندی نمود (Azad et al., 2011). از جمله عواملی که برای تصمیم‌گیری و تخصیص کاربری‌های اراضی مناسب و همچنین برنامه‌های مدیریت منابع آب در سراسر جهان مورد اهمیت قرار دارد، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و پهنه‌بندی ریسک می‌باشد. در نتیجه می‌توان با اطلاعات به‌دست آمده، تمهیدات لازم را درخصوص جلوگیری از آلوده‌شدن مناطق با آسیب پذیری بالا، اندیشید. جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات قابل اطمینان و کافی لازمه مدیریت صحیح و موثر سیستم‌های آب‌زیرزمینی است که از طریق پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی به‌دست می‌آید.

در این راستا اهمیت آبخوان‌ها از حیث آلودگی و ممنوعیت توسعه بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد و پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف پیش‌بینی روند آسیب‌پذیری جهت مدیریت بهینه آبخوان‌ها به‌عنوان ذخیره ارزشمند آب، همچنین توسعه پایدار آن، کاهش آسیب‌های زیست محیطی و بحران نابودی منابع آبی صورت گرفته است. از روش‌های مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، می‌توان به روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، روش‌های آماری و روش دراستیک اشاره کرد یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی[1] آبخوان، روش دراستیک است. در این راستا با توجه به بحث‌های امروز زیست محیطی و آلودگی، تهیه مدل دراستیک به کمک فناوری‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی(GIS)[2] اهمیت زیادی داشته و از آنجا که آب زیرزمینی در شرایط خشکسالی امروز، نقش مهمی در کشاورزی سالم دارد، استفاده از این مدل نتایج خوبی به همراه خواهد داشت(Arab Ameri et al., 2015).

برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ در فرانسه مفهوم آسیب‌پذیری آب زیرزمینی جهت هشدار درباره آلودگی آب ارائه گردید (Vrba & Zaporozec, 1994). در مورد آسیب‌پذیری آبخوان و مفهوم آن در هیدروژئولوژی تعاریف زیادی ارائه شده که از آن می‌توان به تعریف کمیته ملی علوم زمین آمریکا در سال ۱۹۹۱ اشاره کرد. به بیان این کمیته، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی را، تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به وجود آمدن آنها در برخی محل‌ها، در بالای سطح آبخوان می‌داند (Almasri 2008).

از نظر مفهومی در هیدروژئولوژی اصطلاح آسیب‌پذیری به دو صورت آسیب‌پذیری ذاتی و آسیب‌پذیری ویژه تقسیم می‌شود. به امکان آلودگی در یک منطقه بدون در نظر گرفتن آلاینده خاص آسیب‌پذیری ذاتی گفته می‌شود که به ویژگی‌های زمین‌شناسی،

[1] Intrinsic vulnerability
[2] Geographic Information System

هیدرولوژی و هیدروژئولوژی یک منطقه و فعالیت‌های بشری وابسته بوده و مستقل از ماهیت آلاینده (Gogu & Dassargues, 2000) می‌باشد. از جمله روش‌هایی که به منظور ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری استفاده می‌شوند، می‌توان دراستیک را نام برد(Hamza et al., 2007). آسیب‌پذیری ویژه اشاره به آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلاینده یا گروهی خاص از آلاینده‌ها دارد که وابسته به ویژگی‌های آلاینده و ارتباط آن با مؤلفه‌های مختلف آسیب‌پذیری ذاتی می‌باشد. روش‌های مختلفی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی وجود دارد که می‌توان به روش‌های رتبه‌دهی، توصیفی[3]، آماری-تحلیلی[4] و ترکیبی[5] اشاره کرد. روش دراستیک یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش رتبه‌دهی و هم‌پوشانی می‌باشد.

۲- تئوری

در سال ۱۹۸۷ با حمایت آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا (EPA)[6] روش دراستیک توسط(Aller et al., 1987) به عنوان سیستمی استاندارد برای ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی نسبت به آلودگی ارائه گردید که بر اساس آن، نقشه آسیب‌پذیری با پارامترهای مختلف هیدروژئولوژی ایجاد گردید، که هر یک در انتقال آلودگی تاثیر گذارند. در نهایت، با جمع یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش، نقشه آسیب‌پذیری ارائه می‌گردد (Aller et al., 1987). دراستیک متداول‌ترین روش برای ارزیابی حساسیت آبخوان است هر چند هدف آن پیش‌بینی وقوع آلودگی در آب زیرزمینی نمی‌باشد. البته در برخی از کاربردهای آن در خصوص پیش‌بینی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی‌ها، دراستیک موفق و برخی ناموفق بوده است (Adamat et al., 2003). در حال حاضر برای ارزیابی پتانسیل آلودگی، روش دراستیک به عنوان یک سیستم استاندارد شناخته شده و این مدل در بیشتر کشورهای دنیا مورد استفاده قرارمی‌گیرد زیرا داده‌های مورد نیاز جهت استفاده از روش دراستیک به راحتی می‌تواند از نهادهای دولتی و یا نیمه دولتی به‌دست آید. به دلیل در نظر گرفتن تعداد پارامتر بیشتر و دقت بالاتر در مطالعات فراوان، استفاده از چهارچوب عملی دراستیک جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، در آبخوان‌های کشورهای مختلف جهان با موفقیت انجام شده است. فرآیند مدل‌سازی برای محاسبه شاخص ریسک آلودگی در شکل (۱) نشان داده شد.

۲-۱- پارامترهای دراستیک

عبارت DRASTIC مخفف پارامترهایی است که در سیستم هیدروژئولوژیکی، کنترل‌کننده آلودگی آب زیرزمینی می‌باشند و عبارتند از: عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تاثیر ناحیه غیر اشباع و ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان، که به شرح زیر می‌باشد:

عمق آب زیرزمینی[7] (D): یکی از مهم‌ترین فاکتورهای شاخص دراستیک عمق آب زیرزمینی است که فاصله سطح زمین تا سطح ایستابی را شامل می‌شود که بر اساس آن میزان ضخامتی که آب باید طی کند تا به سطح آبخوان برسد مشخص می‌شود. افزایش این ضخامت، منجر به تصفیه و حذف آلودگی توسط ناحیه غیراشباع خاک می‌شود. با افزایش عمق، پتانسیل حفاظت از آلوده شدن آب بیشتر می‌شود.

تغذیه خالص(R): میزان آبی می‌باشد که توسط عوامل مختلفی نظیر بارش، از طریق ناحیه غیراشباع خاک به آب زیرزمینی می رسد. یک عامل اصلی برای انتقال آلودگی، آب نفوذی از محیط غیر اشباع به ناحیه اشباع است که حامل آلودگی‌های جامد و

[3] Subjective Rating Method
[4] Statistical and Process-Based Method
[5] Hybrid Method
[6] US Environmental Protection Agency
[7] Depth to Water Table

مایع می‌باشد و به سطح آب زیرزمینی منتقل شده باعث افزایش کمی و افت کیفیت آب می‌شود. به طور کلی یک ناحیه با تغذیه بالای آب، در ریسک آلودگی بالاتری قرار دارد.

محیط آبخوان (A): محیط آبخوان به ساختار زمین در قسمت اشباع آبخوان گفته می‌شود که وابسته به نوع ترکیب و دانه‌بندی خاک می‌باشد. طول مسیر و جهت جریان آب تاثیر بسزایی در مواد تشکیل‌دهنده آبخوان دارد لذا با افزایش طول مسیر، زمان لازم برای انجام فرایندهای میرایی نظیر جذب، واکنش شیمیایی و پراکنش، افزایش می‌یابد. به طور کلی افزایش پتانسیل آلودگی، نتیجه انتقال سریع آلاینده‌ها از طریق ترکیب دانه‌های درشت و بازشدگی‌های نظیر درز و شکاف در محیط آبخوان است. از این رو ریزدانه‌تر بودن محیط آبخوان باعث افزایش افت آلودگی خواهد بود.

محیط خاک (S): ناحیه ٦ فوت یا کمتر سطح بالایی زمین را تحت پوشش قرار می‌دهد. خاک و بافت آن اثر قابل توجهی بر مقدار آب نشت کرده به زمین دارد. به طور کلی نوع و مقدار رس موجود در خاک نقش مهمی در آلودگی ایفا می‌کند. هر چه خاک ریزدانه‌تر و رس موجود در آن تراکم کمتر و متورم باشد، تراوایی نسبی خاک، کاهش و احتمال نفوذ آلودگی به سطح آب زیرزمینی کاهش می‌یابد. محیط خاک بر حسب رده‌بندی بافتی آن مشخص و امتیازبندی می‌شود.

توپوگرافی (T): منظور از توپوگرافی، شیب سطح زمین است. کنترل حرکت آلودگی و یا نگهداری آن بر روی سطح زمین، متاثر از شیب آن می‌باشد. به همین منظور امکان آلودگی آبخوان در سطوح با شیب زیاد، کاهش می‌یابد و در سطوح با شیب کم و افقی، به علت زمان ماندگاری آلودگی بر روی سطح زمین، بیشتر و در نتیجه میزان نفوذ پذیری آلودگی به حداکثر خواهد رسید.

تاثیر ناحیه غیر اشباع (I): در تعریف دراستیک محیط غیر اشباع به محدوده بالای خط ایستابی آب زیرزمینی که همه خلل و فرج آن با آب پر نشده است، اطلاق می‌شود. در این محدوده به جز آب، دو فاز جامد و هوا نیز وجود دارد. زمان حرکت آلودگی در محیط غیراشباع را، ذرات بافت آن تعیین می‌کند. ارزش‌گذاری محیط غیر اشباع در آبخوان‌های سطحی تقریباً متناسب با ارزش-گذاری محیط آبخوان است. نرخ نفوذ، طول مسیر و چگونگی حرکت آلاینده‌ها با ناحیه غیراشباع خاک رابطه مستقیم و آن را کنترل می‌نماید و به همین جهت در زمان لازم برای میرایی و کاهش آلودگی تاثیر بسیار دارد.

ضریب هدایت هیدرولیکی (C): به میزان توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان به هدایت آب، هدایت هیدرولیکی گفته می‌شود. که این هدایت آب توسط فضای متخلخل تشکیل‌دهنده آبخوان کنترل می‌گردد. میزان انتشار و انتقال آلودگی در ناحیه اشباع تا حد زیادی به این پارامتر بستگی دارد. با توجه به این مفهوم باید مفهوم محیط آبخوان را از آن جدا نمود زیرا ممکن است محیط آبخوان به میزان زیادی نفود ناپذیر باشد ولی شامل شکاف‌های بزرگ باشد.

شکل ۱- فرآیند مدل‌سازی برای محاسبه شاخص ریسک آلودگی

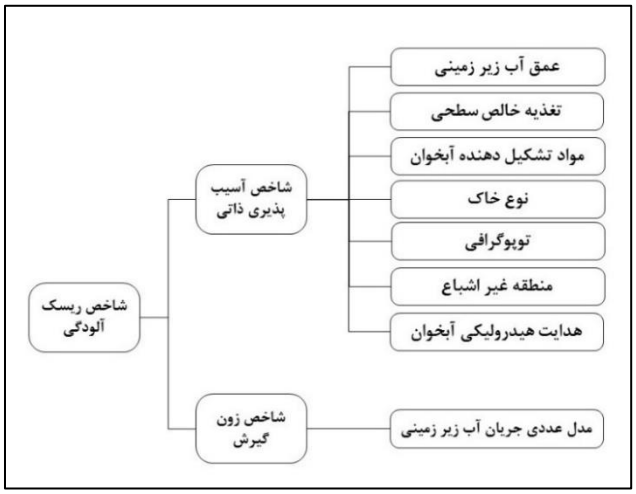


Fig 1. Modeling process to calculate the pollution risk index

۲-۲- نحوه به دست آوردن شاخص آسیب‌پذیری دراستیک

در روش دراستیک به هر پارامتر یک نرخ و یک وزن بر حسب اهمیت پارامتر اختصاص داده می‌شود. از این رو شاخص دراستیک بر اساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر با رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$DI = Dr\,Dw + Rr\,Rw + Ar\,Aw + Sr\,Sw + Tr\,Tw + Ir\,Iw + Cr\,Cw \quad (۱)$$

در این رابطه:

DI = شاخص دراستیک

D، R، A، S، T، I و C = پارامتر های هفتگانه

r = نرخ ارزش (رتبه)

w = وزن پارامتر

دسته‌بندی شاخص دراستیک مطابق با جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- محدوده آسیب‌پذیری آبخوان (Hamza et al., 2007)

Table 1. Range of aquifer vulnerability (Hamza et al., 2007)

محدوده آسیب‌پذیری	آسیب‌پذیری
<٤٦	ناچیز و قابل صرف نظر
٩٢-٤٧	کم
١٣٦-٩٣	متوسط
١٨٤-١٣٧	زیاد
>١٨٥	خیلی زیاد

۳-۲- وزن‌دهی و ارزش‌گذاری پارامترها در دراستیک

در سراسر جهان وزن‌دهی عددی بر مبنای تکنیک دلفی پایه‌گذاری شده است. به منظور ارزیابی سطوح ریسک این تکنیک به صورت تجربی و تحقیقی در نواحی مورد نظر، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس این تکنیک، با افزایش وزن، پتانسیل آلودگی بیشتر می‌گردد. (Aller et al. 1987) طی انجام تحقیقاتی وزن‌های ۱ تا ۵، را برای پارامترهای هفتگانه روش دراستیک ارائه کردند.(Almasri, 2008) بر اساس منطق بولین[8] به منظور ارزش‌گذاری یک پارامتر با توجه به خصوصیات متفاوت این پارامتر، رتبه‌ای در نظر گرفتند. این نرخ‌ها از عدد ۱ تا ۱۰ متغیراند. وزن‌ها و نرخ‌های مربوط به هر پارامتر در جدول (۲) نشان داده شد.

۴-۲- تحلیل حساسیت[9]

تحلیل حساسیت یک گام اساسی در مدل‌های کاربردی است که در آن پارامترهای ورودی مدل، تغییر داده می‌شوند و سپس واکنش سیستم به این تغییرات سنجیده می‌شود. در نهایت میزان حساسیت هر پارامتر تعیین می‌گردد. جهت سنجیدن آسیب‌پذیری آبخوان‌ها میزان اثرگذاری هر کدام از پارامترها، با استفاده از دو نوع تحلیل حساسیت حذف پارامتر (Babiker et al., 2005) و تحلیل حساسیت تک پارامتر (Napolitano & Fabbri 1996) سنجیده می‌شود.

۲-۴-۱- تحلیل حساسیت حذف پارامتر

منظور از تحلیل حساسیت حذف پارامتر، حذف یک یا چند پارامتر جهت نشان دادن حساسیت نقشه آسیب‌پذیری می‌باشد. در این روش ابتدا هرکدام از پارامترها به طور جداگانه از محاسبات حذف شده و اندیس تغییرپذیری[10] دراستیک محاسبه می‌شود. برای شناسایی این روش می‌توان از موثرترین پارامتر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه، استفاده کرد(Babiker et al., 2005). میزان حساسیت مدل به روش حذف تک پارامتر از رابطه (۲) به‌دست می‌آید:

$$\mathbf{S = |(V/N) - (V'/n)|/V * 100} \qquad (۲)$$

در این رابطه:

S= میزان حساسیت یا اندیس تغییرپذیری

V= اندیس‌های آسیب‌پذیری بدون حذف پارامتر

'V= اندیس‌های آسیب‌پذیری با حذف پارامتر

N و n= تعداد لایه‌های مورد استفاده در محاسبه V و 'V

V به عنوان اندیس آسیب‌پذیری غیرآشفته[11] نیز در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از تمام هفت پارامتر دراستیک به دست می‌آید، درحالی که 'V به عنوان اندیس آسیب‌پذیری آشفته[12] مورد توجه قرار می‌گیرد که آسیب‌پذیری با استفاده از تعداد کمتری از لایه‌ها در نتیجه حذف یک یا چند پارامتر محاسبه می‌شود.

[8] Boulin
[9] Sensitivity Analysis
[10] Change Index
[11] Unperturbed Vulnerability Index
[12] Perturbed Vulnerability Index

جدول ۲- رتبه و وزن پارامترهای روش دراستیک (Almasri, 2008)

Table 2. Rank and weight of Drastic method parameters (Almasri, 2008)

محیط خاک		مواد تشکیل دهنده ناحیه غیر اشباع		محیط آبخوان		هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)		توپوگرافی (درصد)		تغذیه (میلی متر)		عمق آب (متر)	
دامنه	ضریب	دامنه	ضریب	دامنه	ضریب	دامنه	ضریب	دامنه	ضریب	دامنه	ضریب	دامنه	ضریب
نازک بودن خاک	۱۰	لایه محصور کننده	۱	شیل توده ای	۲	۰/۴-۴	۱	۰-۲	۱۰	۰-۵	۱	۰-۱/۵	۱۰
شن	۱۰	سیلت / رس	۳	دگرگونی دگرگونی هوازده	۳	۴-۱۲	۲	۲-۶	۹	۵-۱۰	۳	۱/۵-۴/۶	۹
ماسه	۹	شیل	۳		۴	۱۲-۲۸	۴	۶-۱۲	۵	۱۰-۱۸	۶	۴/۶-۹/۱	۷
پیت	۸	سنگ آهک	۶	آبرفت	۵	۲۸-۴۰	۶	۱۲-۱۸	۳	۱۸-۲۵	۸	۹/۱-۱۵/۲	۵
رس ترک خورده	۷	ماسه سنگ	۶	ماسه سنگ ، آهک و شیل	۶	۴۰-۸۰	۸	>۱۸	۱	>۲۵	۹	۱۵/۲ - ۲۲/۸	۳
لوم ماسه ای	۶	ماسه سنگ وشیل	۶	سنگ آهک و توده	۶	>۸۰	۱۰					۲۲/۸ - ۳۰/۴	۲
لوم	۶	شن و ماسه و رس	۶	ماسه سنگو توده	۶							۳۰/۴ <	۱
لوم سیلیسی	۴	دگرگونی	۸	شن و ماسه	۸								
لوم رسی	۳	شن و ماسه	۸	بازالت	۹								
لجن و لای	۲	بازالت	۹	سنگ آهک و کارستی	۱۰								
رس سخت و متورم نشده	۱	سنگ آهک و کارستی	۱۰										
وزن ۲		وزن ۵		وزن ۳		وزن ۳		وزن ۱		وزن ۴		وزن ۵	

۲-۴-۲- تحلیل حساسیت تک پارامتری

(Napolitano & Fabbri, 1996) برای بررسی تاثیر هرکدام از پارامترهای دراستیک بر روی اندیس آسیب‌پذیری از تحلیل حساسیت تک پارامتری استفاده کردند. در هر پیکسل با وزن تئوریک اختصاص یافته به آن پارامتر، از روش مدل تحلیلی دراستیک استفاده گردید. با توجه به اینکه اهمیت هر هفت پارامتر دراستیک در ارزیابی اندیس آسیب‌پذیری با استفاده از تحلیل حساسیت حذف نقشه نشان داده شد، تحلیل حساسیت تک پارامتری وزن‌های موثر و تئوریک پارامترها را با هم مقایسه می‌کند. وزن موثر در هر پیکسل با استفاده از رابطه (۳) به‌دست می‌آید:

$$W= (Pr\ Pw)/V)*100 \qquad (۳)$$

در این رابطه:

W= وزن موثر هر پارامتر

Pr= نمره هر پارامتر

Pw= وزن هر کدام از پارمترها

V= اندیس نهایی آسیب‌پذیری

۲-۵- واسنجی[۱۳]

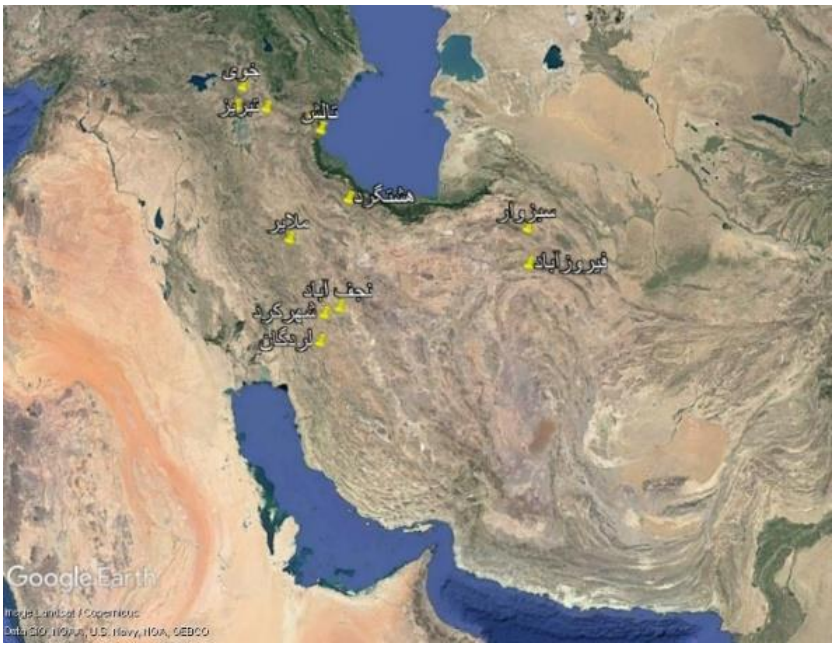
به منظور واسنجی(کالیبراسیون) پهنه‌بندی مدل دراستیک از آلاینده نیترات استفاده می‌شود، زیرا این آلاینده جز یکی از آلاینده‌های مهم و پایدار موجود در آب زیرزمینی می‌باشد. پس از تهیه نقشه آسیب‌پذیری، برای پراکندگی یکنواخت نمونه‌ها نقشه موقعیت چاه‌های کشاورزی برروی یکدیگر همپوشانی می‌شود. در ادامه برای قابل اعتماد بودن نتایج صحت سنجی مدل، چاه‌های نمونه‌گیری طوری انتخاب می‌شوند که از تمام رده‌های آسیب‌پذیری متفاوت، نمونه گرفته شود. برای صحت‌سنجی مدل از چاه‌های کشاورزی منتخب نمونه‌برداری صورت می‌گیرد و یون نیترات موجود در نمونه‌های برداشت شده از آب‌های زیرزمینی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده می‌شود. سپس نقشه پراکندگی مقادیر نیترات آب‌های زیرزمینی تهیه می‌گردد.

۳- ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به روش دراستیک

در طی چند سال گذشته یکی از معضلات جدی در سراسر جهان آلودگی منابع آب می‌باشد. در سرتاسر مناطق ایران نیز آلاینده‌های مختلفی در پی فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری به سفره‌های آب زیرزمینی تحمیل شده‌اند. یکی از روش‌های پیشگیری آلودگی آب زیرزمینی، شناسایی مناطقی است که مستعد آلودگی بالا می‌باشند و با به‌دست آوردن این اطلاعات می‌توان منطقه را از لحاظ آسیب‌پذیری، پهنه‌بندی نمود. یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، روش دراستیک است. در این بخش از مقاله به بررسی نقاط مشخص شده در شکل (۲) در نقشه ایران و مشخص کردن نقاط و میزان آسیب‌پذیری هر کدام از مناطق جهت ارزیابی آلودگی منابع آب زیرزمینی با روش دراستیک پرداخته می‌شود.

[13] Calibration

شکل ۲- موقعیت دشت‌ها و میزان آسیب‌پذیری



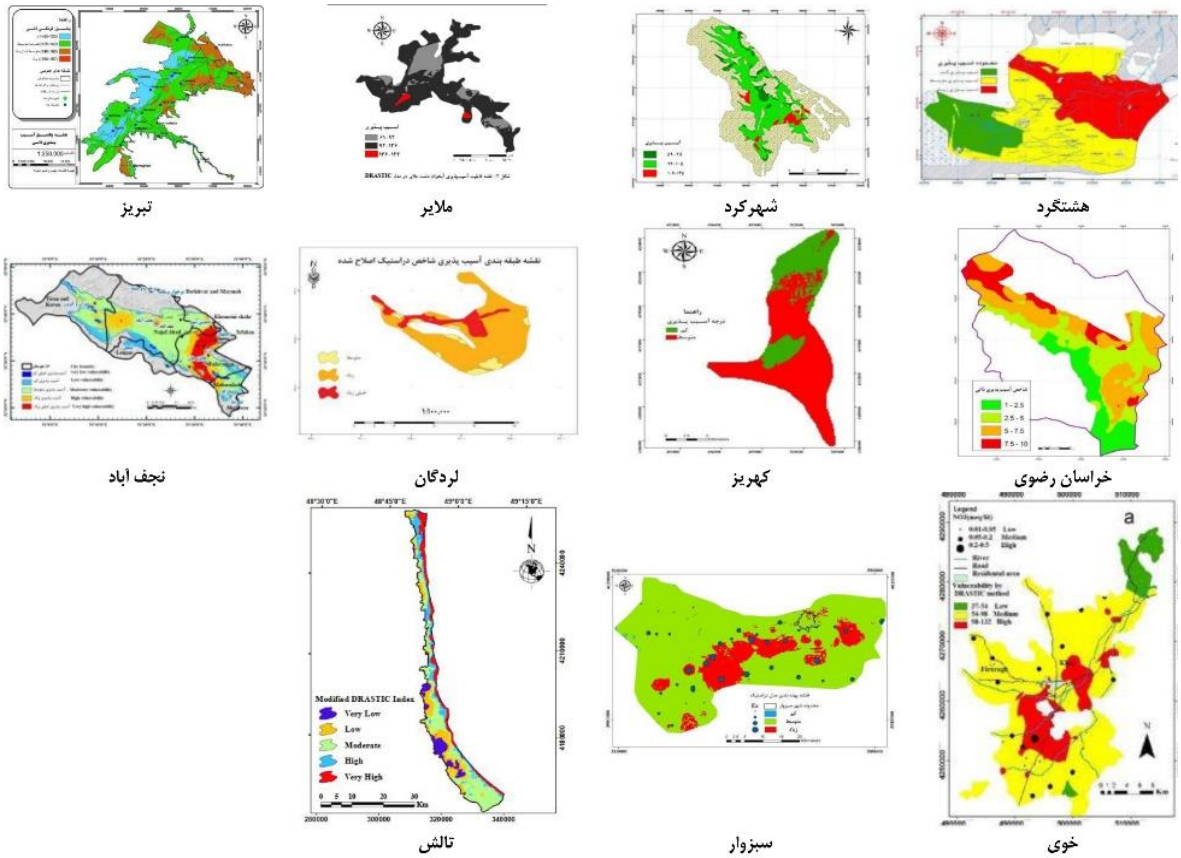


Fig 2. The location of the plains and the degree of vulnerability

(Azad et al., 2011) پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان که یکی از ابزارهای پهنه‌بندی است را برای دشت هشتگرد مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از شاخص دراستیک، آبخوان این دشت که همواره در معرض آلودگی ناشی از آب‌های برگشتی حاصل از آبیاری آغشته به کودهای شیمیایی، فاضلاب شهری و روستایی و پساب‌های صنعتی است، مورد ارزیابی قرار دادند. با تحلیل حساسیت به دو روش پارامتر واحد و حذف لایه‌ها، پس از اطمینان از تناسب توزیع وزن‌ها بر پارامترهای موثر، مشخص گردید بیشترین وزن، مربوط به محیط غیراشباع خاک و تغذیه آبخوان است. سپس پهنه‌بندی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان این دشت با نقشه نیترات آب زیرزمینی مقایسه شد که تطابق نسبتا خوبی را نشان داد. این پهنه‌بندی با آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد تقسیم شد. با انجام این تحقیق، مشخص گردید که بیشترین درصد پتانسیل آسیب‌پذیری مربوط به کلاس متوسط است. مناطق شمالی دشت پتانسیل آسیب‌پذیری زیاد و نواحی جنوبی کمترین پتانسیل آسیب‌پذیری را داشتند. با توجه به نقشه کاربری اراضی می‌توان دریافت که بیشترین آلودگی نیترات موجود در منطقه، از فاضلاب شهری و کودهای مصرفی در کشاورزی ایجاد می‌شود. از این رو باید با افزایش راندمان آبیاری تا حد امکان آب‌های برگشتی کشاورزی به آبخوان که اغلب خود به عنوان منبع آلاینده آبخوان به شمار می‌روند را کاهش داد.

(Mirzai et al., 2012) با استفاده از مدل دراستیک، آسیب‌پذیری دشت شهرکرد را ارزیابی کردند و با استفاده از خصوصیات تغییرنما[14]، پهنه‌بندی غلظت نیترات به روش میان‌یابی کریجینگ[15] انجام شد که در این مطالعه نتایج آن مورد استفاده قرار گرفت. حدود ۸۰ درصد منطقه مطالعاتی در وضعیت آسیب‌پذیری کم قرار گرفت و نواحی شمال، جنوب شرقی و غرب دشت شهرکرد از پتانسیل آلودگی بالاتری نسبت به دیگر نواحی برخوردار بودند. همچنین نواحی جنوب، جنوب شرق و شمال غرب دارای بالاترین غلظت نیترات بودند. با توجه به کاربری اراضی احتمالاً منبع آلودگی، وجود دامداری‌های صنعتی در جنوب و شمال غرب، همراه با کشت علوفه بوده و در جنوب شرق وجود منطقه صنعتی همراه با کشاورزی منابع احتمالی آلودگی، می‌باشند. مناطق شمالی و مرکز دشت، نیترات با غلظت پایین‌تری داشتند. همبستگی نقشه‌های غلظت نیترات آب زیرزمینی و آسیب‌پذیری که از مدل دراستیک به‌دست آمده است، معنادار بود و نشان‌دهنده میزان همبستگی کارایی مدل دراستیک در پیش‌بینی نواحی آسیب‌پذیری بود. عدم تطابق زمانی بارش‌ها، آبیاری اراضی و کوددهی اراضی کشاورزی با زمان اندازه‌گیری غلظت نیترات آب زیرزمینی، دلایل عدم قطعیت حاصل از این مقایسه بود و می‌توان در نظر گرفت که ضریب همبستگی دو نقشه، تابع زمان است. لذا در صورتی که زمان بارش‌ها و فعالیت‌های کشاورزی نیز به طریقی در مدل لحاظ گردد امکان عدم قطعیت بین دو نقشه کاهش می‌یابد. علاوه بر این عامل دیگری همچون وجود منابع نقطه‌ای آلاینده در دشت می‌تواند بر میزان عدم قطعیت حاصل تاثیر بگذارد. در بالا بردن ضریب همبستگی دو نقشه و افزایش کارایی مدل، دقت در محل عبور کانال‌ها و لوله‌های انتقال فاضلاب شهری و صنعتی می‌تواند نقش داشته باشد. نقشه‌های موضوعی پارامترهای مورد نیاز، پس از تشکیل بانک اطلاعات به کمک داده‌های مکانی کمی و کیفی مربوط در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی(GIS) تهیه و تلفیق شدند.

(Marofi et al., 2012) به شناسایی نواحی آسیب‌پذیر آبخوان دشت ملایر در برابر آلودگی و تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان از سه روش SI، دراستیک و سینتکس[16] پرداختند. اهداف اصلی این تحقیق، مشخص نمودن مناطق مستعد از نظر آلودگی در سفره‌های آب زیرزمینی دشت ملایر و کمک به تبیین سیاست‌های کاربردی و عملی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی بود. در گام نخست، نقشه حساسیت دشت برای هر یک از مدل‌های مورد نظر، با توجه به لایه‌های اطلاعاتی آنها تهیه گردید. در گام دوم، لایه نیترات با توجه به داده‌های نیترات اندازه‌گیری شده تهیه گردید. به منظور حصول اطمینان از کارکرد روش‌های مورد استفاده، همبستگی

[14] Variogram
[15] Kriging
[16] Sintacs

بین لایه نیترات و نقشه‌های آسیب‌پذیری مدل‌های یاد شده محاسبه شد. با توجه به سطح معنی‌داری ضریب همبستگی محاسبه شده بین مدل‌های دراستیک و SI، واسنجی مدل‌های یادشده صورت گرفت و ضرایب پارامترهای آنها تصحیح شدند. در گام سوم، با همپوشانی نقشه کاربری اراضی و نقشه آسیب‌پذیری دراستیک اصلاحی، نقشه خطر آلودگی آب زیرزمینی بر اساس مدل دراستیک کشاورزی تهیه شد. در آخرین مرحله، با مقایسه نقشه‌های آسیب‌پذیری دراستیک اصلاح شده، SI اصلاح شده و مدل دراستیک کشاورزی با لایه نیترات، بهترین مدل برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه انتخاب شد. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که مدل دراستیک کشاورزی بهترین مدل به این منظور می‌باشد. به منظور اطمینان از نتایج روش‌های مورد استفاده، پس از تهیه لایه نیترات موجود در آب زیرزمینی منطقه، ضریب همبستگی این لایه با مدل‌های مختلف آسیب پذیری محاسبه شد. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی مدل‌های دراستیک و SI با لایه نیترات در سطح معنی‌داری می‌باشند که نشان‌دهنده تأئید نسبتاً مناسب این روش‌ها در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه است. همچنین ضریب همبستگی مدل سینتکس با لایه نیترات در سطح معنی‌دار نبود، بنابراین نمی‌توان از نتایج این مدل برای تشخیص پتانسیل آسیب‌پذیری[17] منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. روش دراستیک از بیشترین پارامترهای موثر در آسیب‌پذیری ذاتی برای پهنه‌بندی استفاده می‌کند و دقت آن بیشتر می‌باشد. ولی پهنه‌بندی آسیب‌پذیری با این روش هزینه و زمان بیشتری را نسبت به مدل SI می‌طلبد. زیرا که این روش از هفت پارامتر برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده می‌کند و تهیه و فراهم نمودن پارامترهای مورد نیاز برای پهنه‌بندی در برخی از موارد به ویژه در ایران به دلیل کمبود آمار و اطلاعات پایه امکان‌پذیر نیست. مدل SI از پنج پارامتر استفاده می‌کند که چهار مورد از آنها با روش دراستیک مشترک است. فراهم نمودن اطلاعات مورد نیاز برای ارزیابی آسیب‌پذیری به روش SI به مراتب ساده‌تر بوده و هزینه کمتری نیاز دارد. نتایج آسیب‌پذیری با این روش در مدیریت کیفی سفره‌های آب زیرزمینی بسیار کاربرد دارد و با شناسایی مناطق حساس‌تر به آلودگی، نقش بسزایی در این مساله ایفا می‌کند.

(Tabarmayeh & Vaezi, 2015) از مدل دراستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت تبریز استفاده کردند. با توجه به نقشه آسیب‌پذیری نهایی، بیشترین آسیب‌پذیری مربوط به محدوده شمال شرقی منطقه مورد مطالعه بود. این مناطق که محل تمرکز واحدهای صنعتی و مراکز شهری مهمی از جمله شهر تبریز را شامل می‌شد، نتایج آماری حاصل از تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر و روش تک پارامتری نیز بیانگر این بود که در هر دو مورد مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری، عمق سطح ایستابی است. بر اساس بررسی ارتباط بین کاربری زمین و نقشه آسیب‌پذیری ذاتی مشخص گردید که بیشترین مساحت زمین‌های کشاورزی در محدوده آسیب‌پذیری کم و کم تا متوسط قرار گرفته است و توسعه کشاورزی در این نواحی تاثیر شدیدی بر آلودگی آب‌های زیرزمینی ایجاد نمی‌کند اما سایر نواحی باید تحت مراقبت و کنترل بیشتری قرار بگیرد. در همین راستا نقشه آسیب‌پذیری دیگری به روش سینتکس تهیه گردید و با نقشه آسیب‌پذیری تهیه شده به روش دراستیک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت که نتایج حاصله از مدل دراستیک را تایید کرد. بنابراین، تصمیم‌گیری شد که در این مناطق برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی بایستی مراقبت و کنترل بیشتری صورت گیرد و از استقرار واحدهای صنعتی آلاینده و یا توسعه کشاورزی در این مناطق پرهیز شود.

(Joodavi & Khazaei, 2016) روشی جدید برای تعیین مناطقی از ناحیه گیرش چاه‌ها که در برابر آلودگی آسیب‌پذیری بیشتری دارند ارائه کردند. یک از کاستی‌های روش‌های معمول ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، عدم توانایی آنها برای پیش‌بینی اثر پخش آلاینده‌ها در مناطق آسیب‌پذیر آبخوان بر آلودگی چاه‌های آب شرب می‌باشد. در این روش از مدل دراستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان و از مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی توسط کد MODFLOW و ردیابی حرکت ذرات در

[17] Vulnerability

آبخوان توسط کد MODPATH برای تعیین ناحیه گیرش چاه‌ها استفاده گردید. با تلفیق نتایج هر دو مدل در محیط GIS نقشه ریسک آلودگی آب‌زیرزمینی در محدوده شهرستان فیروزه در استان خراسان رضوی به صورت ناحیه‌ای و در محدوده ناحیه گیرش چاه‌های آب شرب تعیین گردید. به طور جزئی‌تر در این پژوهش ابتدا منابع آلودگی مشخص شدند و سپس با توجه به بار آلودگی و خصوصیات آلاینده (که شامل میزان سمیت، سیار بودن و پایداری آلاینده) نقشه پهنه‌بندی خطر ارائه شد. پس از تهیه نقشه خطر، نقشه آسیب‌پذیری نیز به روش دراستیک تولید شد و پس از آن با توجه به کمیت و کیفیت آب زیرزمینی، نقشه ارزش آب زیرزمینی پهنه‌بندی گردید. در نهایت با تلفیق این سه نقشه تحلیل ریسک آلودگی صورت گرفت همچنین برای رتبه‌بندی خطر، کاربری‌های اراضی که احتمالاً بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیرگذار هستند، شناسایی و در شرایط نسبی ارزیابی شدند. آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نیز با استفاده از روش دراستیک انجام شد و معیار برای تخمین ارزش نسبی آب زیرزمینی نیز مبتنی بر سه عامل: وابستگی فعلی به آب زیرزمینی، وابستگی به آب زیرزمینی در آینده و تعامل با منابع زیست محیطی تعیین گردید. در نهایت دو نقشه ریسک: نقشه ریسک عمومی با ترکیب خطر منابع آلودگی و میزان آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و نقشه ریسک وزن‌دهی شده با توجه به ارزش آب زیرزمینی به‌دست آمده از ترکیب نقشه ریسک عمومی و نقشه ارزش نسبی آب زیرزمینی به‌دست آمد.

نقشه ریسک وزن‌دهی شده با توجه به ارزش نسبی آب زیرزمینی برای استفاده جهت اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی و پیشگیرانه مد نظر قرار گرفت. مزیت نقشه ریسک این است که برای مثال در مکان‌هایی که ارزش آب زیرزمینی پایین است، ریسک به صورت کلی نسبت به وضعیتی که در نقشه ریسک عمومی نشان داده شده، کاهش می‌یابد و متناسب با هدف اولویت‌بندی برنامه‌های اصلاحی و پیشگیرانه می‌باشد. در این پژوهش، پارامترهای کیفی نوع آبخوان، خاک و منطقه اشباع با پارامترهای کمی ضخامت آبخوان، مقدار نیتروژن تولید شده در خاک و مقاومت هیدرولیکی منطقه غیراشباع که حرکت آب در این منطقه را محدود می‌کند، جایگزین شده‌اند. در نهایت، پارامترهای مدل دراستیک پیشنهادی با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای غلظت نیترات، واسنجی شدند. توانایی روش ارائه شده در این پژوهش برای تعیین مناطقی از ناحیه گیرش چاه‌ها که در برابر آلودگی، آسیب‌پذیری بیشتری دارند باعث می‌شود یکی از مشکلات روش‌های مرسوم ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، که عدم توانایی پیش‌بینی اثر پخش آلودگی در مناطق آسیب‌پذیر آبخوان بر آلودگی منابع ارزشمند آب مانند چاه‌های آب شرب می‌باشد، رفع گردد.

(Mohebbi & Asghari, 2018) آسیب‌پذیری آبخوان دشت کهریز در برابر آلودگی را به کمک مدل دراستیک و سامانه اطلاعات جغرافیایی ارزیابی کردند. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، برگرفته از نتایج به‌دست آمده، دو پهنه عمده با آسیب‌پذیری کم و متوسط را نشان داد. با استفاده از پراکندگی یون نیترات، صحت سنجی مدل در محدوده آبخوان انجام شد و مشخص گردید در محدوده متوسط، تقریباً تمامی نقاطی که دارای نیترات بالا هستند، قرار گرفتند. دو نوع تحلیل حساسیت حذف متغیر و تک متغیری دراین تحقیق انجام شد. میزان تأثیرگذاری هر کدام از متغیرها در آلوده‌سازی آبخوان با تحلیل حساسیت به روش حذف متغیر و تک متغیری، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج هر دو تحلیل نشانگر این موضوع است که مهم‌ترین متغیر تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری، اثر منطقه غیر اشباع است. پس از آن جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری، نسبت به تهیه متغیرهای مورد نیاز برای ارزیابی آسیب‌پذیری به روش دراستیک اقدام شد. در نتیجه یک لایه شبکه‌ای به‌دست آمد که در این لایه سلول‌های دارای اعداد بزرگتر، نشانگر مناطقی هستند که آسیب‌پذیری ذاتی بیشتر آب زیرزمینی در مقابل آلودگی و سلول‌های دارای ارزش عددی کمتر بیانگر مناطقی که آسیب‌پذیری ذاتی کمتر آب زیرزمینی در مقابل آلودگی را دارا می‌باشند. در این روش با تلفیق متغیرهای هفت‌گانه براساس شاخص آسیب‌پذیری، میزان آسیب‌پذیری محدوده کهریز در دو گروه آسیب‌پذیری کم و آسیب‌پذیری متوسط قرار

گرفت. بدین ترتیب بخش زیادی از نیمه شمالی و تا حدودی قسمتی از نواحی مرکزی آبخوان در گروه آسیب‌پذیری کم و نیمه جنوبی و بخشی از نیمه مرکزی آبخوان در گروه آسیب‌پذیری متوسط قرار گرفتند. آسیب‌پذیری آبخوان پتانسیل آبخوان را برای آلودگی نشان می‌دهد و با خطر آلودگی نباید اشتباه گرفته شود. بدین معنی که ممکن است در یک منطقه با آسیب‌پذیری کم و متوسط، بدلیل حضور گسترده منابع آلاینده از نظر آلودگی منطقه پرخطری باشد و برعکس ممکن است در منطقه‌ای آسیب‌پذیری بالا باشد ولی بدلیل نبود منابع آلاینده هیچ گونه خطر آلودگی آب زیرزمینی را تهدید نکند.

(Ghanbarian & Ahmadi, 2019) به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت لردگان و نیز بررسی کارایی مدل‌های گوناگون در آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی درمحیط GIS با استفاده از سه مدل دراستیک اصلاح شده، GODS[18]و AVI[19]پرداختند. محدوده آبخوان دشت لردگان در رتبه‌بندی دراستیک در محدوده آسیب‌پذیری متوسط و زیاد قرار دارد، به طوری که نواحی حاشیه‌ای و مرزی دشت در وضعیت آسیب‌پذیری متوسط قرار گرفتند و قسمت‌های زیادی از مرکز دشت وضعیت بدتری نسبت به نقاط دیگر داشته و در وضعیت آسیب‌پذیری زیاد قرار داشتند. آبخوان دشت لردگان از لحاظ وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در حالت ممنوعه می‌باشد و در آینده‌ای نه چندان دور با شرایطی بحرانی از لحاظ تأمین آب رو به رو خواهد بود. علت انتخاب این دشت، شرایط بحرانی آن می‌باشد. توسعه مناطق شهرنشینی، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و مصرف کود و همچنین افزایش واحدهای صنعتی موجود در دشت، از جمله دلایل بحرانی شدن این دشت و آبخوان موجود در آن به شمار می‌روند. با توجه به اهمیت دشت لردگان در بخش کشاورزی، صنعت، شرب و توسعه روزافزون شهرک‌های صنعتی در این بخش و ورود فاضلاب‌ها و پسماندهای صنعتی و کشاورزی به داخل منابع آب زیرزمینی، شناسایی مناطق و میزان آسیب‌پذیری دشت یک امر ضروری می‌باشد تا با شناخت کافی از میزان آسیب‌پذیری منطقه، از آلوده شدن هرچه بیشتر این منابع تجدیدناپذیر، جلوگیری کرد. در این تحقیق از روش دراستیک اصلاح شده استفاده شد. از آنجایی که در این روش تعداد پارامترهای بیشتری دخیل می‌باشند، لذا می‌توان ادعا نمود که این روش نسبت به سایر روش‌ها از تکامل بیشتری برخوردار است. این روش که توسط سازمان محیط زیست آمریکا توسعه یافته است، دارای ۷ پارامتر می‌باشد که با اضافه کردن نقشه کاربری اراضی به شاخص‌های دراستیک، این شاخص را به شاخص دراستیک اصلاح شده تبدیل کرده و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. بررسی تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر (نقشه انجام شده)، نشان داد که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب پذیری، تغذیه بوده است.

(Arab Ameri et al., 2015) تعیین نقشه آسیب پذیری دشت نجف آباد را با استفاده از روش دراستیک بررسی نمودند. محاسبه و تهیه نقشه‌های پارامترهای هیدروژئولوژی موثر در انتقال آلودگی، مقایسه اثر پارامترهای موثر در آلودگی آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف نسبت به منطقه مطالعه شده و تعیین اولویت‌های مدیریتی- حفاظتی در آبخوان نجف‌آباد به تفکیک حوزه‌های شهرستان انجام شد. همچنین برای این منظور تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی، استفاده گردید. در روش دراستیک عوامل و پارامترهای مختلفی موثر هستند، ارزش، نقش و اولویت هر کدام از عوامل و پارامترهای مورد بررسی، وابسته به موقعیت منطقه هدف، متفاوت می‌باشند. به همین جهت از ۷ پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، محیط غیر اشباع و هدایت هدرولیکی استفاده شد. طبق نتایج به‌دست آمده پارامترهای عمق آب زیرزمینی و محیط غیراشباع، بیشترین تاثیر را در آلودگی منابع آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی داشته‌اند.

(Nadiri et al., 2019) به منظور شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان دشت خوی از روش‌های دراستیک، سینتکس و ترکیب این دو روش استفاده کردند. در روش‌های دراستیک و سینتکس از پارامترهای هیدروژئولوژی و هیدرولوژیکی منطقه جهت بررسی

[18] Groundwater Occurrence. Overall Aquifer Class. Depth of Water Table. Soil Type (GODS)
[19] Aquifer Vulnerability Index (AVI)

آسیب‌پذیری آبخوان و پهنه‌بندی مناطق مستعد آلودگی استفاده شد ولی با توجه به خصوصیات ذاتی روش‌ها، نتایج متفاوتی ارائه کردند. در این پژوهش، بررسی عملکرد هر کدام از روش‌های دراستیک و سینتکس بر اساس معیارهای ارزیابی متفاوت، نتایج متفاوتی را ارائه دادند که بر اساس آن امکان انتخاب یکی از روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی میسر نبود لذا با ترکیب این دو روش و بر اساس یک نقشه واحد آسیب‌پذیری آبخوان قادر به اظهار نظر گردید. صحت سنجی هر کدام از این روش‌ها و مقایسه نتایج آنها با استفاده از مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده از ۲۶ حلقه چاه در محدوده مطالعاتی و محاسبه شاخص همبستگی و ضریب همبستگی بین نقشه‌های آسیب‌پذیری انجام شد. نتایج نشان داد که روش ترکیبی شاخص همبستگی و ضریب همبستگی دقت بیشتری نسبت به روش‌های دراستیک و سینتکس دارد و از این رو برای ارزیابی آسیب‌پذیری این منطقه مناسب‌تر است. بر اساس نقشه آسیب‌پذیری به‌دست آمده از روش ترکیبی، آسیب‌پذیری آبخوان در قسمت‌های مرکزی و غربی دشت بالا و به سمت حاشیه، کاهش داشت.

(Saadati et al., 2020) سفره آب زیرزمینی اردبیل را بر اساس شاخص جدیدی از جمله عامل تراکم منابع نقطه‌ای[20] آلاینده، آسیب‌پذیری ذاتی و ناحیه[21] گیرش آلودگی چاه‌ها، ارزیابی کردند. پژوهش صورت گرفته با استفاده از یک روش جامع ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی با شاخص ریسک آلودگی آب زیرزمینی دشت اردبیل ارائه گردید که شامل استفاده از یک نسخه اصلاح شده از روش دراستیک برای پهنه‌بندی آسیب پذیری ذاتی، یک روش تحلیل مکانی برای پهنه‌بندی تراکم منابع نقطه آلاینده و مدل‌سازی عددی برای تعیین منطقه گیرش آلودگی چاه‌ها بود. تلفیق این پارامترها، در محیط GIS انجام شد که مکانیسمی برای پهنه‌بندی ریسک و شناسایی مناطق در محدوده گیرش آلودگی را فراهم می‌کند که باید از جهت نظارت بر آب زیرزمینی و مدیریت استفاده از آنها مورد توجه قرار گیرند. این روش دقت بالاتری با توجه به عوامل متعدد در مقایسه با سایر شاخص‌ها دارد. در بیشتر سطوح دشت اردبیل، مقدار این شاخص در حداقل محدوده طبقه بود ولی مقادیر حداکثر این شاخص در مناطق پرجمعیت، حاشیه جاده‌ها و صنعتی قرار داشت که بیانگر کیفیت پایین آب زیرزمینی است. به طور کلی مطابق این شاخص، دشت اردبیل در محدوده آسیب‌پذیری و خطر پایینی قرار می‌گیرد.

(Mahmoudpour et al., 2021) شبکه پایش بهینه با حداقل تعداد چاه‌ها در آبخوان ساحلی تالش را با توجه به نقشه آسیب‌پذیری آبخوان و ارزیابی دقت شبکه پایش طراحی کردند. همچنین نقشه آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از شاخص دراستیک اصلاح شده[22]، تهیه و برای جستجوی بهینه شبکه پایش، از الگوریتم ژنتیک[23] (GA) استفاده شد. در مدل بهینه‌سازی، همزمان سه هدف شامل موارد ذیل مورد بررسی قرار گرفت:

۱- حداکثر کردن همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و مقدار EC[24]
۲- حداقل کردن تعداد چاه‌های پایش
۳- حداکثر کردن ضریب نش – ساتکلیف[25] (که بیانگر برازش بین توزیع EC محاسبه شده در شبکه پایش موجود و شبکه جدید است)

در جهت هدف اقتصادی اعمال ضریب وزنی w، در یک تابع هدف، سه هدف تعریف شد و پارامترهای مختلف وزن ارزیابی شد. نتایج نشان داد که انتخاب جواب بهینه، تا حد زیادی به تعیین ضریب وزنی وابسته بوده و بهترین وزن، با توجه به متعادل‌ترین

[20] Point Sources Index (PSI)
[21] Capture Zone
[22] Modified DRASTIC
[23] Genetic Algorithm
[24] Electrical Conductivity
[25] Nash–Sutcliffe Coefficient

جواب، شاخص آسیب‌پذیری و دقت شبکه پایش انتخاب شد. نتایج اعتبارسنجی در هر دو دوره بهینه‌سازی و اعتبارسنجی، تخمین‌های قابل قبولی را به‌دست آورد.

(Eshaghi et al., 2021) نقشه آسیب‌پذیری آبخوان سبزوار را با استفاده از مدل دراستیک تهیه کردند. تراکم جمعیتی بالا در حوضه آبریز سبزوار، فراوانی وجود مزارع و تشکیلات صنعتی در منطقه، منجر به افزایش مصرف بی‌رویه آب زیرزمینی در حوزه فوق شده است که این امر منجر به افزایش املاح و کاهش کیفیت آب در این آبخوان گردید. لذا ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان سبزوار حائز اهمیت می‌باشد. مطالعات صورت گرفته بر روی آبخوان سبزوار نشان داد که مناطق مرکزی آبخوان نسبت به آلاینده‌ها آسیب‌پذیرتر هستند. بررسی نقشه‌ها بیانگر این است که عمق سطح ایستابی تغذیه آبخوان و شیب زمین بیشترین تاثیر را نسبت به دیگر نقشه‌ها دارا می‌باشند. میزان آسیب‌پذیری بالای مناطق مرکزی دشت که عمق کمتری تا سطح ایستابی و شیب کمتری دارند منجر به تمرکز بیشتر آلاینده‌ها در ناحیه فوق و انتقال سریع آلاینده‌ها به منابع آب زیرزمینی می‌باشد. تغذیه آبخوان بیشترین آسیب‌پذیری را در نواحی مرکزی دشت داشت. ترسیم نقشه محیط آبخوان، نقشه محیط خاک و نقشه منطقه غیراشباع نشان داد که میزان آسیب‌پذیری در کل دشت بصورت یکسان و تغییرات آسیب‌پذیری کم می‌باشد. هدایت هیدرولیکی در بیشتر منطقه یکسان بود و مقدار بالایی داشت. با بررسی انجام شده بر روی نقشه آسیب‌پذیری دراستیک در منطقه مورد مطالعه، میزان آسیب‌پذیری در منطقه از کم تا زیاد بود به نحوی که مناطق مرکزی دشت، آسیب‌پذیری بالاتری داشت. با توجه به حجم فعالیت‌های کشاورزی در مناطق مرکزی دشت، بایستی تمهیداتی در جهت جلوگیری از آلودگی احتمالی آبخوان صورت گیرد. همچنین همپوشانی هدایت الکتریکی با نقشه دراستیک نشان داد هدایت الکتریکی در مناطقی با آسیب‌پذیری زیاد، بالا می‌باشد که بیانگر املاح بالا در نمونه‌های آب در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد و این امر نیز می‌توانند تاییدی بر دقت و صحت سنجی مدل دراستیک باشد. مروری بر روش‌های تعیین آسیب‌پذیری آبخوان ۱۲ منطقه در نیمه شمالی کشور در قالب جدول (۳) ارائه گردید.

٤- نتیجه‌گیری

یکی از منابع مهم و قابل توجه در منابع آب، آب‌های زیرزمینی می‌باشند زیرا این منابع استعداد آلودگی کمتر و همچنین ظرفیت ذخیره بیشتری نسبت به آب‌های سطحی دارند. اما وجود آلودگی‌های منتشرشونده و نقطه‌ای که از فعالیت‌های انسانی در سطح زمین ناشی می‌شوند و نفوذ آنها به منابع آب زیرزمینی باعث از بین رفتن کیفیت آب زیرزمینی شده و کیفیت آن را برای مصرف‌کننده پائین می‌آورد. مضاف بر آن با برداشت بی‌رویه آب، سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور به حد بحرانی رسیده است. با وجود اینکه بخش بسیاری از مصارف آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت از منابع آب زیرزمینی تامین می‌گردد. بنابرین منابع آب زیرزمینی به روش‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آنها نسبت به آب‌های سطحی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. همچنین، به دلیل تداوم آلودگی در این منابع، بهترین روش پیشگیری از آلودگی آنها، شناخت منابع آلوده‌کننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و یافتن سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد. به همین دلیل، مدیریت کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی دارای اهمیت بالایی در این مناطق می‌باشد.

جدول ۳- مرور روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها به روش دراستیک

Table 3. Overview of the methods of assessing the vulnerability of aquifers by the Drastic method

منطقه مورد مطالعه	روش مورد ارزیابی	عامل هیدرولوژیکی مؤثر	نحوه صحت سنجی	روش تحلیل حساسیت	مهمترین متغیر تأثیر گذار	منطقه دارای بالاترین آسیب پذیری	تعداد حلقه چاه	نرم افزار مورد استفاده
ملایر	SI DRASTIC SINTACS	عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، سنگ شناسی آبخوان، توپوگرافی و کاربری اراضی، محیط خاک، اثر محیط غیر اشباع، هدایت هیدرولیکی آبخوان، شیب	نیترات	–	–	-	۳۲	GIS
لردگان	DRASTIC اصلاح شده، GODS, AVI	عمق تا سطح آب زیرزمینی، تغذیه خالص، خصوصیات خاک، خصوصیات سفره، توپوگرافی، اثر منطقه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی آبخوان و کاربری اراضی	نیترات	حذف متغیر	تغذیه	-	–	GIS
کهریز	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی	پراکندگی یون نیترات	حذف متغیر، تک متغیری	اثر منطقه غیر اشباع	–	–	GIS
شهرکرد	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی	نیترات	-	-	-	۹۶	GIS
سبزوار	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی	نیترات	حذف متغیر، تک متغیری	عمق تا سطح ایستابی تغذیه آبخوان	-	۹۰	GIS
تبریز	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی.	نیترات	حذف متغیر، تک متغیری	عمق سطح ایستابی	-	-	GIS
خراسان رضوی	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی	نیترات	عنوان نشده	عمق آب زیرزمینی، نوع خاک، منطقه غیر اشباع	-	۴۲۸	GIS
خوی	DRASTIC SINTACS ترکیب این دو روش	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی	نیترات	عنوان نشده	–	قسمت های مرکزی و غربی	۲۶	GIS
اردبیل	ترکیب روش‌های DRASTIC SINTACS	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی	غلظت نیترات، کلراید	عنوان نشده	–	شمال و جنوب شرقی	۲۲۴۳	GIS

ادامه جدول ۳- مرور روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها به روش دراستیک

Table 3. Overview of the methods of assessing the vulnerability of aquifers by the Drastic method

منطقه مورد مطالعه	روش مورد ارزیابی	عامل هیدرولوژیکی مؤثر	نحوه صحت سنجی	روش تحلیل حساسیت	مهمترین متغیر تأثیر گذار	منطقه دارای بالاترین آسیب پذیری	تعداد حلقه چاه	نرم افزار مورد استفاده
تالش	DRASTIC اصلاح شده	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی، کاربری اراضی، فاصله تا ساحل، اختلاف تراز سطح آب زیرزمینی و سطح آب دریا	-	-	عمق، تغذیه، محیط خاک، هدایت هیدرولیکی، کاربری اراضی	تمام نواحی با کاربری شهری	۵۹	GIS
هشتگرد	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی.	نیترات	حذف متغیر، تک متغیری	محیط غیراشباع، تغذیه	شمالی	-	GIS
نجف آباد	DRASTIC	عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی.	-	-	عمق آب، محیط غیراشباع	انتهای آبخوان به سمت شرق	۳۴	GIS

داشتن داده‌ها و اطلاعات مطمئن برای داشتن مدیریت صحیح و مؤثر در سیستم‌های آب زیرزمینی کافی می‌باشد که این اطلاعات از طریق پایش کمی و کیفی آب زیرزمینی به‌دست می‌آید. یکی از مراحل اساسی در شناسایی خصوصیات سیستم‌های آب زیرزمینی پایش کیفی آب زیرزمینی است. به طور کلی، طراحی شبکه‌های پایش به دلیل‌های پایش اولیه کیفیت آب زیرزمینی بدون دخالت انسان، شناسایی روند تغییرات کیفی در کمترین زمان و نظارت بر مناطق آلوده شده جهت تعیین میزان گسترش آلودگی با منبع غیرنقطه‌ای انجام می‌شود. یک شبکه پایش مناسب، نه تنها باید نماینده کل سیستم آب زیرزمینی باشد، بلکه از نظر اقتصادی نیز باید مقرون به صرفه باشد. یکی از ابزارهای مهم برای تصمیم‌گیری و تخصیص کاربری‌های اراضی مناسب و همچنین برنامه‌های مدیریت منابع آب در سراسر جهان تعیین آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و پهنه‌بندی ریسک می‌باشد.

در این پژوهش ارزیابی روش‌های تعیین آسیب‌پذیری آبخوان ۱۲ منطقه در نیمه شمالی کشور با استفاده از تئوری دراستیک بررسی شد. اصطلاحات مهم و مورد استفاده در روش‌ها توضیح داده شد. سپس در پایان مروری بر همه روش‌ها در قالب جدول (۳) ارائه گردید. به طور کلی هدف تحقیق انجام شده شناسایی برخی از روش‌های ارزیابی تعیین آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد که به محققان، توسعه‌دهندگان و مجریان برطرف‌کننده آلودگی‌های سیستم‌های آب زیرزمینی در جهت انتخاب، استفاده مجدد و یا ارائه روش‌های جدید کمک می‌کند. علاوه بر این در توضیح هر روش، چالش‌ها و شکاف‌های تحقیقاتی دشت‌های موجود مورد بررسی قرار گرفتند که می‌توانند موضوع کارهای تحقیقاتی در آینده باشند.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- منابع

Adamat, R., Foster, I., & Baban, S. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Arzaq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, 23, 303-324. http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2003.08.007

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., & Petty, R. (1987). DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Washington, DC, 455.

Almasri, M. N. (2008). Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 577-593. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.022

Arab Ameri, A., Shirani, K., & Rezai, KH. (2015). Assessment of vulnerability of underground water by drastic method (Case study: Najafabad Plain). *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 12(43). (In Persian)

Azad Shahrak, F., Aghasi, A., Azad Shahrak, F., & Zarei, A. (2011). Vulnerability mapping of the hashtgerd aquifer using DRASTIC method and sensitivity analysis. *Journal of Water And Wastewater*, 2. (In Persian)

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, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005

Dixon, B. (2005). Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, 25(4), 327-347. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.07.002

Eshaghi Ilbeygi, S., Ganji Norouzi, Z., Dorostkar, V., Movahednejad, M.H., & Atari, M. (2021). Vulnerability assessment of Sabzevar Aquifer (Northeast of Iran) using Drastic model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*,16(1), 255-266. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.1.20.7. (In Persian)

Ghanbarian, M., & Ahmadi Nadoushan, M. (2019). Determination of aquifer vulnerability in Lordegan aquifer using DRASTIC, AVI and GODS models. *Journal of Research in Environmental Health*, 4(4), 257-271. https://doi.org/10.22038/jreh.2019.35710.1246. (In Persian)

Gogu, R. C., & Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology*, 39, 549-559. http://dx.doi.org/10.1007/s002540050466

Hamza, M. H., Added, A., Rodriguez, R., Abdeljaoued, S., & Mammou, A. B. (2007). A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia). *Journal of Environmental Management*, 84(1), 12-19. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.04.004

Joodavi, A., & Khazaei, S. (2016). A new method for groundwater vulnerability and risk mapping using GIS and numerical modeling. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(10), 241-251. (In Persian)

Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. J. (2007). Environmental geology: Handbook of field methods and case studies. Springer Science & Business Media.

Mahmoudpour, H., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2021). Design of the optimal groundwater quality monitoring network using the aquifer vulnerability map. *Iran-Water Resources Research*, 16(4), 154-173. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.4.11.1. (In Persian)

Marofi, S., Soleymani, S., Ghobadi, M.H., Rahimi, GH. & Marofi, H. (2012). Vulnerability assessment of Malayer plain groundwater by SINTACS, DRASTIC and SI models. *Water and Soil Conservation*, 19(2). (In Persian)

Mirzai, S., Naderi, M., Beigi, H., & Mohammadi, J. (2012). Vulnerability assessment of Shahrekord plain aquifer using Drastic model. *Environmental Impact Assessment Review*, 11(6), 143-151. (In Persian)

Mohebbi, Y., & Asghari Moghaddam, A. (2018). Kahriz plain aquifer vulnerability assessment using Drastic Model in GIS. *Environmental Geology Scientific Research Quarterly*, 45(11). (In Persian)

Nadiri, A., Akbari, E., Abbas Novinpour, E., & Gharekhani, M. (2019). Assessment of Khoy aquifer vulnerability using a combined method. *Journal of Water and Irrigation Management*, 9(2), 251-262. https://doi.org/10.22059/jwim.2019.290989.720. (In Persian)

Napolitano, P., & Fabbri, A. G. (1996). Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. IAHS *Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 235(235), 559-566.

Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., & Shafri, H. Z. M. (2014). Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71, 3119-3131. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2690-7

Saadati, H., Malekian, A., & Moghaddamnia, A. (2020). Assessment of vulnerability index and risk zoning in Ardabil plain. *Journal of Water and Irrigation Management*, 10(1), 157-171. https://doi.org/10.22059/jwim.2020.298424.770. (In Persian)

Sadat-Noori, M., & Ebrahimi, K. (2016). Groundwater vulnerability assessment in agricultural areas using a modified DRASTIC model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1-18. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4915-6

Tabarmayeh, M., & Vaezi, A. (2015). Vulnerability assessment of open aquifer of Tabriz plain. *Journal of Water and Soil*, 28(6), 1137-1151. (In Persian)

Umar, R., Ahmed, I., & Alam, F. (2009). Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of Central Ganga Plain, Western Uttar Pradesh. *Journal of the Geological Society of India*, 73, 193-201. https://doi.org/10.1007/s12594-009-0075-z

Vrba, J., & Zaporozec, A. (Eds.). (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *International Contribution for Hydrogeology*, 16, 1-131.