University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management **Online ISSN: 2382-9931**

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Optimization of DRASTIC Index to Assess the Vulnerability of Qazvin Plain with DA and GIS

Samaneh Ghafoori-Kharanagh[1] | Nargeskhatoon Dowlatabadi[2] | Aminreza Neshat[3]✉

1. Department of Water Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: sghafouri@ut.ac.ir
2. Department of Water Engineering, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: dolatabadi.narges@ut.ac.ir
3. Corresponding Author, Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: neshat.aminreza@srbiau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 5 March 2023
Received in revised form: 10 May 2023
Accepted: 1 July 2023
Published online: 2 July 2023

Keywords:
Groundwater vulnerability, logistic regression (Log), discriminant analysis (DA), GIS.

ABSTRACT

In recent years, the extraction of groundwater, especially in arid and semi-arid areas, has increased significantly due to the increase in population, the growing need for agricultural products, and the demand of industry. The increase in extraction from aquifers has been paralleled by the pollution and decrease in their quality. One of the effective ways to protect these resources is to identify areas with high vulnerability potential. Researchers have provided many methods to evaluate the pollution and vulnerability potential of groundwater sources, most of them are based on DRASTIC index. Also, in recent years, many researchers have modified it to improve the index. Therefore, in this research, the weight of DRASTIC index parameters has been improved using two statistical methods, logistic regression, and Discriminant Analysis. To validate DRASTIC-DA and DRASTIC-Log models, the correlation between these two indicators and nitrate concentration in Qazvin plain was used. The research results showed that the correlation coefficient between nitrate concentration and vulnerability index in the DRASTIC, DRASTIC-Log, DRASTIC-DA1 and DRASTIC-DA2 models are 40, 48.4, 51.8 and 55.5 percent, respectively. This is shows that the DRASTIC-Log method is more accurate than the DRASTIC method in determining the weight of the coefficients of the DRASTIC index, and the use of the Discriminant Analysis method will have a more appropriate approach than the Logistic Regression method.

Cite this article: Neshat, A. R., Ghafoori-Kharanagh, S., & Dowlatabadi, N. (2023). Optimization of DRASTIC Index to Assess the Vulnerability of Qazvin Plain with DA and GIS. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13(2), 565-580. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355062.1052

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355062.1052

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

بهینه‌سازی مدل DRASTIC جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان قزوین با ابزار DA و GIS

سمانه غفوری خرانق[۱] | نرگس‌خاتون دولت‌آبادی[۲] | امین‌رضا نشاط[۳]✉

۱. گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sghafouri@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: dolatabadi.narges@ut.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران. رایانامه: neshat.aminreza@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

کلیدواژه‌ها:
آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، تحلیل تشخیصی (DA)، رگرسیون لجستیک (Log)، GIS.

چکیده

درسال‌های اخیر برداشت از آب‌زیرزمینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک با توجه به افزایش جمعیت، نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی و نیز تقاضای صنعت به‌صورت چشمگیری افزایش یافته است. افزایش برداشت از آبخوان‌ها مقارن با آلودگی و کاهش کیفیت آن‌ها نیز شده است. یکی از راه‌کارهای مؤثر در حفاظت از این منابع، شناسایی مناطق دارای پتانسیل بالای آسیب‌پذیری می‌باشد. پژوهش‌گران روش‌های زیادی را برای ارزیابی آلودگی و پتانسیل آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی ارائه نموده‌اند که بیش‌تر آن‌ها براساس روش شاخص DRASTIC بنا شده‌اند. هم‌چنین در سال‌های اخیر پژوهش‌گران بسیاری نیز جهت بهبود شاخص اقدام به اصلاح آن نمودند. از این‌رو، در این پژوهش وزن پارامترهای شاخص DRASTIC با استفاده از دو روش آماری رگرسیون لجستیک و تحلیل تشخیصی ارتقا داده شده است. به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌های DRASTIC-DA و DRASTICQ-Log از همبستگی این دو شاخص و غلظت نیترات در دشت قزوین استفاده گردید. نتایج پژوهش نشان داد، ضریب همبستگی بین غلظت نیترات و شاخص آسیب‌پذیری در مدل DRASTIC، DRASTIC-Log، DRASTIC-DA1 و DRASTIC-DA2 به‌ترتیب برابر ۴۰، ۴۸/۴، ۵۱/۸ و ۵۵/۵ درصد می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده این مطلب است که در تعیین وزن ضرایب روش DRASTIC، روش DRASTIC-Log از دقت بالاتری نسبت به روش DRASTIC برخوردار می‌باشد و هم‌چنین استفاده از روش تحلیل تشخیصی رویکرد مناسب‌تری نسبت به روش رگرسیون لجستیک خواهد داشت.

استناد: نشاط، امین‌رضا؛ غفوری خرانق، سمانه و دولت‌آبادی، نرگس خاتون (۱۴۰۲). بهینه‌سازی مدل DRASTIC جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان قزوین با ابزار DA و GIS. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۲)، ۵۶۵-۵۸۰. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355062.1052

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

امروزه با توجه به فشار روزافزون بر منابع آب‌زیرزمینی، یافتن راه‌کارهای مدیریتی جهت کاهش اثرات منفی این فشار و برداشت بی‌رویه ضرورت می‌یابد. در کشورهای خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران، آب‌های زیرزمینی به‌طور عمده تنها منبع اصلی آب آشامیدنی برای جمعیت ساکن در آن مناطق می‌باشد. بنابراین مدیریت، پایش و حفاظت از این منابع از مسایل مهم زیست‌محیطی می‌باشد. از سویی دیگر، با توجه به عدم سهولت در تصفیه در صورت آلودگی، علاوه بر مسایل کمی آبخوان‌ها، مسایل کیفی آن‌ها نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌طوری‌که امروزه ورود آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی بر سلامت انسان و سایر جانداران تأثیر سوء داشته و نگرانی خاصی را در بین متخصصان محیط زیست ایجاد نموده است. با توجه به گسترش و هم‌چنین توسعه دو بخش شهری و کشاورزی در مجامع انسانی ورود آلاینده‌ها از جمله نیترات به آبخوان‌ها رو به افزایش است. وجود نیترات در آب‌های زیرزمینی اغلب نشان‌دهنده آلودگی با کودهای نیتروژنی و یا فاضلاب‌های انسانی که در سطح زمین تولید می‌شود، است (Javadi *et al*., 2017). در حوضه رودخانه الخورن، نبراسکا، ایالات متحده آمریکا مطالعه‌ای صورت گرفت و نتایج نشان داد که آسیب‌پذیری آبخوان وابستگی بالایی به آلودگی نیترات در منطقه دارد که این مورد را می‌توان با عامل کاربری اراضی در مدل آسیب‌پذیری DRASTIC وارد نمود (Li *et al*., 2014). بنابراین ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به آلودگی و شناسایی مناطق دارای پتانسیل آلودگی می‌تواند گامی مهم در اجرای برنامه‌های حفاظت و مدیریت آب‌های زیرزمینی باشد.

یکی از رایج‌ترین روش‌های شناسایی مناطق دارای پتانسیل آسیب‌پذیری و برآورد آن، روش DRASTIC است که توسط آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا در ۱۹۸۹ ارائه شده است (Aller *et al*., 1987). این مدل به‌دلیل دارابودن پارامترهای مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی در آبخوان به‌کار می‌رود. مدل DRASTIC به‌طور گسترده در مطالعات موردی مختلف برای ارزیابی آسیب‌پذیری به‌کار رفته است. پژوهش‌های فراوانی به استفاده از این مدل در جهت شناسایی و برآورد آسیب‌پذیری آبخوان‌ها و هم‌چنین بهبود این روش در نقاط مختلف جهان از جمله ایران پرداخته شده است که از آن‌جمله می‌توان به مواردی هم‌چون Fritch *et al*. (2000) در شمال مرکزی تگزاس، Celico and Naclerio (2005) در ایتالیا، Chitsazan and Akhtari (2009) در دشت کران در خوزستان ایران، Javadi *et al*. (2010) در آبخوان آستانه ایران، Neshat *et al*. (2014) در دشت کرمان ایران، Javadi *et al*. (2017) در دشت قزوین ایران، Mishra *et al*. (2023) در هند و ... اشاره نمود. این روش را می‌توان در مقیاس‌های مختلف استفاده نموده و با توجه به انعطاف‌پذیری این روش می‌توان با افزودن و یا حذف پارامترها به آن، آن را اصلاح نمود. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در جهان براساس روش DRASTIC نشان می‌دهد که این روش باید برای هر منطقه مطالعاتی کالیبره شود تا نتایج دقیق‌تری برای هر منطقه حاصل نماید. بنابراین پژوهش‌های بی‌شماری برای اصلاح وزن و رتبه در این مناطق مختلف صورت گرفته است که یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، رویکردهای آماری براساس اطلاعات موجود در هر منطقه مورد مطالعاتی است. Javadi *et al*. (2011) در آبخوان آستانه در شمال ایران از روش آماری همبستگی پارامترهای روش DRASTIC با پارامتر نیترات، برای اصلاح وزن‌های پارامترهای روش DRASTIC استفاده نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که روش DRASTIC اصلاح‌شده با استفاده از رویکرد آماری می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی از روش DRASTIC کلاسیک برتر باشد.

رویکردهای آماری طیف وسیعی از روش‌های موجود در ارزیابی آلودگی و آسیب‌پذیری را در بر می‌گیرند. یکی

از روش‌های مناسب در به‌دست‌آوردن تابع عملکرد عوامل مستقل مؤثر در یک پدیده، تحلیل رگرسیون است (Kosaki *et al*., 1989). در به‌دست‌آوردن توابع جهت بررسی و ارزیابی آسیب‌پذیری با توجه به شاخص‌های آلودگی مانند نیترات، روش رگرسیون لجستیک تا کنون نتایج قابل قبولی ارائه نموده است. Nolan *et al*. (2002) از مدل رگرسیون لجستیک برای شناسایی متغیرها برای پیش‌بینی احتمال بیش از ۴ میلی‌گرم در لیتر نیترات در آب‌های زیرزمینی کم عمق در ایالت متحده استفاده نمودند و نتایج آن‌ها حاکی از کارایی این روش در برآورد آلودگی آبخوان بود. Mair and El-Kadi (2013) با استفاده از رگرسیون لجستیک آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را در هاوایی مدل‌سازی نمودند. نتایج نشان داد که مدل LR به‌خوبی گروه‌هایی از چاه‌ها با کم‌ترین و بیش‌ترین غلظت نیترات را شناسایی می‌کند. Jmal *et al*. (2017) در مطالعه‌ای در قسمت غربی مرکزی تونس در آبخوان کم‌عمق سید بوعزید، که به‌علت استفاده کودهای نیتراته در زمین‌های کشاورزی آلوده شده بود، ۳۸ نمونه تهیه شد. برای بررسی اثر نیترات بر آلودگی آب‌های زیرزمینی، رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، تحلیل کوواریانس (ANCOVA) و رگرسیون لجستیک (LR) انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که رابطه بین کلاس‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و غلظت نیترات در مدل رگرسیون لجستیک نتایج قابل‌قبولی را حاصل می‌نماید. روش‌های دیگر آماری نیز تاکنون مورداستفاده قرار گرفته است که از آن جمله می‌توان به تحلیل تشخیصی اشاره نمود.

روش تحلیل تشخیصی نیز از جمله روش‌های آماری می‌باشد که در سال‌های اخیر برای اصلاح و بهبود نتایج روش DRASTIC به‌کار گرفته شده است. Jang *et al*. (2016) در جلگه رودخانه Choushui در تایوان براساس روش درستیک برای تعیین مناطق دارای پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان، از روش تحلیل تشخیصی برای تعیین وزن عوامل در مدل DRASTIC استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل DRASTIC اصلاح‌شده با استفاده از DA به‌طور قابل‌توجهی عملکرد پیش‌بینی را برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان بهبود می‌بخشد و مناطق حفاظت آب زیرزمینی می‌تواند به‌درستی براساس شاخص DRASTIC اصلاح شده تعیین شود. Liang *et al*. (2016) در سطح دشت Pingtung در جنوب تایوان برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، با استفاده از روش تحلیل تشخیصی ضرایب وزنی فاکتورهای روش DRASTIC را اصلاح نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل اصلاح‌شده، روشی قابل‌اعتماد در پیش‌بینی و استفاده در تعیین آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی نیترات می‌باشد.

با توجه به وسعت و اهمیت دشت قزوین در بخش کشاورزی به‌عنوان یکی از بزرگترین آبخوان‌ها در ایران، با بیش از ۲ میلیارد مترمکعب آب در هر سال Javadi *et al*. (2017)، هدف این پژوهش استفاده از روش‌های آماری پر کاربرد رگرسیون لجستیک و تحلیل تشخیصی جهت اصلاح روش DRASTIC در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین می‌باشد. از سویی دیگر، برای بهبود عملکرد روش DRASTIC اصلاح‌شده از پارامتر نیترات به‌عنوان شاخصی از آلایندگی آبخوان استفاده شده است.

مراحل و چارچوب نظری پژوهش حاضر براساس استفاده از شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC رویکردهای آماری ذکرشده شکل گرفته است. برای تدوین تعیین روش DRASTIC اصلاح‌شده و ارائه‌شده، متدولوژی پژوهش براساس شکل (۱) پیشنهاد شده است.

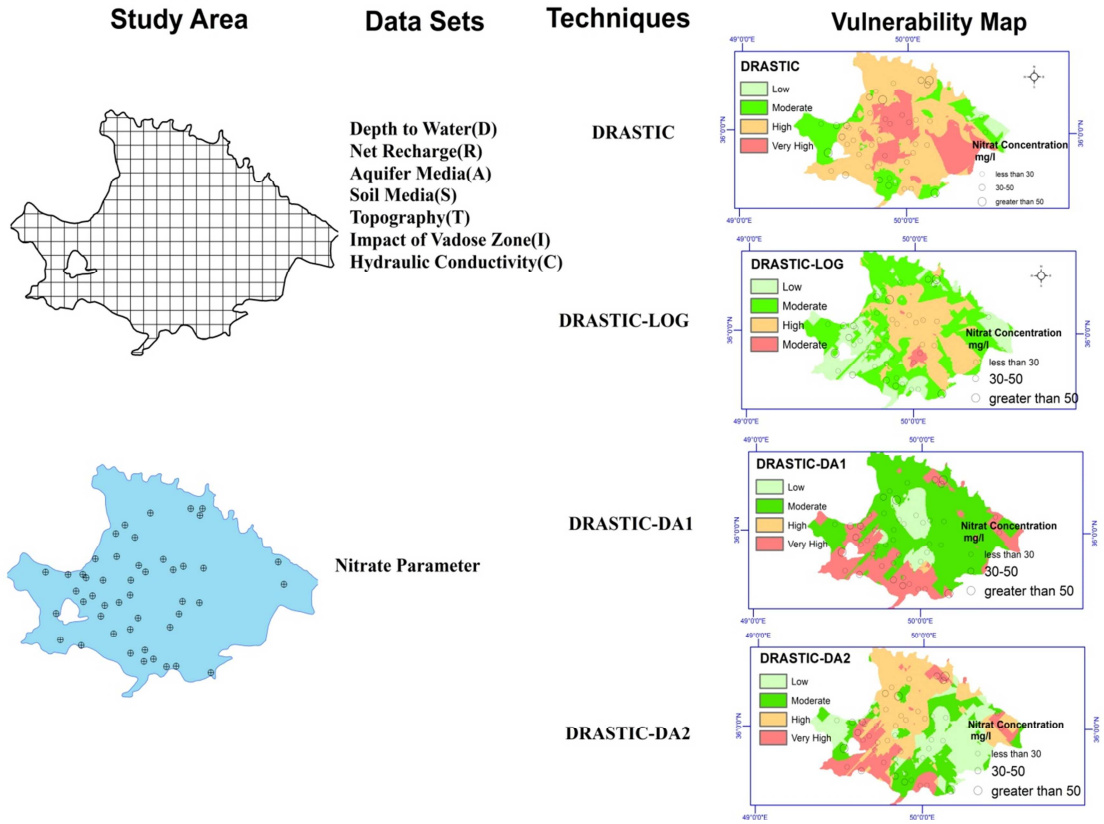

Figure 1. Methodology framework using in the present study

۲. منطقه موردمطالعه و داده‌ها

۲–۱. محدوده موردمطالعه

محدوده مطالعاتی قزوین با مساحتی حدود ۴۹۴۲ کیلومتر مربع بزرگ‌ترین دشت حوضه آبریز دریاچه نمک می‌باشد و مستعد کشور برای تولید محصولات کشاورزی است. این دشت در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی در نواحی مرکزی ایران قرار دارد. جلگه آبرفتی پهناور این دشت از رسوبات جریان‌های سطحی کوه‌های اطراف تشکیل شده است. ارتفاع جلگه بین ۱۱۵۰ تا ۱۵۰۰ متر متغیر می‌باشد، در حالی‌که ارتفاع نواحی کوهستانی بین ۲۹۰۰ متر در شمال‌شرق به ۲۶۰۰ متر در جنوب دشت تغییر می‌یابد. عمق سنگ بستر تقریباً بین ۷۰ تا ۳۷۰ متر در آبخوان دارای نوسان است. لایه اشباع نیز در منطقه تغییراتی در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر دارد و هم‌چنین جهت حرکت آب زیرزمینی در این آبخوان از شمال‌غربی به جنوب‌شرقی می‌باشد (Javadi *et al.*, 2017). مطالعات نشان داده است که رسوبات آبرفتی در آبخوان قزوین دارای نفوذپذیری مناسبی می‌باشد که هرگونه ماده آلوده مورداستفاده در سطح از جمله کودهای نیترات به سهولت در اثر مجاورت با سطح زمین و یا بارندگی به درون آبخوان نفوذ کرده و آلودگی آبخوان راتشدید می‌نمایند (Kholghi *et al.*, 2010). دشت قزوین به‌دلیل نزدیکی به پایتخت، وجود شبکه گسترده‌ای از راه‌های ارتباطی، برخورداری از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی و وجود زمین‌های حاصل‌خیز و منابع معدنی غنی در این محدوده باعث شده است تا امور توسعه‌ای در این دشت، رونق چشمگیری یافته و فعالیت‌های مختلف کشاورزی، دامداری، صنعتی و معدنی در آن با گذشت زمان

افزایش یابد. با توجه به گستردگی فعالیت‌های توسعه‌ای منطقه که سبب آلودگی آبخوان در این منطقه می‌شود مدیریت منابع آب نیازمند انجام مطالعات مختلف در زمینه آسیب‌پذیری آبخوان در منطقه می‌باشد. این مسئله از آن جهت دارای اهمیت دو چندان می‌باشد که تنوع فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه باعث واردشدن آلاینده‌های مختلف از جمله نیترات به منابع آب زیرزمینی شده است که افزایش غلظت این آلاینده‌ها می‌تواند مخاطرات جدی را برای بهره‌برداران از این منابع آب به همراه داشته باشد.

شکل (۲)، موقعیت جغرافیایی دشت موردمطالعه در کشور ایران و پراکندگی ۴۹ چاه نمونه‌برداری از نیترات را نشان می‌دهد.

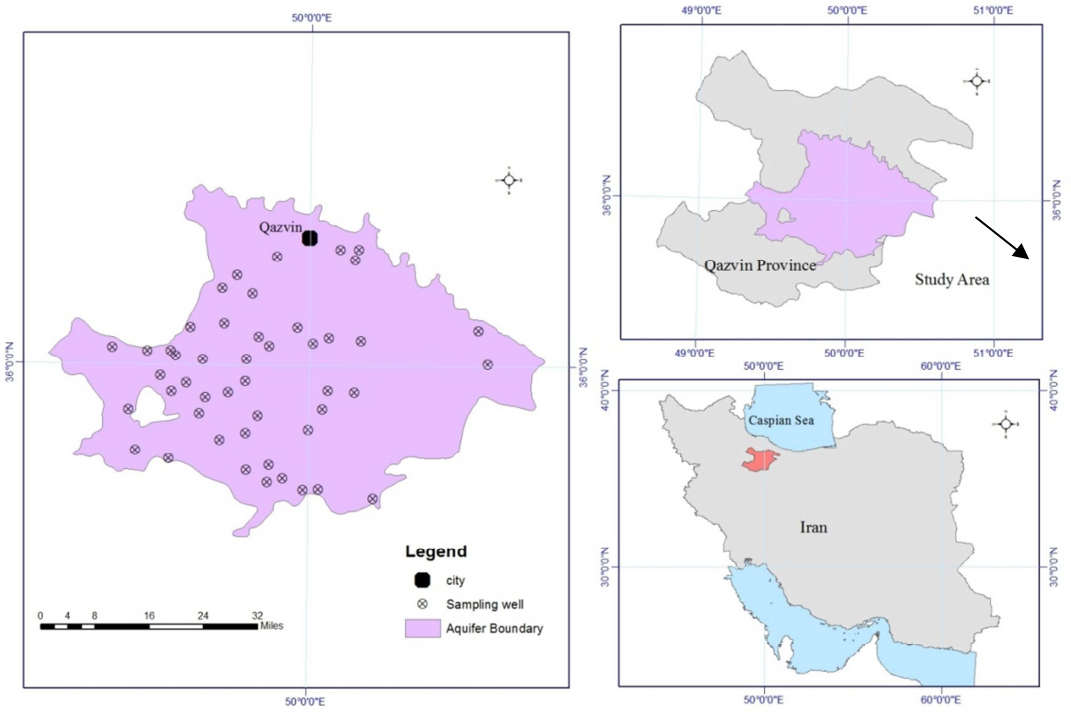

Figure 2. The study area

۲-۲. داده‌ها

جهت کاربرد روش‌های آماری رگرسیون لجستیک و تحلیل تشخیصی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با توجه به شاخص نیترات، داده‌ها از منابع مختلفی جمع‌آوری و در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌گونه که اشاره شد وجود نیترات در آب های زیرزمینی اغلب بر اثر استفاده از کودهای نیتروژنی موجود در سطح است. بنابراین نیترات شاخص مناسبی در انتقال آلودگی به سفره آب زیرزمینی است (Javadi *et al*., 2017). برای تدقیق رویکرد پژوهش که براساس روش‌های آماری و شاخص ارزیابی آسیب‌پذیری DRASTIC است، از پارامتر نیترات براساس ۴۷ چاه نمونه‌برداری استفاده شده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.1 نقشه پارامترهای مختلف شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC تهیه شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.

Table 1. Data sources used for constructing the vulnerability maps

Data Type	Source	considerations
Groundwater table	Qazvin Regional Water Auhority	A total of 49 Piezometers Wells
Soil Map	Soil and Water Research Institute of Qazvin	
DEM	National Cartographic Center	
Hydrogeological data	Qazvin Regional Water Auhority	
Quality sample wells	Qazvin Regional Water Auhority	
Geology map	Qazvin Regional Water Auhority	
Water Balance	Qazvin Regional Water Auhority	

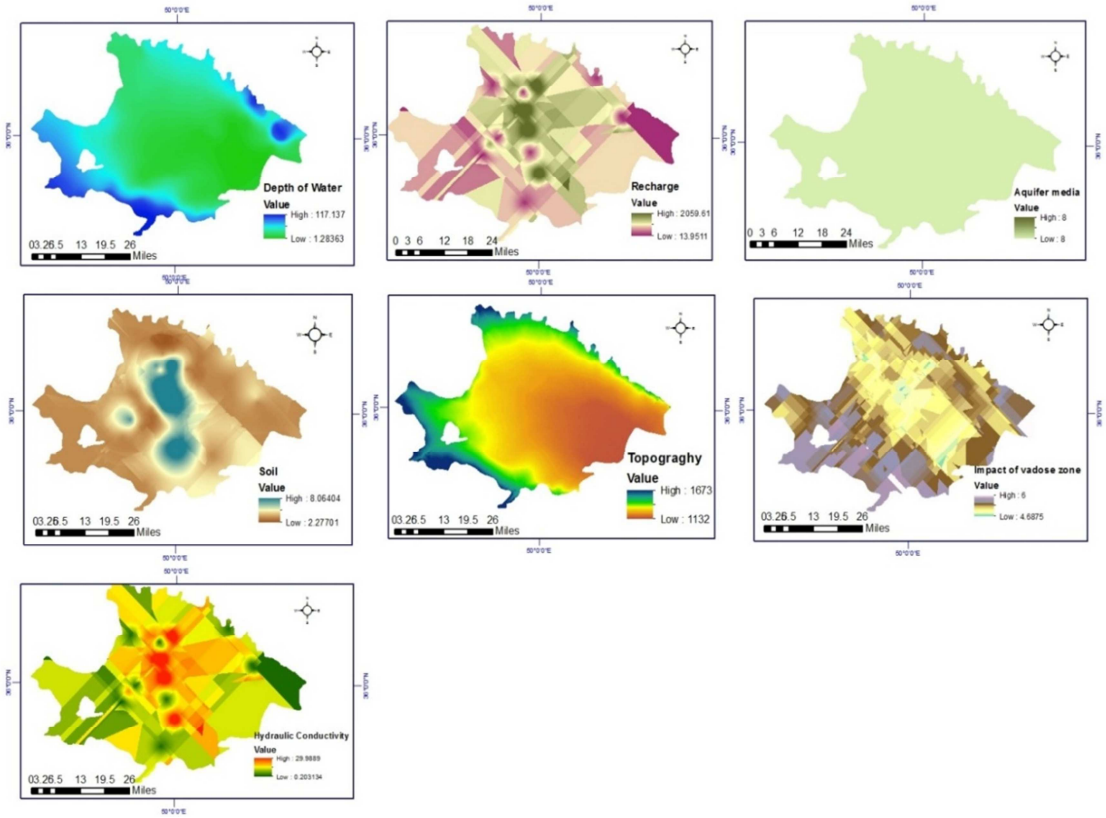

Figure 3. Classification of DRASTIC vulnerability index parameters

۳. مواد و روش‌ها

۳– ۱. ارزیابی آسیب‌پذیری با روش DRASTIC

اکثر مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری براساس نقشه‌برداری از شاخص آسیب‌پذیری تعیین‌شده با توجه به عوامل مختلف مربوط به خاک، منطقه هوادار و منطقه اشباع، محاسبه می‌شوند. این مدل‌ها غالباً یک مدل‌سازی ریاضی از ترکیب وزن و یا رتبه‌بندی فاکتورها برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری عددی می‌باشند (Sinan and Razack, 2009). یکی از محبوب‌ترین روش‌های محاسبه آسیب‌پذیری، روش DRASTIC است. روش DRASTIC برای اولین بار توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا توسعه یافته وبه‌عنوان یک سیستم استاندارد جهت ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌ها بارها در سراسر جهان مورداستفاده قرار گرفته است. از روش DRASTIC می‌توان به‌عنوان راهنمایی برای توسعه اراضی و حفاظت منابع استفاده نمود. مدل DRASTIC زمینه‌ای را فراهم می‌کند تا پتانسیل آلودگی هر منطقه به‌طور سیستماتیک با استفاده از اطلاعات موجود ارزیابی شود (Mohammadi *et al*., 2009). این مدل از یک سیستم

رتبه‌بندی عددی استفاده می‌کند که وزن نسبی را به پارامترهای مختلفی اختصاص می‌دهد که در ارزیابی آسیب‌پذیری نسبی آب زیرزمینی به آلودگی کمک می‌کند. مدل DRASTIC، حساسیت ذاتی آبخوان را به آلودگی با استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناسی و توپوگرافی تعریف می‌کند. این مجموعه شامل هفت مشخصه آبخوان است؛ عمق آبخوان (D)، تغذیه آبخوان (R)، محیط آبخوان (A)، ویژگی‌های خاک (S)، شیب و یا توپوگرافی (T)، ویژگی‌های منطقه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C). شاخص آسیب‌پذیری در این روش از مجموع حاصلضرب وزن و رتبه هفت پارامتر مطابق فرمول زیر به‌دست می‌آید. رتبه مربوط به هر پارامتر بین یک تا ۱۰ متغیر بوده و وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن بین یک تا پنج متغیر می‌باشد.

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

که در آن، DI شاخص درستیک، اندیس r و w به‌ترتیب نشان‌دهنده رتبه و وزن شاخص‌ها می‌باشد.

در دشت قزوین، پس از جمع‌آوری داده‌ها لایه‌های مربوط به هر یک از فاکتورهای روش DRASTIC تهیه گردید. سپس ضرایب این روش براساس جداول استاندارد که نشان‌دهنده تأثیر انتقال آلودگی و آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد، تعیین شد. در نهایت نقشه آسیب‌پذیری آبخوان براساس روش DRASTIC تهیه شد که در شکل (۴) نشان داده شده است.

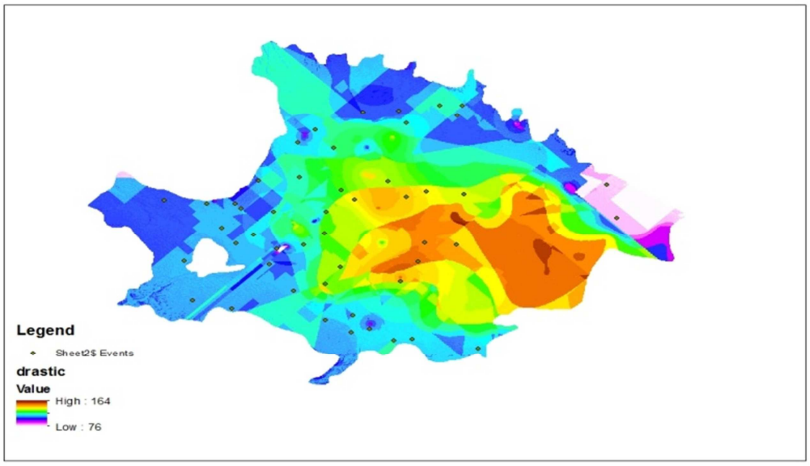

Figure 4. Groundwater vulnerability map of Qazvin plain using DRASTIC model

۳– ۲. ارزیابی آسیب‌پذیری براساس تلفیق روش DRASTIC و رویکردهای آماری

روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری را می‌توان به سه گروه تقسیم نمود که شامل: مدل‌های شبیه‌سازی، روش‌های آماری و روش‌های شاخص محور می‌شود (Dixon, 2004). رویکردهای آماری تاکنون به فراوانی در ارزیابی آلودگی و آسیب پذیری آبخوان‌ها استفاده شده‌اند. براساس اطلاعات مربوط به آلودگی، می‌توان از روش‌های آماری برای نشان‌دادن روابط بین داده‌های پژوهش و عوامل مرتبط با آلودگی استفاده کرد. سپس شاخص‌های ارزیابی را می‌توان تعیین نمود و هر شاخص با توجه به اهمیت آن به‌وسیله روش آماری تحلیل می‌شود. استفاده از رگرسیون خطی، رگرسیون لجستیک، تحلیل تشخیصی، توابع احتمالاتی و غیره از جمله‌روش‌های آماری می‌توانند باشند.

تاکنون روش DRASTIC با استفاده از روش‌های آماری زیادی اصلاح شده است. به‌عنوان نمونه، با استفاده از اندازه گیری نیترات در آبخوان‌ها با استفاده از چاه‌های نمونه‌برداری، از روش آماری برای تعیین همبستگی غلظت نیترات با شاخص آسیب‌پذیری و تعیین رتبه‌بندی پارامترها در روش DRASTIC، استفاده شده است.

۳ – ۲ – ۱. تحلیل تشخیصی (Discriminant Analysis)

تحلیل تشخیصی، روشی جهت تجزیه و تحلیل آماری برای پیش‌بینی یک متغیر وابسته طبقه‌بندی‌شده (متغیر گروه‌بندی) توسط یک یا چند متغیر مستقل است. این روش در ابتدا توسط رونالد فیشر در سال ۱۹۳۶ ارائه شده است. از این روش برای تعیین متغیرهایی که بین دو یا چند گروه تمایز ایجاد می‌کنند، استفاده می‌شود. تحلیل تشخیصی در تعیین این‌که آیا مجموعه‌ای از متغیرها، در تابع عضویت پیش‌بینی مؤثر هستند، مفید است. به‌عبارت دیگر، تحلیل تشخیصی در صدد است تا ترکیب‌های خطی بین متغیرهای مستقل را که قادرند به بهترین نحو گروه‌هایی از مشاهدات براساس یک متغییر وابسته را از هم جدا کنند، شناسایی کند. به‌عنوان مثال در روش DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با توجه به متغییر وابسته‌ای مانند نیترات، تحلیل تشخیصی توانایی ارائه ترکیبی خطی از پارامترهای روش DRASTIC براساس طبقه‌بندی نیترات را دارد. از این‌رو، می‌توان گفت که تحلیل تشخیصی شبیه رگرسیون خطی چندمتغیره است، با این تفاوت که در رگرسیون خطی، متغیر وابسته در سطح فاصله‌ای یا نسبی است، اما در تحلیل تشخیصی مقیاس متغیر وابسته اسمی دو یا چند وجهی است. بنابراین با توجه به شباهت تحلیل تشخیصی و رگرسیون از جمله رگرسیون لجستیک، برای تحلیل و ارتقای روش DRASTIC، هر دو روش می‌تواند استفاده شود. رگرسیون لجستیک بسیاری از مفروضات و محدودیت‌های روش تحلیل تشخیصی را ندارد. با این‌حال، هنگامی‌که مفروضات تحلیل تشخیصی برآورده شود، قوی‌تر از رگرسیون لجستیک است (Jang *et al*., 2016). توابع ارائه شده توسط روش تحلیل تشخیصی می‌توانند به‌عنوان یک مدل پیش‌بینی عمل کنند و برای طبقه بندی موارد جدید استفاده شوند (Jain *et al*., 2017)، که از این ویژگی می‌توان برای اصلاح روش DRASTIC براساس پارامتر نیترات استفاده نمود.

در ارائه ترکیب خطی برای هر یک از گروه‌های طبقه‌بندی شده، تابع تحلیل تشخیصی خطی بر فرض تبعیت متغیرهای مستقل از توزیع نرمال و برابری کواریانس آن‌ها استوار می‌باشد (Antonogeorgos *et al*., 2009). بنابراین تفاوت اساسی رگرسیون لجستیک با تحلیل تشخیصی این است که در تحلیل تشخیصی فرض می‌شود متغیرهای مستقل دارای توزیع نرمال می‌باشند در حالی‌که اگر این فرض برقرار نباشد استفاده از رگرسیون لجستیک منطقی‌تر می‌باشد. برای استفاده از روش تحلیل تشخیصی در این پژوهش فرضیات روش تحلیل تشخیصی براساس مسئله موردنظر مورد ارزیابی قرار گرفت تا مشخص شود که آیا استفاده از رویکرد تحلیل تشخیصی مناسب خواهد بود؟ بنابراین فرض بر این است که داده‌ها از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند (Fidell and Tabachnik, 1996). با توجه به آزمون کلموگروف اسمیرنوف انجام‌شده این فرض برای پنج پارامتر از هفت پارامتر روش DRASTIC برقرار می‌باشد. پارامتر خاک به‌دلیل کیفی‌بودن داده‌ها نرمال نمی‌باشد، لذا از ترکیب خطی و تحلیل‌ها کنار گذاشته شده است. بررسی توزیع مجموعه داده‌های هر یک از پارامترهای روش DRASTIC براساس شاخص نیترات در شکل (۵) ارائه شده است. بنابراین داده‌های موجود در پنج گروه (D, R, T, I & C) نرمال بوده و براساس فرضیات روش تحلیل تشخیصی، از این رویکرد می‌توان در اصلاح روش DRASTIC استفاده نمود. در تحلیل تشخیصی باید متغیر وابسته متغیری اسمی و دو یا چندوجهی باشد؛ در این مطالعه متغیر وابسته (پارامتر کیفی نیترات) براساس تعیین یک آستانه مشخص ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان آستانه آلودگی آبخوان، متغیری دو وجهی است. متغیرهای مستقل در رویکرد تحلیل تشخیصی باید در سطح سنجش فاصله‌ای قرار گیرند، این ویژگی در روش DRASTIC براساس جداول استاندارد الر وجود دارد. برای هر گروه از طبقه بندی متغیر وابسته باید حداقل دو نمونه وجود داشته باشد. در مطالعه حاضر، مقدار نیترات به‌عنوان متغیر وابسته در دو گروه طبقه‌بندی شده و برای گروه غلظت نیترات کم‌تر/ بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب ۴۰ و ۹ نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است و در نهایت واریانس هیچ یک از متغیرهای مستقل در گروه‌هایی که تشکیل می‌شوند، نباید صفر

باشد (Poulsen *et al.*, 2008). در سری داده‌های موجود در این مطالعه به‌دلیل آن‌که لایه آبخوان دارای واریانس صفر بوده و هم‌چنین از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند از تحلیل حذف شده است.

رویکرد تحلیل تشخیصی شبیه به یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی می‌باشد و ترکیبی وزنی از متغیرهای مستقل را ارائه می‌دهد.

$$Di = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots + b_nx_n$$

که در آن، Di: نمره پیش‌بینی و نمره تفکیک، X متغیر پیش‌بینی و b ضریب تفکیک می‌باشد.

همان‌گونه که اشاره شد منطقه موردمطالعه جزو دشت‌هایی می‌باشد که فعالیت کشاورزی به‌صورت گسترده در آن انجام می‌شود. استفاده گسترده از سموم و به‌ویژه کودهای نیتروژنه بر آلودگی آبخوان افزوده است. وجود این‌گونه مواد با توجه به برگشت آب کشاورزی به آبخوان، پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان را افزایش خواهد داد. برای ارزیابی آسیب‌پذیری روش DRASTIC مورداستفاده قرار گرفته است و هم‌چنین جهت ارائه ترکیب خطی از پارامترهای روش DRASTIC براساس تحلیل تشخیصی در این پژوهش، غلظت نمونه‌برداری‌شده پارامتر نیترات از چاه‌های منطقه، به‌عنوان متغیر طبقه‌بندی انتخاب شده است. گروه‌بندی نیترات با توجه به منطقه موردمطالعه و شاخص نیترات با توجه به استاندارد آب شرب (WHO) کم‌تر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به دو گروه کم‌تر/ بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر طبقه‌بندی شد. به این ترتیب مقدار نیترات دو گروه طبقه‌بندی شده و برای گروه غلظت نیترات کم‌تر/ بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به‌ترتیب ۴۰ و نُه نمونه از چاه‌های نمونه‌برداری موجود، وجود دارد.

پس از طبقه‌بندی داده‌های نیترات و هم‌چنین توجه به فرضیات روش تحلیل تشخیصی، دو ترکیب خطی زیر برای مناطق با مقادیر طبقه‌بندی‌شده نیترات در دشت قزوین ارائه شده است. تابع تحلیل تشخیصی براساس غلظت نیترات در سطوح کم‌تر/ بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، به‌ترتیب به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\text{DA-DRASTIC1}=0.889\,Depth - 0.002\,Recharge + 0.021\,K - 0.078\,Slop - 0.028\,Vados - 0.428\,Soil - 22.871$$

$$\text{DA-DRASTIC2}=0.234\,Depth + 0.003\,Recharge + 1.162\,K + 0.571\,Slop - 0.402\,Vados - 0.625\,Soil + 3.813$$

پس از تعیین دو معادله حاصل از DRASTIC اصلاح‌شده با تحلیل تشخیصی نقشه آسیب‌پذیری آبخوان براساس دو روش DRASTIC-DA1 و DRASTIC-DA2 تهیه شد که در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است.

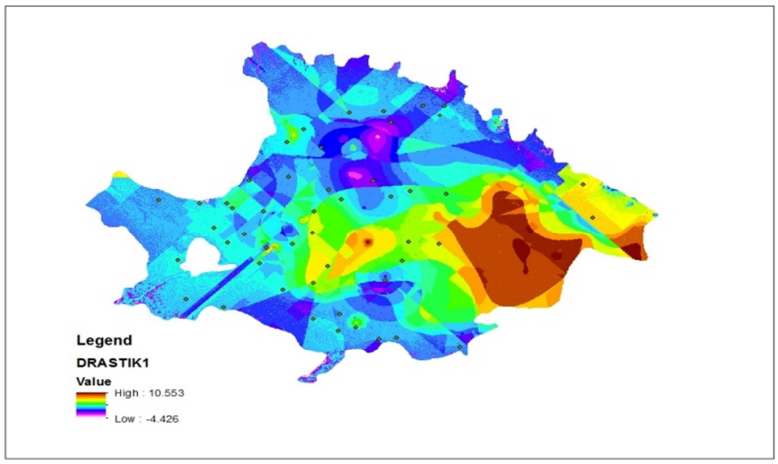

Figure 5. Groundwater vulnerability map of Qazvin plain using DRASTIC-DA1 model

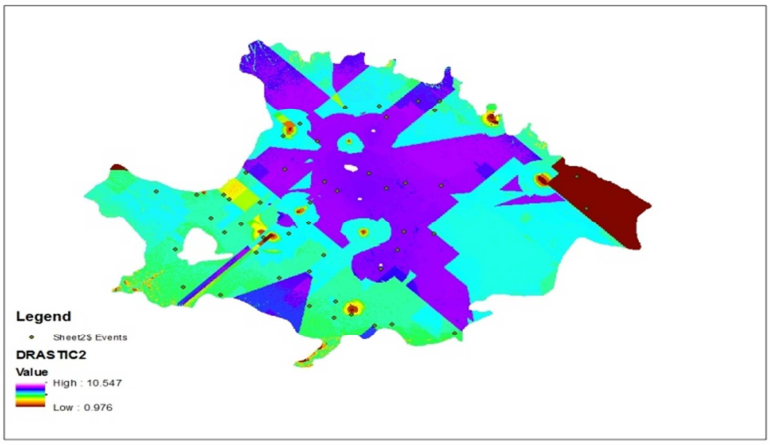

Figure 6. Groundwater vulnerability map of Qazvin plain using DRASTIC-DA2 model

۳– ۲–۲. رگرسیون لجستیک

رگرسیون لجستیک نوع خاصی از رگرسیون چندگانه است با این تفاوت که در این مدل رگرسیون لجستیک، متغیر وابسته به‌صورت باینری می‌باشد، و تنها می‌تواند دو حالت صفر و یا یک را بپذیرد. تعیین ترکیب خطی بین متغیر وابسته کیفی دو حالته و مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده می‌تواند با استفاده از رگرسیون لجستیک صورت گیرد (Lee, 2005). مزیت رگرسیون لجستیک نسبت به سایر روش‌های تعیین رابطه بین متغیر مستقل و وابسته این می‌باشد که ضرایب مدل را براساس روش حداقل مربعات محاسبه می‌کند، از این رو لزومی برای وجود رابطه خطی میان متغیر مستقل و وابسته وجود ندارد (Shirzadi *et al*., 2012). بنابراین استفاده از رگرسیون لجستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص آلودگی نیترات امکان‌پذیر است، زیرا بین متغیرهای مستقل در روش DRASTIC و پارامتر نیترات لزومی به وجود رابطه خطی نیست.

با توجه به ویژگی بیان‌شده در مورد رگرسیون لجستیک مبنی بر باینری‌بودن متغیر وابسته، در ابتدا شاخص نیترات با تعیین یک حد آستانه، به متغیر باینری تبدیل می‌شود. در این پژوهش حد آستانه با توجه به استاندارد آب شرب WHO برابر با ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر انتخاب شده است. سپس با استفاده از رگرسیون لجستیک مدلی برای تعیین رابطه بین متغیر وابسته که در مسئله پارامتر نیترات به‌عنوان شاخصی از آلایندگی آبخوان و مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده که پارامترهای مدل DRASTIC، به‌عنوان شاخص‌های بررسی‌کننده آسیب‌پذیری آبخوان دشت قزوین می‌باشند، ارائه شده است. معادله رگرسیون لجستیک در این تعیین آسیب‌پذیری براساس رابطه زیر فرموله شده و نقشه نهایی آن در شکل (۷) ارائه شده است.

$$LOG-DRASTIC = 0.05D + 0.017R - 2.807S - 0.19T + 2.911I - 1.035C + 13.191$$

۴. نتایج و بحث

۴– ۱.آسیب‌پذیری DRASTIC

نقشه آسیب‌پذیری دشت قزوین براساس داده‌های موجود و جداول الر در نرم‌افزار ArcGIS 10.1 براساس هفت پارامتر DRASTIC و در فرمت رستر تهیه و در شکل (۴) ارائه شده است. براساس این نقشه مناطق مرکزی جنوب‌شرقی آبخوان دارای پتانسیل بالای آسیب‌پذیری می‌باشد.

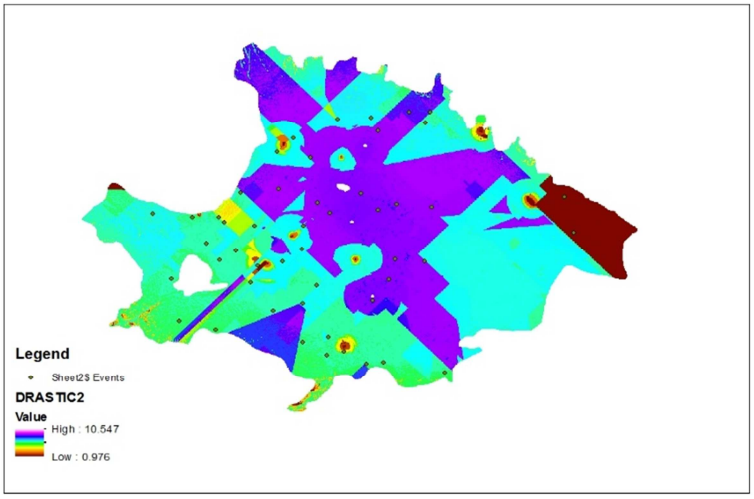

Figure 7. Groundwater vulnerability map of Qazvin plain using LOG-DRASTIC model

۴– ۲. آسیب‌پذیری DRASTIC براساس رویکرد آماری تحلیل تشخیصی

آنالیزهای آماری و تعیین معناداری ترکیب‌های ارائه‌شده توسط تحلیل تشخیصی در نرم‌افزار SPSS انجام شد و نتایج نشان داد که ترکیب‌های ارائه‌شده در سطح معناداری ۹۵ درصد، معنادار می‌باشند. در این پژوهش تحلیل تشخیصی توانسته دو تابع تشخیصی کانونی را شناسایی کند که براساس تعداد داده‌های موجود در هر گروه تابع اول می‌تواند تقریباً ۸۰ درصد از کل واریانس را تبیین نماید و این درحالی است که تابع دوم توانسته است ۲۰ درصد از کل واریانس را تبیین کند. لازم به ذکر است طبقه‌بندی براساس غلظت نیترات در چاه‌ها با توجه به غلظت کم‌تر/ بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر انجام شده است که به‌ترتیب در دو گروه ۴۰ و نُه داده طبقه‌بندی شده است.

جدول (۲) میزان همبستگی میان هر متغیر مستقل را با تابع تشخیصی نشان می‌دهد. این مقادیر معادل بارهای عاملی در آنالیز عاملی هستند. هرچه مقدار این اعداد به یک نزدیک تر باشد، نشان از نقش مؤثرتر آن متغیر در تابع تشخیصی دارد. نتایج این پژوهش نشان داد که در نیترات کم‌تر از ۵۰ میلی‌گرم اثر پارامتر عمق و توپوگرافی بیش‌تر است و در نیترات بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم اثر پارامتر تغذیه و هدایت هیدرولیکی بیش‌تر می‌باشد.

Table 2. Correlation of each independent variable with discriminant function

	Function 1	Function 2
D	0.711	-0.2
R	0.04	0.391
S	0.146	0.310
T	0.503	0.189
I	0.169	0.11
C	0.04	0.391

براساس نتایج حاصله میزان، موفقیت تابع ممیزی را در دسته‌بندی صحیح مشاهدات گروه یک و گروه دو به‌ترتیب برابر با ۷۲/۴ و ۶۰ درصد می‌باشد که به این معنا است که براساس مدل پیشنهادی طبقه‌بندی صورت گرفته دارای دقت قابل‌قبولی می‌باشد. این نتایج در شکل (۸) نشان شده است.

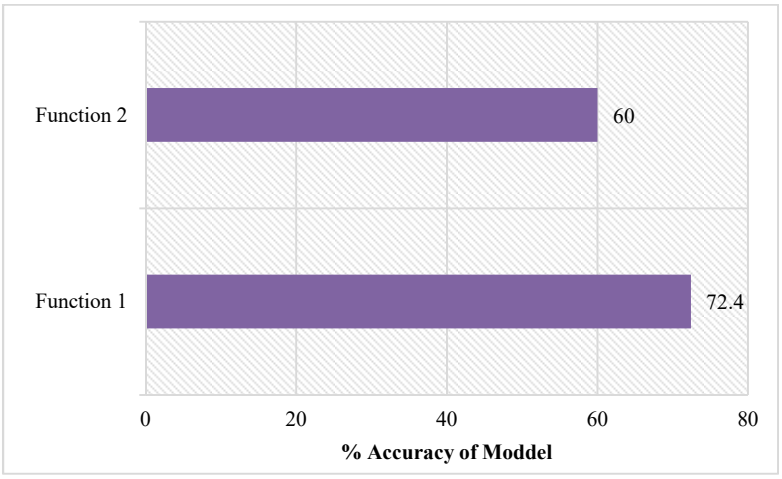

Figure 8. Accuracy of the model in nitrate classification in two functions

نتایج حاصل از ترکیب خطی ارائه‌شده برای شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC براساس روش تحلیل تشخیصی در دو شکل (۵) و (۶) ارائه شده است.

۴– ۳. آسیب‌پذیری DRASTIC براساس رویکرد آماری رگرسیون لجستیک

نقشه آسیب‌پذیری دشت قزوین براساس داده‌های موجود و طبقه‌بندی پارامتر نیترات در دو گروه کم‌تر/ بیش‌تر از ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر غلظت نیترات پس از تعیین ترکیب خطی براساس رگرسیون لجستیک، در نرم‌افزار ArcGIS 10.1 براساس هفت پارامتر DRASTIC و در فرمت رستر تهیه و در شکل (۷) ارائه شده است.

۴–۴. مقایسه روش‌ها

برای ارزیابی و مقایسه نتایج چهار رویکرد موردبررسی، نقشه‌های آسیب‌پذیری تهیه شده توسط هر روش، از طریق همبستگی با داده‌های نیترات مقایسه شده‌اند. به‌دلیل نرمال‌نبودن داده‌های نیترات، از ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. نقشه‌های حاصل از چهار رویکرد ارائه‌شده، با غلظت نیترات دارای همبستگی قابل‌قبولی می‌باشند. به‌طور قابل‌توجهی، غلظت نیترات در مناطق دارای آسیب‌پذیری بالا طبقه‌بندی می‌شود. نتایج حاصل از همبستگی با نیترات در جدول (۳) و شکل (۹) ارائه شده است. همانگونه که نتایج نشان می‌دهد روش تحلیل تشخیصی قادر است آسیب‌پذیری آبخوان را در دو گروه طبقه‌بندی نیترات کم‌تر/ بیش‌تر از غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب با ۵۱/۸ و ۵۵/۵ درصد پیش‌بینی نماید. جدول (۳) نتایج میزان همبستگی نیترات را با مدل‌های انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد.

Table 3. Correlation coefficient of nitrate with the models

	DRASTIC	DRASTIC-LOG	DRASTICQ-DA1	DRASTICQ-DA2
Correlation Cofficient (%)	40	48.4	51.8	55.5

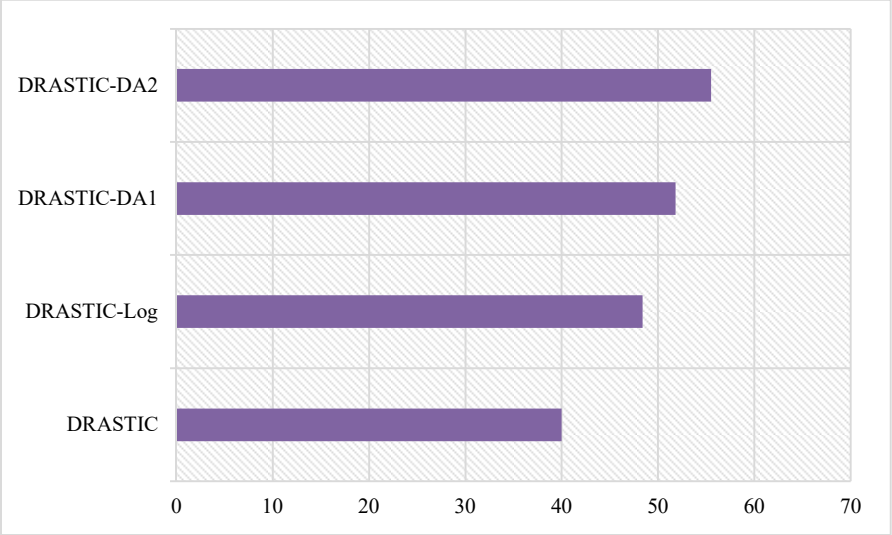

Figure 9. Correlation between linear combinations and nitrate parameter

۵. نتیجه‌گیری

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها می‌تواند رویکرد مؤثری در مدیریت و حفاظت از کیفیت آب‌های زیرزمینی باشد. روش DRASTIC از جمله روش‌هایی است که در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها به‌طور گسترده در جهان مورداستفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، روش DRASTIC، روشی پارامتریک بوده و با استفاده از رتبه‌بندی به ارزیابی در تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان به‌کار می‌رود. یکی از مهم‌ترین منابع آلوده‌کننده آبخوان‌ها استفاده از کودهای شیمیایی در کشاورزی است و از آن‌جا که دشت قزوین جزو مهم‌ترین دشت‌های کشور در بخش کشاورزی است، آسیب‌پذیری آبخوان این دشت موردارزیابی قرار گرفته است.

در این پژوهش، به‌منظور اصلاح روش DRASTIC از دو رویکرد آماری رگرسیون لجستیک و تحلیل تشخیصی استفاده شده است. هم‌چنین از پارامتر نیترات به‌عنوان پارامتری برای تدقیق مدل‌های ارائه‌شده استفاده شده است. برای صحت‌سنجی مدل‌های اصلاح‌شده و مدل اصلی، از ضریب همبستگی اسپیرمن بین غلظت نیترات و شاخص آسیب پذیری استفاده شد. هرچه همبستگی بین غلظت نیترات و شاخص آسیب‌پذیری نهایی بیش‌تر باشد، آن مدل به‌عنوان مدلی که در تعیین آسیب‌پذیری دقت بالاتری دارد، برتر شناخته می‌شود. بدین منظور از آمار اندازه‌گیری غلظت نیترات از ۴۹ چاه نمونه‌برداری در منطقه استفاده شده است. نتایج پژوهش نشان داد، ضریب همبستگی بین غلظت نیترات و شاخص آسیب‌پذیری در مدل DRASTIC، DRASTIC-Log، DRASTIC-DA1 و DRASTIC-DA2 به‌ترتیب برابر ۴۰، ۴۸/۴، ۵۱/۸ و ۵۵/۵ درصد می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده این مطلب است که در تعیین وزن ضرایب روش DRASTIC، روش DRASTIC-Log از دقت بالاتری نسبت به روش DRASTIC برخوردار می‌باشد و هم‌چنین استفاده از روش تحلیل تشخیصی رویکرد مناسب‌تری نسبت به روش رگرسیون لجستیک خواهد داشت.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی بین نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. EPA/600/2–87/035. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA.

Antonogeorgos, G., Panagiotakos, D.B., Priftis, K.N., & Tzonou, A. (2009). Logistic regression and linear discriminant analyses in evaluating factors associated with asthma prevalence among 10-to 12-years-old children: Divergence and similarity of the two statistical methods. *International journal of pediatrics*, *2009*.

Celico, F., & Naclerio, G. (2005). Verification of a DRASTIC-based method for limestone aquifers. *Water international*, *30*(4), 530-537.

Chitsazan, M., & Akhtari, Y. (2009). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran. *Water resources management*, *23*(6), 1137-1155.

Dixon, B. (2004). Prediction of groundwater vulnerability using an integrated GIS-based neuro-fuzzy techniques. *Journal of Spatial Hydrology*, 4 (2), 1-14.

Fritch, T.G., Mcknight, C.L., Yelderman Jr, J.C., & Arnold, J.G. (2000). An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy aquifer, central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach. *Environmental management*, *25*(3), 337-345.

Jain, A.K., & Jha, C.K. (2017). *Dropout Classification through Discriminant Function Analysis: A Statistical Approach.*

Jang, C.S., Lin, C.W., Liang, C.P., & Chen, J.S. (2016). Developing a reliable model for aquifer vulnerability. *Stochastic environmental research and risk assessment*, *30*(1), 175-187.

Javadi, S., Hashemy, S.M., Mohammadi, K., Howard, K.W.F., & Neshat, A. (2017). Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *Journal of hydrology*, *549*, 27-37.

Javadi, S., Kavehkar, N., Mohammadi, K., Khodadadi, A., & Kahawita, R. (2011). Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International*, *36*(6), 719-732.

Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M.H., & Mohammadi, K. (2010). Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *13*, 239-249.

Jmal, I., Ayed, B., Boughariou, E., Allouche, N., Saidi, S., Hamdi, M., & Bouri, S. (2017). Assessing groundwater vulnerability to nitrate pollution using statistical approaches: a case study of Sidi Bouzid shallow aquifer, Central Tunisia.*Arabian Journal of Geosciences*, *10*(16), 364.

Kholghi, M., Hassanzadeh, H., & Keyvanpour, M. (2010, May). Classification and evaluation of data mining techniques for data stream requirements. In *Computer Communication Control and Automation (3CA), 2010 International Symposium on* (Vol. 1, pp. 474-478). IEEE.

Kosaki, T., Wasano, K., & Juo, A.S. (1989). Multivariate statistical analysis of yield-determining factors. *Soil Science and Plant Nutrition*, 35(4), 597-607.

Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Journal of Remote Sensing*, 26, 1477-1491.

Li, R., Merchant, J. W., & Chen, X. H. (2014). A geospatial approach for assessing groundwater vulnerability to nitrate contamination in agricultural settings. *Water, Air, & Soil Pollution*, *225*(12), 2214.

Liang, C.P., Jang, C.S., Liang, C.W., & Chen, J.S. (2016). Groundwater Vulnerability Assessment of the Pingtung Plain in Southern Taiwan. *International journal of environmental research and public health*, *13*(11), 1167.

Magyar, N., Kovacs, J., Tanos, P., Trasy, B., Garamhegyi, T., & Hatvani, I. G. (2017). Application of Combined Cluster and Discriminant Analysis to Make the Operation of Monitoring Networks More Economical. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Marine and Environmental Sciences*, *4*(5).

Mair, A., & El-Kadi, A.I. (2013). Logistic regression modeling to assess groundwater vulnerability to contamination in Hawaii, USA. *Journal of contaminant hydrology*, *153*, 1-23.

Mishra, D., Chakrabarty, R., Sen, K., Pal, S.C., & Mondal, N.K. (2023). Groundwater vulnerability assessment of elevated arsenic in Gangetic plain of West Bengal, India; Using primary information, lithological transport, state-of-the-art approaches. *Journal of Contaminant Hydrology*, 104195.

Mohammadi, K., Niknam, R., & Majd, V.J. (2009). Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in Tehran–Karaj aquifer, Iran. *Environmental Geology*, *58*(2), 437-446.

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*(7), 3119-3131.

Nolan, B. T., Hitt, K. J., & Ruddy, B. C. (2002). Probability of nitrate contamination of recently recharged groundwaters in the conterminous United States. *Environmental science & technology*, *36*(10), 2138-2145.

Poulsen, J., & French, A. (2008). Discriminant function analysis. *Retrieved from*.

Shirzadi, A., Saro, L., Hyun-Joo, Oh., & Chapi, K. (2012). A GIS-based logistic regression model in rock fall susceptibility mapping along a mountainous road: Salavat Abad case study, Kurdistan, Iran. *Natural Hazard*, 64, 1639-1656.

Sinan, M., & Razack, M. (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco). *Environmental Geology*, *57*(2), 349-363.

Tabachnick, B.G., & Fidell, L.S. (1996). *Using Multivariate Statistics*. Harper Collins College Publishers: New York. Tabachnick and Fidell compare and contrast statistical packages, and can be used with a modicum of pain to understand SPSS result print-outs.

Torkashvand, M., Neshat, A., Javadi, S., & Pradhan, B. (2021). New hybrid evolutionary algorithm for optimizing index-based groundwater vulnerability assessment method. *Journal of Hydrology*, 598, 126446.