



Vulnerability Assessment of Groundwater Resources in Qazvin Aquifer with DRASTIC, Modified and Fuzzy Methods

Taleb Moradinejad^{*1}, Mohsen Rezaei², Mohammad Nakhaei³

1. Ph.D. Student. Hydrogeology, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran.

2. Professor Hydrogeology, Shiraz University, Shiraz, Iran.

3. Professor Hydrogeology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: talebmoradinejad@yahoo.com

Keywords:

Vulnerability assessment,
Sensitivity analysis, Modified
DRASTIC, Fuzzy DRASTIC

Extended Abstract

Introduction

Groundwater vulnerability is a relative, non-measurable, dimensionless property, that expresses the possibility of penetration and spread of pollutants from the ground surface to the groundwater system, and it depends on the characteristics of the aquifer, geological environment, and hydrogeology. This method has a low cost and can be used to determine vulnerability levels for large areas using a combination of layers with very little information. This study investigates the vulnerability of the Qazvin plain, considering its appropriate permeability, and the high probability of absorbing various pollutants. In order to find the most suitable model for zoning the vulnerability of Qazvin plain, different methods such as DRASTIC, modified DRASTIC, and fuzzy DRASTIC have been used.

Materials and Methods

DRASTIC is based on the seven hydrogeological data layers that provide input to the modeling. It corresponds to the initials of seven layers i.e., depth of water, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of the vadose zone, and hydraulic conductivity. Combining the above parameters and creating a network layer, could create the standard DRASTIC vulnerability index. softwares such as ILWIS, ArcView, and ArcGIS software were used to find out the water-vulnerable zones in the aquifer. For this purpose, a database was created from the available statistics and information in the

Received:

24 Apr 2023

Revised:

27 May 2023

Accepted:

13 Jun 2023

How to cite this article:

Moradinejad, T., Rezaei, M., Nakhaei, M. (2023). Vulnerability Assessment of Groundwater Resources in Qazvin aquifer with Drastic, Modified and Fuzzy Methods. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(3), 35-56. [10.22077/JDCR.2023.6186.1020](https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6186.1020).



GIS environment. The final map was prepared by combining layers and their weights. The final index is the result of multiplying the ranked numerical value of each parameter by the weight of that parameter. The sum of all the parameters for each part will indicate the degree of vulnerability, and the higher the number, the higher the risk. In the modified DRASTIC model, nitrate was used as a main parameter of groundwater pollutants to modify the model. In the third work method (fuzzy DRASTIC), first, the membership functions of the maps that can be fuzzified (for example, the hydraulic conductivity, the slope, and the depth of the groundwater) were produced and shown in the GIS software environment. Then, the standard deviation of the linear functions was calculated and applied based on the DRASTIC ratings of the desired parameters. Finally, a single-parameter sensitivity analysis was performed to evaluate the effect of each DRASTIC parameters on the vulnerability index.

Results and Discussion

According to the normal DRASTIC map, most of the Qazvin plain is in the range of moderate vulnerability. However, small areas of the plain are in the range of high vulnerability. In the modified DRASTIC method, the contradictions of the DRASTIC vulnerability category and the point concentration of nitrate have been resolved and corrected. The results of the single-parameter sensitivity analysis showed that there was not much change in the map resulting from the modified weights by the sensitivity analysis compared to the modified DRASTIC map. But, in the fuzzified method, the percentage of the area of the highly vulnerable area is much lower, which from the point of view of these researchers and considering the nitrate concentration in the plain, can be far from reality.

Conclusion

According to the results of this research, it can be concluded that in the studied area of Qazvin Plain, DRASTIC modified by nitrate data compared with DRASTIC and fuzzy DRASTIC has the best performance.



ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی آبخوان قزوین با روش‌های دراستیک معمولی، اصلاحی و فازی

طالب مرادی نژاد^{۱*}، محسن رضایی^۲، محمد نخعی^۳

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲. استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۳. استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: talebmoradinejad@yahoo.com

چکیده

واژه‌های کلیدی:

ارزیابی آسیب‌پذیری، تحلیل حساسیت، دراستیک اصلاحی، دراستیک فازی

با توجه به افزایش تقاضا برای منابع آبی در بخش‌های کشاورزی، خانگی و صنعتی، کیفیت منابع آب زیرزمینی در ایران به ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور در خطر است. از این رو، ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق در معرض آلودگی انسان‌زاد، عنصر مهمی برای مدیریت معقول منابع آبی و کاربری زمین محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر از روش‌های مختلف تخمین آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نظیر دراستیک معمولی، اصلاح شده و فازی به وسیله سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی در دشت قزوین و تعیین روش بهینه از آن‌ها استفاده شده است. مدل دراستیک از هفت پارامتر محیطی (عمق آب، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیر اشباع و هدایت الکتریکی) برای توصیف تنظیمات هیدروژئولوژیکی و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده می‌کند. محدوده مطالعاتی بر حسب شدت آسیب‌پذیری به سه دسته کم، متوسط و بالا تقسیم شده است. نتایج نشان داد که محدوده آسیب‌پذیری متوسط دشت از ۶۳ درصد در مدل دراستیک معمولی به ۸۷ درصد در دراستیک اصلاحی و ۹۷ درصد در دراستیک فازی تغییر یافته است. صحت‌سنجی مدل دراستیک معمولی با غلظت داده‌های نیترات انجام و تناقضاتی در دشت به ویژه بخش شرقی و غربی آن مشاهده شد. بنابراین با استفاده از نرمال‌سازی داده‌های نیترات، مدل دراستیک اصلاحی پهنه‌بندی گردید. تحلیل حساسیت در مدل دراستیک حاکی از بیشترین تطابق این مدل پس از تغییر وزن پارامترها با مدل دراستیک اصلاحی می‌باشد. به علاوه، با توجه به غلظت نیترات در دشت، درصد بسیار کم مساحت محدوده بسیار آسیب‌پذیر می‌تواند دور از واقعیت باشد. بنابراین، مدل دراستیک اصلاحی، مدلی بهینه در این دشت محسوب می‌گردد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۳/۲۳

مقدمه

آب یکی از ضروری‌ترین مواد برای زندگی بوده و وجود این منبع طبیعی اغلب یک نقش حیاتی در فرآیندهای اقتصادی و سیاسی بازی می‌کند. افزایش تقاضا برای منابع آبی موجب توسعه شهرک‌های صنعتی و گسترش زمین‌های کشاورزی شده است به طوری که بخش کشاورزی بزرگترین مصرف‌کننده آب (تا حدود ۹۰ درصد) و همچنین آسیب‌پذیرترین بخش در شرایط کم آبی است (Anvari et al., 2022). از طرفی، وجود نواحی صنعتی منجر به برهم زدن تعادل محیط زیست و در معرض خطر واقع شدن منابع آب سطحی و زیرزمینی پیرامون آن‌ها می‌شوند (Rahmani and Azari, 2019). در این میان، بی‌توجهی به سفره‌های آب زیرزمینی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آبی در مناطق گرم و خشک نظیر ایران باعث نشر و انتقال آلاینده‌های مختلف به این منابع شده است (Asghari Moghadam et al., 2016). آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق فعالیت‌های انسانی از جمله فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، مراکز دفن زباله و ... ایجاد می‌گردد. از جمله برخی از آلاینده‌های کشاورزی مانند نیترات و فسفات و فلزاتی همچون آرسنیک، جیوه، کادمیوم و سرب که از آلاینده‌های صنعتی به حساب می‌آیند، نقش بیشتری در آلودگی این منابع حیاتی خواهند داشت (Pishkar Dehkor et al., 2006). از این رو، تعیین شدت آسیب‌پذیری این منابع با ارزش گام مهمی در حفاظت از آن‌ها در برابر آلودگی محسوب می‌گردد.

به عقیده ویربا و زوپوروزک (Vrba and Zoporozec, 1994) عبارت آسیب‌پذیری نخستین بار در فرانسه در سال ۱۹۸۶ ارائه گردید که طی آن آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در برابر آلودگی تعیین می‌گردد. آسیب‌پذیری به عنوان یک استعداد ذاتی سیستم آب زیرزمینی، امکان نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی تعریف می‌شود که وابسته به میزان حساسیت این سیستم به تأثیرات انسانی و یا طبیعی می‌باشد (Vrba and Zoporozec, 1994). این کلید واژه مهم، یک خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان،

محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos and Lambrakis, 2007). از جمله روش‌های متداول برای بررسی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، روش دراستیک است که کاربرد زیادی در بسیاری از مناطق دنیا داشته است (Aller et al., 1987). دراستیک از کاربردی‌ترین و رایج‌ترین مدل‌های کیفی است که هزینه انجام آن پایین بوده و با اطلاعات کم و در دسترس برای تولید درجات آسیب‌پذیری برای مناطق وسیع با ترکیب چندین لایه طراحی شده است (Aller et al., 1987). بنابراین در این پژوهش از مدل دراستیک (معمولی، اصلاحی و فازی) برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان قزوین استفاده می‌گردد.

مطالعات زیادی با استفاده از مدل دراستیک در جهان انجام شده است. برای مثال، در پژوهشی در اردن (Al-Adamat et al., 2003)، جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان از مدل DRASTIC استفاده گردید (البته لایه هدایت هیدرولیکی به علت نبود اطلاعات در نقشه نهایی وارد نشده است). آن‌ها، میزان تغذیه خالص را با ترکیب سه پارامتر میزان بارندگی، شیب زمین و نفوذپذیری خاک با روش Piscopo به دست آوردند. نتایج نشان داد، متوسط میزان نیترات با آسیب‌پذیری کم حدود ۹/۹۹ میلی‌گرم بر لیتر و برای آسیب‌پذیری متوسط ۱۰/۵۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. همچنین، اختلاف آماری معنی‌داری (با آزمون U test) بین مقادیر نیترات با آسیب‌پذیری کم و متوسط وجود نداشت. شواجین و همکاران (Shuaijun et al., 2011) در تحقیقی به بررسی آسیب‌پذیری آب‌های فریاتیکی کواترنر در چین با روش دراستیک و با استفاده از نرم‌افزار GIS پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که ۱۶/۱۸ درصد از محدوده مورد مطالعه دارای پتانسیل آلودگی بالا، ۳۳/۰۵ درصد دارای پتانسیل آلودگی متوسط و ۵۰/۷۷ درصد دارای پتانسیل آلودگی کم می‌باشد. در تحقیقی دیگر الحلاق و الایش (Al Hallaq and Elaish, 2012) تکنیک آسیب‌پذیری را برای تئوری و کاربرد انباشت جریان، کاربری زمین و هدایت هیدرولیکی در یک آبخوان کم‌عمق در حوضه رودخانه ولتا در شرق غنا ارائه و نتایج آن را با مدل استاندارد DRASTIC مقایسه

پرداخته و کاربردها، مزایا و معایب آن‌ها را ارائه نموده است. به عقیده وی، DRASTIC از پارامترهای متعددی استفاده می‌کند و خروجی‌های آن فقط گاهی با داده‌های جمع‌آوری‌شده در صحرا مقایسه می‌شوند. بنابراین پیش‌بینی مبتنی بر DRASTIC باید قبل از تصمیم‌گیری مدیریت به‌دقت بررسی شود. همچنین، وی معتقد است که هیچ کدام از روش‌های ارائه شده جهت ایجاد نقشه‌های آسیب‌پذیری قابل اعتمادترین روش نبوده و هر یک از آن‌ها به ویژگی‌های آبخوان، کاربری زمین، در دسترس بودن داده‌ها، پارامترهای درگیر در مدل، وزن‌ها و رتبه‌بندی اختصاص داده شده به هر پارامتر وابسته می‌باشند. پاتل و همکاران (Patel, 2022) کاربرد روش DRASTIC در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تحلیلی سیستماتیک از مقالات تحقیقاتی موجود در مورد کاربردهای فرآیند مدیریت عملکرد دراستیک (DRASTIC) و دراستیک اصلاح شده (DRASTIC-L) در سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) ارائه دادند. نتایج نشان داد که ادغام GIS با DRASTIC مؤثرترین و دقیق‌ترین راه برای تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است. همچنین در مناطق کشاورزی، خشک، نیمه‌خشک و بازالتی، مدل DRASTIC اصلاح شده نیز بهتر از مدل DRASTIC سنتی عمل می‌نماید. در ایران نیز تحقیقات مشابه در این زمینه در چند سال اخیر صورت گرفته است. به عنوان نمونه رنگزن و همکاران (Rangzen et al., 2006)، در آسیب‌پذیری آبخوان آبرفتی ورامین، با استفاده از روش DRASTIC در محیط GIS، وزن‌های مدل را با استفاده از غلظت نیترات برای دشت ورامین اصلاح نمودند. آن‌ها نشان دادند که اختلاف عمده مدل DRASTIC تصحیح شده آسیب‌پذیری نیترا ته با مدل اصلی در کاهش وزن اثر زون غیراشباع از ۵ به ۲ است که با پایداری یون نیترات در محیط غیر اشباع مطابقت دارد. در تحقیقی دیگر، ارزیابی تأثیر کودهای کشاورزی در آلودگی نیترا ته آب زیرزمینی دشت باغملک با استفاده از مدل DRASTIC (Faryabi et al., 2007) نشان داد که علی‌رغم درشت دانه بودن رسوبات سطحی در بخش نسبتاً وسیعی از دشت، میزان آسیب‌پذیری آب زیرزمینی پایین است.

نمودند. آن‌ها نشان دادند که شاخص آسیب‌پذیری نهایی تا حد زیادی تحت تأثیر حذف پارامترهای هدایت هیدرولیکی و کاربری زمین قرار گرفته است. وارول و دارواز (Varol and Davraz, 2010) در پژوهشی به بررسی آسیب‌پذیری حوضه Sarkikaraagac در جنوب غربی ترکیه با روش دراستیک پرداختند. به عقیده آن‌ها، مهم‌ترین عامل آلاینده در این حوضه، آلودگی انسانی است و از فعالیت‌های کشاورزی متراکم و گسترده ناشی می‌شود که از طریق آب‌های زیرزمینی به سمت دریاچه Beysehir حرکت می‌کند. آن‌ها محدوده مطالعاتی را در سه دسته آسیب‌پذیری زیاد (۳۰ درصد محدوده)، متوسط (۲۰ درصد محدوده) و کم (۵۰ درصد محدوده) طبقه‌بندی کردند (Varol and Davraz, 2010). مطالعات پیشرفته‌تری از این مدل در دو دهه اخیر انجام شده است. برای مثال، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در مناطق کشاورزی با استفاده از مدل اصلاح شده DRASTIC در دشت ساوه - نوبران توسط سادات نوری و ابراهیمی (Sa- dat-Noori and Ebrahimi, 2016) نشان داد که اصلاح پیشنهادی که شامل استفاده از تکنیک‌های آماری است، عملکرد رتبه‌بندی پارامترهای مدل DRASTIC را برای به دست آوردن نقشه آسیب‌پذیری دقیق‌تر بهینه می‌نماید. آن‌ها نرخ‌های جدید را با استفاده از روابط بین پارامترها و غلظت کلرید داده‌های نقطه‌ای در آب‌های زیرزمینی محاسبه کردند. عبدالسلام و همکاران (Abdeslam et al., 2017)، روش دراستیک را با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری یک سفره آبرفتی در یک محیط نیمه‌خشک در شمال شرق الجزایر (منطقه آبرفتی که از افزایش شوری به سمت بخش شمالی حوضه متحمل شده است) به کار برده‌اند. طبق مدل ارائه شده، قسمت شمالی دشت بالاترین کلاس آسیب‌پذیری (آسیب‌پذیرترین منطقه در برابر آلودگی‌های خارجی) را نشان می‌داد. طبقه متوسط در جنوب، شرق و منطقه شمال غرب پراکنده است. کمترین آسیب‌پذیری متعلق به بیشترین قسمت دشت است. باربولشو (Barbulescu, 2020) به مرور روش DRASTIC و برخی روش‌های شبیه به DRAS-TIC که توسط دانشمندان مختلف معرفی شده‌اند،

در سال ۱۹۹۰، آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) به توسعه مدل حاضر پرداخت تا بتوان از این مدل به عنوان یک سیستم استاندارد شده جهت ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی استفاده نمود (Boughriba et al., 2009). استفاده از این مدل، چهار پیش شرط دارد که بطور خلاصه به شرح زیر است (Voudouris et al., 2010). (۱) آلودگی از سطح زمین وارد آب زیرزمینی شده باشد، (۲) آلودگی از طریق بارندگی شسته شده و به آب زیرزمینی وارد شده باشد، (۳) انتقال آلودگی از طریق آب با سرعتی مشابه آن صورت گرفته باشد (۴) محدوده مطالعاتی جهت استفاده از این مدل ۴ هکتار یا بیشتر باشد. با توجه به نفوذپذیری مناسب آبرفت دشت قزوین و احتمال بالای این آبخوان در جذب آلاینده‌های مختلف در اثر بارندگی و یا مجاورت با منابع آبی، کشاورزی گسترده در این دشت و همچنین وجود صنایع آلاینده، در این تحقیق به مطالعه آسیب پذیری آن پرداخته شده است. مطالعاتی که پیشتر در جهان و ایران ارائه شده حاکی از استفاده بیشتر از مدل‌های اصلاحی آسیب پذیری نسبت به مدل خام آن بوده است. بنا براین، در این تحقیق ضمن پهنه بندی آسیب پذیری دشت قزوین با روش‌های مختلف منتج از دراستیک (DRASTIC)، سعی بر آن است که مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و مدل بهینه انتخاب گردد. از این رو، از مدل‌های مختلف دراستیک معمولی، اصلاحی و فازی بهره گرفته شده است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی قزوین در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غربی تهران بین طول‌های شرقی ۳۵°-۲۰' و ۴۹°-۴۰' و عرض‌های شمالی ۳۵°-۲۰' و ۳۶°-۳۰' جغرافیایی قرار گرفته است. همچنین آبخوان قزوین در محدوده مختصات متریک ۳۴۴۷۱۴ الی ۴۶۷۲۹۰ و ۳۹۳۶۵۵۶ الی ۴۰۳۱۷۷۱ قرار دارد. حداکثر ارتفاع منطقه حوضه قزوین برابر ۲۹۷۱ متر و حداقل ۱۱۰۰ متر و متوسط منطقه حدود ۱۲۵۰ متر از سطح دریا می‌باشد. کل حوضه آبریز ۹۳۷۶ کیلومتر مربع مساحت دارد که ۳۸۴۲ کیلومتر مربع از آن را دشت و باتلاق تشکیل داده است (جدول ۱). این

حاجی کریمی و همکاران (Haji Karimi et al., 2011)، در تحقیقی به بررسی آسیب‌پذیری زیست محیطی آب زیرزمینی دشت برتش و دهلران با استفاده از مدل DRASTIC پرداختند. به عقیده آن‌ها، قسمت‌هایی از شرق و مرکز آبخوان دارای آسیب‌پذیری زیاد بوده و قسمت اعظم آبخوان در محدوده آسیب‌پذیری متوسط قرار می‌گیرد. همچنین آن‌ها، صحت مدل را با استفاده از نتایج تحلیل نیترات نمونه‌های آب زیرزمینی از ایستگاه‌های منتخب در دو فصل، واسنجی و تأیید نمودند. افروزی و محمد زاده (Afrozi and Mo-hammadzadeh, 2011) در تحقیقی مشابه، به ارزیابی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دشت فارسان-جونقان نسبت به آلودگی با استفاده از شاخص DRASTIC در محیط GIS پرداختند. در مدل آن‌ها، شاخص دراستیک بین ۱۰۰ تا ۱۷۸ متغیر بوده و بترتیب در حدود ۱۰، ۲۸، ۳۵ و ۱۸ درصد از سطح منطقه دارای آسیب‌پذیری کم، کم تا متوسط، متوسط تا زیاد و زیاد قرار گرفت. مردان و یار قلی (Mardan, and Yarqali, 2019) در مطالعه‌ای تحت عنوان پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت آبرفتی اردبیل با استفاده از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل دراستیک نشان دادند که آسیب‌پذیری آبخوان دشت اردبیل تقریباً در نیمه شرقی در گروه آسیب‌پذیری کم و در نیمه غربی در گروه آسیب‌پذیری زیاد قرار گرفته است. نتایج نشان داد که پتانسیل و میزان آلودگی آبخوان دشت اردبیل بالا بوده و حفاظت این مناطق به منظور جلوگیری از آلودگی و مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. بهرامی و شهیدی (Bahrami and Shahidi, 2022)، به بهبود مدل دراستیک با استفاده از مدل هوشمند بیان ژن پرداختند. در این تحقیق متغیرهای دراستیک با طول دوره‌ی آماری ۲۰ ساله (۱۳۷۸-۱۳۹۸) به عنوان ورودی مدل و غلظت نیترات به عنوان خروجی مدل تعریف گردید.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از مدل دراستیک به منظور ارزیابی پتانسیل آلودگی سفره زیرزمینی دشت قزوین استفاده شده است. مدل دراستیک نخستین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آلر معرفی گردید (Aller et al., 1987). سپس

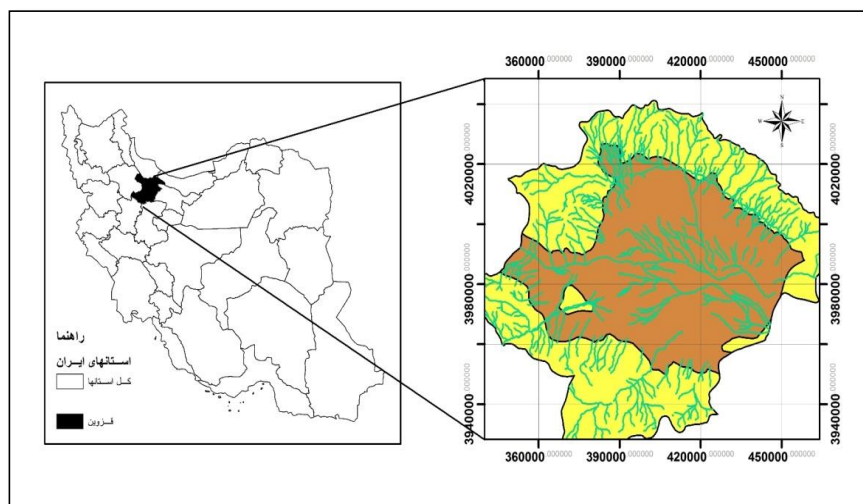
موقعیت جغرافیایی محدوده منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه گردید. آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده در منطقه نشان می‌دهد که آلودگی محیط زیست در منطقه در جهات مختلف در حال گسترش است و مهم‌ترین اثر آلودگی را می‌توان در منابع آلاینده صنعتی، کشاورزی و شهری جستجو نمود. کارگاه‌ها و کارخانه‌های بزرگ صنعتی از عمده‌ترین منابع آلوده کننده در سطح استان قزوین می‌باشند. بنا بر اطلاعات موجود بیش از ۵۵۰ کارگاه بزرگ صنعتی در این منطقه در حال فعالیت هستند.

محدوده از شمال با حوضه آبریز شاهرود، از غرب با حوضه‌های آبریز ابهر رود و خررود، از جنوب با حوضه آبریز رودخانه‌های شور چای، قره‌بلاغ لار و قره‌چای و از شرق با حوضه‌های آبریز رودخانه‌های کردان و کرج هم‌جوار می‌باشد (Ab Ara Sazeh Consulting Engineering Company, 2009).

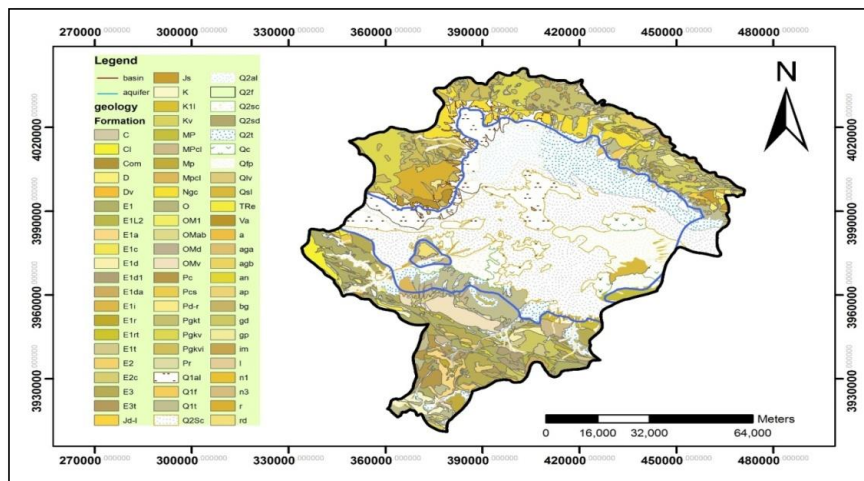
منطقه مورد مطالعه از نقطه نظر تقسیم‌بندی هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز کشور در حوضه آبریز دریاچه نمک حوض سلطان قرار گرفته است و در واقع به عنوان زیر حوضه رودخانه شور محسوب می‌شود.

جدول ۱. خلاصه مشخصات محدوده مطالعاتی قزوین (Ab Ara Sazeh Consulting Engineering Company, 2009)
Table 1. Summary of Qazvin study area characteristics (Ab Ara Sazeh Consulting Engineering Company, 2009)

ارتفاع - متر از سطح دریا Altitude (m.a.sl)		مساحت (کیلومتر مربع) Area (Km ²)				نام محدوده مطالعاتی Study Area
متوسط Avg	حداقل Min	حداکثر Max	سازند سخت Hard Rock	دشت Plain	کل Total	
1250	1100	2971	5534	3842	9376	قزوین Qazvin



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده منطقه مورد مطالعه
Fig 1. Geographical location of the study area



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

Fig 2. Geological map of the study area

(to watertable)، تغذیه خالص (net Recharge)، محیط آبخوان (Aquifer media)، محیط خاک (Soil media)، توپوگرافی (Topography)، تأثیر محیط غیراشباع (Im- Hydraulic)، هدایت هیدرولیکی (Conductivity) مدل DRASTIC (Babiker et al., 2005). در صورت لزوم از توانایی کم و اضافه نمودن پارامترهای مورد بررسی برخوردار است. هر پارامتر بسته به نوع تأثیرگذاری در حرکت املاح به آب زیرزمینی دارای وزن ثابتی می‌باشد. از محدودیت‌های روش DRAS- TIC نبود ویژگی خاک در آن می‌باشد. چرا که S در DRASTIC نمایانگر بافت خاک بوده نه ساختمان آن و حال آنکه ساختمان خاک و میزان خلل و فرج‌ها در انتقال املاح نقش زیادی دارند.

لایه‌های اطلاعاتی روش دراستیک در محدوده مطالعاتی عمق آب زیرزمینی (D): اطلاعات آماری عمق آب زیرزمینی از چاه‌های مشاهده‌ای حفاری شده در آبخوان حاصل گردید (Asghari Moghadam et al., 2016). شکل (۳) نشان‌دهنده نقشه‌ی رتبه‌بندی شده‌ی عمق سطح آب زیرزمینی دشت می‌باشد. لازم به ذکر است که کمترین عمق سطح آب زیرزمینی به جنوب و جنوب شرقی دشت که دو خصوصیت دشت بر آن موثر هست، اول اینکه بر اساس نقشه‌ی جریان آب، خروجی دشت می‌باشد و دوم به دلیل وجود دریاچه نمک غیر دائمی می‌باشد، که آسیب‌پذیری ذاتی آن قسمت از آبخوان به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و در نهایت لایه عمق آبخوان در هفت کلاس

دشت قزوین با وسعتی برابر با $۵۰۵۹/۳$ کیلومتر مربع در اثر رویدادهای تکتونیکی (حد فاصل دو زون تکتونیکی متفاوت یعنی زون البرز مرکزی در شمال دشت قزوین و زون آتشفشانی ارومیه- دختر در ارتفاعات جنوب دشت قزوین) بوجود آمده است و حالت گرانی را دارد که توسط مواد حمل شده از ارتفاعات مجاور بوسیله آب‌های جاری پر شده است. در بخش شمالی، سنگ‌های آتشفشانی آتوسن ارتفاعات منطقه را عمدتاً تشکیل داده‌اند و سنگ نهشته‌های نئوژن به دلیل سست بودن واحدهای سنگی آن فرسایش‌پذیر بوده و مناطق پست و کم ارتفاع را بوجود آورده‌اند. در قسمت جنوبی نیز سنگ‌های سخت و مقاوم آتشفشانی ارتفاعات عمده منطقه را تشکیل داده در صورتی که تشکیلات با مقاومت کمتر در معرض تخریب و فرسایش بیشتری بوده و نقاط پست منطقه را تشکیل می‌دهند. همچنین به علت فعالیت شدید تکتونیکی منطقه، اغلب سیستم‌های آبراهه‌ای از مسیر گسل‌ها و شکستگی‌های اصلی تبعیت می‌نمایند. نحوه رسوب‌گذاری و وجود رودخانه‌های بزرگ و کوچک و تغذیه از سطح این رودخانه‌ها (نظیر زیاران، رودک، چهر رود و خررود) آبخوان نسبتاً مناسبی با وسعتی برابر با $۳۹۵۲/۴۵$ کیلومتر مربع در این دشت تشکیل داده است (Abkhan Consulting Engineers, 2013).

معرفی مدل و پارامترهای آن

واژه دراستیک از هفت پارامتر به کار رفته در این مدل تشکیل شده که عبارتند از: عمق سطح ایستابی (Depth

رتبه‌بندی و ارائه گردید. محاسبه و استخراج و در نهایت نقشه بدست آمده چنانچه در شکل (۷) مشخص است، در پنج کلاس رتبه‌بندی گردید که به دلیل هموار بودن منطقه و پایین بودن شیب توپوگرافی این لایه عمدتاً در رتبه‌های ۹ و ۱۰ می‌باشد.

محیط غیر اشباع (I): اثر ناحیه غیراشباع منطقه با استفاده از اطلاعات لوگ‌های حفاری و چاه‌های اکتشافی و بررسی لیتولوژیکی آن‌ها و با ترکیب نفوذپذیری و عمق سطح ایستابی محاسبه گردید. بر این اساس، این نقشه از تلفیق دو نقشه عمق سطح ایستابی و نفوذپذیری به دست آمد. نقشه لایه محیط غیراشباع در شکل (۸) و در سه کلاس رتبه‌بندی و ارائه شده است.

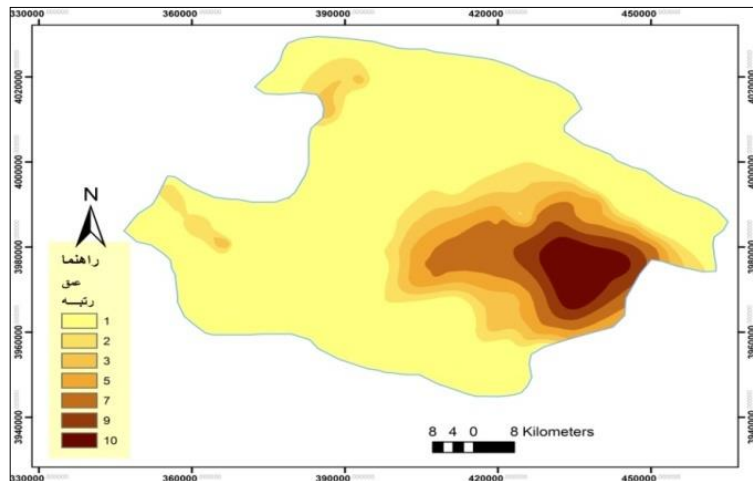
هدایت هیدرولیکی (C): با تقسیم نقشه قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت لایه آبدار، نقشه هدایت هیدرولیکی بدست می‌آید. این پارامتر بیان‌کننده قابلیت هدایت آب و آلاینده‌های محلول در آبخوان می‌باشد. اطلاعات مربوط به قابلیت از آزمایشات پمپاژ صورت گرفته در سال ۱۳۵۰ استخراج شده است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش پمپاژ ۶۳ حلقه چاه اکتشافی و ۳۹۶ حلقه چاه بهره‌برداری در محدوده مطالعاتی قزوین، ضریب قابلیت انتقال بین ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمربع در روز متغیر می‌باشد (Abkhan Con- (sulting Engineers, 2013). طبق مطالعات انجام گرفته (Abkhan Consulting Engineers, 2013)، ضخامت آبرفت در ابتدای مخروط‌افکنه و میانه دشت به حدود ۳۰۰ متر و در پایاب دشت (نواحی جنوبی) به کمتر از ۱۰۰ متر می‌رسد. در شکل (۹)، لایه نهایی هدایت هیدرولیکی در چهار کلاس رتبه‌بندی گردید.

رتبه‌بندی و ارائه گردید. **تغذیه خالص (R):** در روش دراستیک، تغذیه خالص با استفاده از روش پیسکوپو (Piscopo et al., 2001) از مجموع بارندگی، شیب و نفوذپذیری بدست می‌آید. منابع تغذیه آبخوان دشت قزوین شامل تغذیه ناشی از ریزش‌های جوی R_p ، تغذیه ناشی از جریان‌های سطحی و روان آب‌ها R_r ، پساب‌های برگشتی به آب زیرزمینی ناشی از مصارف کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. از این رو، تغذیه خالص (تغذیه کل) از حاصل جمع آن‌ها و با تلفیق خطوط هم‌باران، نقشه خاک و میزان ضریب نفوذپذیری سطحی بدست آمد. لایه بارندگی به دلیل اینکه بارندگی دشت قزوین از ۵۰۰ میلیمتر در سال کمتر است با ضریب یک استفاده شد. چنانچه در شکل (۴) قابل مشاهده است لایه تغذیه در چهار کلاس رتبه و ارائه گردید.

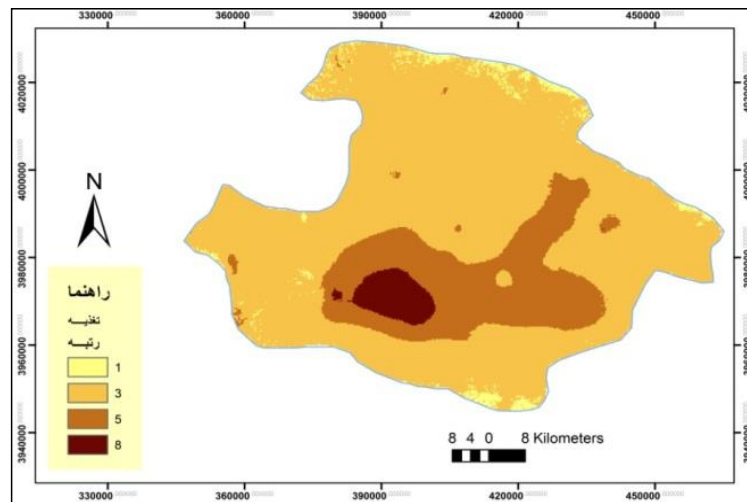
محیط آبخوان (A): اطلاعات مربوط به محیط آبخوان در دشت قزوین از لوگ حفاری چاه‌های اکتشافی، پیزومتری و بررسی زمین‌شناسی منطقه به دست آمده است. این لایه در نهایت پس از کلاس‌بندی شامل دو رتبه گردید. کلاس‌بندی محیط آبخوان در شکل (۵) قابل مشاهده است.

خاک (S): لایه محیط خاک معمولاً با ضخامتی حدود ۰/۵ تا ۲ متر به لحاظ میکروبیولوژی منطقه بسیار فعال به شمار می‌رود. لایه خاک به دلیل فعالیت نسبتاً بالای میکروبی، وجود مواد آلی بالا و وجود ریشه گیاهان، برای حذف و کاهش غلظت آلاینده‌ها از پتانسیل بالایی برخوردار است. شکل (۶) نشان‌دهنده نقشه‌ی رتبه‌بندی شده‌ی خاک‌شناسی دشت قزوین می‌باشد که در چهار کلاس رتبه‌بندی گردید.

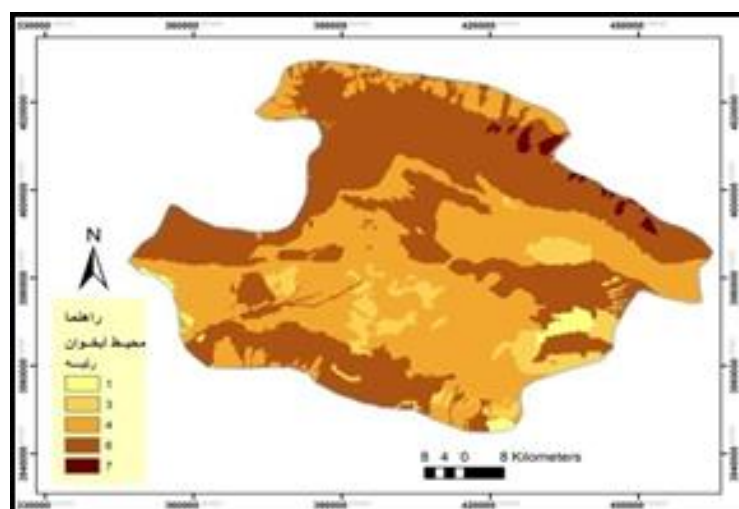
توپوگرافی (T): نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاع



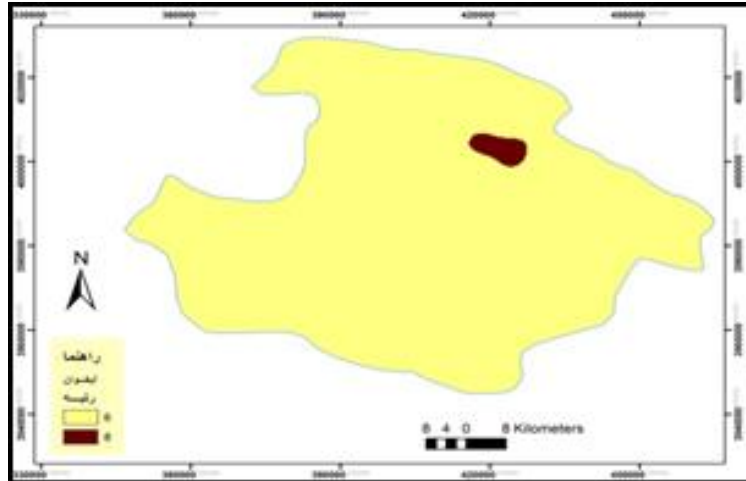
شکل ۳. لایه عمق آب زیرزمینی
Fig 3. Groundwater depth layer



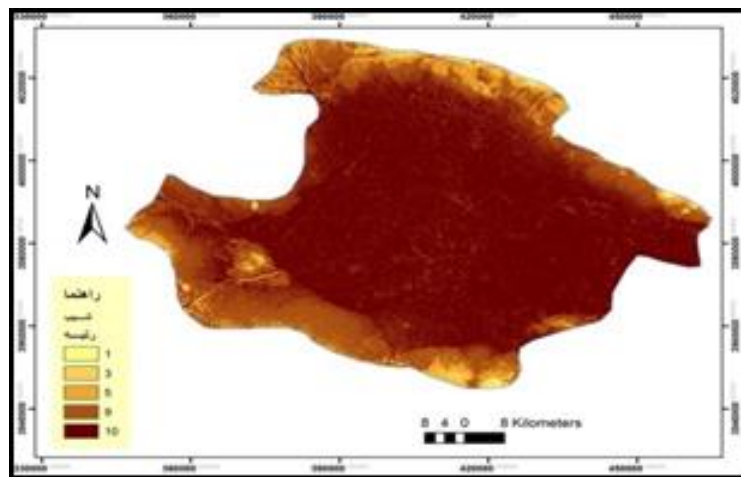
شکل ۴. لایه تغذیه
Fig 4. Recharge layer



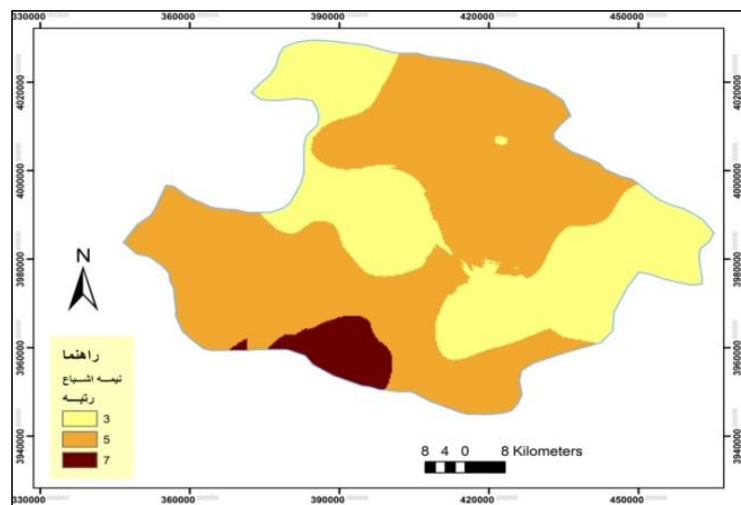
شکل ۵. لایه محیط آبخوان
Fig 5. Aquifer environment layer



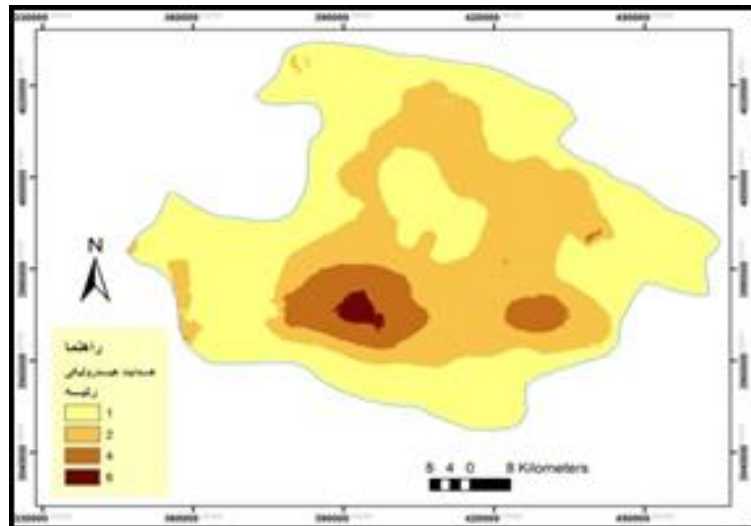
شکل ۶. لایه محیط خاک
Fig 6. Soil layer



شکل ۷. لایه توپوگرافی
Fig 7. Topography layer



شکل ۸. لایه غیر اشباع
Fig 8. unsaturated layer



شکل ۹. لایه هدایت هیدرولیکی

Fig 9. Hydraulic conductivity layer

در این رابطه D_i مقدار نهایی شاخص آسیب پذیری، R_i رتبه هر یک از پارامترهای هفتگانه و W_j وزن مؤثر هر پارامتر می باشد.

عدد محاسبه شده نشان دهنده میزان حساسیت سفره به آلوده شدن بوده به این ترتیب که اعداد بزرگتر تعیین کننده استعداد بیشتر سفره آب زیرزمینی برای آلوده شدن می باشد. تقسیم بندی اعداد استاندارد خاصی نداشته، بلکه بسته به نوع منطقه از لحاظ آلودگی و بازه اعداد، کل دامنه اعداد به فواصل یکسان تقسیم می شود. شاخص مورد نظر به صورت توصیفی به ۵ کلاس مختلف به صورت جدول (۲) تقسیم بندی گردید (Aller et al., 1987).

دراستیک معمولی: حاصل جمع تمامی پارامترها برای هر قسمت بیانگر درجات آسیب پذیری خواهد بود (رابطه ۱). پهنه بندی آسیب پذیری در محیط GIS و با استفاده از نرم افزارهای ArcView و ArcGIS انجام شده است. بدین منظور از آمار و اطلاعات موجود، یک پایگاه اطلاعات داده در محیط GIS تشکیل گردید و با تلفیق لایه ها و وزن های مربوط به آن ها نقشه نهایی تهیه شد.

شاخص استاندارد آسیب پذیری دراستیک

با تلفیق پارامترها بر اساس دراستیک، نتیجه حاصل یک لایه شبکه ای است که در این لایه سلول های دارای اعداد بزرگتر بیان کننده مناطقی هستند که آسیب پذیری ذاتی آب زیرزمینی در مقابل آلودگی بیشتر است و سلول های دارای ارزش عددی کمتر مناطقی را نشان می دهند که آسیب پذیری ذاتی آب های زیرزمینی در مقابل آلودگی در این مناطق کمتر می باشد. در مدل دراستیک شاخص نهایی حاصل ضرب ارزش عددی رتبه بندی شده هر پارامتر در وزن آن پارامتر می باشد. حاصل جمع تمامی پارامترها برای هر قسمت بیانگر درجات آسیب پذیری خواهد بود.

برای بدست آوردن شاخص نهایی دراستیک از رابطه (۱) استفاده گردید و بر اساس روش استاندارد دراستیک، به هر پارامتر مدل دراستیک و نسبت به اهمیت هر یک از آن ها در آسیب پذیری، وزنی برابر ۱ تا ۵ اختصاص داده شد. به مهم ترین آن ها وزن ۵ و کم اهمیت ترین آن ها وزن یک داده شد و با استفاده از نقشه های تهیه شده و به کمک وزن های در نظر گرفته شده برای هر پارامتر در روش DRASTIC نقشه آسیب پذیری سفره آب زیرزمینی محدوده آستانه بدست آمد (Babiker et al., 2005).

$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j \times R_j) \quad (1)$$

جدول ۲- تقسیم بندی کلاس های مختلف آسیب پذیری (Aller et al., 1987)
 Table 2- Classification of different classes of vulnerability (Aller et al., 1987)

شماره کلاس Class number	توصیف علمی آسیب پذیری Scientific description of vulnerability	کلاس آسیب پذیری Vulnerability class	دامنه تغییرات Range of changes
2	زمانی که لایه محبوس کننده که مؤلفه عمودی جریان در آن ناچیز است، در محیط وجود دارد. The existence of a confining layer with the lowest amount of vertical flow	خیلی کم	23-46
4	زمانی که تغذیه به صورت پیوسته و گسترده به آبخوان صورت می گیرد و آلاینده ها توانایی واکنش در محیط را ندارند Continuous and extensive recharge to the aquifer and no reaction of pollutants in the environment	کم low	46-92
5	زمانی که تغذیه به آبخوان به صورت پیوسته باشد آسیب پذیری نسبت به بعضی از آلاینده ها ایجاد می شود. Continuous recharge to the aquifer and vulnerability to some pollutants in the environment	متوسط average	92-136
6	آسیب پذیری در خیلی از موارد نسبت به بسیاری از آلاینده ها (بجز آلاینده هایی که جذب یا انتقال بالایی دارند) ایجاد می شود. Extreme vulnerability to pollutants except those with high absorption or transmission	زیاد high	136-184
8	آسیب پذیری نسبت به اکثر آلاینده ها با تأثیر سریع در اکثر مواقع ایجاد می شود. Extreme vulnerability to pollutants	بسیار زیاد very high	184-230

توابع عضویت این نقشه ها که در محیط نرم افزار GIS تولید شده اند و از تابع عضویت خطی پیروی می کنند نشان داده می شود. توسط این نرم افزار انحراف معیار توابع خطی بر اساس رتبه بندی های دراستیک پارامترهای مورد نظر محاسبه و اعمال شد. نحوه تولید توابع عضویت خطی بدین صورت است که با توجه به رتبه بندی های دراستیک برای هر نقشه میانگین تابع خطی پارامتر مورد نظر تولید می شود. برای مثال تابع عضویت خطی در شکل (۱۰) آورده شده است.

تحلیل حساسیت مدل دراستیک

تحلیل حساسیت تک پارامتری توسط ناپولیتانو و فابری (Napolitano and Fabbri, 1996) در سال ۱۹۹۶ برای ارزیابی تأثیر هر کدام از پارامترهای دراستیک بر روی اندیس آسیب پذیری انجام شد. وزن مؤثر با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود (Babiker, 2005):

(۲)

$$W = (pr \cdot pw / V) * 100$$

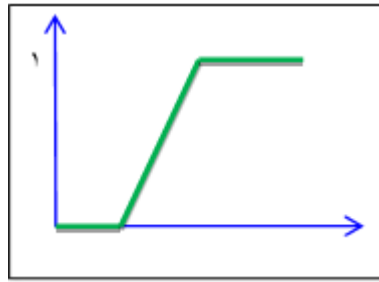
در این رابطه W وزن مؤثر هر پارامتر، pr و pw به ترتیب رتبه و وزن هر کدام از پارامترها و V اندیس آسیب پذیری بدست آمده است.

دراستیک اصلاحی: در این بخش، از نیترا ت به عنوان یک پارامتر اصلی آلاینده آب های زیرزمینی جهت اصلاح مدل دراستیک استفاده شده است. برای این کار باید ابتدا از نرمال بودن توزیع داده های غلظت نیترا ت مطمئن شد. جهت اطمینان از داده های نیترا ت در محدوده مطالعاتی، از مدل زمین آماری ArcGIS بهره گرفته شده است. نرمال سازی با استفاده از تبدیل باکس-کاکس^۱ که از گروه تبدیلات توانی^۲ (نمایی) است انجام و در نهایت از مدلی با کمترین میزان خطا، کشیدگی و چولگی استفاده شده است. پس از آن رتبه های اصلاحی محاسبه شدند.

دراستیک فازی: از لایه های اطلاعات ورودی به مدل تلفیقی دراستیک سه لایه هدایت هیدرولیکی، توپوگرافی و عمق سطح آب زیرزمینی دارای ماهیت فازی و مقادیر پیوسته می باشند و چهار مورد دیگر شامل نقشه های تغذیه، خاک شناسی، محیط غیراشباع و آبخوان به دلیل عدم پیوستگی در مقادیر بینابینی قابلیت فازی شدن ندارند. برای تهیه نقشه های فازی دراستیک آبخوان در ابتدا توابع عضویت نقشه هایی که قابلیت فازی شدن دارند تولید شده و در ادامه

^۱ Box-Cox

^۲ Power Transform



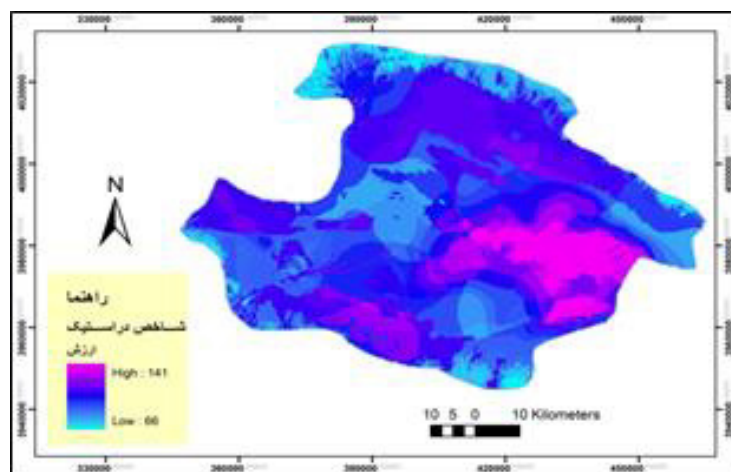
شکل ۱۰. تابع عضویت خطی

Fig 10. Linear membership function

این موضوع با استفاده از نیترا ت اندازه گیری شده در منابع آب زیرزمینی دشت تایید شده است (Khol-ghi and Taki, 2002). برای مثال، انتها الیه شرقی و غربی دشت که شاخص آسیب پذیری دراستیک کم است، مقادیری بالا و متوسط از غلظت نیترا ت مشاهده می شود (شکل ۱۳). لذا برای بررسی هر چه بهتر شاخص های آسیب پذیری دشت قزوین و بررسی میزان صحت آن از داده های اندازه گیری شده نیترا ت استفاده و شاخص ارزیابی پتانسیل آلودگی مجدداً بررسی شد. برای این کار باید ابتدا از نرمال بودن توزیع داده های غلظت نیترا ت مطمئن گردید. پس از بررسی داده ها و تعیین نرمال نبودن آن ها، با استفاده از تبدیل لگاریتمی، توزیع آن ها به نرمال بسیار نزدیک شد. پس از آن رتبه های اصلاحی محاسبه گردیدند. با رتبه های اصلاحی جدید نقشه پتانسیل آلودگی جدید تهیه گردید که در شکل (۱۴) ارائه شده است.

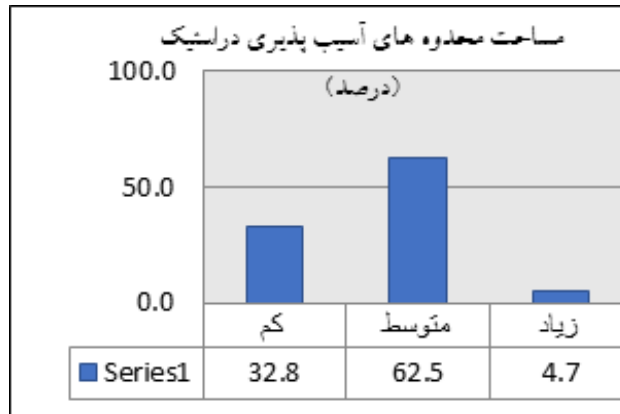
نتایج و بحث

پهنه بندی آسیب پذیری دشت قزوین به روش دراستیک معمولی: مطابق شکل (۱۱) بیشتر مساحت دشت قزوین در محدوده آسیب پذیری متوسط و مساحت های کوچکی از دشت در محدوده آسیب پذیری زیاد قرار می گیرند. طبق نقشه دراستیک معمولی و بر اساس جدول (۲) که نشان دهنده توصیف علمی آسیب پذیری است دشت قزوین از لحاظ آسیب پذیری در سه محدوده کم، متوسط و زیاد واقع شده است. مساحت هر کدام از این محدوده ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. **پهنه بندی آسیب پذیری دشت قزوین به روش دراستیک اصلاحی:** به نظر می رسد نقشه به دست آمده به دلیل محدودیت های ناشی از تهیه آن با روش هم پوشانی شاخص قادر به بیان مناسب محدوده های آسیب پذیری در دشت قزوین نباشد.

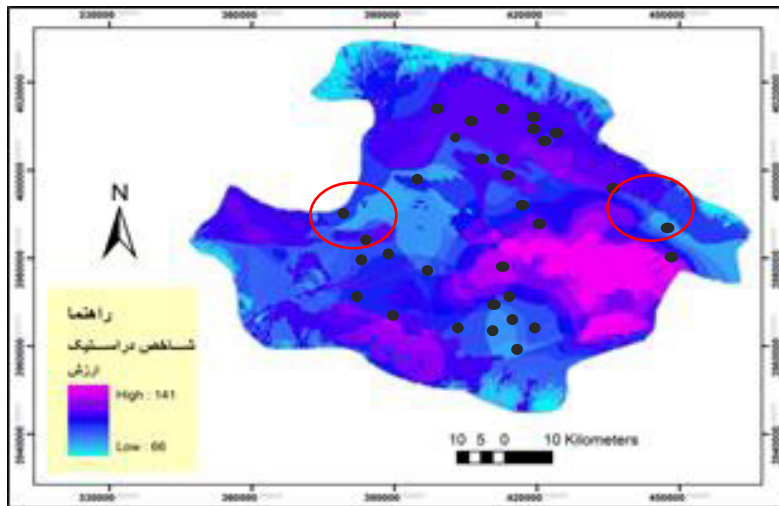


شکل ۱۱. نقشه آسیب پذیری دراستیک

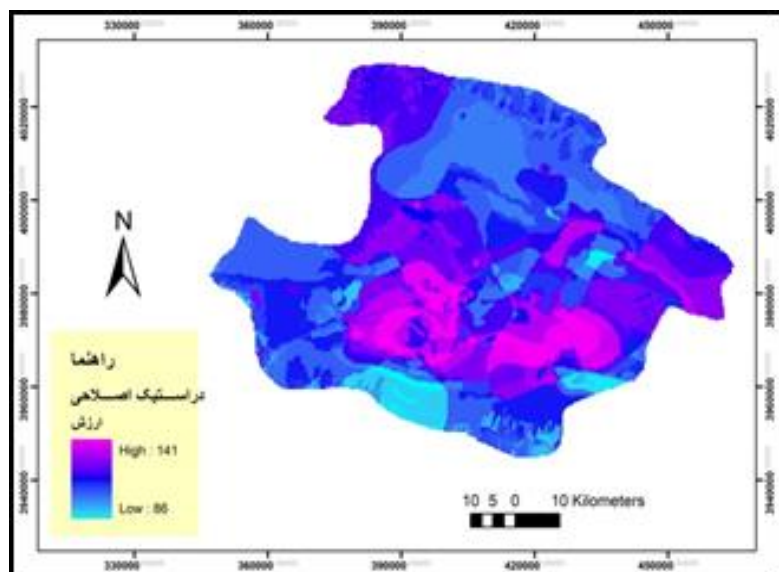
Fig 10. DRASTIC vulnerability map



شکل ۱۲. درصد فراوانی آسیب پذیری دراستیک
 Fig 12. DRASTIC vulnerability frequency percentage



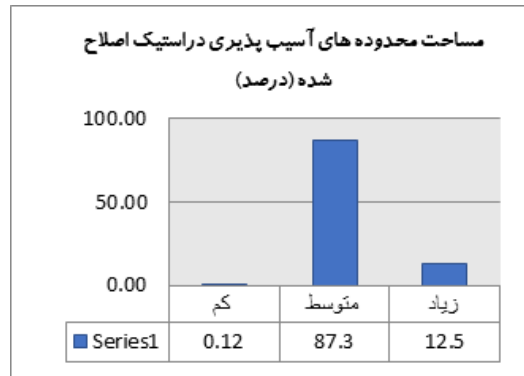
شکل ۱۳. محدوده دارای تناقض در شاخص دراستیک و غلظت نیترات (Kholghi and Taki, 2002)
 Fig 13. Range with contradictions in DRASTIC index and nitrate concentration



شکل ۱۴. نقشه آسیب پذیری شاخص دراستیک آبخوان قزوین پس از اصلاح رتبه ها
 Fig 14. Vulnerability map of DRASTIC index of Qazvin aquifer after correcting the ratings

شده است که مشاهده می‌شود بخش عمده‌ای از دشت که در محدوده کم آسیب‌پذیر بود در کلاس متوسط قرار گرفته است و محدوده کم آسیب‌پذیر مساحتی نزدیک به صفر را به خود اختصاص داده است.

طبق نقشه‌ی دراستیک اصلاح شده و بر اساس جدول (۲) که نشان‌دهنده‌ی توصیف علمی آسیب‌پذیری است دشت قزوین از لحاظ آسیب‌پذیری در سه محدوده‌ی کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد. مساحت هر کدام از این محدوده‌ها در شکل (۱۶) نشان داده



شکل ۱۵. درصد فراوانی دراستیک اصلاح شده

Fig 15. Modified DRASTIC Frequency

آب زیرزمینی دارای ماهیت فازی و مقادیر پیوسته می‌باشند. از آنجا که شیب در بخش‌های میانی دشت قزوین بسیار کم می‌باشد و علی‌رغم اینکه در رتبه‌بندی دراستیک در دو کلاس ۹ و ۱۰ قرار می‌گیرد لزومی برای تهیه‌ی نقشه‌ی شیب دراستیک در دشت دیده نمی‌شد، نقشه مورد نظر ساخته و ارائه گردید. پس از آن نقشه‌ی دراستیک فازی آبخوان بدست آمد، برای این منظور نقشه‌های حاصل را طبق وزن دهی‌های دراستیک با هم جمع کرده و نقشه فازی نهایی بدست آمد. شکل (۱۷) نشان‌دهنده‌ی نقشه‌ی فازی دراستیک دشت قزوین می‌باشد.

مقایسه‌ی نقشه‌های فازی دراستیک، دراستیک اصلاحی و دراستیک معمولی: برای این منظور مساحت قسمت‌هایی از دشت که در کلاس‌های مختلف آسیب‌پذیری در این سه نقشه بود محاسبه شده و بر حسب درصد بیان شدند. طبق جدول (۲) پس از اعمال دراستیک فازی در منطقه مورد مطالعه ۲/۱۸ درصد از مساحت دشت قزوین در محدوده‌ی با خطرپذیری بالا می‌باشد و ۰/۸۷ درصد دشت در محدوده‌ی با خطرپذیری کم می‌باشد. اما محدوده‌ی با خطرپذیری متوسط با ۹۶/۹۵ درصد بیشترین مساحت را به خود اختصاص می‌دهد.

تحلیل حساسیت

به منظور بهبود هر چه بیشتر شاخص آسیب‌پذیری دراستیک، وزن‌های استاندارد با استفاده از روش تحلیل حساسیت تک پارامتری برای ناحیه مورد مطالعه اصلاح شدند. در این تحقیق آسیب‌پذیری به وسیله نرم افزار ILWIS و با استفاده از رابطه (۲) تحلیل حساسیت انجام و نتایج آن در جداول (۳) و (۴) ارائه گردید. نتایج نشان می‌دهد که لایه عمق تأثیر کمتری در آسیب‌پذیری دشت قزوین دارد و وزن کمتری را به خود اختصاص می‌دهد و وزن لایه توپوگرافی (شیب) پس از تحلیل حساسیت بیشتر گردید. وزن لایه‌های غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی نیز بیشتر شدند و وزن تغذیه کمتر شد ولی وزن محیط آبخوان و محیط خاک تغییری نکرد. در نهایت با وزن‌های پس از تحلیل حساسیت و رتبه‌های اصلاحی نقشه جدید حاصل گردید که در شکل (۱۶) قابل مشاهده است. در نقشه بدست آمده در مقایسه با نقشه پتانسیل آلودگی دراستیک اصلاحی (شکل ۱۶) تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود.

پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دشت قزوین به روش دراستیک فازی: همانگونه که پیشتر بیان شد، از لایه‌های اطلاعات ورودی به مدل تلفیقی دراستیک، سه لایه هدایت هیدرولیکی، شیب و عمق سطح

جدول ۳. نتایج آماری تحلیل حساسیت تک پارامتری شاخص دراستیک

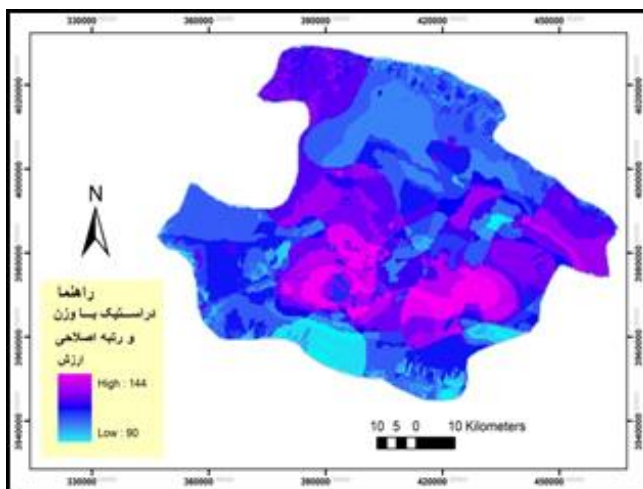
Table 3. Statistical results of single-parameter sensitivity analysis of DRASTIC index

انحراف معیار % Standard Deviation	وزن موثر % Effective Weight %			وزن تئوریک % Theoretical weight percentage	وزن تئوریک Theoretical weight	پارامتر Parameter
	حد اکثر % Max	حداقل % Min	میانگین % Avg			
2.19	24.76	11.03	17.19	21.7	5	عمق (D) Depth
4.31	28.57	6.11	15.08	17.4	4	تغذیه (R) Recharge
1.35	21.43	10.64	12.98	13	3	آبخوان (A) Aquifer media
2.98	15.05	1.47	8.62	8.7	2	خاک (S) Soil media
0.784	10.35	10.08	7.68	4.3	1	توپوگرافی (T) Topography
3.62	38.04	11.03	23.81	21.7	5	غیر اشباع (I) unsaturated
2.03	20.69	6.62	14.69	13	3	هدایت هیدرولیکی (C) Hydraulic Conductivity

جدول ۴. وزن های اصلاح شده پس از تحلیل حساسیت تک پارامتری شاخص دراستیک

Table 4. Modified weights after single-parameter sensitivity analysis of DRASTIC index

هدایت هیدرولیکی (C) Hydraulic Conductivity	غیر اشباع (I) Vadose zone	شیب (T) Topography	خاک (S) Soil media	آبخوان (A) Aquifer media	تغذیه (R) Recharge	عمق (D) Depth	پارامتر Parameter
3.39	5.49	1.79	2	3	3.47	3.96	وزن اصلاح شده Modified weight

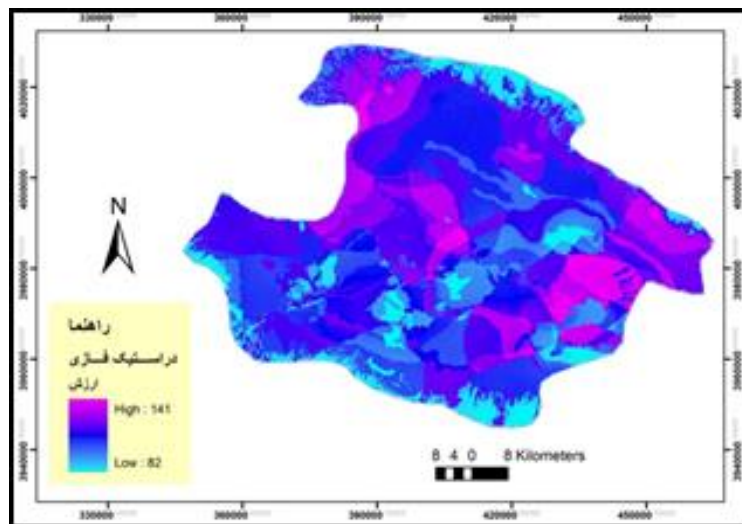


شکل ۱۶. نقشه ی آسیب پذیری شاخص دراستیک دشت قزوین پس از اصلاح رتبه ها و وزن ها

Fig 16. Vulnerability map of DRASTIC index Qazvin Plain after correcting the ranks and weights

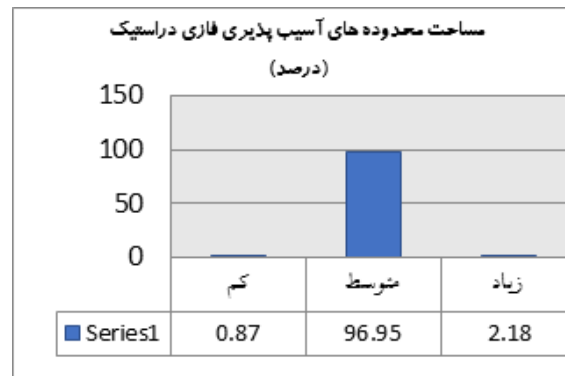
در دشت می‌تواند دور از انتظار و واقعیت باشد. در جدول (۶) و همچنین با مقایسه شکل‌های (۱۴) و (۱۶) مربوط به دراستیک اصلاحی و فازی شده می‌توان تغییر کلاس در بخش‌های مختلف دشت را به وضوح مشاهده نمود. از طرفی، تحلیل حساسیت نشان داد که مدل دراستیک اصلاحی مدلی بهینه محسوب می‌گردد.

نکته حائز اهمیت در این مورد می‌تواند این باشد که همانطور که تغییر محسوسی در نتایج حاصل از دراستیک پیش از اصلاح و پس از اصلاح به وجود آمد، پس از فازی‌سازی دراستیک نیز در نتایج حاکی از خطرپذیری دشت اختلافاتی دیده شد و درصد مساحت محدوده زیاد آسیب‌پذیر بسیار کمتر شده که از دید این محققین و با توجه به غلظت نیترات



شکل ۱۷. نقشه‌ی فازی دراستیک آبخوان دشت قزوین

Fig 17. Fuzzy DRASTIC map of Qazvin plain aquifer



شکل ۱۸. درصد فراوانی در منطق فازی

Fig 18. Frequency percentage in fuzzy DRASTIC

جدول ۶. درصد آسیب‌پذیری دراستیک فازی، دراستیک اصلاحی و دراستیک معمولی

Table 6. Vulnerability percentage of Normal, Modified, and Fuzzy DRASTIC

شماره‌ی کلاس	کلاس آسیب‌پذیری	درصد آسیب‌پذیری منطق فازی	درصد آسیب‌پذیری دراستیک اصلاحی	درصد آسیب‌پذیری هم‌پوشانی شاخص
Class Number	Vulnerability class	Fuzzy Vulnerability%	Modified Vulnerability%	Index Overlay Vulnerability%
کم	2	0.87	0.12	32.8
Low				
متوسط	3	96.95	87.3	62.5
moderate				
زیاد	4	2.18	12.5	4.7
High				
مجموع		100	100	100

نتیجه‌گیری

مساحت محدوده بسیار آسیب‌پذیر با توجه به غلظت نیترات در دشت می‌تواند دور از انتظار و واقعیت باشد. با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که در منطقه مورد مطالعه آبخوان دشت قزوین دراستیک اصلاح شده توسط داده‌های نیترات بهترین عملکرد را در بین روش‌های استفاده مذکور دارد و نتایج آن از دراستیک و فازی دراستیک قابل قبول‌تر می‌باشد.

منابع

- Aller, L., Bennet, T. & Lehr. (1987). DRASTIC, A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydro geologic Settings, EPA 600/2-87-035. Ada, Oklahoma, U.S.Environmental Protection Agency.
- Antonakos, A.K., Lambrakis. & N.J. (2007). Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the DRASTIC model, an example from NE Korinthia, Greece, *Journal of Hydrology*, 333, 288-304.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T. & Kato, K. (2005). A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, Central Japan, *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140.
- Napolitano, P., & Fabbri, A.G. (1996). Single parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS Hydro GIS 96: application of geographical information systems in hydrology and water resources management, *Proceedings of Vienna Conference, IAHS Pub*, 235, 559-566.
- Vrba, J., & Zoporozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*, International Contributions to Hydrogeology, Verlag Heinz Heise GmbH and Co. KG.
- Ab Ara Sazeh Consulting Engineering

تحقیق حاضر به مقایسه آسیب‌پذیری دشت قزوین با روش‌های دراستیک معمولی، اصلاحی و فازی پرداخته است. بر اساس مدل دراستیک معمولی و با کمک سیستم اطلاعات جغرافیایی مقدار آسیب‌پذیری برای آبخوان دشت قزوین بین ۶۶ تا ۱۴۱ به دست آمد. با توجه به محاسبات انجام شده، در روش دراستیک معمولی بیش از ۶۲ درصد از مساحت دشت قزوین در محدوده‌ی آسیب‌پذیری متوسط قرار گرفته است و آسیب‌پذیری زیاد و کم به ترتیب ۵ و ۳۳ درصد از ناحیه را به خود اختصاص داده‌اند. طبق نقشه‌های دراستیک قسمت‌هایی از دشت قزوین (میان‌ه دشت) به دلیل زیاد بودن هدایت هیدرولیکی و بخش جنوب شرقی به دلیل کم بودن عمق سطح آب زیرزمینی در محدوده آسیب‌پذیری بالا قرار گرفت. برای صحت‌سنجی مدل ارائه شده، از غلظت نیترات نرمال شده با پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده شد. بر این اساس، تناقضاتی در دشت مشاهده شد که نشان‌دهنده مناطقی با غلظت بالای نیترات و آسیب‌پذیری کمتر مدل دراستیک (در نواحی شمال غرب و شرق دشت) بود. شاخص اصلاح شده با تابع نرمال شده نیترات نشان داد که بخش وسیعی از دشت (حدود ۸۷ درصد) در رتبه متوسط آسیب‌پذیری قرار دارد. بر این اساس، مناطق کم آسیب‌پذیر در بررسی دراستیک معمولی در کلاس متوسط دراستیک اصلاحی قرار گرفتند. از طرفی در تحلیل حساسیت انجام شده بر روی مدل دراستیک، مشاهده شد که بیشترین تطابق بین مدل دراستیک اصلاحی و پهنه‌بندی پس از تغییر وزن‌ها با تحلیل حساسیت وجود دارد. بر این اساس، پس از اعمال تحلیل حساسیت تک پارامتری و تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، وزن لایه‌های عمق آبخوان و تغذیه کمتر، وزن لایه‌های توپوگرافی (شیب)، غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی بیشتر شد و وزن لایه‌های محیط آبخوان و محیط خاک بدون تغییر بود. مدل با استفاده از تابع فازی تک عضویتی مجدداً راه اندازی شد و محدوده‌ی با خطرپذیری متوسط با ۹۶/۹۵ درصد بیشترین مساحت را به خود اختصاص داد. بر اساس مدل دراستیک فازی، درصد بسیار کم

- example from NE Korinthia, Greece, *Journal of Hydrology*, 333, 288- 304.
- Anvari, S. & Rezakhani Nejad, M. (2022). A GIS-Based DRASTIC Model for Assessing Aquifer Vulnerability, *Irrigation science and engineering*, 45(2), 19-29. doi: 10.22055/jise.2022.41088.2033. [In Persian].
- Asghari Moghadam, A., Nadiri, A. & Paknia, V. (2016). Vulnerability assessment of Dasht Bostan Abad aquifer using DRASTIC and SINTACS methods, *Hydrogeomorphology*, 3 (8), 28-52. [In Persian].
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A.A., Hiyama, T. & Kato, K. (2005). A GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, Central Japan, *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140.
- Bahrami, I. & Shahidi, A. (2022). Improving the DRASTIC Model by Programming Gene Expression in Determining Aquifer Vulnerability to Nitrate, Case Study: Kermanshah Plain Aquifer, *Hydrogeomorphology*, 8(28), 39-62. doi: 10.22034/hyd.2021.44284.1574. [In Persian].
- Barbulescu, A. (2020). Assessing Groundwater Vulnerability: DRASTIC and DRASTIC-Like Methods: A Review. *Water*, 12(5), 13-56. <https://doi.org/10.3390/w12051356>
- Boughriba, M., Barkaoui. A., Zarhloule. Y., Lahmer. Z., El-Houadi. B. & Verdoya, M. (2009). Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment, *Arabian Journal of Geoscience*, 3, 207-220
- Faryabi, M., Kalantari, N., Chitsazan, M. & Rahimi, M. (2007). Evaluation of the effect of agricultural fertilizers on nitrate contamination Company (2009). Qazvin aquifer pollution atlas. Department of Geology and Hydrogeology. Department of Environment Islamic Republic of Iran. [In Persian].
- Abkhan Consulting Engineers. (2013). Studies on updating the balance of water resources of the study areas of the Namak Lake watershed, Qazvin study area water resources balance report (4106). [In Persian].
- Afrozi, M., & Mohammadzadeh, H. (2011). Evaluation and zoning of vulnerability of Farsan-Jonghan plain to pollution using DRASTIC index in GIS environment, The 15th conference of the Geological Society of Iran, Tarbiat Moalem University of Tehran. Iran. [In Persian].
- Al Hallaq, A.H., & Elaish, B.S.A. (2012). Assessment of Aquifer Vulnerability to Contamination in Khanyounis Governorate, Gaza Strip—Palestine, Using the DRASTIC Model within GIS Environment, *Arabian Journal of Geosciences*, 5, 833-847. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0284-9>
- Al-Adamat, R.A.N., Foster, I.D.L. & Baban, S.M.J. (2003). Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC, *Applied Geography*, 23(4), 303-324, 0143-6228, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2003.08.007>.
- Aller, L., Bennet, T. & Lehr. (1987). DRASTIC, A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydro geologic Settings, EPA 600/2-87-035. Ada, Oklahoma, U.S.Environmental Protection Agency.
- Antonakos, A.K. & Lambrakis, N.J. (2007). Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the DRASTIC model, an

- the chemical quality of groundwater (case study), 1st Conference of Environmental Engineering, Tehran <https://civilica.com/doc/11878>. [In Persian].
- Priyank, P., Darshan M. & Neeraj, S. (2022). A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. *Water Supply*, 22 (5), 5190–5205. doi: <https://doi.org/10.2166/ws>. (2022).126
- Rahmani, M. & Azari, T. (2019). Application of DRASTIC Model in the Studying Process of Industrial Development of Sari Plain with its impact on environmental pollution, *Environmental Research and Technology*, 4(6), 83-92. SID. <https://sid.ir/paper/375493/fa>. [In Persian].
- Rangzen, K., Ziyaian, P., Mirzaei, L. & Alikhani, P. (2006). Vulnerability assessment of Varamin plain groundwater to nitrate pollution using modified DRASTIC in GIS environment, 1st Conference of Environmental Engineering, Tehran. [In Persian].
- Regional Water Company of Qazvin. (2019). Statistics and information on groundwater sources. [In Persian].
- Sadat-Noori, M. & Ebrahimi, K. (2016). Groundwater vulnerability assessment in agricultural areas using a modified DRASTIC model, *Environ Monit Assess*, 188, 19. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4915-6>
- Shuaijun, H., Maosheng, Z., Yin, L., Yunfeng, L. & Jiaqiu, D. (2011). A GIS-based groundwater vulnerability assessment for the Northern Shaanxi energy and chemical base, China. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection, 4, 2789-2793.
- Varol, SO. & Davraz, A. (2010). Hydrogeological investigation of Sarkikaraagac Basin (Isparta, of groundwater in Baghmolek Plain using DRASTIC model, *Geomatics conference*. [In Persian].
- Haji Karimi, A., Melmasi, S. & Saraei, L. (2011). Investigating the environmental vulnerability of the groundwater of Dasht Bartash and Dehhran using the DRASTIC model, the 15th conference of the Geological Society of Iran. Tarbiat Moalem University of Tehran. Iran. [In Persian].
- Ilhem, A., Chemseddine, F. & Larbi, D. (2017). Application of DRASTIC method for determining the vulnerability of an alluvial aquifer, Morsott - El Aouinet north east of Algeria: using arcgis environment, *Energy Procedia*, 119, 308-317, 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.114>.
- Kholghi, M. & Taki, R. (2002). Vulnerability assessment of Qazvin plain groundwater, *Journal of Engineering Geology*, 1(3), 255. [In Persian].
- Mardan, H. & Yarqali, B. (2019). Vulnerability zoning of Ardabil alluvial plain aquifer using integration of geographic information system and DRASTIC model, *Environmental Science and Technology*, 22(6), 391-407. doi: 10.22034/jest.2018.20118.2915. [In Persian].
- Napolitano, P. & Fabbri, A.G. (1996). Single parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS Hydro GIS 96: application of geographical information systems in hydrology and water resources management. *Proceedings of Vienna Conference, IAHS Pub*, 235, 559–566.
- Piscopo, G., P. Please. & Sinclair, P. (2001). Macquarie Catchment Groundwater Vulnerability Map Explanatory Notes, Department of Land and Water Conservation, New South Wales.
- Pishkar Dehkordi, A., & Pourmoghods, H. (2006). Investigating the effect of industrial wastewater on

Turkey) and groundwater vulnerability, *Water International*, 35(2), 177-194, doi: 10.1080/02508061003663445

Voudouris, K., Nazakis, N., Polemio, M. & Kareklas, K. (2010). Assessment of intrinsic vulnerability using the DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus, *European Water*, 30, 13-24.

Vrba, J. & Zoporozec, A. (1994). Guidebook on mapping groundwater vulnerability, *International Contributions to Hydrogeology*. Verlag Heinz Heise GmbH and Co. KG.