



## Groundwater Monitoring Network Design Using Vulnerability Analysis and Well Preservation Zone

H. Yousefi<sup>1</sup>, M. Jamal Omid<sup>1</sup>, and A. Moridi<sup>2\*</sup>

### Abstract

Monitoring the quantity and quality of groundwater is a non-separable part of the environmental information system. There are several ways to design a groundwater monitoring network. In the present study, we attempted to develop a new method for flexible design. By flexible we mean that the results of this study allow the decision maker to select a limited number of high-priority wells, taking into account the budget allocated to the project. It is also possible to easily use this method for wells under study or construction. Also, in the proposed design method, monitoring is not limited to just one parameter (in the present study, EC concentration) and one or more parameters can be easily replaced. The DRASTIC model was used to calculate the aquifer vulnerability, which consists of seven layers of aquifer, including groundwater depth, net recharge, aquifer media, soil type, topography, impact of vadose zone, and the hydraulic conductivity of aquifers. The layers were optimized using differential evolutionary algorithm (DE) in order to find the highest correlation between the vulnerable points and the points with the highest concentration of EC. As a result of this optimization, the amount of the net recharge (the actual infiltration of water into the aquifer) had the highest correlation, which was confirmed by comparing net recharge and EC maps. The aquifer was divided into 60×60m cells. The first scenario identified the cells in which at least 60 percent of simulations have vulnerabilities above average. The second scenario identified the cells which in at least 25 percent of simulations have vulnerabilities above average plus standard deviation. With the help of WhAEM2000, 10-year capture zone of existing wells were calculated. The final priority of the wells was calculated by monitoring the number of vulnerable cells enclosed in the capture zones.

**Keywords:** WhAEM2000, DRASTIC, DE Algorithm, MODFLOW.

Received: January 18, 2020

Accepted: May 22, 2020

## طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل آسیب پذیری در محدوده شعاع مؤثر چاه‌های پایش

حسین یوسفی<sup>۱</sup>، مونا جمال امید<sup>۱</sup> و علی مریدی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

پایش کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی قسمت جدانشدنی سیستم اطلاعات محیط زیستی است. روش‌های مختلفی برای طراحی شبکه پایش آب زیرزمینی وجود دارد. در تحقیق حاضر سعی بر این بود تا روشی نوین جهت طراحی منطف شبکه پایش تدوین شود. منظور از منطف این است که نتایج حاصل از این تحقیق به تصمیم گیرنده این امکان را می‌دهد تا با در نظر گرفتن سطح بودجه اختصاص یافته به طرح، تعداد محدودی از چاه‌های با اولویت بالا را انتخاب کند. همچنین این امکان وجود دارد تا این روش به راحتی برای چاه‌های در دست مطالعه یا احداث نیز استفاده گردد. همینطور در این روش طراحی منحصر به پایش فقط یک پارامتر (در تحقیق حاضر غلظت EC) نیست و به سادگی می‌توان یک یا چند پارامتر را جایگزین نمود. برای محاسبه آسیب‌پذیری آبخوان مدل DRASTIC استفاده شده است که از هفت لایه مربوط به آبخوان شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، مصالح تشکیل دهنده آبخوان، نوع خاک، توپوگرافی، ماهیت منطقه غیر اشباع و هدایت هیدرولیکی مصالح آبخوان تشکیل شده است. که وزن لایه‌های آن با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) به منظور یافتن بیشترین همبستگی بین نقاط آسیب‌پذیر و نقاطی که غلظت بالای از هدایت الکتریکی دارند، بهینه شده‌اند. در نتیجه این بهینه‌سازی مقدار تغذیه آبخوان (نفوذ واقعی آب به آبخوان) بیشترین همبستگی را دارد که این موضوع با استفاده از مقایسه نقشه‌های تغذیه و هدایت الکتریکی صحت‌سنجی می‌گردد. سطح حوضه به سلول‌هایی با ابعاد ۶۰ متر تقسیم شد. در استراتژی اول سلول‌هایی که حداقل در ۶۰ درصد حالات مقدار آسیب‌پذیری آن‌ها بیشتر از میانگین است و در استراتژی دوم سلول‌هایی که حداقل در ۲۵ درصد حالات مقدار آسیب‌پذیری آن‌ها بیشتر از میانگین به علاوه انحراف معیار است، مشخص شده‌اند. با کمک مدل WhAEM2000 حریم حمایتی (۱۰ ساله) چاه‌های آب شرب موجود محاسبه شد و در نهایت چاه‌های پایش به وسیله تعداد سلول‌های محصور در حریم هر چاه اولویت‌بندی شدند.

**کلمات کلیدی:** WhAEM2000، الگوریتم DE، DRASTIC، MODFLOW

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۲

1- M.Sc. Student of Water Resources Management and Engineering, Water Resources Engineering Department, Civil, Water and Environmental Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor of Civil Engineering, Water Resources Engineering Department, Civil, Water and Environmental Engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a\_moridi@sbu.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

آب زیرزمینی نقش مهمی در تأمین نیازهای آبی دارد و همیشه در معرض تغییرات کمی و کیفی قرار دارد. یکی از راههای کنترل کیفی آبخوان شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مدیریت آن است. بسیاری از تحقیقات بر روی حفاظت کیفی آب زیرزمینی با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان و تخمین خطر آلودگی آن تمرکز کرده‌است (Dixon, 2004; Jafari et al., 2016; Jafari and Nikoo, 2016; Nadiri et al., 2018; Naghibi et al., 2016; Neshat and Pradhan, 2015; Sadeghfam et al., 2016; Saidi et al., 2011).

مدل‌های خطر آلودگی آب زیرزمینی در مقیاس حوضه‌ای، آسیب‌پذیری ذاتی و آسیب‌پذیری ویژه آبخوان را ارزیابی می‌کند. ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی تحت چارچوب DRASTIC، در ابتدا توسط Aller (1985) و (1987) ارائه شده است و محققان بسیاری از روش‌های درستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان در پژوهش‌های خود استفاده کرده‌اند (Almasri, 2008; Bazimenyera and Zhonghua, 2008; Neshat and Pradhan, 2010; Tilahun and Merkel, 2017). روش DRASTIC معمولاً نتایج مطلوبی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبهای زیرزمینی در برابر آلودگی ارائه می‌دهد اما در برخی موارد توانسته ارزیابی دقیقی از خطر آلودگی آب زیرزمینی ارائه دهد، بنابراین در جهت ارتقای دقت ارزیابی روش DRASTIC برخی از محققان به اصلاح این روش با استفاده از روش‌های مختلف پرداختند (Afshar et al., 2007; Huan et al., 2012; Javadi et al., 2011; Kazakis and Voudouris, 2015; Moustafa, 2019; Neshat et al., 2014; Pacheco et al., 2018).

پایش فرآیندی نظارتی با طرحی علمی و پویا بر مبنای مشاهده، اندازه‌گیری، نمونه‌برداری و ارزیابی نتایج و ثبت آن می‌باشد (Akbarzadeh et al., 2016). روش‌های طراحی شبکه پایش را می‌توان به ۳ دسته تقسیم کرد: روش‌های مبتنی بر تلفیق مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی، روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های آماری و استفاده از روش‌های زمین‌آمار مثل کریجینگ و خوشه‌بندی و روش‌های مبتنی بر منطقه‌بندی. Bashi-Azghadi and Kerachian (2010) از ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی MODFLOW و MT3DMS و مدل‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه Monte Carlo و چندهدفه NSGA-II در طراحی شبکه پایش استفاده کردند. پژوهش‌های بسیاری از تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در طراحی شبکه پایش استفاده کردند (Alizadeh and Mahjouri, 2017; Mahar and Datta, 2001; Maymandi et al., 2018). تجزیه و تحلیل مکانی معمولاً با استفاده از روش‌های متفاوتی از زمین‌آمار،

و در درجه اول تکنیک‌های کریجینگ انجام می‌شود همانند پژوهش Maghsudsangatah et al. (2018) که مبتنی بر مدل زمین‌آمار کریجینگ برای ارزیابی و بهینه‌یابی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی در آبخوان مشهد است. آنالیزهای زمین‌آمار به طور گسترده‌ای در پروژه‌های مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا با موفقیت می‌تواند تنوع مکانی سطح آب‌های زیرزمینی را نشان دهد (Ayvaz and Karahan, 2008; Bhat et al., 2015; Desbarats et al., 2002). Esquivel et al. (2015) از روش طبقه‌بندی برای تحلیل و مدل کردن معیارهای اصلی تأثیرگذار بر طراحی بهینه شبکه‌ی پایش سطح آب زیرزمینی استفاده کرده‌اند، برای تعیین وزن عوامل از فرایند سلسله‌مراتبی تحلیلی (AHP<sup>2</sup>) استفاده شده است. به‌منظور پیدا کردن نقشه‌ی اولویت‌بندی مناطق برای پایش، نقشه‌ی به‌دست آمده در GIS طبقه‌بندی می‌شود. این طبقه‌بندی ۵ کلاس خیلی کم تا خیلی زیاد است، که ناحیه‌ی خیلی زیاد در منطقه‌ی شهری قرار گرفته که اولویت بیشتری برای پایش دارد. در انتخاب چاه‌های شبکه پایش کیفی می‌توان به منظور صرفه‌جویی اقتصادی، از بین چاه‌های موجود در منطقه (مشاهداتی و بهره‌برداري) چاه‌های پایش را انتخاب کرد. Alizadeh et al. (2018) از روش آنتروپی در طراحی شبکه پایش کیفی دشت اشتهارد استفاده کرده‌اند. در این تحقیق شوری آبخوان (TDS) به عنوان متغیر بهینه‌سازی استفاده شده است و از بین چاه‌های موجود، ۲۰ چاه به عنوان چاه پایش تعیین شدند. Akbarzadeh et al. (2016) به بهینه‌سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌سازی فضایی-زمانی پرداختند. رویکرد بهینه‌سازی در این پژوهش، کاهش ایستگاه‌های پایش است و با استفاده از الگوریتمی براساس معیارهای آنتروپی و بر مبنای شاخص آلودگی نیترات، نسبت به بهینه‌سازی شبکه پایش موجود اقدام کردند. حفاظت کیفی از منابع آب زیرزمینی شهرها که برای تأمین آب شرب استحصالی از چاه‌ها نقش دارند، امروزه از مسئولیت‌ها و دغدغه‌های فکری متولیان تأمین و توزیع آب شرب محسوب می‌شود. در این راستا محاسبه بهینه و دقیق حریم‌ها با استفاده از مبانی علمی و توجه به آسیب‌پذیری آبخوان از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا محاسبه و اعمال حریم کوچکتر خطر آلودگی آب چاه را بالا برده و حریم بزرگتر اتلاف سرمایه را به دنبال خواهد داشت (Abedi Koupai et al., 2018). Zamani moghadam et al. (2019) با استفاده از نرم‌افزار WhAEM2000 حریم کیفی چاه‌ها به دو روش شعاع ثابت و روش تحلیلی محاسبه کردند. سپس با استفاده از روش DRASTIC میزان آسیب‌پذیری آبخوان در محدوده‌های حریم کیفی چاه‌های شرب شناسایی کردند و مبنایی برای تعیین دوره بازگشت حریم کیفی در محدوده مطالعاتی قرار دادند.

آبخوان مشخص شود. لایه‌های مورد استفاده به صورت Raster هستند که متشکل از پیکسل‌هایی با ابعاد ۶۰ متر در ۶۰ متر با ارزش هر لایه از مدل DRASTIC در آن پیکسل می‌باشند. در مرحله بعد برای هر پیکسل از نقشه هر لایه از مدل DRASTIC، ۱۰۰ عدد تصادفی با توزیع یکنواخت ایجاد شد. با توجه به اینکه ارزش هر لایه بین ۱ تا ۱۰ است، حد خطای قابل قبول ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. به همین دلیل اعداد تصادفی در محدوده یک واحد کمتر و بیشتر از مقادیر هر لایه تولید شده است. روش حاضر مبتنی بر تلفیق مدل مفهومی آسیب‌پذیری آبخوان و مدل تعیین حریم کیفی چاه‌ها است که بدین منظور دو استراتژی تعریف گردید. استراتژی اول بیان می‌کند که اگر آسیب‌پذیری یک پیکسل از میانگین بیشتر باشد، آن پیکسل آسیب‌پذیر است و در غیر این صورت آسیب‌پذیر نیست. در استراتژی دوم اگر آسیب‌پذیری یک پیکسل از میانگین به علاوه انحراف معیار بیشتر باشد، آن پیکسل آسیب‌پذیر است و در غیر این صورت آسیب‌پذیر نیست. با توجه به مقادیر آستانه آسیب‌پذیر بودن پیکسل‌ها مشخص است که استراتژی اول سخت‌گیرانه‌تر از استراتژی دوم است. در مرحله بعد با محاسبه تحلیلی حریم حفاظتی ۱۰ ساله چاه‌های موجود، اولویت هر چاه برای پایش کیفیت به دست آمد. شکل ۱ مراحل انجام این تحقیق را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر به دلیل دسترس نبودن داده‌های تغذیه و هدایت هیدرولیکی آبخوان، از مدل MODFLOW استفاده شده است.

بررسی سوابق مطالعاتی نشان می‌دهد که عمدتاً از سه روش برای طراحی شبکه پایش استفاده می‌شود. این سه روش همانطور که در فوق ارائه شده عبارتند از: ۱- روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، ۲- روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های آماری و زمین آماری و ۳- روش‌های مبتنی بر خوشه‌بندی و منطقه‌بندی. روش پیشنهادی این مقاله خارج از دسته‌بندی‌های فوق است و در این مقاله با استفاده از یک روش ابتکاری و ترکیب دو مدل DRASTIC و WhAEM2000 میزان آسیب‌پذیری چاه‌های موجود ارزیابی شده و مبنایی برای انتخاب چاه‌های پایش است. ترکیب این دو مدل در کنار استفاده از مدل بهینه‌سازی برای برآورد دقیق پارامترهای مدل DRASTIC و مدل شبیه‌سازی مونت کارلو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت برآورد پارامترهای مدل DRASTIC جزو نوآوری‌های این تحقیق است.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق سعی بر این است تا طراحی شبکه پایش با روشی نسبتاً جامع و مبتنی بر ارتباط شاخص‌های آسیب‌پذیری و خطر ارائه شود که برای این هدف ابتدا مدل DRASTIC آبخوان محدود مورد مطالعه ساخته شده است. سپس ضرایب لایه‌های این مدل توسط الگوریتم DE<sup>۳</sup> برای آبخوان بهینه شده است تا مؤثرترین لایه در آسیب‌پذیری

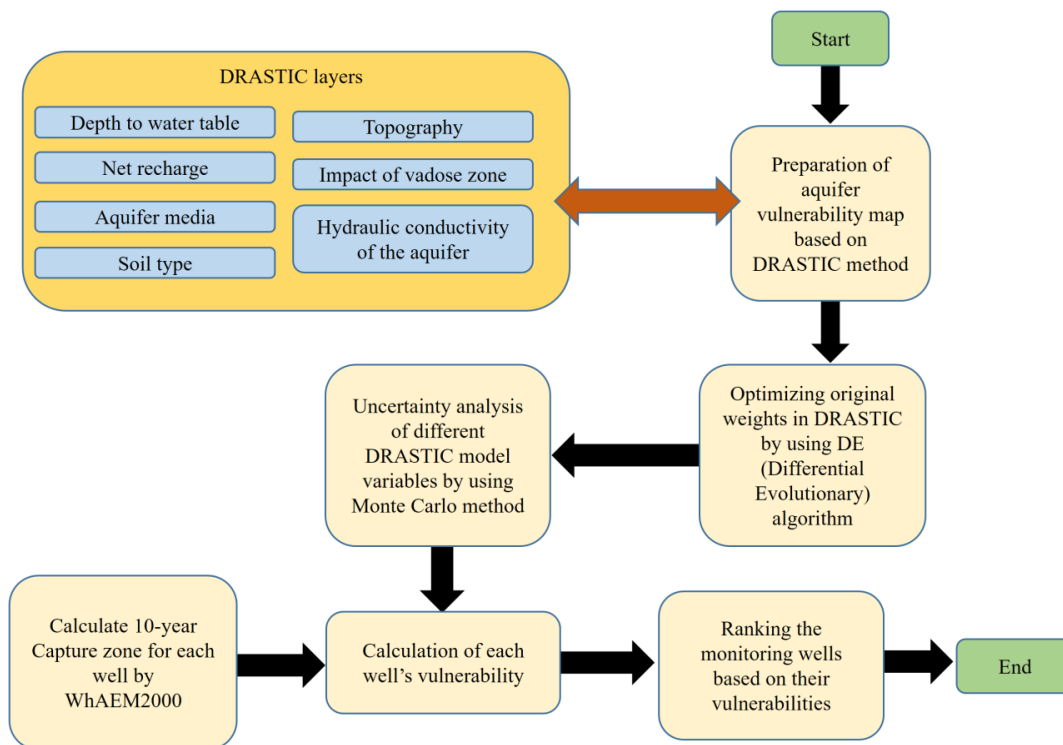


Fig. 1- Algorithm of the steps taken in the present study

شکل ۱- الگوریتم گام‌های انجام شده در این تحقیق

مدل WhAEM2000<sup>۴</sup> جهت تعیین حریم کیفی چاه‌ها و برنامه‌ریزی جهت برآورد و تخمین منابع آب که توسط سازمان محیط زیست ایالات متحده آمریکا به منظور کنترل آلودگی منابع آب زیرزمینی، تهیه و تدوین شد. این مدل بر مبنای روش تحلیلی جریان آب‌های زیرزمینی را مدل‌سازی و حریم حفاظتی اطراف چاه، چشمه و قنات را محاسبه می‌نماید. حریم کیفی چاه، تعیین و محاسبه سطحی در محدوده مجاور یک چاه، جهت حفاظت از آب زیرزمینی در آن منطقه را گویند. در حریم کیفی (Capture Zone) منابع آب سه نوع ناحیه حفاظتی از منبع تعریف شده است که تحت عنوان حریم کیفی حفاظت چاه (حمایت فوری)، ناحیه حفاظت داخلی (حمایت اجباری) و ناحیه حفاظت خارجی (حمایتی) به طور متوالی پیرامون چاه پمپاژ در نظر گرفته می‌شوند. مدل WhAEM2000 بر اساس مدل‌سازی قطعی ریاضی تهیه شده است. اطلاعات مورد نیاز شامل توپوگرافی، مرز آبخوان، چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های آب شرب، محدوده‌های شهری، تراز آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان، عمق سنگ بستر، میزان هدایت هیدرولیکی و میزان تخلخل آبخوان می‌باشد. در این مدل نیاز به معرفی مشخصات رودخانه مانند شیب، آبدهی و عرض آن است. همچنین این امکان فراهم شده است تا موانع آب زیرزمینی و جریان‌های زیرسطحی نیز در مدل تعریف شوند. در این تحقیق با استفاده از مدل WhAEM2000 نواحی حمایت فوری (۲ ساله)، حمایت اجباری (۵ ساله) و حمایتی (۱۰ ساله) برای چاه‌های شرب به روش تحلیلی محاسبه شد. در روش تحلیلی، حریم حفاظتی با توجه به ویژگی‌هایی از جمله تراز آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی، عمق چاه، ضخامت آبخوان، زمان، تعداد خطوط هم‌پتانسیل و سایر خصوصیات ذاتی آبخوان با استفاده از رابطه داری محاسبه می‌شود که به همین دلیل نتایج حریم‌ها دقت بیشتری نسبت به روش شعاع ثابت دارد.

آسیب‌پذیری را می‌توان به عنوان امکان نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی تعریف کرد. مفهوم پتانسیل آسیب‌پذیری بر اساس این نظریه که برخی از مناطق نسبت به آلودگی آب زیرزمینی مستعدتر از مناطق دیگر می‌باشد، استوار است (Gogu and Dassargues, 2000). مدل DRASTIC توسط (Aller et al., 1987) ارائه گردید، این مدل به عنوان یک سیستم استاندارد برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطور کلی این مدل شامل سه بخش وزن، محدوده و رتبه می‌باشد. روش درستیک معروفترین و پرکاربردترین روش مورد استفاده در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد که از هفت مشخصه برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده می‌کند که عبارتند از: ۱- عمق آب زیرزمینی، ۲- تغذیه خالص، ۳- مصالح تشکیل دهنده آبخوان، ۴- نوع خاک، ۵- توپوگرافی، ۶- ماهیت منطقه غیر اشباع و ۷- هدایت هیدرولیکی مصالح آبخوان. روش درستیک برای هر نوع آبخوان (اعم از آبخوان‌های آبرفتی و کارستیکی) قابل استفاده است.

در روش DRASTIC برای هر یک از مشخصه‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری آبخوان، عدد شاخصی بین ۱ تا ۱۰ برای هر نقطه از آبخوان در نظر گرفته می‌شود. عدد ۱۰ معرف بیشترین آسیب‌پذیری و عدد ۱ نمایانگر کمترین آسیب‌پذیری آبخوان است. پس از تعیین عدد شاخص مربوط به هر نقطه، نقشه آسیب‌پذیری آبخوان تهیه می‌شود. سپس شاخص‌های تعیین شده برای هر یک از هفت مشخصه مدل درستیک در ضرایب وزنی مربوطه ضرب شده و اعداد به دست آمده با هم جمع می‌شوند تا شاخص آسیب‌پذیری کل در هر نقطه محاسبه شود. با توجه ضرایب ارائه شده در جدول ۱ شاخص آسیب‌پذیری کل در روش DRASTIC با استفاده از معادله ۱ می‌آید:

$$\text{DRASTIC} = 5 \times D + 4 \times R + 3 \times A + 2 \times S + T + 5 \times I + 3 \times C \quad (1)$$

Table 1- Data sources for conducting DRASTIC model

جدول ۱- اطلاعات مورد نیاز برای ساختن مدل DRASTIC

DRASTIC layer	Property	Source
D	Depth to water table	Ministry of Energy
R	Net recharge	MODFLOW output
A	Aquifer media	Ministry of Energy
S	Soil type	FAO Digital Soil Map of the World (1995)
T	Topography	USGS DEM with 30m resolution ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )
I	Impact of vadose zone	Geological survey and mineral exploration of Iran (GSI)
C	Hydraulic conductivity of the aquifer	MODFLOW output

### ۳-۲- مدل MODFLOW

همین دلیل اعداد تصادفی در محدوده یک واحد کمتر و بیشتر از مقادیر هر لایه تولید شده است. به دلیل اینکه حداقل و حداکثر مقادیر برخی لایه‌ها در حالت عادی بین ۱ و ۱۰ است لذا در مواقعی که مقادیر لایه‌ها بین این اعداد باشند، امکان توسعه بازه وجود ندارد و بازه تولید اعداد تصادفی با بازه موجود برابر می‌شود. پس از تولید اعداد تصادفی برای هر متغیر از مدل، مقادیر مدل مفهومی آسیب‌پذیری به ازای اعداد تصادفی ساخته شده محاسبه می‌گردد و نتایج حاصله توسط شاخص‌های آماری تحلیل و بررسی می‌شوند. معادله شماره ۲ نشان دهنده دامنه تولید اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت برای لایه D از مدل DRASTIC است که برای سایر لایه‌ها نیز از این معادله استفاده می‌گردد:

$$D \in [D_{\min}, D_{\max}] \rightarrow \begin{cases} D_{\min} = \begin{cases} D_{\min_{org}} - 1 & \text{if } D_{\min_{org}} - 1 \geq 1 \\ 1 & \text{Otherwise} \end{cases} \\ D_{\max} = \begin{cases} D_{\max_{org}} + 1 & \text{if } D_{\max_{org}} - 1 \leq 10 \\ 10 & \text{Otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

$$(DRASTIC)_{avg} = \left( \frac{\sum_{i=1}^{100} (DRASTIC)_i}{100} \right) \quad (3)$$

$$(DRASTIC)_{std} = \sqrt{0.01 \times \sum_{i=1}^{100} ((DRASTIC)_i - (DRASTIC)_{avg})^2} \quad (4)$$

$$\text{Objective} = \text{minimize} [RMSE(DRASTIC_{n,i}, EC_{n,i})] \quad (5)$$

در معادلات ۲ تا ۵،  $D_{\min_{org}}$  و  $D_{\max_{org}}$  به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر اصلی برای لایه D از مدل DRASTIC هستند (برای سایر لایه‌ها نیز همین رابطه استفاده می‌شود)،  $D_{\min}$  و  $D_{\max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر بازه‌های بسط داده شده برای تولید اعداد تصادفی هستند.  $(DRASTIC)_{avg}$  میانگین و  $(DRASTIC)_{std}$  انحراف معیار مدل‌های ساخته شده برای اعداد تصادفی است.

### ۲-۵- معیارهای ارزیابی

جزر میانگین مربع خطا (RMSE) معیاری برای مقایسه مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد. RMSE با حذف اثر داده‌های منفی، فاصله بین دو دسته داده (خطا) را گزارش می‌کند. که در این تحقیق به منظور محاسبه فاصله نتایج هدایت هیدرولیکی و آسیب‌پذیری ابتدا داده‌ها بی‌بعد شده‌اند (معادله ۶) و سپس از شاخص RMSE (معادله ۷) استفاده شده است:

$$x_n = \left( \frac{x_i}{x_{\max}} \right) \times 10 \quad (6)$$

$$RMSE = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n} \right]^{0.5} \quad (7)$$

نسخه اصلی مدل MODFLOW در USGS تهیه و ارائه گردیده است (McDonald and Harbaugh, 1988). این نرم‌افزار با زبان برنامه‌نویسی Fortran نوشته شده است و معادلات دیفرانسیلی جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل را بر پایه روش تفاضل‌های محدود حل می‌نماید. MODFLOW قادر به شبیه‌سازی محدوده وسیعی از فرآیندها و جنبه‌های هیدروژئولوژیکی از قبیل موازنه آب بین رودخانه و آبخوان، نفوذ ناشی از بارندگی و آبیاری، تبخیر و تعرق، استخراج یا تزریق توسط چاه، شرایط عمومی هد هیدرولیکی، تخلیه آبخوان از طریق چشمه و زهکش می‌باشد. همچنین جریان‌های ماندگار و غیرماندگار، آبخوان‌های آزاد و تحت فشار و سایر انواع آبخوان‌ها به کمک آن قابل شبیه‌سازی هستند. جهت حل معادلات جریان در محیط متخلخل، محدوده آبخوان در MODFLOW در جهات مختلف به صورت مستطیلی گسسته‌سازی می‌شود. همچنین لازم است اطلاعات مربوط به چاه‌ها، رودخانه‌ها و سایر اجزاء ورودی و خروجی به مدل داده شود. در این پژوهش از مقادیر محاسبه شده هدایت هیدرولیکی و تغذیه آبخوان توسط مدل MODFLOW در محاسبه آسیب‌پذیری آبخوان (ساخت مدل DRASTIC) استفاده شده است.

### ۲-۴- الگوریتم تکاملی تفاضلی (DE) و تحلیل اعداد تصادفی

الگوریتم تفاضلی تکاملی اولین بار توسط Storn and Price (1995) معرفی گردید. این الگوریتم عملکرد همگرایی بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی ( $EA^a$ ) دارد، الگوریتم تفاضلی تکاملی از نظر کارایی، اثربخشی و استحکام یکی از امیدوارکننده‌ترین  $EA$  های جدید است (Karterakis et al., 2007). این الگوریتم نقاط جمعیت  $N$  را در هر نسل حفظ می‌کند، جایی که هر نقطه یک راه‌حل بالقوه و  $N$  یک پارامتر کنترل است. این الگوریتم به صورت مکرر جمعیت را تکامل و بهبود می‌بخشد. در هر نسل جمعیت جدیدی برحسب جمعیت فعلی تولید می‌شود. برای تولید فرزندان در جمعیت جدید، این الگوریتم اطلاعات مربوط به مسافت و جهت را از اعضای فعلی جمعیت استخراج و برای تنوع، انحراف تصادفی را اضافه می‌کند. اگر فرزندان در جمعیت جدید، متناسب با تابع هدف ارزش کمتر یا بیشتری نسبت به عضو از پیش تعیین شده جمعیت داشته باشند، این عضو جمعیت را جایگزین خواهد کرد (Sun et al., 2005). در این پژوهش از الگوریتم تکاملی تفاضلی برای بهینه‌سازی ضرایب و مقادیر درستیک استفاده شده است. به منظور کاهش خطای انسانی و عدم قطعیت در شبیه‌سازی و تعیین مقادیر لایه‌های مدل مفهومی آسیب‌پذیری آبخوان (DRASTIC) از تحلیل اعداد تصادفی استفاده شد. با توجه به اینکه ارزش هر لایه بین ۱ تا ۱۰ است، حد خطای قابل قبول ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. به

در معادله‌های ۶ و ۷،  $n$  تعداد داده‌ها،  $x_{1,i}$  داده‌ی نام دسته‌ی اول و  $x_{2,i}$  داده‌ی نام دسته‌ی دوم و  $x_{max}$  حداکثر داده در هر دسته است.

#### ۴- نتایج و بحث

مدل مفهومی در این مطالعه از هفت لایه اطلاعاتی (Coverage) تشکیل شد که لایه‌های مربوط به این مدل عبارتند از: مرز آبخوان، چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری، تبخیر، تغذیه از آبخوان، هدایت هیدرولیکی، رودخانه و مقدار آبدی ویژه می‌باشند. مرزهای مدل که از طریق نقشه هم تراز چاه‌های مشاهده‌ای به دست آمد که شامل چهار جبهه ورودی و خروجی است که مناطق شمال شرقی و شمال غربی آبخوان به عنوان مرزهای ورودی و قسمت‌های جنوب و جنوب غربی آبخوان به عنوان مرزهای خروجی این محدوده در نظر گرفته شدند.

در مدل MODFLOW ضرایب هدایت هیدرولیکی و تغذیه آبخوان و نیز مقدار آبدی ویژه به عنوان پارامترهای مدل در نظر گرفته شد مقدار اولیه هدایت هیدرولیکی از آنجایی که در محل مورد نظر آزمایش پمپاژ صورت نگرفته است، به طور تقریبی برابر ۲۰ متر بر روز در نظر گرفته شد. همچنین مقادیر اولیه تغذیه آبخوان مذکور برای منطقه کشاورزی برابر با ۰/۰۷ و برای منطقه شهری برابر با ۰/۰۴ متر بر روز در نظر گرفته شد که این مقادیر به ترتیب ۱۶ و ۱۱ درصد از کل تغذیه آبخوان می‌باشند.

#### ۳- منطقه مورد مطالعه: آبخوان دشت رودان

دشت رودان با مساحت ۲۰۵/۲۵ کیلومتر مربع از لحاظ جغرافیایی در محدوده ۲۷/۲۵ درجه شمالی و ۲۷/۵ درجه شمالی و ۵۷ درجه و ۵۷/۳ درجه شرقی واقع شده است. اقلیم این منطقه گرم و خشک است و زمستانی معتدل و تابستانی گرم دارد. دشت رودان به علت طبیعت خشک و تبخیر زیاد با محدودیت منابع آبی رو به رو است. کاربری غالب اراضی را مراتع ضعیف (۵۸ درصد) و زمین‌های کشاورزی زراعی آبی (۴۰ درصد) تشکیل می‌دهند. متوسط سالانه دما در بلندمدت برابر ۲۶/۱ درجه سانتی‌گراد و میزان متوسط بارش دشت رودان در بلندمدت برابر با ۲۵۲/۶ میلی‌متر در سال برآورد شده است. همچنین میزان رواناب خارج شده از دشت به سمت پایین دست ۳۰/۲ میلیون مترمکعب در سال است. در این محدوده ۱۵ چاه با کاربری شرب وجود دارد.

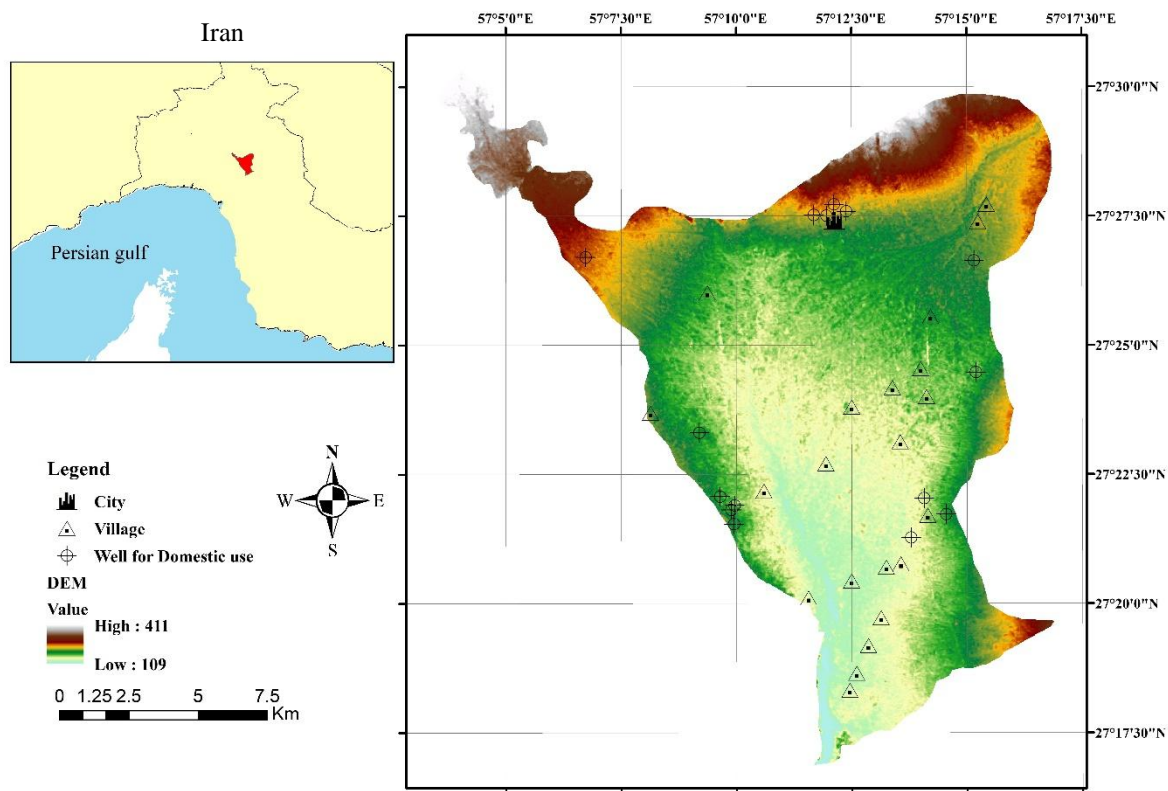


Fig. 2- Rudan aquifer map

شکل ۲- محدوده آبخوان رودان

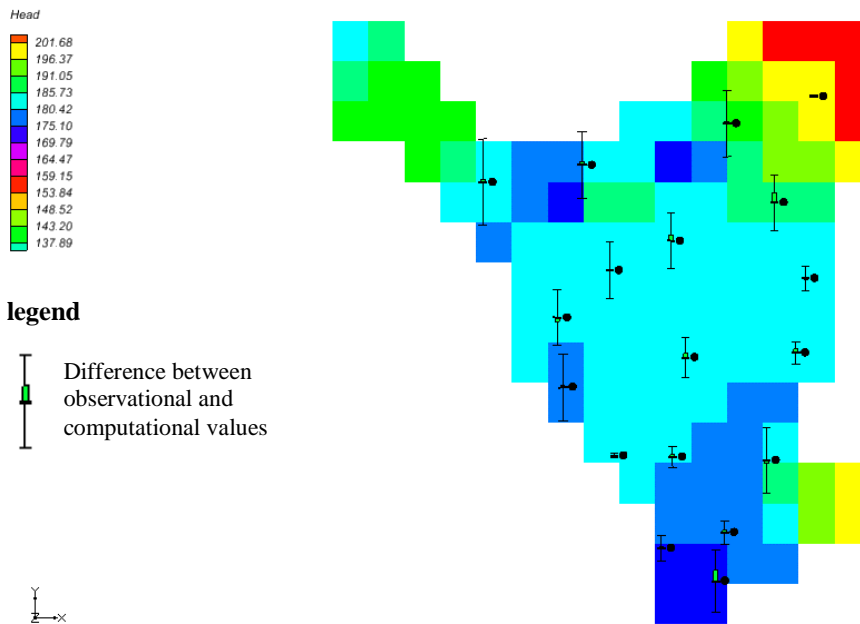


Fig. 3- Results of the calibrated model in the steady state (Variation of groundwater head and error in observation wells)

شکل ۳- نتایج مدل کالیبره شده در حالت پایدار (تفاوت تراز مقادیر مشاهداتی و محاسباتی)

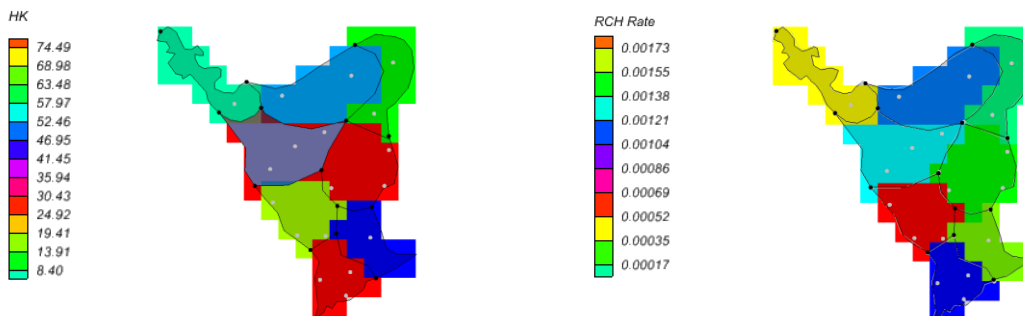


Fig. 4- Hydraulic Conductivity and Recharge maps

شکل ۴- نقشه‌های هدایت هیدرولیکی و تغذیه آبخوان

خط برابر با ۱/۵۶ محاسبه شد. نتایج تغییرات هد تراز آب زیرزمینی در مدل ماندگار نیز مطابق با شکل ۳ آورده شده است. برای تکمیل اطلاعات مورد نیاز برای ساخت مدل DRASTIC از نقشه‌های تغذیه و هدایت هیدرولیکی آبخوان که از نتایج مدل کالیبره شده به دست آمده است، استفاده شد.

شکل ۵ نشانگر نتایج مدل DRASTIC و شکل ۶ نقشه هم‌غلظت EC در آبخوان دشت رودان است. عمق آب زیرزمینی از سطح زمین (D) در مرکز و شمال شرق آبخوان بیشتر از سایر نقاط است و در کل عمق آب زیرزمینی بیشتر از ۱۵ متر است.

در نهایت مقدار آبدهی ویژه آبخوان همانطور که در گزارش بیان دشت مربوطه آورده شده است، برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته شد که در کالیبراسیون این مقادیر به روش PEST (روش خودکار) کالیبره گردید. در حالت ماندگار پارامتر مربوط به ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان به گونه‌ای کالیبره شد که این مقدار از ۵ تا ۶۰ متر بر روز متغیر بوده است. مدل در حالت ماندگار با استفاده از اطلاعات سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ ساخته و کالیبره شد. معیار جذر میانگین مربعات خطا برای حالت ماندگار ۱/۴۹ متر شد که نشانگر دقت قابل قبول در شبیه‌سازی وضعیت آبخوان است. همچنین صحت‌سنجی مدل در حالت پایدار برای سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ صورت گرفت که مجذور میانگین مربعات

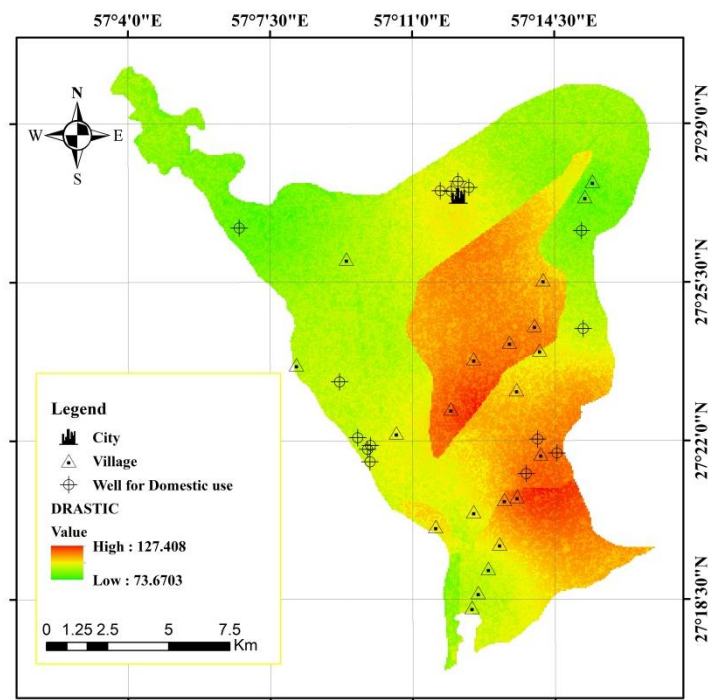


Fig. 5- DRASTIC map of the aquifer  
 شکل ۵- نقشه‌ی آسیب‌پذیری آبخوان

با توجه به اینکه هر یک از لایه‌های مدل DRASTIC ارزشی معادل یک تا ۱۰ دارند، لذا برای ایجاد امکان مقایسه بین مقادیر لایه‌های DRASTIC و EC، همه مقادیر بین یک تا ۱۰ نرمال شده‌اند. همچنین فرض بر این است که وزن هر لایه نیز عددی بین یک تا ۱۰ است. با استفاده از توزیع یکنواخت اعداد تصادفی به منظور بهینه‌سازی وزن لایه‌ها با الگوریتم تفاضلی تکاملی (DE)، ساخته شد. پس از اجرای بهینه‌سازی با تابع هدف (معادله ۵) و مقادیر وزن هر لایه به عنوان متغیر تصمیم، نتایج جدول ۲ بدست آمد.

با برهم نهی نقشه تغذیه خالص (شکل ۷) با نقشه هدایت الکتریکی آبخوان (شکل ۶) مشاهده می‌شود که این دو نقشه شباهت زیادی در محل قرارگیری تغذیه و هدایت الکتریکی بیشینه دارند.

تغذیه خالص (R) بیشتر از قسمت جنوب شرقی آبخوان صورت می‌گیرد. محیط آبخوان (A) از دو نوع سازند کلی ماسه‌سنگ و سنگ آهک تشکیل شده است. خاک (S) محدوده مطالعاتی اغلب به صورت ترکیب ماسه و رس (لوم) و گاهی همراه با سیلت می‌باشد. توپوگرافی (T) منطقه با استفاده از DEM و ArcGIS محاسبه شده است. محیط غیر اشباع آبخوان (I) به در حالت کلی به شن، ماسه، ماسه‌سنگ و سنگ آهک تقسیم می‌شود. هدایت هیدرولیکی (C) در قسمت شمال و غرب آبخوان بیشتر از سایر نواحی است. نقشه DRASTIC آسیب‌پذیری آبخوان را در قسمت‌های مرکز و جنوب محدوده مطالعاتی شدیدتر نشان می‌دهد که در شدیدترین حالت مقدار آسیب‌پذیری برابر ۱۲۸ است که در گروه آسیب‌پذیری متوسط رو به کم طبقه‌بندی می‌شود. نقشه هم‌غلظت EC نیز بیانگر تمرکز هدایت الکتریکی در جنوب آبخوان است.

Table 2-Original and Optimized weight of DRASTIC model layers  
 جدول ۲- وزن اصلی و بهینه لایه‌های مدل DRASTIC

DRASTIC Layers	D	R	A	S	T	I	C
Original Weight	5	4	3	2	1	5	3
Optimized Weight	1	9.99	1	1	1.065	1.026	1



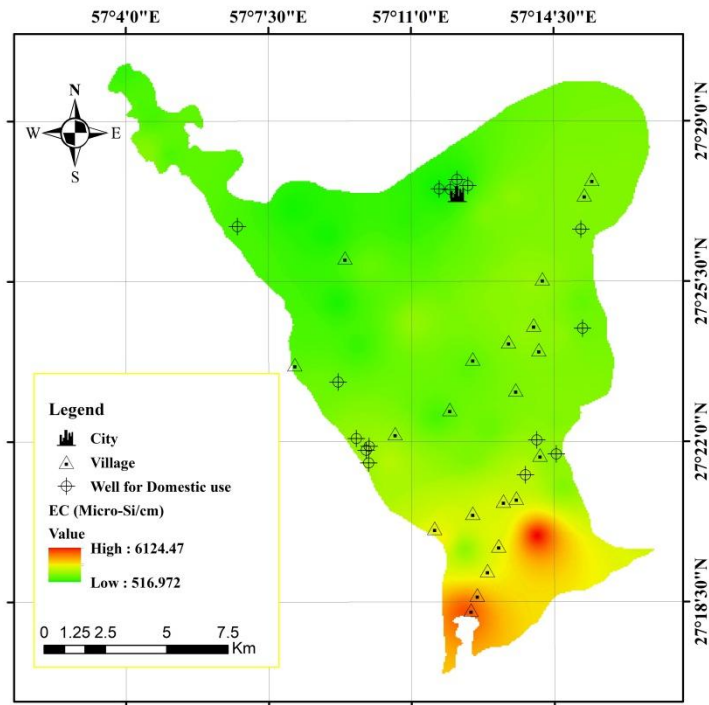


Fig. 6- EC map of the aquifer  
 شکل ۶- نقشه‌ی هدایت الکتریکی آبخوان

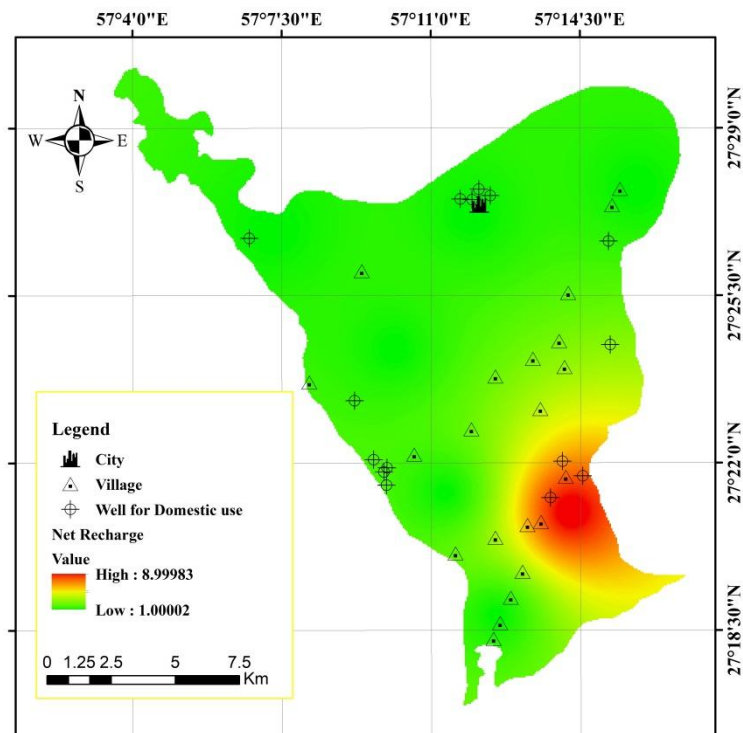


Fig. 7- Net recharge map in DRASTIC model  
 شکل ۷- نقشه تغذیه خالص در مدل DRASTIC

برای هر پیکسل ۱۰۰ مقدار تصادفی با توزیع یکنواخت و برای هر لایه در محدوده‌های مشخص انتخاب شده است و به این ترتیب یک ماتریس با ۱۰۰ سطر و هشت ستون برای هر پیکسل ساخته شد که هفت ستون اول مربوط به لایه‌ها و ستون هشتم مربوط به مقدار نهایی آسیب‌پذیری (DRASTIC) با استفاده ضرایب تصادفی محاسبه شده در همان سطر از ماتریس است. در ادامه میانگین و انحراف معیار آسیب‌پذیری (ستون هشتم ماتریس مذکور) محاسبه شد. در استراتژی اول پیکسل‌هایی که بیشتر از ۶۰ درصد مواقع مقادیر بیشتر از میانگین در شکل ۸ و در استراتژی دوم بیشتر از ۲۵ درصد مواقع مقادیر بیشتر از میانگین به علاوه انحراف معیار داشته‌اند در شکل ۹ با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. این تفاوت درصدها (۲۵ و ۶۰) به این منظور است که جنبه بصری نقشه‌های تولید شده قابل درک و تفکیک باشند که در جدول ۴ با وزن‌دهی سعی در جبران این تفاوت درصدها شده است. در گام بعدی حریم‌های حمایتی برای چاه‌های شرب با استفاده از نرم‌افزار WhAEM2000 محاسبه شدند. برای این کار مشخصات مربوط به چاه و آبخوان که عبارتند از: عمق سنگ بستر، عمق آب زیرزمینی در چاه نسبت به بالاترین تراز محیط اشباع (آبخوان)، دبی پمپاژ از چاه، شعاع چاه، ضخامت آبخوان، هدایت هیدرولیکی و تخلخل را در مدل مشخص شد. سپس برخی عوارض طبیعی تأثیرگذار مانند جریان‌های سطحی و زیر سطحی نیز برای مدل تعریف شد.

محدوده ۱۰ ساله تحلیلی حفاظت کیفی چاه‌های شرب آبخوان رودان در اشکال ۸ و ۹ مشخص شده است. محدوده حفاظتی هر چاه شامل تعدادی پیکسل است که طبق نتایج (شکل ۸ و ۹) می‌توانند آسیب‌پذیر باشند یا نباشند. در جدول ۴ تعداد پیکسل‌های آسیب‌پذیر در محدوده حفاظتی هر چاه محاسبه شده است و معیاری برای اولویت دادن به چاه‌های موجود است. با توجه به جدول ۴ چاه‌های W1، W8، W4، W15 و W13 به ترتیب بالاترین اولویت پایش را دارند، زیرا به نقاطی که آسیب‌پذیری بالایی دارند نزدیک هستند یا به عبارتی دیگر به ترتیب بیشترین امتیاز مجموع را کسب نموده‌اند. اگر بنا بر استفاده از فقط یکی از استراتژی‌ها باشد، به دلیل کم بودن امتیاز تکراری برای چاه‌ها در استراتژی دوم، رتبه‌بندی چاه‌ها جهت پایش در این استراتژی دقیقتر است.

لذا با تابع هدف نزدیک کردن هدایت الکتریکی و آسیب‌پذیری آبخوان و نتایج مشهود (جدول ۲) مقدار تغذیه خالص به عنوان تأثیرگذارترین لایه در مقدار تابع هدف انتخاب شد. با توجه به این که مدل بهینه‌سازی حاضر وابسته به منشأ عنصر یا عناصر مورد پایش (زمین‌زاد یا انسان‌زاد) نیست، به همین علت در صورت استفاده از نقشه مقادیر عنصری دیگر (بجز EC که در تحقیق حاضر استفاده شده است) که برای مثال با لایه‌ای بجز تغذیه آبخوان برهم‌نهی و شباهت داشته باشد، مقادیر وزن‌های مرتبط با مدل DRASTIC با نتایج کنونی (جدول ۲) کاملاً متفاوت خواهند بود در نتیجه وزن‌های به‌دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی مخصوص این آبخوان و پایش هدایت الکتریکی هستند.

لایه‌های مدل DRASTIC به صورت فایل ASCII وارد محیط برنامه نویسی MATLAB شدند و منطقه به پیکسل‌هایی با اندازه ۶۰ متر تقسیم‌بندی شد. هر پیکسل دارای یک مقدار است که ارزش آن لایه در مدل DRASTIC را نشان می‌دهد. در مدل اصلی ارزش‌دهی به هر لایه عددی بین یک تا ۱۰ است. هرچه قدر ارزش لایه بیشتر باشد به این معنی است که نقش بیشتری در بالارفتن آسیب‌پذیری دارد، برای مثال هرچه قدر شیب زمین (T) کمتر شود سرعت رواناب کمتر شده و در نتیجه نفوذ افزایش می‌یابد؛ لذا با کاهش شیب ارزش لایه T به ۱۰ نزدیک می‌شود. با توجه به این که دقت داده‌های مشاهداتی مانند نوع خاک یا جنس محیط غیر اشباع آبخوان کم است و در برخی لایه‌ها (تغذیه خالص و هدایت هیدرولیکی آبخوان) نیز به دلیل فرضیات ساده‌ساز استفاده شده در مدل MODFLOW، خطا وارد محاسبات می‌شود. همین‌طور به منظور ساخت نقشه‌های رستری عمق، تغذیه خالص و هدایت هیدرولیکی، مقادیر موجود در نقاط توسط روش IDW<sup>۶</sup> درونیابی شده‌اند و نقشه‌های مذکور تولید شده است. این امر باعث بوجود آمدن یک خطای مضاعف است که یکی از روش‌های کاهش آن افزایش نقاط مشاهداتی است.

هر یک از پیکسل‌ها یک مقدار برای هر یک از لایه‌های DRASTIC دارد. پس از مشخص نمودن شاخص خطر، به منظور کاهش خطا در رتبه‌دهی پارامترهای مورد استفاده در روش DRASTIC تحلیل حساسیت انجام شده است. بدین منظور با استفاده از معادله ۲ محدوده‌هایی مطابق جدول ۴ برای هر مقادیر هر لایه محاسبه شد.

Table 3- Original and extended ranges for DRASTIC layers values for the error correction

جدول ۳- مقادیر اصلی و بسط داده‌شده لایه‌های مدل DRASTIC برای تصحیح خطا							
DRASTIC layers	D	R	A	S	T	I	C
Original ranges	1-3	1-9	6-8	4.8	1-10	6-8	1-8
extended ranges	1-4	1-10	5-9	4-6	1-10	5-9	1-9

مطابق با شکل‌های ۸ و ۹ استراتژی اول سختگیرانه‌تر است؛ لذا نقاطی که طی این استراتژی به عنوان نقاط آسیب‌پذیر تشخیص داده شده‌اند، از ارزش بیشتری در تصمیم‌گیری برخوردارند. برای این منظور به امتیازات استراتژی اول وزن ۲/۴ اختصاص یافته است که حاصل از تقسیم اعداد ۶۰ بر ۲۵ که به ترتیب معادل درصد آستانه آسیب‌پذیری نقاط در استراتژی اول و دوم است، می‌باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق، می‌توان شبکه پایش آب زیرزمینی با استفاده از شاخص آسیب‌پذیری (در این تحقیق مدل DRASTIC و حریم حمایتی چاه‌ها که با استفاده از مدل WhAEM2000 با روش تحلیل محاسبه شده است) متناسب با شاخص خطر (در این تحقیق غلظت EC) که مخصوص یک آبخوان با ویژگی‌های خاص خود است، طراحی کرد و توسعه داد. وزن لایه‌های مدل DRASTIC مقادیر ثابتی دارد که در این تحقیق با هدف پایش یک پارامتر خاص (EC) این اوزان با استفاده از الگوریتم فراکوشی DE به منظور یافتن بیشترین همبستگی بین نقاط آسیب‌پذیر و نقاطی که غلظت بالایی از هدایت الکتریکی دارند، بهینه شده‌اند. در نتیجه‌ی این بهینه‌سازی مقدار تغذیه آبخوان (یا به عبارتی نفوذ واقعی آب به

آبخوان) بیشترین همبستگی را دارد که این موضوع با استفاده از مقایسه نقشه‌های تغذیه و هدایت الکتریکی صحت‌سنجی می‌گردد. به دلیل اینکه بزرگی حریم حمایتی چاه‌ها نیز به عنوان یکی از فاکتورهای اولویت‌دهی به چاه‌ها جهت پایش مطرح شده است، لذا اثر پارامترهای مؤثر در تعیین محدوده حفاظتی مانند: جریان آب زیرزمینی، تخلخل، مقدار پمپاژ و عمق سنگ بستر که در مدل WhAEM2000 استفاده شده‌اند، نیز به نوعی لحاظ می‌شود. در ادامه این تحقیق با تلفیق نتایج مدل DRASTIC اصلاح شده و مدل WhAEM2000، دو استراتژی تعریف شد. سطح حوضه به سلول‌هایی با ابعاد ۶۰ متر تقسیم شد. در استراتژی اول سلول‌هایی که حداقل در ۶۰ درصد حالات مقدار آسیب‌پذیری آن‌ها بیشتر از میانگین است و در استراتژی دوم سلول‌هایی که حداقل در ۲۵ درصد حالات مقدار آسیب‌پذیری آن‌ها بیشتر از میانگین به علاوه انحراف معیار است، مشخص شده‌اند. با کمک مدل WhAEM2000 حریم حمایتی (۱۰ ساله) چاه‌های آب شرب موجود محاسبه شد و در نهایت چاه‌های پایش به وسیله تعداد سلول‌های محصور در حریم هر چاه اولویت‌بندی شدند. یکی از مزیت‌های روش پیشنهاد شده این است که تصمیم‌گیرنده می‌تواند با در نظر گرفتن سطح بودجه اختصاص یافته به طرح، تعداد محدودی از چاه‌های با اولویت بالا را انتخاب کند.

**Table 4- Priority of wells for monitoring**  
جدول ۴- اولویت‌بندی چاه‌ها جهت پایش

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14	W15
Strategy 1 vulnerability	8	0	2	4	1	0	2	4	2	0	0	1	2	1	3
	vulnerability of Strategy 1 × 2.4														
	19.2	0	4.8	9.6	2.4	0	4.8	9.6	4.8	0	0	2.4	4.8	2.4	7.2
Strategy 2 vulnerability	62	8	16	22	20	13	14	25	15	11	10	12	19	7	22
Sum of vulnerability	81.2	8	20.8	31.6	22.4	13	18.8	34.6	19.8	11	10	14.4	23.8	9.4	29.2
Monitoring priority	1	15	7	3	6	11	9	2	8	12	13	10	5	14	4

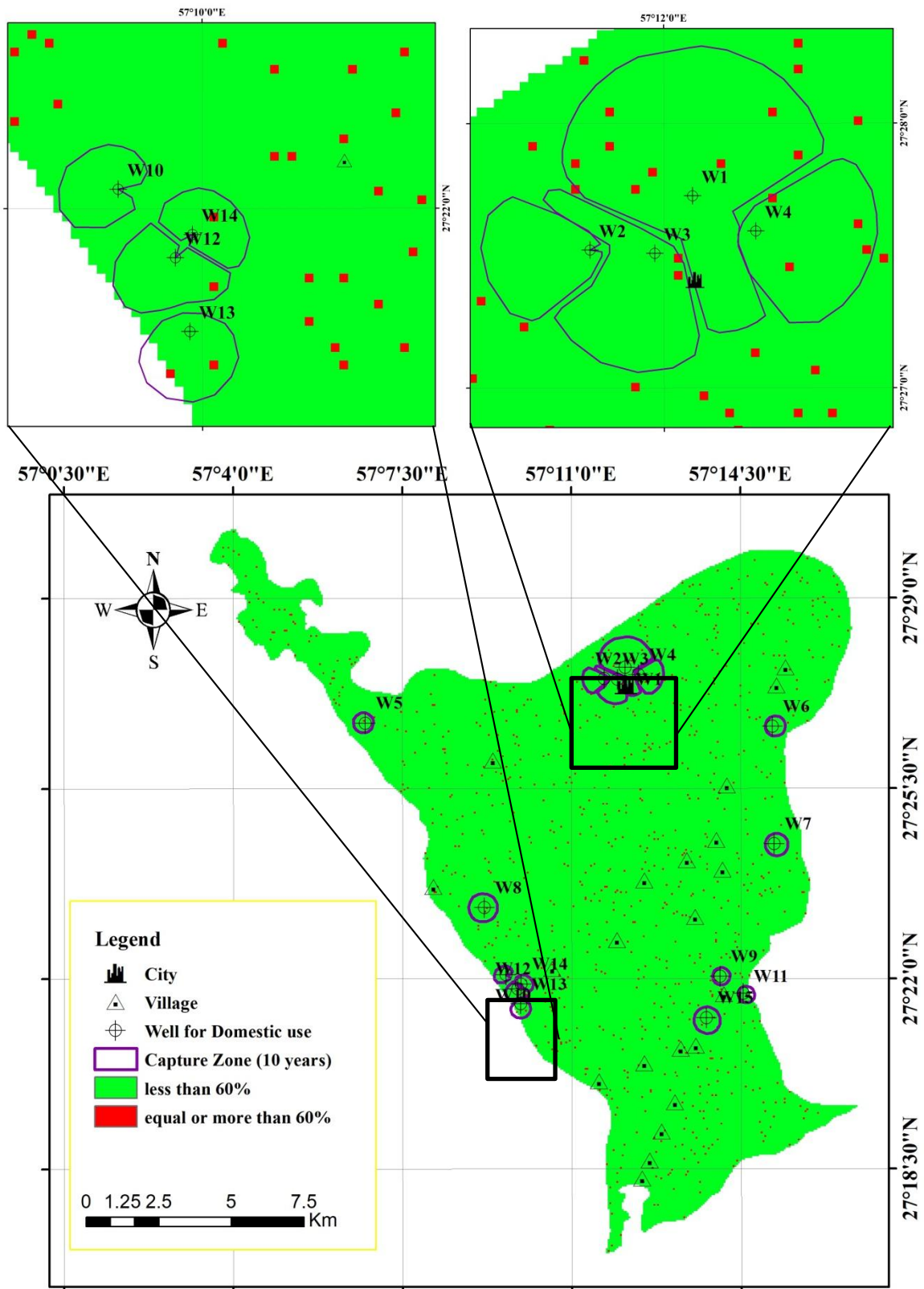


Fig. 8- Vulnerability map by average DRASTIC as threshold (Strategy 1)  
 شکل ۸- نقشه آسیب پذیری با استفاده از میانگین DRASTIC (استراتژی ۱)

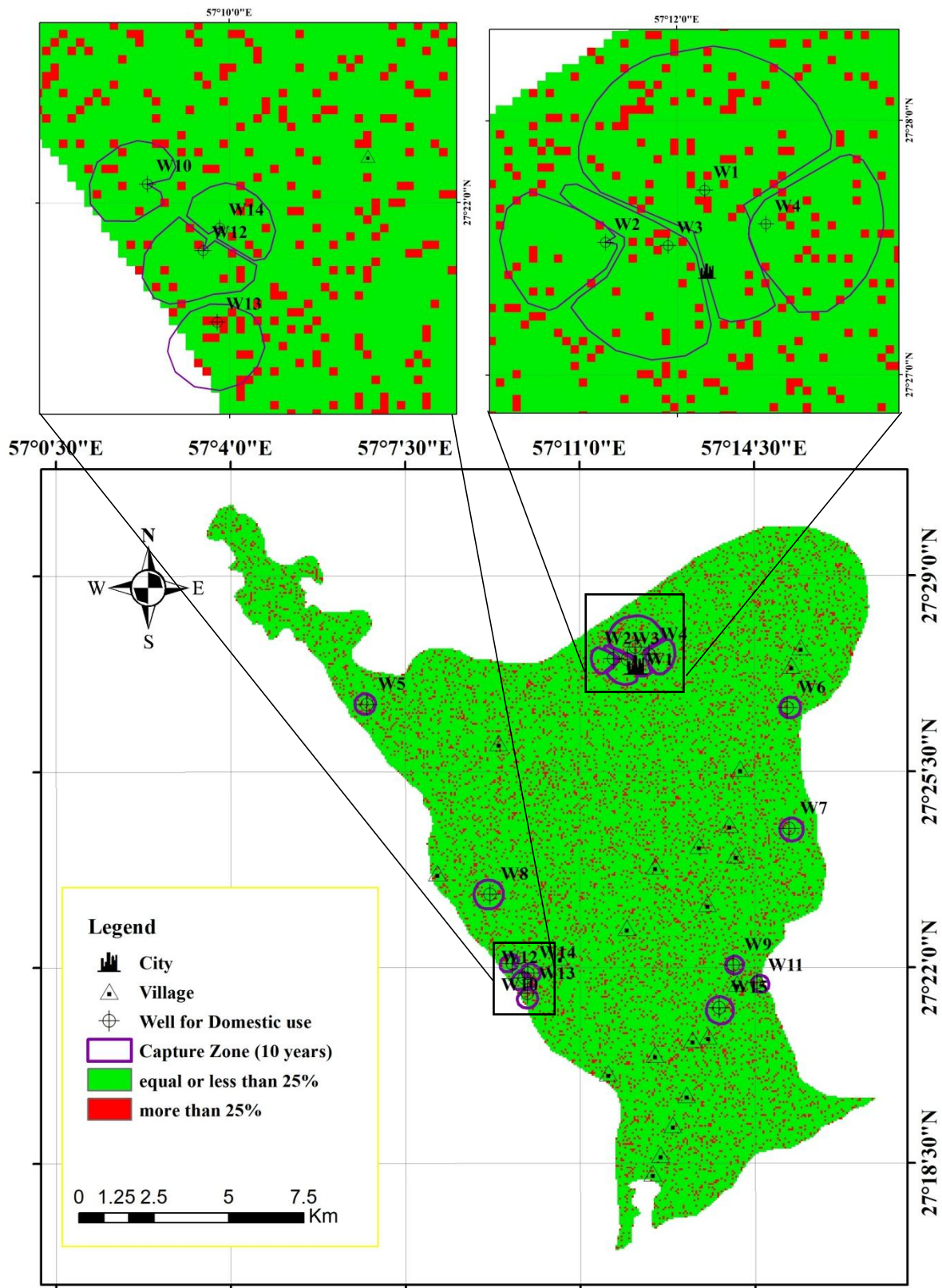


Fig. 9- Vulnerability map by average DRASTIC plus standard deviation as threshold (Strategy 2)  
 شکل ۹- نقشه آسیب پذیری با استفاده از میانگین و انحراف معیار DRASTIC (استراتژی ۲)

Almasri MN (2008) Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management* 88(4):577–593

Ayvaz MT and Karahan H (2008) A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates. *Journal of Hydrology* 357(1–2):76–92

Baalousha H (2006) Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC. *Environmental Geology* 50(3):405–414

Babiker IS, Mohamed MAA, Hiyama T, and 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

Bashi-Azghadi SN and Kerachian R (2010) Locating monitoring wells in groundwater systems using embedded optimization and simulation models. *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V. 408(10):2189–2198

Bazimenyera JDD and Zhonghua T (2008) A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain, China. *Research Journal of Applied Sciences* 3(8):550–559

Bhat S, Motz LH, Pathak C, and Kuebler L (2015) Geostatistics-based groundwater-level monitoring network design and its application to the Upper Floridan aquifer, USA. *Environmental Monitoring and Assessment* 187(1):4183

Connell LD and Van den Daele G (2003) A quantitative approach to aquifer vulnerability mapping. *Journal of Hydrology* 276(1–4):71–88

Desbarats AJ, Logan CE, Hinton MJ, and Sharpe DR (2002) On the kriging of water table elevations using collateral information from a digital elevation model. *Journal of Hydrology* 255(1–4):25–38

Dixon B (2004) Prediction of ground water vulnerability using an integrated GIS-based Neuro-Fuzzy techniques. *Journal of Spatial Hydrology* 4(2):1-38

Esquivel JM, Morales GP, and Esteller M V (2015) Groundwater monitoring network design using GIS and multicriteria analysis. *Water Resources Management* 29(9):3175–3194

Gogu RC and Dassargues A (2000) Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* 39(6):549–559

همچنین این امکان وجود دارد تا این روش به راحتی برای چاه‌های در دست مطالعه یا احداث نیز استفاده گردد. از دیگر مزیت‌های این طرح این است که می‌توان به جای EC از هر پارامتر کیفی دیگر صرف نظر از منشأ آن (زمین‌زاد یا انسان‌زاد بودن) استفاده نمود.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Non-Dominated Sorted Genetic Algorithm
- 2- Analytical Hierarchy Process
- 3- Differential Evolution
- 4- Wellhead Analytic Element Model 2000
- 5- Evolutionary Algorithms
- 6- Inverse Distance Weighting

#### ۶- مراجع

Abedi Koupai J, Zamani N, Goodarzi M, and Akhavan S (2018) Studying different methods for wellhead protection area delineation using WhAEM2000 analytic model in drinking wells of Damaneh-Daran. *Iran-Water Resources Research* 13:39–50 (In Persian)

Afshar A, Marino MA, Ebtehaj M, and Moosavi J (2007) Rule-based fuzzy system for assessing groundwater vulnerability. *Journal of Environmental Engineering, American Society of Civil Engineers* 133(5):532–540

Akbarzadeh M, Ghahraman B, and Davary K (2016) Optimization of groundwater quality monitoring network in Mashhad city aquifer using spatial-temporal modeling. *Iran-Water Resources Research* 12:133–144 (In Persian)

Alizadeh Z and Mahjouri N (2017) A spatiotemporal Bayesian maximum entropy-based methodology for dealing with sparse data in revising groundwater quality monitoring networks: The Tehran region experience. *Environmental Earth Sciences* 76(436):1-15

Alizadeh Z, Yazdi J, and Moridi A (2018) Development of an entropy method for groundwater quality monitoring network design. *Environmental Processes* 5(4):769–788

Aller L (1985) DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research

Aller L, Bennett T, Lehr JH, Petty RJ, and Hackett G (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency

- McLay CDA, Dragten R, Sparling G, and Selvarajah N (2001) Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: A comparison of three approaches. *Environmental Pollution* 115(2):191–204
- Moustafa M (2019) Assessing perched aquifer vulnerability using modified DRASTIC: A case study of colliery waste in north-east England (UK). *Hydrogeology Journal* 1–14
- Nadiri AA, Sadeghfam S, Gharekhani M, Khatibi R, and Akbari E (2018) Introducing the risk aggregation problem to aquifers exposed to impacts of anthropogenic and geogenic origins on a modular basis using 'risk cells.' *Journal of Environmental Management, Elsevier Ltd* 217:654–667
- Naghbi SA, Pourghasemi HR, and Dixon B (2016) GIS-based groundwater potential mapping using boosted regression tree, classification and regression tree, and random forest machine learning models in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(1):1–27
- Neshat A and Pradhan B (2015) Risk assessment of groundwater pollution with a new methodological framework: Application of Dempster–Shafer theory and GIS. *Natural Hazards* 78(3):1565–1585
- Neshat A and Pradhan B (2017) Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 10(22)
- Neshat A, Pradhan B, and Dadras M (2014) Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources, Conservation, and Recycling* 86:74–86
- Pacheco FAL, Martins LMO, Quininha M, Oliveira AS, and Sanches Fernandes LF (2018) Modification to the DRASTIC framework to assess groundwater contaminant risk in rural mountainous catchments. *Journal of Hydrology* 566(September):175–191
- Pathak DR and Hiratsuka A (2011) An integrated GIS based fuzzy pattern recognition model to compute groundwater vulnerability index for decision making. *Journal of Hydro-environment Research* 5(1):63–77
- Sadeghfam S, Hassanzadeh Y, Nadiri AA, and Zarghami M (2016) Localization of groundwater vulnerability assessment using catastrophe theory. *Water Resources Management* 30(13):4585–4601
- Saidi S, Bouri S, Ben Dhia H, and Anselme B (2011) Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agricultural Water Management, Elsevier B.V.* 98(10):1671–1682
- Huan H, Wang J, and Teng Y (2012) Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. *Science of the Total Environment* 440:14–23
- Jafari F, Javadi S, Golmohammadi G, Mohammadi K, Khodadadi A, and Mohammadzadeh M (2016) Groundwater risk mapping prediction using mathematical modeling and the Monte Carlo technique. *Environmental Earth Sciences* 75(6):491
- Jafari SM and Nikoo MR (2016) Groundwater risk assessment based on optimization framework using DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences* 9(20):742
- Javadi S, Kavehkar N, Mohammadi K, Khodadadi A, and Kahawita R (2011) Calibrating DRASTIC using field measurements, sensitivity analysis and statistical methods to assess groundwater vulnerability. *Water International, Taylor & Francis* 36(6):719–732
- Karterakis SM, Karatzas GP, Nikolos IK, and Papadopoulou MP (2007) Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria. *Journal of Hydrology* 342(3–4):270–282
- Kazakis N and Voudouris KS (2015) Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology, Elsevier B.V.* 525:13–25
- Maghsudsangatah S, Khashei Siuki A, Pourreza Bilondi M, and Shafiei M (2018) Application of acceptance probability method in assessment of groundwater chlorine quality monitoring network (Case study: Mashhad Aquifer). *Iran-Water Resources Research* 14:253–256 (In Persian)
- Mahar PS and Datta B (2001) Optimal identification of ground-water pollution sources and parameter estimation. *Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers* 127(1):20–29
- Maymandi N, Kerachian R, and Reza M (2018) Optimal spatio-temporal design of water quality monitoring networks for reservoirs: Application of the concept of value of information. *Journal of Hydrology, Elsevier B.V.* 558:328–340
- McDonald MG and Harbaugh AW (1988) A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *US Geological Survey Reston, VA*

- model and GIS. *Environmental Modelling & Software* 18(7):645–656
- Tilahun K and Merkel BJ (2010) Assessment of groundwater vulnerability to pollution in Dire Dawa, Ethiopia using DRASTIC. *Environmental Earth Sciences* 59(7):1485–1496
- Zamani moghadam MG, Moridi A, and Yazdi J (2019) Determining the groundwater quality protection zone by considering the vulnerability of aquifer. *Iran-Water Resources Research* 16(1):1-16 (In Persian)
- Storn R and Price K (1995) DE-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous space. *Journal of Global Optimization* 25(6):95–102
- Sun J, Zhang Q, and Tsang EPK (2005) DE/EDA: A new evolutionary algorithm for global optimization. *Information Sciences* 169(3–4):249–262
- Thirumalaivasan D, Karmegam M, and Venugopal K (2003) AHP-DRASTIC: Software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC