



تحلیل حساسیت و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از معیارهای هیدروژئولوژیک بررسی موردی: (آبخوان دشت سرخون هرمزگان)

احمد نوحه‌گر^{۱*}، فاطمه ریاحی^۲، مجید خیاط خلقی^۳ و حسن وقار فرد^۴

^۱ استاد گروه محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران

^۲ دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان

^۳ استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی کرج

^۴ استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، هرمزگان

تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۲۳

Sensitivity Analysis and Aquifer Vulnerability Assessment Using Hydrogeological Criteria Case Study: (Aquifer Sarkhoun Hormozgan)

Ahmad Nohegar,^{1*} Fatemeh Riahi,² Majid Kholghy³ & Hasan Vagharfard⁴

¹Professor, Department of Environment, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran

²PhD. Student of Watershed Engineering, Hormozgan University, Bandar Abbas

³Professor, Department of Water Science, Faculty of Natural Resources, University of Karaj

⁴Assistant Professor, Department of Watershed, Faculty of Natural Resources, Hormozgan University

Abstract

One of the best ways to prevent groundwater contamination is to identify aquifer vulnerability areas, monitor spatial quality changes and, then, manage water resource exploitation and land uses. In this study, aquifer vulnerability has been studied by using a DRASTIC model in SARKHON. Thus, the geographic information system (GIS) has been used to provide an aquifer vulnerability map and seven hydro-geological factors influencing vulnerability have been studied. The results show that 70% of the area affected has moderate vulnerability, 27.5% has high vulnerability and 2.5% has low vulnerability. In both of the sensitivity analysis methods, the map removal and single parameter was assessed. The DRASTIC vulnerability index was most responsive to both sensitivity analysis methods and shows the effect of vados zone results from a single parameter sensitivity analysis of the study area. This shows a depth of parameter, the most important criterion in assessing the vulnerability of but, unexpectedly, the lower impact on the vulnerability of the study area, weight and a significant difference of about 12% with the weight theoretical. Nitrate ion measurements were taken from multiple wells (water and agricultural) and were used in order to verify the measurement accuracy of the model. The results indicate the high accuracy of the model for the area studied.

Keywords: DRASTIC Model, Hydro-Geological Factors, Sensitivity Analysis, Vulnerability, SARKHON Aquifer.

چکیده

یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان به آلودگی، بررسی تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب و کاربری اراضی است. در این پژوهش با استفاده از شاخص دراستیک که از ترکیب معیارهای تأثیرگذار هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی (عمق، تغذیه، محیط آبخوان، بافت خاک، توپوگرافی، ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی) مؤثر بر انتقال و یا عدم انتقال آلودگی تشکیل شده است، میزان آسیب‌پذیری آبخوان دشت سرخون استان هرمزگان مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده ۷۰ درصد وسعت منطقه دارای آسیب‌پذیری متوسط، ۲۷/۵ درصد آسیب‌پذیری زیاد و ۲/۵ درصد دارای آسیب‌پذیری کم است. با توجه به دو نوع تحلیل حساسیت تک پارامتری و حذف نقشه، در این پژوهش، شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در هر دو روش تحلیل حساسیت بیشترین حساسیت را، به پارامتر اثر منطقه غیراشباع نشان داد. نتایج حاصل از تحلیل تک پارامتری نشان داد که پارامتر عمق سطح ایستابی با وجود اینکه از مهم‌ترین مشخصه‌ها در برآورد میزان آسیب‌پذیری است، ولی برخلاف انتظار در مقایسه با شاخص دراستیک تأثیر کمتری بر آسیب‌پذیری منطقه مورد بررسی، داشته است و اختلاف زیادی در حدود ۱۲ درصد با وزن تئوریک داشته و در مقابل پارامتر محیط آبخوان بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری منطقه نشان می‌دهد. برای صحت‌سنجی مدل از یون نیترات اندازه‌گیری شده از ۹ چاه منطقه استفاده شد و نزدیک بودن مقادیر نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل در منطقه مورد بررسی است.

کلمات کلیدی: آبخوان سرخون، آسیب‌پذیری، تحلیل حساسیت، معیارهای هیدروژئولوژی، مدل دراستیک.

* Corresponding Author. E-mail Address: nohegar@ut.ac.ir

۱- مقدمه

دشت سرخون نزدیک‌ترین منبع آبرفتی شیرین به شهر بندرعباس بوده و سال‌ها است که تأمین‌کننده آب شرب شهر بندرعباس و شهرک‌های اطراف آن است. از طرف دیگر با توجه به مصرف روزافزون آب در بخش کشاورزی و همین‌طور به‌واسطه خشکسالی‌های حاکم بر منطقه مورد بررسی که منفی شدن بیلان دشت را به دنبال داشته است (۱۵)، بررسی وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان برای توسعه و مدیریت بهینه منابع آب ضروری به نظر می‌رسد.

هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان، بررسی میزان تاثیرگذاری پارامترهای مدل دراستیک با استفاده از تحلیل حساسیت تک پارامتری و حذف نقشه است تا حساسیت آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مورد بررسی نسبت به گزینش وزن‌ها و رتبه‌ها در این مدل بررسی شود.

۱-۱- منطقه مورد بررسی

دشت سرخون به فاصله تقریبی ۲۵ کیلومتری از بندرعباس در دامنه شرقی-شمال شرقی کوه گنو قرار دارد. این دشت با مساحتی حدود ۱۱۴ کیلومتر مربع و در حدود عرض‌های شمالی $27^{\circ} 9'$ تا $27^{\circ} 35'$ و طول‌های شرقی $56^{\circ} 7'$ تا $56^{\circ} 33'$ ، در حوضه آبریز سرخون واقع شده است. وجود مناطق بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در حاشیه شرقی دشت سرخون و ایجاد شیب هیدرولیکی، سبب شده رودخانه شور در عمل آن دشت را تغذیه کند (این رودخانه در حاشیه شرقی دشت از تشکیلات تبخیری و سازندهای شور در بخش‌هایی از مسیر خود باعث نامناسب شدن کیفیت آب این رودخانه شده است). میانگین درازمدت بارش در مناطق کوهستانی و دشتی منطقه به ترتیب ۲۳۴ و ۲۱۹ میلی‌متر است. منطقه طرح از نظر زمین‌شناسی ساختاری، در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. جنس آبرفت در بخش غربی و ورودی و همچنین مرکزی دشت دانه‌درشت است و با پیش‌روی به سمت شمال شرق و جنوب و بالاخص شرق و جنوب شرقی (خروجی دشت) از قطر دانه‌بندی آبرفت کاسته شده و آبرفت حالت دانه‌ریز پیدا می‌کند.

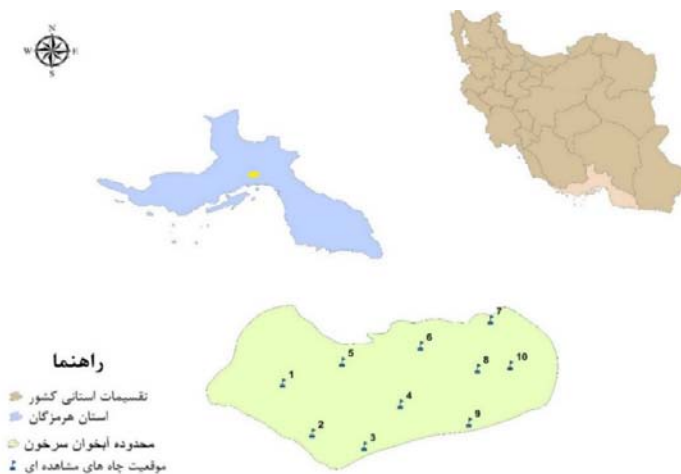
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- روش تحقیق

اولین بار روش دراستیک توسط اداره حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا ابداع داده شد. در این روش با ترکیب هفت پارامتر، نقشه آسیب‌پذیری آبخوان

آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک که دسترسی به آب‌های سطحی محدود است، اهمیت بسیار دارد (۱). برای طراحی آمایش سرزمین (کاربری اراضی) و مدیریت منابع آب حساس به آلودگی، استفاده از ارزیابی آسیب‌پذیری برای مشخص کردن مناطقی که در برابر آلودگی آسیب‌پذیرترند، به یک ابزار مهم تبدیل شده است. در بسیاری از موارد آلودگی آب‌های زیرزمینی، بعد از آلوده شدن چاه‌های آب شرب شناسایی می‌شوند. رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی بسیار پرهزینه و طولانی است و اغلب زمانی آلودگی تشخیص داده می‌شود که رفع آلودگی آبخوان تقریباً غیرممکن می‌شود. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان و مدیریت کاربری اراضی است. در حقیقت نقشه آسیب‌پذیری، حساسیت منبع آب زیرزمینی را نسبت به آلودگی با روش‌های شاخص - همپوشانی، روش‌های آماری و یا روش‌های شبیه‌سازی (مدل‌های ریاضی) نشان می‌دهد. روش‌های شاخص همپوشانی عوامل کنترل‌کننده حرکت آلودگی از سطح زمین تا منطقه اشباع را شامل می‌شوند. این روش‌ها اغلب به دلیل در دسترس بودن داده‌های مورد نیازشان ترجیح داده می‌شوند (۲). روش‌های شاخص همپوشانی، مانند روش دراستیک در بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان نقش موثری دارند، در حال حاضر استفاده از نقشه‌های آسیب‌پذیری برای مدیریت زیست‌محیطی منابع آب زیرزمینی به یک ابزار مفید و محبوب در دنیا تبدیل شده است. روش‌های شاخص همپوشانی مانند روش دراستیک در بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان نقش موثری دارند، در حال حاضر استفاده از نقشه‌های آسیب‌پذیری برای مدیریت زیست‌محیطی منابع آب زیرزمینی به یک ابزار مفید و محبوب در دنیا تبدیل شده است (۱). استفاده از روش دراستیک بسیار گسترده بوده و در بخش‌هایی از ایالات متحده آمریکا (۳)، در چین (۴)، بنگلادش (۵)، افریقا (۶)، رام‌الله فلسطین (۷)، کارناتا‌کای هندوستان (۸)، دوالای کامرون (۹) به کار گرفته شده است. در ایران نیز می‌توان به تحقیقاتی اشاره کرد که در این زمینه درباره آبخوان دشت پل دشت و بازرگان (۱۰)، آبخوان کارستی شیما (۱۱)، دشت قزوین (۱۲)، آبخوان دشت آستانه کوچصفهان (۱۳) و دشت بهار همدان (۱۴) انجام شده‌اند.

پس از محاسبه هر شاخص می توان گفت که کدام منطقه در خطر آلودگی قرار دارد. به این ترتیب که هر چه شاخص بزرگتر باشد، خطر آلودگی بیشتر می شود. باید توجه داشت که شاخص دراستیک تنها یک ابزار ارزیابی نسبی را تهیه می کند و قابلیت ارزیابی مطلق ندارد. هر کدام از لایه های فوق با استفاده از قابلیت نرم افزار Arc GIS 9.3 تهیه و طبق جدول ۲ رتبه دهی و وزن دهی شدند. در نهایت طبق معادله ۱ همپوشانی شده و بعد از طبقه بندی بر اساس جدول ۳ نقشه شاخص آسیب پذیری به روش دراستیک حاصل شد.



شکل ۱- محدوده مورد بررسی و موقعیت چاه های پیژومتر در آبخوان

می شود تا آلاینده در جهت عمودی انتقال یافته و به سطح ایستابی برسد و در جهت افقی در آبخوان حرکت کند. برای تهیه لایه تغذیه خالص دشت ابتدا تغذیه خالص مربوط به ارتفاعات، بارندگی، رواناب و پساب که در رابطه بیلان به دست آمده با هم جمع شد. سپس از طریق روابط زیر میزان تغذیه محاسبه شد (برای لایه تغذیه از روش پیشنهادی الر استفاده شده است) (۱۵) (شکل ۳).

هدایت هیدرولیکی متوسط (متر بر روز) / ارتفاع خالص (میلی متر) × نقشه هدایت هیدرولیکی (متر بر روز) = نقشه تغذیه
 $1000 \times$ مساحت آبخوان (میلیون مترمربع) / (تغذیه از دشت مجاور - مجموع تغذیه) (میلیون مترمکعب) = ارتفاع خالص تغذیه

تهیه می شود. شاخص آسیب پذیری در این روش از حاصل ضرب هر پارامتر در رتبه آن مطابق رابطه (۱) به دست می آید. رتبه مربوط به هر پارامتر بین ۱ تا ۱۰ متغیر است و وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن بین ۱ تا ۵ متغیر است. مهم ترین پارامتر وزن ۵ و کم اهمیت ترین پارامتر وزن ۱ دارد.

$$D_i = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + (1) I_r I_w + C_r C_w$$

x رتبه مربوط به هر طبقه از پارامتر w : وزن مربوط به هر پارامتر

D : پارامتر عمق، R : تغذیه، A : محیط آبخوان، S : خاک، T : شیب، I : محیط غیراشباع، C : هدایت هیدرولیکی

۲-۲- تهیه لایه های مدل دراستیک و نقش آن ها در ارزیابی آسیب پذیری آبخوان

۲-۲-۱- عمق تا سطح ایستابی (D)

این پارامتر تعیین کننده عمقی است که آلاینده ها باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد و اهمیت قابل توجهی دارد. برای تهیه لایه عمق از داده های اندازه گیری سطح ایستابی در پیژومترهای منطقه استفاده شد. عمق برخورد به سطح ایستابی در محدوده مورد بررسی حدود ۱۵ تا ۶۸ متر از سطح زمین متغیر بوده است. بیشترین عمق آب زیرزمینی در قسمت غرب و کمترین عمق در قسمت شرق و شمال شرق منطقه مورد بررسی مشاهده شده است. (شکل ۲)

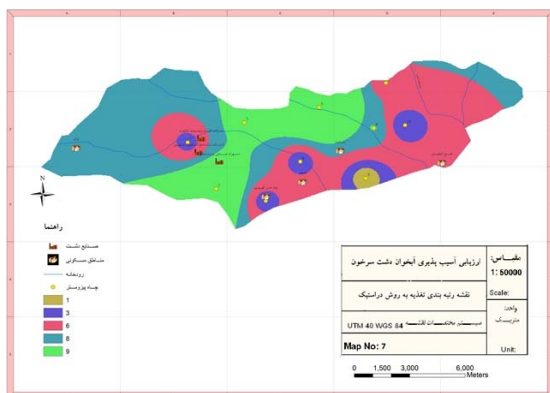
۲-۲-۲- تغذیه خالص (R)

تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می رسد. تغذیه آب زیرزمینی موجب

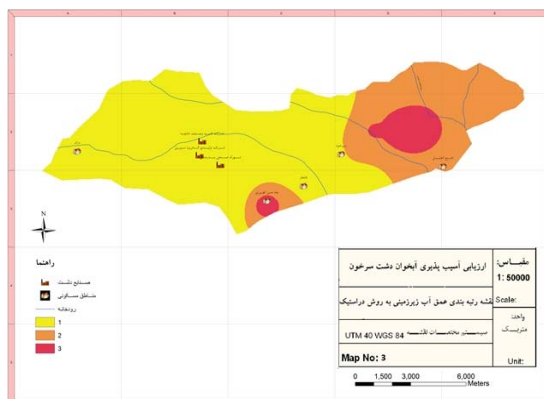
جدول ۱- گزارش بیلان آب زیرزمینی (۱۵)

تغییرات حجم ذخیره	تخلیه						تغذیه				تغذیه
	جمع	خروجی زیرزمینی	تبخیر از آبخوان	زهکشی	چاه و چشمه‌های آبرفتی	جمع	نفوذ از آب شرب	نفوذ از آب زراعتی	نفوذ از جریان‌های سطحی	نفوذ از بارندگی سطح آبخوان	
۸۸۳/۰	۶۷/۲۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶۷۸/۲۳	۵۶۱/۲۴	۳۸۶/۴	۸۸۵/۴	۹۵۸/۱۲	۷۸۸/۰	۵۴۴/۱

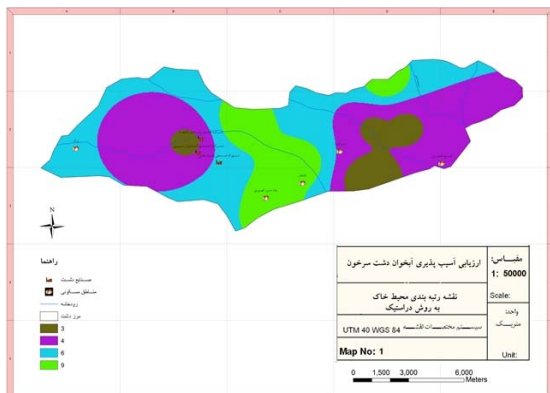
دشت سرخون



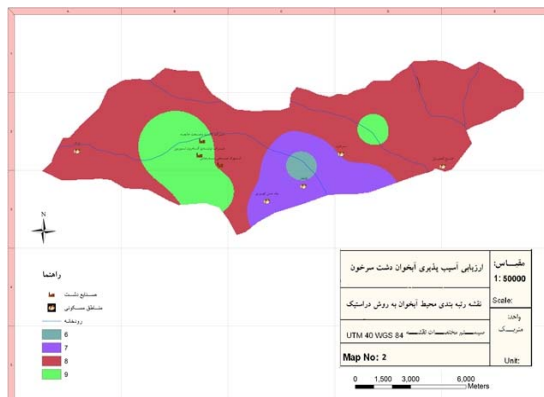
شکل ۳- نقشه رتبه‌بندی تغذیه خالص



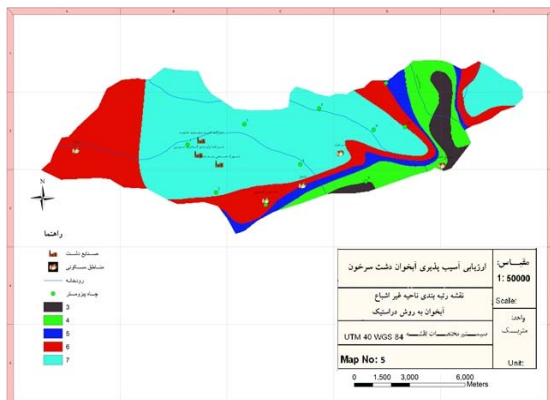
شکل ۲- نقشه رتبه‌بندی عمق سطح ایستابی



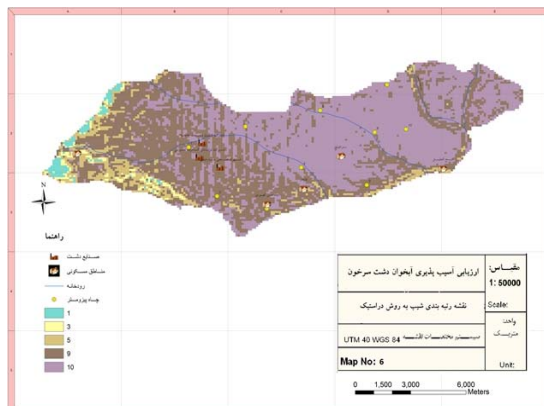
شکل ۵- نقشه رتبه‌بندی محیط خاک



شکل ۴- نقشه رتبه‌بندی محیط آبخوان



شکل ۷- نقشه رتبه‌بندی ناحیه غیراشباع



شکل ۶- نقشه رتبه‌بندی توپوگرافی

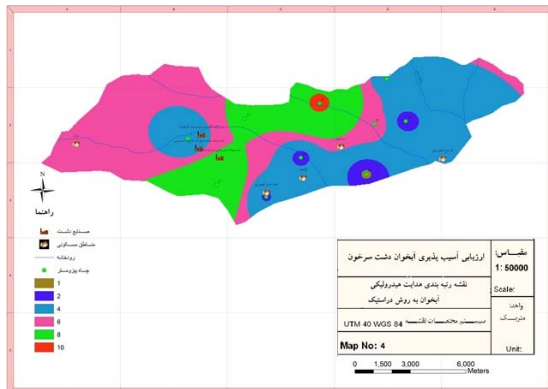
۲-۲-۳- محیط آبخوان (A)

نظر خاک تشکیل دهنده‌ی ناحیه غیراشباع به دست آمد (شکل ۷).

محیط آبخوان بیان‌کننده ویژگی میرایی (زوال و نابودی آلاینده‌ها در لایه غیراشباع که بیشترین میزان مربوط به نیم تا دو متری لایه سطحی خاک است) مواد تشکیل‌دهنده آبخوان است. با استفاده از لوگ پیزومترها، لوگ چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه، موقعیت جغرافیایی لوگ‌ها و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس محیط آبخوان مشخص و سپس ارزش‌گذاری شد (شکل ۴).

۲-۲-۷- هدایت هیدرولیکی آبخوان (C)

هدایت هیدرولیکی بیان‌کننده میزان نفوذ آب در خاک برای رسیدن به آب زیرزمینی است. با توجه به آنکه در آزمایش‌های پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب محاسبه می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان به دست آمد (شکل ۸).



شکل ۸- نقشه رتبه‌بندی هدایت هیدرولیکی آبخوان

۲-۲-۴- محیط خاک (S)

این لایه نشان‌دهنده محیط خاک یا همان خاکی است که در عمق ۱/۸ متری زمین قرار دارد. با توجه به عدم وجود نقشه خاک از منطقه مورد بررسی، با استفاده از اطلاعات لوگ‌های حفاری دشت و تصاویر ماهواره‌ای (ماهواره لندست) منطقه این لایه ترسیم و به هر یک از چاه‌های مشاهده‌ای رتبه‌ای اختصاص داده شد. سپس در محیط نرم‌افزار Arc GIS بین رتبه‌ها درون‌یابی انجام گرفت و به این ترتیب نقشه‌ی رتبه‌دهی خاک رسم شد (شکل ۵).

۲-۲-۵- توپوگرافی (T)

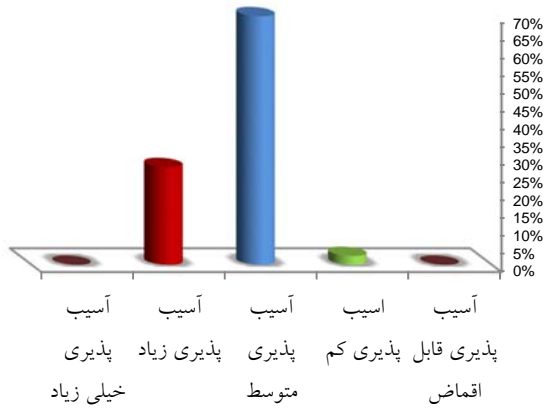
توپوگرافی به معنای شیب و تغییرات شیب سطح زمین است. توپوگرافی حرکت آلاینده و نگهداری آن را بر سطح زمین در کنترل دارد. شیب‌های کم موجب می‌شوند حرکت آلاینده‌ها در سطح زمین کند بوده و آلاینده‌ها شانس بیشتری برای نفوذ داشته باشند. بنابراین شیب کم پتانسیل بیشتری برای آلودگی آب زیرزمینی ایجاد می‌کند. برای تهیه لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع سازمان نقشه‌برداری استفاده شد (شکل ۶).

۲-۲-۶- محیط غیراشباع آبخوان (I)

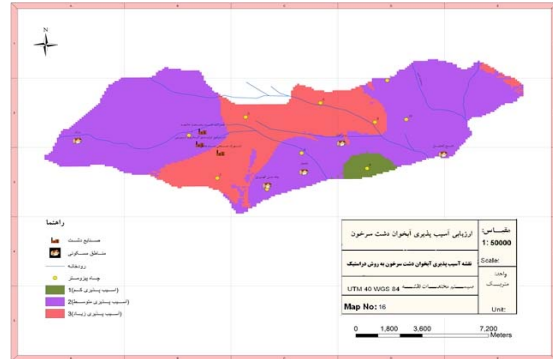
۳- نتایج و بحث

پس از تجزیه و تحلیل لایه‌های اطلاعاتی مدل دراستیک و با اعمال رتبه‌بندی و وزن‌دهی به هر کدام از پارامترها مطابق جدول ۱ و ۲ نهایتاً شاخص نهایی شامل مجموع حاصل ضرب ارزش عددی رتبه‌بندی شده هر پارامتر در وزن آن پارامتر است. بازه شاخص آسیب‌پذیری منطقه (۱۵۲ - ۶۰) مطابق طبقه‌بندی جدول ۳ در سه گروه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد. با توجه به نقشه آسیب‌پذیری قسمت‌های مرکزی دشت پتانسیل آسیب‌پذیری بالاتری دارند و در دو سمت غرب و شرق دشت از میزان آسیب‌پذیری کاسته می‌شود. قسمت کوچکی از منطقه در جنوب شرق آسیب‌پذیری کمی دارد. به طوری که ۷۰ درصد وسعت منطقه آسیب‌پذیری متوسط، ۲۷/۵٪ آسیب‌پذیری زیاد و ۲/۵٪ آسیب‌پذیری کم دارد. به دلیل بالا بودن میزان تغذیه و هدایت هیدرولیکی و جنس درشت‌دانه محیط آبخوان در بخش مرکزی دشت و همچنین کم بودن عمق سطح ایستابی، مکان‌هایی با آسیب‌پذیری زیاد در این بخش آبخوان قرار گرفته است (شکل ۹).

لایه محیط غیراشباع همانند لایه محیط آبخوان از لوگ پیزومترها، لوگ چاه‌های اکتشافی موجود در منطقه، موقعیت جغرافیایی لوگ‌ها و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس منطقه غیراشباع با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. به این ترتیب که هر یک از ۱۱ طبقه خاک دسته‌بندی شده در جدول روش دراستیک به شکل یک لایه جداگانه در نظر گرفته شده و ضخامت هر یک از این طبقات با درون‌یابی در تک‌تک لایه‌های مذکور مشخص شد و آنگاه با استفاده از رابطه میانگین هارمونیک و در نظر گرفتن رتبه‌های هر یک از ضخامت‌ها، رتبه کلی هر یک از نقاط از



شکل ۱۰- درصد پوشش کلاس‌های آسیب‌پذیری شاخص دراستیک در منطقه مورد بررسی



شکل ۹- نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت سرخون

جدول ۲- رتبه‌های مربوط به پارامترهای مدل دراستیک در منطقه مورد بررسی

رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
	عمق تا سطح ایستابی		شیب (درصد)		محیط خاک		محیط آبخوان
۳	۲۲/۵-۱۵/۵	۱۰	لومی-سیلتی رسی	۶	ماسه-شن-ریگ		
۲	۳۰/۵-۲۲/۵	۹	لومی	۷	ماسه-سیلت-رس		
۱	۳۰/۵<	۵	لوم ماسه‌ای	۸	ماسه-شن-سیلت-رس		
	تغذیه خالص (میلی متر در سال)	۳	ماسه-شنی	۹	ماسه-شن-ریگ-سیلت		
۱	۵۰-۲۲	۱	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)				
۳	۱۰۱-۵۰		۴>				
۶	۱۷۸-۱۰۱	۳	محیط غیراشباع				
۸	۲۵۴-۱۷۸	۴	رس و سیلت				
		۵	رس و سیلت با ماسه ریز				
۹	۲۵۴<	۶	ماسه و گراول و سیلت				
		۷	شن و ماسه				
		۷	شنی سنگی				

جدول ۴- محدوده شاخص آسیب‌پذیری به روش دراستیک

رتبه	پتانسیل آلودگی	شاخص دراستیک
۰	آسیب‌پذیری قابل چشم‌پوشی	۴۶-۲۳
۱	آسیب‌پذیری کم	۹۲-۴۷
۲	آسیب‌پذیری متوسط	۱۳۶-۹۳
۳	آسیب‌پذیری زیاد	۱۸۴-۱۳۷
۴	آسیب‌پذیری خیلی زیاد	۲۳۰-۱۸۴

جدول ۳- وزن پارامترهای دراستیک

وزن	پارامتر
۵	عمق تا سطح ایستابی
۴	تغذیه
۳	محیط آبخوان
۲	محیط خاک
۱	شیب
۵	منطقه غیراشباع
۳	هدایت هیدرولیکی

۳-۱- آنالیز حساسیت مدل دراستیک

یکی از مزیت‌های اصلی مدل دراستیک انجام ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از تعداد زیاد لایه اطلاعاتی (پارامتر)

است، زیرا عقیده بر این است که در این حالت، اثرات خطاها و عدم قطعیت‌های موجود در یک پارامتر منفرد در خروجی نهایی محدود می‌شود. (۱۶) برای از بین بردن تردیدها در

۳-۳- تحلیل حساسیت تک پارامتری

تحلیل حساسیت تک پارامتری، وزن مؤثر هر پارامتر را با وزن تئوریک آن پارامتر مقایسه می‌کند. وزن مؤثر تابعی است از ارزش یک پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر، به علاوه وزن اختصاص داده شده به آن توسط مدل دراستیک. هر پارامتر با فاکتور وزنی مشخصی در تشکیل شاخص آسیب پذیری نهایی دخالت دارد.

این فاکتور وزنی مؤثر (W_{Xi}) به صورت زیر در هر زیرمنطقه به دست می‌آید (معادله ۳):

$$(3) W_{Xi} = (X_{Ri} \cdot X_{Wi}) / V_i$$

که X_{Wi} و X_{Ri} به ترتیب مقدار رتبه و وزن پارامتر X در زیرمنطقه i ام هستند. V_i مقدار شاخص آسیب پذیری محاسبه شده DRASTIC است. با توجه به نتایج جدول ۵ بیشترین حساسیت مدل نسبت به پارامتر محیط غیراشباع است، با میانگین وزنی مؤثر ۰.۲۳٪ که با وزن تئوریک آن (وزن تعریف شده در شاخص) در مدل اختلاف زیادی ندارد. و بعد از آن پارامترهای محیط آبخوان، تغذیه، هدایت هیدرولیکی، محیط خاک، عمق آب زیرزمینی و توپوگرافی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. وزن‌های مؤثر و تئوریک پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه و خاک تقریباً بر هم منطبق هستند. کمترین میانگین وزنی مؤثر نیز مربوط به پارامتر توپوگرافی است. نتایج نشان داد که پارامتر عمق سطح آب با آنکه یکی از مهم‌ترین مشخصه‌ها در برآورد میزان آسیب پذیری بوده، ولی برخلاف انتظار، در مقایسه با مدل دراستیک تأثیر کمتری بر آسیب پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه مورد بررسی، داشته و با وزن تئوریک آن اختلاف زیادی در حدود ۱۲ درصد دارد.

در تحقیقی که توسط احمدی و همکاران (۱۸)، بر روی دشت خاش انجام شد، نتایج هر دو تحلیل حساسیت نشان داد که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب پذیری، تغذیه خالص است. در پژوهش باقرزاده و همکاران (۱۱)، روی دشت بهبهان، پارامتر عمق تا سطح ایستابی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر آسیب پذیری این دشت تعیین شد.

۳-۴- صحت‌سنجی مدل با استفاده از یون نیترات

هدف از این مرحله به دست آوردن اطمینان بیشتر از مدل تهیه شده است، با توجه به اینکه در منطقه مورد بررسی کشاورزی رونق خاصی دارد و غالباً از کودهای حیوانی و یا کودهای شیمیایی نیتراتی استفاده می‌شود و همچنین یون

مورد اینکه آیا می‌توان آسیب پذیری آب زیرزمینی را با تعداد کمتری از پارامترها و با دقت بیشتر و هزینه کمتر ارزیابی کرد و آیا وزن‌ها و رتبه‌های نسبت داده شده به پارامترهای مدل دقت کافی دارند یا نه آنالیز حساسیت مدل به ۲ روش حذف پارامتر و تک پارامتری انجام شد. برای افزایش اطمینان به داده‌های ارائه شده توسط روش‌های تعیین آسیب پذیری آبخوان، داده‌ها باید تصدیق شوند (۱۷). برای محاسبه حساسیت، ابتدا شاخص دراستیک با تلفیق هر ۷ پارامتر و در مرحله بعد با در نظر گرفتن ۶ پارامتر محاسبه شد. این روش‌ها به شرح زیر است.

۳-۲- تحلیل حساسیت حذف پارامتر

حساسیت آسیب پذیری را به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود. (معادله ۲)

$$S_{xi} = ([V_i/N - V_{xi}/n] / V_i) * 100 \quad (2)$$

S_{xi} = حساسیت مبتنی بر حذف پارامتر X از نقشه
 V_i = شاخص آسیب پذیری زیر منطقه i ام با در نظر گرفتن پارامتر V_{xi} = شاخص آسیب پذیری زیر منطقه i ام بدون در نظر گرفتن پارامتر N = تعداد پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص n = تعداد پارامترهای مورد استفاده بدون در نظر گرفتن پارامتر مورد نظر

در هر زیر منطقه محاسبات فوق منعکس کننده تغییرات پارامترهای شاخص هستند و فاکتور وزنی پارامتر را نشان نمی‌دهند. نتایج حاصل از این آنالیز (جدول ۴) حاکی از آن است که بیشترین تغییر در شاخص آسیب پذیری آبخوان با حذف پارامتر محیط غیراشباع و سپس عامل توپوگرافی اتفاق می‌افتد، به طوری که میانگین آنها به ترتیب ۲/۳۲ و ۲ است. کمترین حساسیت مربوط به پارامتر هدایت هیدرولیکی است.

جدول ۵- آنالیز حساسیت حذف پارامتر در نقشه

آسیب‌پذیری منطقه مورد بررسی

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	حداقل (درصد)	حداکثر (درصد)
D	۱/۵۵	۱/۱۱	۰/۹۹	۱/۸۳
R	۱/۵	۱/۱۹	۱/۲۷	۱/۵۶
A	۱/۳	۰/۸۱	۳/۴۷	۰/۲۸۹
S	۱/۰۵	۰/۹۶	۰/۷۱	۱/۲۸
T	۲	۱/۴۱	۰/۷۱	۱/۲۸
I	۲/۳۲	۱/۲	۱/۷۸	۱/۴۵
C	۰/۹۴	۰/۸۱	۰/۷۱	۰/۱۳۸

هم نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است. برای دشت سرخون این نسبت تقریباً برای نقاط مختلف به هم نزدیک است و با توجه به داده‌های جدول ۵ می‌توان گفت که این مدل از دقت بالایی برخوردار است. نتایج این پژوهش با نتایج تاکی و همکاران (۱۲)، سنر (۱۹)، عزیزی و همکاران (۲۰)، ناصری و همکاران (۲۱)، که برای صحت‌سنجی نقشه آسیب‌پذیری از غلظت یون نترات استفاده کردند مطابقت دارد.

نترات سیال است و توسط محیط جذب نمی‌شود، برای صحت‌سنجی مدل از یون نترات استفاده شد. برای بررسی دقت مدل، صحت‌سنجی آن از نظر آماری بررسی می‌شود و برای محاسبه دقت آماری برای هر یک از نقاط دارای نترات معلوم، عدد دراستیک آن نقطه با توجه به نقشه‌ی شاخص محلی دراستیک مشخص می‌شود و با تقسیم غلظت نترات بر شاخص دراستیک به دست آمده یک نسبت ثابت (Q) به دست می‌آید. هر چه این نسبت برای همی نقاط به

جدول ۶- نتایج آماری آنالیز حساسیت تک‌پارامتری

پارامتر	وزن تئوریک	وزن تئوریک (%)	میانگین وزنی مؤثر (%)	انحراف معیار (%)	ماکزیمم (%)	مینیمم (%)
D	۵	۲۱/۷۴	۹	۳/۷۴۱	۱۵	۳
R	۴	۱۷/۴	۱۸/۲۲	۶/۸۱۵	۲۹	۵
A	۳	۱۳	۲۰/۰۴	۶/۱۳۷	۳۵	۱۴
S	۲	۸/۷	۱۰/۵	۴/۰۳۱	۱۷	۴
T	۱	۴/۳۴	۷/۹۳	۴/۴۳۴	۱۵	۰
I	۵	۲۱/۷۴	۲۳	۶/۰۵۵	۳۳	۱۳
C	۳	۱۳	۱۱/۵	۴/۶۰۹	۱۹	۴

جدول ۷- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل دراستیک با یون نترات

شماره چاه	Q	Di	NO3	Y	X
۱	۰/۲	۱۳۴	۳۳/۵	۳۰۲۹۸۶۳	۴۳۴۱۲۱
۲	۰/۲۷	۱۳۵	۳۶/۴۵	۳۰۳۲۶۶۲	۴۳۴۳۴۶
۳	۰/۰۸	۱۴۱	۱۲/۴۵	۳۰۲۹۰۰۸	۴۳۶۷۷۲
۴	۰/۰۸۲	۱۵۲	۱۲/۴۷	۳۰۳۱۲۰۹	۴۳۶۷۸۲
۵	۰/۲۸	۱۳۷	۳۸/۳۶	۳۰۳۰۶۹۲	۴۳۹۴۹۵
۶	۰/۱۱۵	۱۱۴	۱۳/۱۱	۳۰۲۹۰۹۶	۴۳۹۷۹۰
۷	۰/۱۱	۱۴۶	۱۶/۷۲	۳۰۳۳۰۴۸	۴۴۱۲۵۸
۸	۰/۲۱	۱۳۸	۲۸/۹۸	۳۰۳۰۸۲۷	۴۴۱۹۵۰
۹	۰/۱۸	۱۲۳	۲۲/۱۴	۳۰۳۰۱۲۵	۴۴۴۰۱۱

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت سرخون در مقابل آلودگی با استفاده از مدل DRASTIC در محیط GIS تهیه شده است. بر پایه نتایج حاصل از مدل‌سازی DRASTIC آسیب‌پذیری آبخوان دشت سرخون در سه گروه آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد قرار می‌گیرد. از نظر وسعت می‌توان گفت که ۷۰ درصد منطقه آسیب‌پذیری متوسط، ۲۷/۵٪ آسیب‌پذیری زیاد و ۲/۵٪ آسیب‌پذیری کم دارد. قسمت‌های مرکزی دشت پتانسیل آسیب‌پذیری بالاتری هستند و در دو سمت غرب و شرق دشت از میزان آسیب‌پذیری کاسته می‌شود. قسمت کوچکی از منطقه در جنوب شرق

آسیب‌پذیری کمی دارد. با توجه به پارامترهای هیدروژئولوژیکی مؤثر بر آسیب‌پذیری آبخوان به دلیل کم عمق بودن سطح ایستابی و بالا بودن میزان تغذیه و هدایت هیدرولیکی و جنس درشت‌دانه محیط آبخوان در بخش مرکزی دشت، مکان‌هایی با آسیب‌پذیری زیاد در این بخش آبخوان قرار گرفته است. در این پژوهش تحلیل حساسیت به دو روش حذف پارامتر و تک‌پارامتری انجام شده است. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC بیشترین حساسیت را به اثر منطقه غیر اشباع نشان می‌دهد. در تحلیل حساسیت به روش حذف نقشه پس از منطقه غیر اشباع، به ترتیب پارامترهای توپوگرافی، عمق آب زیرزمینی، میزان تغذیه، محیط آبخوان، خاک و هدایت

- [8] Lathamani R, M.R. Janardhana, B. Mahalingam, S. Suresha. Evaluation of Aquifer Vulnerability Using Drastic Model and GIS: A Case Study of Mysore City, Karnataka, India. *Aquatic Procedia*; **2015**; **4**: 1031-1038.
- [9] Akenji Victorine Neh, Andrew Ako Ako, Akoachere Richard Ayuk II, Takahiro Hosono. DRASTIC-GIS model for assessing vulnerability to pollution of the phreatic aquiferous formations in Douala-Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*; **2015**; **120**:180-190.
- [10] Asghary moghadam A, Jomiry R. The origin of basaltic plains Bazrgan- Poldasht high concentration of fluoride in groundwater demands and its adverse effects on the health of area residents. *Environmental Science Journal of Tehran University*; **2006**; **33** (41):25-32. [In Persian]
- [11] Bagherzade S, Kalantary N, Moradzade M. The use of GIS for a single parameter sensitivity analysis methods to assess the vulnerability of groundwater resources of Behbahan Plain. *JEOMATIC National Confrance. Tehran*; **2010**. [In Persian]
- [12] Taki R. The sensitivity analysis index- overlap in the process of vulnerability DRASTIC groundwater. *Iran Natural Resource Journal*; **2009**; **62** (3): 353-362. [In Persian]
- [13] Arezoomand Masoome, Omid Langrudi, Abbas Khashei Siuki, Saman Javadi, Seyed Reza Hashemi. Evaluation of vulnerability of aquifers by improved fuzzy drastic method: Case study: Aastane Kochesfahan plain in Iran. *Ain Shams Engineering Journal*; **2016**. [In Persian]
- [14] Toranjian A. Study places vulnerable to pollution in Hamedan Bahar Plain using GIS.MASTER: Water Engineering, Abo ali sina University, Hamedan; **2009**. [In Persian]
- [15] Regional water company, report of ground water balance of Sarkhon area. **2010**. [In Persian]
- [16] Rosen L. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Ground Water*; **1994**; **32**(2): 278 –85.
- [17] Ramos leal J.A, Rodriguez castillo R. Aquifer vulnerability mapping in the turbio river valley, mexico; A validation study. *Geofisica Internacional*; **2003**; **42**(1): 141-156.
- [18] Ahmadi A, Aberomand M. Vulnerability of Khash-Plain Aquifer, Eastern Iran, to Pollution Using Geographic Information System (GIS). *Applied geology journal*; **2009**; **5** (11): 1-10. [In Persian]
- هیدرولیکی قرار می گیرند. نتایج حاصل از روش تحلیل حساسیت تک پارامتری نشان می دهد که حساسیت شاخص آسیب پذیری به پارامترهای منطقه غیراشباع، محیط آبخوان، تغذیه، هدایت هیدرولیکی، نوع خاک، عمق آب زیرزمینی و توپوگرافی به ترتیب کاهش می یابد. و در نهایت برای صحت سنجی مدل از یون نترات استفاده شد و نتایج حاکی از دقت بالای مدل در منطقه مورد بررسی است. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد بررسی که برای مقاصد مختلف به کار می رود، حفاظت این مناطق برای جلوگیری از آلودگی و مدیریت بهینه منابع آب ضروری است. نقشه های حساسیت و قابلیت آسیب پذیری آبخوان می تواند به عنوان یکی از راهبردها توسط نهادهای ذیربط استفاده شود.

منابع

- [1] Todd D. K. *Groundwater Hydrology*. 2nd edition, John Wiley, New york; **1980**; 535pp.
- [2] Jawed I. Gorai A.K, Poonam T, Gopal P. Approaches to groundwater vulnerability to pollution: a literature review. *Asian J. Water Environ. Pollut*; **2012**; **9** (1): 105–115.
- [3] Plymale C. L, Angle M. P. Groundwater pollution potential of Fulton County, Ohio. Ohio Department of Natural resources division of water, water resources section, Groundwater pollution potential report no.45; **2002**.
- [4] Kabera T, Zhahui L. A GIS Based DRASTIC MODEL for Assessing Groundwater in shallow Aquifer in Yuncheng Basin, Shanxi, China. *Research Journal of Applied Sciences*; **2008**; **3**(3): 195-205.
- [5] Shahid S, Hazarika M. Geographic Information System for the Evaluation of Groundwater Pollution Vulnerability of the Northwestern Barind Tract of Bangladesh. *Environmental Research Journal*; **2008**; **1**(1-4): 27-34.
- [6] Oluwapelumi O. Ojuri, Olufunmilola T. Bankole. Groundwater Vulnerability Assessment and Validation for a Fast Growing City in Africa: A Case Study of Lagos, Nigeria. *Journal of Environmental Protection*; **2013**; **4**: 454-465.
- [7] Mimi Z. A, N. Mahmoud, M. A. Madi. Modified DRASTIC assessment for intrinsic vulnerability mapping of karst aquifers: a case study. *Journal of Earth and Environmental Science*; **2012**; **66**(2): 447-456.

- [19] Sener E, Sener S, Davraz A. Assessment of aquifer vulnerability based on GIS and DRASTIC methods: a case study of the Senirkent-Uluborlu Basin (Isparta, Turkey). Hydrogeology Journal Official Journal of the International Association of Hydrogeologists; **2009**.
- [20] Azizi F, Mohamadzade H. vulnerability zoning and evaluation of quality spatial variations using DRASTIC index and quality index GWQI (case study: Emamzade Jaefar Plain). Engineering Water Resource Journal; **2011**; **5** (13): 1-14. **[In Persian]**
- [21] Nasery H, Saremi nejad F. Compare the aquifer vulnerability DRASTIC methods and fuzzy logic Case Study of Gelgir Plain of Masjed Soleiman. Natural Geography Journal; **2011**; **4** (11): 17-34. **[In Persian]**

