



# بررسی پتانسیل آلودگی آبخوان دشت فاش، شرق ایران، با استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی

علی احمدی و ممد آبرومند

گروه زمین‌شناسی، دانشکده‌ی علوم پایه، دانشگاه سیستان و بلوچستان

m\_aberoumand@yahoo.com

## چکیده

در این پژوهش آسیب‌پذیری آبخوان دشت خاش در برابر آلودگی، به کمک مدل دراستیک و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی ارزیابی شد. در این روش، هفت عامل هیدروژئولوژیک مؤثر بر آلودگی آب‌های زیرزمینی ترکیب شدند. این هفت عامل عبارتند از: عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه‌ی غیراشباع و هدایت هیدرولیکی. نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری، برگرفته از نتایج به‌دست آمده، دو پهنه‌ی عمده‌ی آسیب‌پذیری متوسط (شاخص آسیب‌پذیری ۱۴۸-۱۲۲) و کم (شاخص آسیب‌پذیری ۱۲۱-۹۲) را نشان می‌دهند. گسترش پهنه‌ی با آسیب‌پذیری متوسط، حدود ۷۵/۵ درصد و گسترش پهنه‌ی با آسیب‌پذیری کم، حدود ۲۴/۵ درصد است. تحلیل آماری با استفاده از غلظت یون نیترات انجام شده است. با تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر و نیز تحلیل حساسیت به روش تک‌پارامتری، میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترها در آلوده‌سازی آبخوان مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج هر دو تحلیل نشان می‌دهند که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری، تغذیه‌ی خالص آبخوان است.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آبخوان، آلودگی، تحلیل حساسیت، دراستیک، دشت خاش

## Vulnerability of Khash-Plain Aquifer, Eastern Iran, to Pollution Using Geographic Information System (GIS)

A. Ahmadi & M. Aberoumand

Department of Geology, Faculty of Basic Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, I. R. Iran

### Abstract

This research is an evaluation of vulnerability of Khash-plain aquifer to pollution, using DRASTIC model and Geographic Information System (GIS). Seven environmental parameters have been used to represent the hydrogeological nature of the aquifer. These parameters are: depth of water table, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of vadose zone, and hydraulic conductivity. This study shows that the Khash aquifer consists of two main zones: low groundwater vulnerability risk zone (risk indexes 92-121) and moderate groundwater vulnerability risk zone (risk indexes 122-148). Areas with moderate and low risk zones comprise 75.5% and 24.5% of the studied area, respectively. Statistical analyses have been carried out using nitrate ion concentration. Two tests of sensitivity analyses were carried out: the map removal and the single-parameter sensitivity analyses. Based on the characteristics of the studied area, the results from both map removal and single-parameter sensitivity analyses showed that the net recharge parameters have the most significant impact on the vulnerability risk zones.

**Key words:** aquifer, DRASTIC model, groundwater, Khash-plain, pollution, sensitivity analyses

## ۱- مقدمه

توسعه‌ی روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی سهم عمده‌ای در آلودگی‌های محیط زیست به ویژه آب دارد (Rahman 2008). بنابراین فعالیت‌های انسان در بعضی از موارد به توازن‌های ظریف موجود در طبیعت آسیب می‌رساند (Knodel et al. 2007). بعضی از این آسیب‌ها توسط طبیعت قابل جبران هستند. به عبارتی طبیعت قادر است بعضی از خرابی‌ها را ترمیم و محیط خود را تصفیه نماید (Knodel et al. 2007). اما توانایی جبران آلودگی در طبیعت شامل تمام آسیب‌های وارده به آن نمی‌شود و نیز جبران خسارات وارده به زمان زیاد نیاز دارد. بنابراین، انسان باید با شناخت (Characterization)، پیشگیری (Prevention) و یا مقابله با آلودگی‌ها (Remediation)، آن‌ها را در کنترل خود درآورد (Knodel et al. 2007). یکی از مهمترین منابع آبی آسیب‌پذیر در برابر آلودگی، آبخوان‌ها می‌باشند. این منابع به شکل‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آن‌ها نسبت به آب‌های سطحی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. همچنین، به دلیل استمرار آلودگی در این منابع، بهترین روش جلوگیری از آلودگی آن‌ها، شناسایی منابع آلوده‌کننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه‌ی نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد (Babiker et al. 2005, Knodel et al. 2007).

تا کنون تعاریف زیادی در مورد آسیب‌پذیری آبخوان و مفهوم آن در هیدروژئولوژی ارائه شده است، که از آن جمله می‌توان به تعریف کمیته ملی علوم آمریکا در سال ۱۹۹۳ اشاره کرد. این کمیته، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی را، تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به وجود آمدن آن‌ها در برخی محل‌ها در بالای سطح آبخوان می‌داند (Almasri 2008). اصطلاح آسیب‌پذیری از نظر مفهومی در هیدروژئولوژی به دو صورت آسیب‌پذیری ذاتی (Intrinsic Vulnerability) و آسیب‌پذیری ویژه (Specific Vulnerability) تقسیم می‌شود (Almasri 2008, Gogu & Dassargues 2000). آسیب‌پذیری ذاتی به امکان آلودگی در یک منطقه بدون در نظر گرفتن آلاینده‌ی خاص اشاره دارد (Almasri 2008). به عبارتی، این نوع آسیب‌پذیری به ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی یک منطقه و فعالیت‌های بشری بستگی دارد و مستقل از ماهیت آلاینده است (Gogu & Dassargues 2000). روش‌هایی نظیر دراستیک (DRASTIC) و سین تکس (SINTACS) به منظور ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری استفاده می‌شوند (Hamza et al. 2007). آسیب‌پذیری

ویژه نیز به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلاینده یا گروهی خاص از آلاینده‌ها اشاره دارد که به ویژگی‌های آلاینده و ارتباط آن با مؤلفه‌های مختلف آسیب‌پذیری ذاتی بستگی دارد (Gogu & Dassargues 2000). روش شاخص حساسیت (SI: Susceptibility Index) یکی از روش‌هایی است که برای ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری استفاده می‌شود و در آن آسیب‌پذیری آبخوان به طور مشخص نسبت به آلاینده‌های کشاورزی (نیترات) بررسی می‌گردد (Hamza et al. 2007).

روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک آبخوان وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، روش‌های آماری و روش‌های شاخص و همپوشان اشاره کرد (Almasri 2008). دراستیک یک روش شاخص و همپوشان است که در آن، اطلاعات حاصل از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی و به طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی پردازش می‌گردند (Dixon 2005). اصولاً روش‌های شاخص و همپوشان از ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیک مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌شوند. در این روش‌ها برای تعیین اهمیت نسبی، هر کدام از پارامترها نسبت به سایرین ارزیابی می‌شوند. گرچه این روش‌ها فرایندهای مؤثر در آلوده شدن منابع آب زیرزمینی را کاملاً شرح نمی‌دهند، اما به دلیل ساده بودن روش و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Gogu & Dassargues 2000). در بیشتر روش‌های شاخص و همپوشان و منجمله روش دراستیک، باید اطلاعات حاصل از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی تجزیه و تحلیل شوند. سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی، به دلیل ویژگی‌ها و توانایی‌های خاص خود، نیز می‌تواند ابزاری بسیار مفید باشد. این سامانه قابلیت جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل هم‌زمان پارامترهای مختلف را دارد و نمایش داده‌های مکانی را در مدت زمان کوتاه فراهم می‌سازد. هزینه‌ی کم، دقت محاسباتی بالا، استفاده از توابع تحلیلی پیچیده، قابلیت تفکیک طیفی، مکانی و زمانی قابل توجه و قابلیت‌های ویرایشی و به هنگام‌سازی سریع داده‌ها، مدل‌سازی و تهیه‌ی گزارش به اشکال متعدد از ویژگی‌های دیگر این سامانه می‌باشند (Gold 2006, Rahman 2008).

## ۲- ویژگی‌های مدل دراستیک

مدل دراستیک یک مدل تجربی است که اولین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده

سهولت حصول داده‌ها، دقت آماری، هزینه‌ی کم و استفاده در مناطق وسیع را نام برد (Aller et al. 1987, Rosen 1994). علاوه بر مزایای ذکر شده، روش دراستیک دارای نواقصی نیز می‌باشد. برای مثال، برخی از فاکتورهای مهم علمی، نظیر ظرفیت جذب (adsorption capacity)، زمان انتقال (Travel time) و رقیق‌سازی (Dilution) مستقیماً در شاخص نهایی نقش ندارند (Rosen 1994). همچنین، این روش، آسیب‌پذیری سفره‌های متخلخل (porous media aquifers) را در مقایسه با سفره‌های حاصل از شکستگی (Aquifers in fractured rocks) بیشتر برآورد می‌کند (Rosen 1994). اگر چه در این روش انتخاب پارامترهای زیاد و مرتبط به هم، احتمال نادیده گرفتن برخی از پارامترهای مهم را کاهش می‌دهد و نیز تأثیر خطاهای اتفاقی در محاسبه‌ی یک پارامتر را محدود کرده و در نتیجه دقت آماری مدل افزایش می‌یابد (Rosen 1994)، اما ممکن است بعضی از پارامترهای حساس که در آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی تأثیر بیشتری دارند، تحت تأثیر دیگر پارامترهای مربوط به آسیب‌پذیری در شاخص نهایی (Final index) تغییر کنند (Vrba & Zoporozec 1994).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه‌ی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با استفاده از مدل دراستیک انجام شده است که از آن جمله می‌توان به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های پالوکسی (Paluxy) در شمال تگزاس (Fritch et al. 2000)، آبخوان بازالتی ازراق (Azraq) در اردن (Al-Adamat et al. 2003)، آبخوان ناحیه‌ی تامیل نادو (Tamil Nadu) در هند (Thirumalaivasan et al. 2003)، آبخوان کاکامیگهارا (Kakamigahara) در مرکز ژاپن (Babiker et al. 2005)، و دراف کانتی (Woodruff County) در ناحیه‌ی دلتای رود می‌سی‌سی‌پی در ایالت آرکانزاس (Dixon 2005)، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در دو ناحیه در جنوب پرتغال (Stigter et al. 2006) و آبخوان ساحلی غزه (Gaza) در فلسطین (Almasri 2008) اشاره کرد. همچنین، در کره‌ی جنوبی از مدل دراستیک برای ارزیابی محل مناسب دفع زباله‌ها و جلوگیری از آلوده شدن آب‌های زیرزمینی استفاده شده است (Lee 2003). در ایران نیز از روش دراستیک برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، به‌طور موردی کمک گرفته شده است. از جمله این آبخوان‌ها می‌توان به آبخوان دشت خراسان (Kherran Plain) در خوزستان (Chitsazan & Akhtari 2008)، آبخوان دشت تهران (Mohammadi et al. 2008) و آبخوان دشت ایرانشهر در سیستان و بلوچستان (مؤدب ۱۳۸۴) اشاره کرد.

(Aller et al. 1987) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ایالات متحده مطرح و براساس مفهوم وضعیت هیدروژئولوژیکی (Hydrogeological setting) استوار است. وضعیت هیدروژئولوژیکی در واقع بیانگر ترکیبی از همه‌ی فاکتورهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی است که حرکت آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه کنترل می‌کند (Aller et al. 1987). این مدل از ترکیب هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی که شامل عمق سطح ایستابی، تغذیه خالص آبخوان، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، منطقه‌ی غیراشباع و هدایت هیدرولیکی می‌باشد، تشکیل شده است. واژه‌ی دراستیک نیز عبارت از حروف اول هفت پارامتر اصلی تأثیرگذار در این روش می‌باشد. این هفت پارامتر در محیط نرم‌افزار جی آی اس (GIS) به‌صورت هفت لایه که تحلیل‌های لازم بر روی آن‌ها انجام می‌شود، ظاهر می‌گردند.

برای تعیین اهمیت نسبی هر کدام از عوامل هفتگانه‌ی استفاده شده در مدل، هر پارامتر نسبت به سایر عوامل ارزیابی می‌شود، به‌طوری‌که به هر کدام با توجه به اهمیت تأثیر در آلودگی یک وزن نسبی، از یک تا پنج، تعلق می‌گیرد که پنج مؤثرترین و یک کم‌اثرترین آن‌هاست. هر یک از عوامل هیدروژئولوژیکی تأثیرگذار در مدل دراستیک، خود به بازه‌هایی (Ranges) تقسیم می‌شوند. به‌عنوان مثال، لایه‌ی محیط خاک بر حسب جنس مواد تشکیل دهنده و یا لایه‌ی عمق سطح ایستابی بر حسب متر، به بازه‌هایی تقسیم می‌شوند که نسبت تأثیر هر بازه بر روی آسیب‌پذیری آبخوان متفاوت است.

در این مدل به بازه‌های هر یک از پارامترهای هیدروژئولوژیکی نیز یک رتبه (Rating) از ۱ تا ۱۰ بر اساس تأثیر آن‌ها بر آسیب‌پذیری اختصاص داده می‌شود. در نهایت، پس از جمع‌آوری و رقوم‌کردن اطلاعات هیدروژئولوژیکی، هفت عامل نامبرده که پتانسیل آلودگی را کنترل می‌کنند، برای تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری با یکدیگر هم‌پوشانی و تلفیق می‌گردند و یک لایه جدید به نام شاخص دراستیک (DRASTIC index) طبق رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

رابطه ۱

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = D\text{-index}$$

در این رابطه حروف  $D, R, A, S, T, I, C$  و  $r, w$  پارامترهای هیدروژئولوژیکی تأثیرگذار در مدل دراستیک و اندیس‌های  $r$  و  $w$  به ترتیب رتبه و وزن هر پارامتر می‌باشند، بنابراین شاخص آسیب‌پذیری در این روش از حاصل ضرب هر پارامتر در رتبه‌ی آن به‌دست می‌آید (Rahman 2008).

از مزایای این روش می‌توان اندک بودن نسبی داده‌های لازم،

### ۳- نقش پارامترهای مدل دراستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان

عمق سطح ایستابی: هر چه عمق سطح ایستابی بیشتر باشد زمان بیشتری طول می‌کشد تا مواد آلاینده به آب‌های زیرزمینی برسند. در نتیجه در اثر همکنش‌های طبیعی از قبیل تجزیه‌ی شیمیایی، جذب (Adsorption) و پخش (Dispersion) امکان پالایش مواد آلاینده افزایش می‌یابد. بنابراین، سطوح ایستابی عمیق‌تر شانس آلودگی کمتری دارند.

تغذیه‌ی خالص آبخوان: تغذیه‌ی عاملی برای نفوذ و انتقال آلاینده‌ها به منطقه‌ی اشباع از طریق ناحیه‌ی غیراشباع است. معمولاً با افزایش میزان تغذیه در یک منطقه، پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی در آن منطقه افزایش می‌یابد.

محیط آبخوان: این عامل به خصوصیات مواد تشکیل دهنده‌ی منطقه‌ی اشباع نظیر میزان تخلخل، جنس و اندازه ذرات و جورشدگی ذرات اشاره دارد که میزان پویایی و تحرک آلودگی و به عبارتی فرایندهای رقیق‌سازی آلودگی نظیر تجزیه‌ی شیمیایی، جذب، پخش و تأخیر (Retardation) را کنترل می‌کند.

محیط خاک: به بخش هوازده‌ی بالایی منطقه‌ی غیر اشباع گفته می‌شود که تا حد نفوذ ریشه‌ی گیاهان ادامه دارد. این بخش از نظر فعالیت‌های بیولوژیکی و وجود مواد آلی بسیار حائز اهمیت است و میزان آب نفوذی و نیز نفوذ آلاینده‌ها را به داخل آبخوان کنترل می‌کند. به‌طورکلی هر قدر اندازه‌ی ذرات تشکیل دهنده‌ی خاک ریزتر و نفوذپذیری خاک کمتر و درصد مواد آلی و ضخامت خاک بیشتر باشد، پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی کاهش می‌یابد.

توپوگرافی: به تغییرات شیب سطح زمین اشاره دارد. شیب سطح زمین علاوه بر این که بر حرکت و نفوذ آب‌های سطحی و آلاینده‌ها در سطح زمین تأثیر می‌گذارد، بر گسترش خاک و در نتیجه بر میرایی (Attenuation) آلاینده‌ها نیز مؤثر است. بنابراین هرچه شیب سطح زمین کمتر باشد زمان تماس آب‌های سطحی و آلاینده‌ها با سطح زمین بیشتر است و در نتیجه امکان نفوذ آلاینده‌ها به داخل آبخوان بیشتر می‌شود.

منطقه‌ی غیراشباع: شامل قسمت قرار گرفته ما بین سطح ایستابی و محیط خاک می‌شود که اساساً غیراشباع بوده و یا به‌طور ناپیوسته اشباع می‌باشد و عبور و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه‌ی اشباع کنترل می‌کند. تأثیر منطقه‌ی غیراشباع در آلودگی آبخوان، مشابه محیط خاک بوده و به نفوذپذیری مواد تشکیل دهنده و خصوصیات محیط غیراشباع بستگی دارد.

هدایت هیدرولیکی: توانایی مواد تشکیل دهنده‌ی آبخوان در انتقال آب، هدایت هیدرولیکی نامیده می‌شود که به درصد فضا‌های خالی مرتبط به هم در لایه‌ی آبدار (تخلخل مؤثر) بستگی دارد. هدایت هیدرولیکی حرکت آلاینده و پخش آن را از نقطه‌ی نفوذ تا رسیدن به منطقه‌ی اشباع کنترل می‌نماید. بنابراین، هر چه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود.

### ۴- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

دشت خاش که در برگرنده‌ی سفره‌ی آب زیرزمینی منطقه می‌باشد در حوضه‌ی آبریز خاش قرار دارد. این حوضه با وسعت حدود ۱۸۶۶ کیلومترمربع به‌صورت نواری با امتداد شمال‌غربی - جنوب شرقی بین عرض‌های جغرافیایی ۲۷° ۵۰' و ۲۸° ۴۰' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۶۰° ۵۵' و ۶۱° ۳۰' شرقی واقع شده است. دشت خاش نیز به‌صورت نواری با امتداد شمال‌غربی - جنوب شرقی در دامنه‌ی جنوبی آتشفشان تفتان به طول تقریبی ۵۰ کیلومتر و عرض متوسط ۵ تا ۹ کیلومتر توسط ارتفاعات احاطه شده است (تصویر ۱). شهر خاش که تقریباً در مرکز این دشت قرار دارد، در فاصله‌ی ۱۵۰ کیلومتری جنوب‌شرق زاهدان و ۵۰ کیلومتری جنوب کوه تفتان واقع شده است. از دیدگاه زمین‌شناسی نیز منطقه‌ی مورد مطالعه در بخشی از کمربند چین - گسل خورده و به شدت شکسته شده‌ی نهندان - خاش قرار می‌گیرد و بیشتر با رسوبات آبرفتی دامنه‌ی جنوبی کوه تفتان که توسط جریان‌های سطحی و سیلابی به منطقه حمل شده‌اند، پوشیده می‌شود. رسوبات آبرفتی که منبع اصلی ذخیره‌ی آب زیرزمینی در منطقه هستند، سازندگان اصلی دشت را تشکیل می‌دهند. آب و هوای خشک، کمبود بارندگی (متوسط بارندگی سالانه ۱۵۰ میلی‌متر)، تبخیر و تعرق شدید، خشکسالی‌های بلند مدت و شدید، نوسانات دمایی زیاد، نبود رودخانه‌ی دائمی و منابع آبی محدود سبب بحران آب در این منطقه می‌گردد. به همین دلیل، آب‌های زیرزمینی نقش اساسی در تأمین آب شهرها و روستاهای موجود در این منطقه را دارند.

### ۵- تهیه‌ی نقشه‌ی شفاف آسیب‌پذیری

در ابتدا به منظور وارد نمودن آمار و اطلاعات موجود به محیط نرم افزارهای مربوطه و همچنین پردازش داده‌های اولیه، اقدام به تهیه‌ی پایگاه اطلاعاتی در محیط اکسل (Excel) گردید. با استفاده از نرم‌افزار سرفر (Surfer) برای هر لایه کنتور ترسیم و به محیط نرم‌افزار آرک جی آی اس (Arc GIS) داده شد. در ادامه با استفاده از تحلیل‌گر سه بعدی (3D Analyst) کنتورهای ساخته شده را به نقشه‌ی ۲D مد ارتفاعی تبدیل نموده تا فواصل بین کنتورها نیز دارای ارزش شوند،



شیمیایی نیترا تی استفاده می‌شود، جهت صحت‌سنجی مدل از یون نیترات استفاده گردید. با استفاده از نتایج آنالیز، مشخص گردید که هیچ‌یک از نقاطی که دارای نیترات بالا هستند، در محدوده‌ی با استعداد آلودگی کم قرار نگرفته‌اند، که این می‌تواند دقت و صحت مدل را مورد تأیید قرار دهد (تصویر ۱۰). جهت بررسی دقیق‌تر مدل، صحت‌سنجی آن از نظر آماری نیز مورد بررسی قرار گرفت. محاسبه‌ی دقت از نظر آماری به این صورت انجام می‌گیرد می‌گیرد که برای هر یک از نقاط دارای

جدول ۲- رتبه‌بندی و وزن‌دهی تغذیه‌ی خالص

| تغذیه‌ی خالص بر حسب میلی‌متر بر سال (Net Recharge) |                |
|--|----------------|
| رتبه (Rating)                                      | محدوده (Range) |
| ۱  | ۰-۵۰           |
| ۳  | ۵۰-۱۰۰         |
| ۶  | ۱۰۰-۱۸۰        |
| ۸  | ۱۸۰-۲۵۰        |
| ۹  | > ۲۵۰          |
| وزن نسبی: ۴  |                |

جدول ۳- رتبه‌بندی و وزن‌دهی محیط آبخوان

| محیط آبخوان (Aquifer media) |  |
|-----------------------------|--|
| رتبه (Rating)               | محدوده (Range)                             |
| ۱-۳                         | شیل توده‌ای                                |
| ۲-۳                         | سنگ آذرین یا دگرگونی                       |
| ۳-۵                         | سنگ آذرین یا دگرگونی هوازده                |
| ۴-۶                         | رسوبات یخچالی                              |
| ۵-۹                         | ماسه‌سنگ لایه لایه، سنگ آهک و توالی شیل‌ها |
| ۴-۹                         | ماسه‌سنگ توده‌ای                           |
| ۴-۹                         | سنگ‌آهک توده‌ای                            |
| ۴-۹                         | ماسه و گراول                               |
| ۲-۱۰                        | بازالت                                     |
| ۹-۱۰                        | سنگ‌آهک کارستی                             |
| وزن نسبی: ۳                 |  |

جدول ۶- رتبه‌بندی و وزن‌دهی محیط غیراشباع

| محیط غیراشباع (Impact of vadose zone media) |                                   |
|---|-----------------------------------|
| رتبه (Rating)                               | محدوده (Range)                    |
| ۱   | لایه‌ی محبوس‌کننده                |
| ۲-۶   | سیلت، رس                          |
| ۲-۵   | شیل                               |
| ۲-۷   | سنگ‌آهک                           |
| ۴-۸   | ماسه‌سنگ                          |
| ۴-۸   | سنگ‌آهک لایه لایه، ماسه‌سنگ و شیل |
| ۴-۸   | ماسه و گراول با تداخل سیلت و رس   |
| ۲-۸   | سنگ آذرین یا دگرگونی              |
| ۶-۹   | ماسه و گراول                      |
| ۲-۱۰  | بازالت                            |
| ۸-۱۰  | سنگ‌آهک کارستی                    |
| وزن نسبی: ۵                                 |                                   |

جدول ۴- رتبه‌بندی و وزن‌دهی محیط خاک

| محیط خاک (Soil media) |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| رتبه (Rating)         | محدوده (Range)                 |
| ۱۰                    | فاقد خاک یا نازک لایه بودن خاک |
| ۱۰                    | گراول                          |
| ۹                     | ماسه                           |
| ۸                     | کود گیاهی (peat)               |
| ۷                     | رس فشرده یا متراکم             |
| ۶                     | لوم ماسه‌ای                    |
| ۵                     | لوم                            |
| ۴                     | لوم سیلتی                      |
| ۳                     | لوم رس‌دار                     |
| ۲                     | کود (سرگین) (muck)             |
| ۱                     | رس غیر متراکم                  |
| وزن نسبی: ۲           |                                |

جدول ۷- رتبه‌بندی و وزن‌دهی هدایت هیدرولیکی

| هدایت هیدرولیکی بر حسب متر بر روز (Hydraulic Conductivity) |                |
|--|----------------|
| رتبه (Rating)  | محدوده (Range) |
| ۱  | ۰/۵-۵          |
| ۲  | ۵-۱۵           |
| ۴  | ۱۵-۳۵          |
| ۶  | ۳۵-۵۰          |
| ۸  | ۵۰-۱۰۰         |
| ۱۰   | > ۱۰۰          |
| وزن نسبی: ۳  |                |

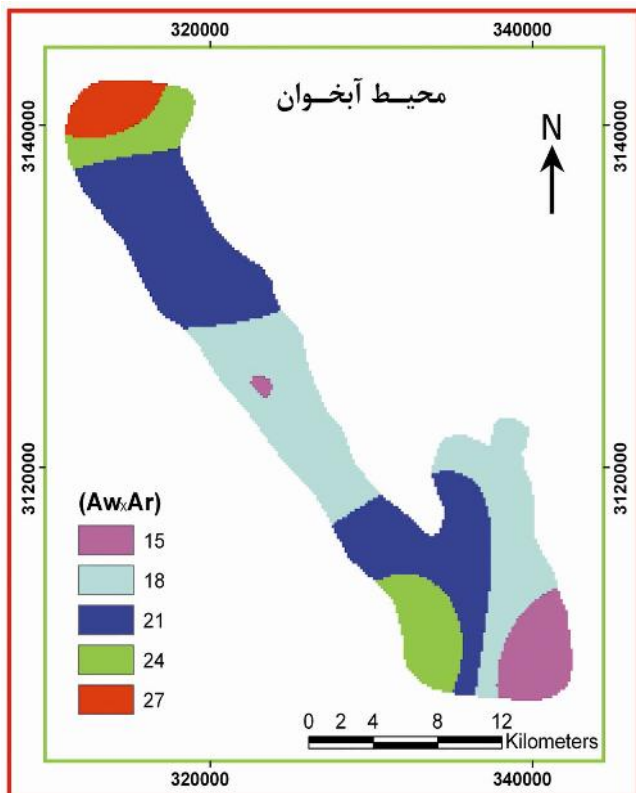
جدول ۵- رتبه‌بندی و وزن‌دهی توپوگرافی

| توپوگرافی (Topography) |                |
|------------------------|----------------|
| رتبه (Rating)          | محدوده (Range) |
| ۱۰                     | ۰-۲            |
| ۹                      | ۲-۶            |
| ۵                      | ۶-۱۲           |
| ۳                      | ۱۲-۱۸          |
| ۱                      | > ۱۸           |
| وزن نسبی: ۱            |                |

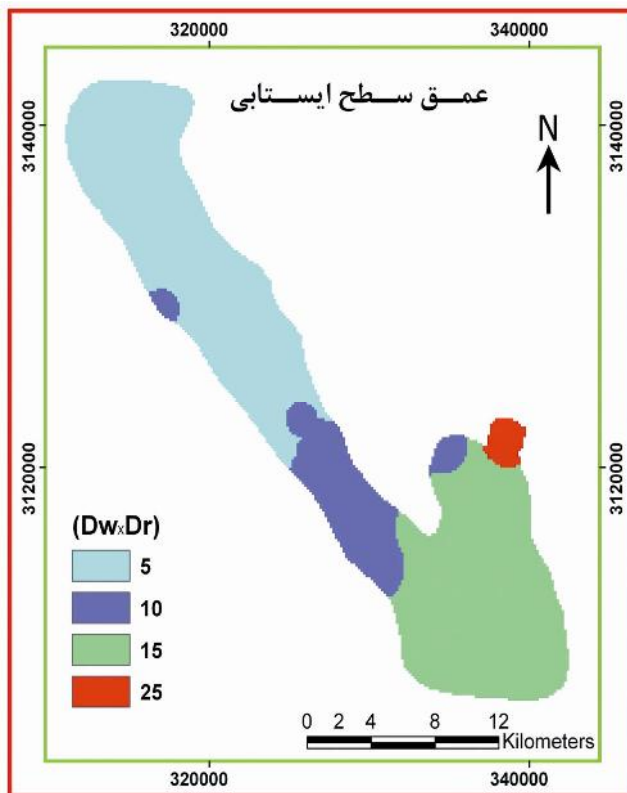
جدول ۸- رتبه‌بندی شاخص آسیب‌پذیری (Al-Adamat et al. 2003)

| شاخص آسیب‌پذیری دراستیک (The DRASTIC vulnerability index) |                |
|---|----------------|
| رتبه (Rating)   | محدوده (Range) |
| بدون ریسک (No risk)                                       | ۲۴-۷۱          |
| آسیب‌پذیری کم (Low)                                       | ۷۲-۱۲۱         |
| آسیب‌پذیری متوسط (Moderate)                               | ۱۲۲-۱۷۰        |
| آسیب‌پذیری زیاد (High)                                    | ۱۷۱-۲۲۰        |

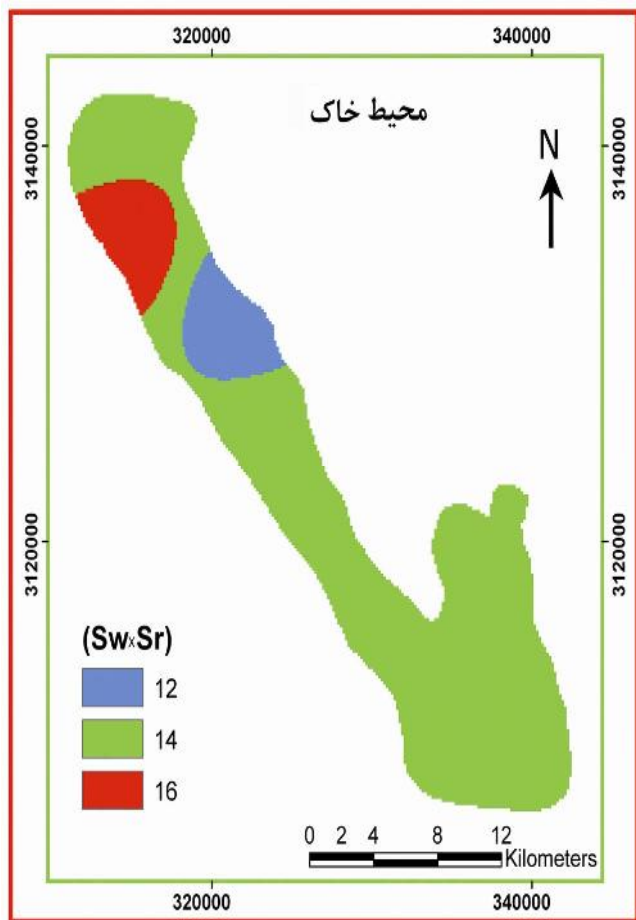
است. با توجه به این‌که در منطقه‌ی مورد مطالعه کشاورزی از رونق خاصی برخوردار است و غالباً از کودهای حیوانی و یا کودهای



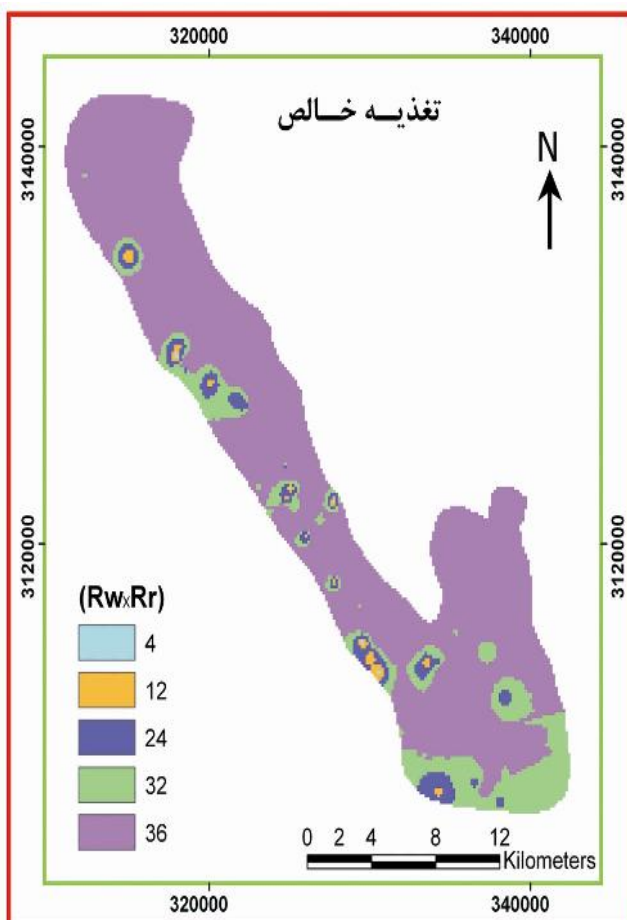
تصویر ۱- نقشه‌ی محیط آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



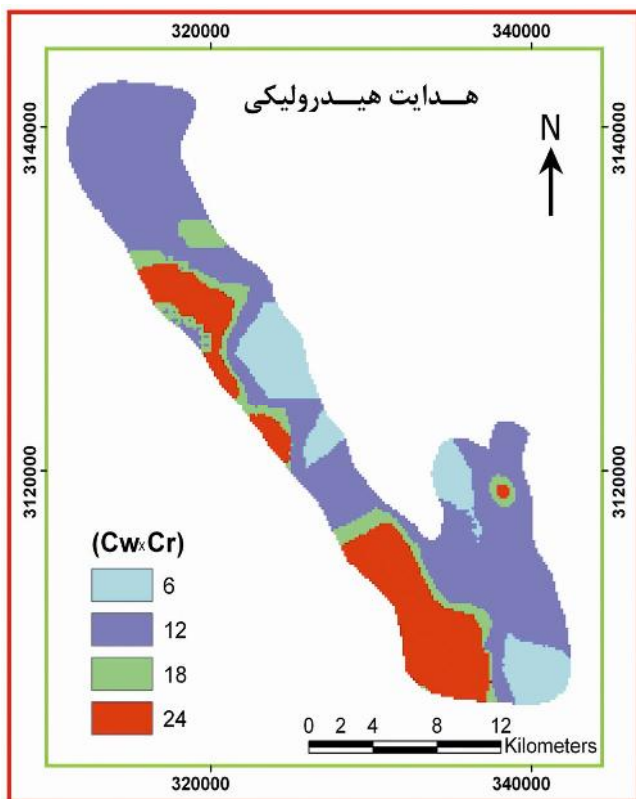
تصویر ۲- نقشه‌ی عمق سطح ایستابی آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



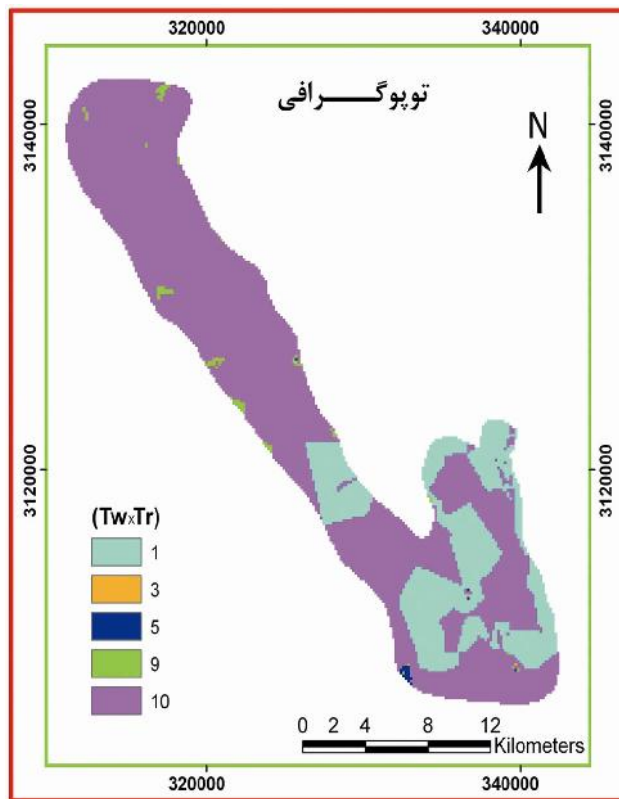
تصویر ۳- نقشه‌ی تغذیه خالص آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



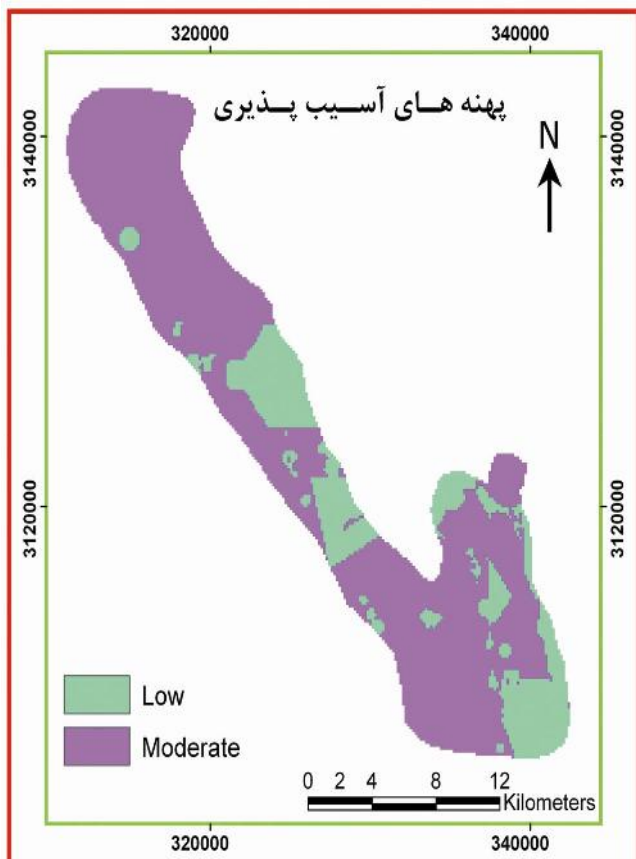
تصویر ۴- نقشه‌ی محیط خاک آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



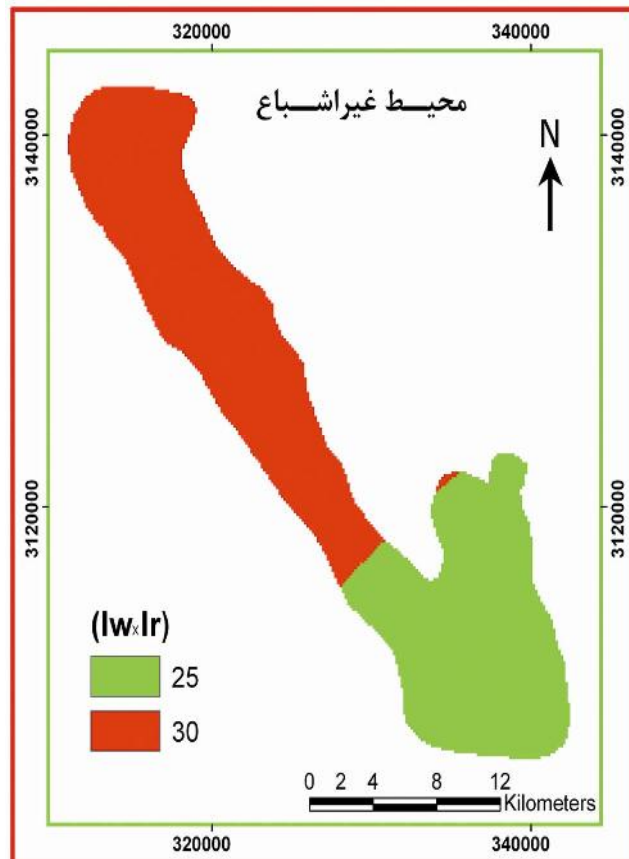
تصویر ۸- نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



تصویر ۶- نقشه‌ی شیب توپوگرافی آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



تصویر ۹- نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری با استفاده از پارامترهای هفتگانه‌ی دراستیک



تصویر ۷- نقشه‌ی نهایی محیط غیراشباع آبخوان با استفاده از مدل دراستیک



### ۷- آنالیز حساسیت مدل

آنالیز حساسیت یک گام اساسی در این مدل کاربردی می‌باشد. در طی این مرحله، پارامترهای ورودی مدل تغییر داده می‌شوند و عکس‌العمل سیستم نسبت به این تغییرات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نتیجه میزان حساسیت هر پارامتر مشخص می‌شود. میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای به کار برده شده، جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت خاش با استفاده از دو نوع تحلیل حساسیت حذف پارامتر (Lodwick et al. 1990) و تحلیل حساسیت تک پارامتری (Napolitano & Fabbri 1996) مورد ارزیابی قرار گرفت.

تحلیل حساسیت، حذف پارامتر حساسیت نقشه‌ی آسیب‌پذیری را به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید.

رابطه‌ی ۲

$$S = \frac{|(V/N) - (V'/n)|}{V} \times 100$$

در این رابطه: S میزان حساسیت پذیری، V و V' به ترتیب شاخص غیرآشسته (شاخص واقعی و بدون حذف پارامتر) و شاخص آشسته (شاخص آسیب‌پذیری با حذف پارامتر)، N و n نیز تعداد لایه‌های مورد استفاده V و V' می‌باشد (Babiker et al. 2005).

تحلیل حساسیت تک پارامتری، تأثیر هر یک از پارامترهای دراستیک را در شاخص نهایی آسیب‌پذیری بررسی می‌کند. در این تحلیل وزن مؤثر یا واقعی هر پارامتر با وزن تئوری اختصاص یافته به آن در مدل دراستیک مقایسه می‌شود و با استفاده از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید (Babiker et al. 2005):

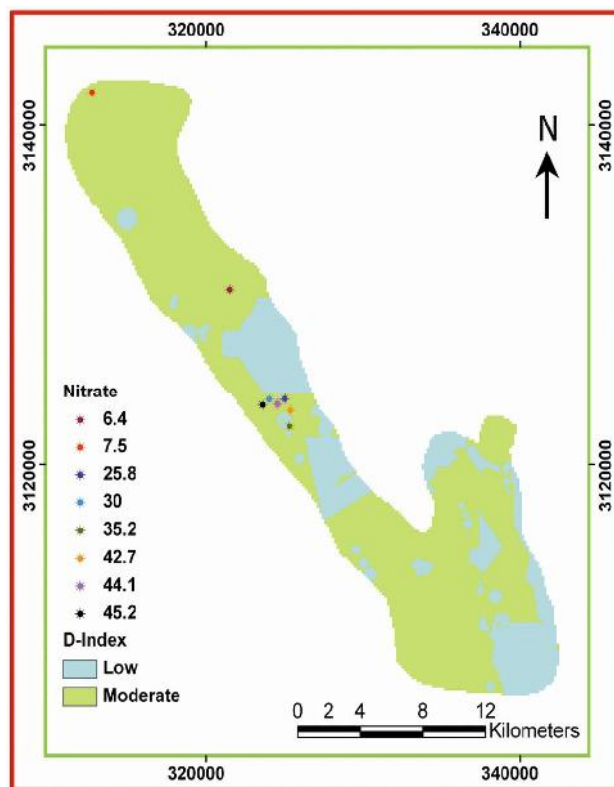
$$W = \left( \frac{P_r \times P_w}{V} \right) \times 100$$

رابطه‌ی ۳

در این رابطه: W وزن مؤثر هر پارامتر، P<sub>w</sub> و P<sub>r</sub> به ترتیب رتبه و وزن هر پارامتر و V شاخص کلی آسیب‌پذیری می‌باشد. این تحلیل‌ها با استفاده از نرم افزار جی آی اس (GIS) برای دشت خاش انجام گردید و نتایج آن در جداول ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد.

جدول ۱۰- نتایج آماری تحلیل حساسیت به روش حذف پارامتر

| پارامتر حذف شده | شاخص تغییرات % |       |        |              |
|-----------------|----------------|-------|--------|--------------|
|                 | میانگین        | حداقل | حداکثر | انحراف معیار |
| D               | ۰/۶۲           | ۰     | ۲      | ۰/۷۰         |
| R               | ۱/۸۰           | ۰     | ۳      | ۰/۶۰         |
| A               | ۰/۰۵           | ۰     | ۱      | ۰/۲۲         |
| S               | ۰/۰۴           | ۰     | ۱      | ۰/۱۹         |
| T               | ۰/۸۱           | ۰     | ۳      | ۰/۷۶         |
| I               | ۰/۵۹           | ۰     | ۳      | ۰/۶۰         |
| C               | ۰/۰۸           | ۰     | ۱      | ۰/۲۸         |



تصویر ۱۰- پراکنندگی نقاط با نیترات معلوم بر روی نقشه‌ی شاخص دراستیک

جدول ۹- مقادیر عددی غلظت نیترات و عدد دراستیک در محدوده دشت خاش

| Q= Nitrate / D-Index | شاخص دراستیک | غلظت نیترات | مختصات محل نمونه برداری (UTM) |         |
|----------------------|--------------|-------------|-------------------------------|---------|
|                      |              |             | UTM(X)                        | UTM(Y)  |
| ۰/۳۰                 | ۱۱۸          | ۳۵/۲        | ۳۲۵۳۲۳                        | ۳۱۲۲۳۳۹ |
| ۰/۳۴                 | ۱۲۶          | ۴۲/۷        | ۳۲۵۳۸۲                        | ۳۱۲۳۱۸۳ |
| ۰/۳۴                 | ۱۳۱          | ۴۵/۲        | ۳۲۳۵۹۱                        | ۳۱۲۳۴۹۷ |
| ۰/۲۴                 | ۱۲۵          | ۳۰          | ۳۲۴۰۳۲                        | ۳۱۲۳۸۳۰ |
| ۰/۲۱                 | ۱۲۵          | ۲۵/۸        | ۳۲۵۰۱۴                        | ۳۱۲۳۸۴۶ |
| ۰/۳۵                 | ۱۲۷          | ۴۴/۱        | ۳۲۴۵۴۶                        | ۳۱۲۳۵۴۵ |
| ۰/۰۶                 | ۱۳۴          | ۷/۵         | ۳۱۲۷۲۹                        | ۳۱۴۱۸۹۱ |
| ۰/۰۵                 | ۱۳۲          | ۶/۴         | ۳۲۱۵۱۲                        | ۳۱۳۰۳۳۳ |

دارای نیترات معلوم، عدد دراستیک آن نقطه با توجه به نقشه‌ی شاخص محلی دراستیک مشخص می‌شود و با تقسیم غلظت نیترات بر عدد دراستیک، یک نسبت ثابت (Q) به دست می‌آید که هر چه این نسبت برای همه‌ی نقاط به هم نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است. برای دشت خاش این نسبت تقریباً برای بیشتر نقاط به هم نزدیک است (جدول ۹). با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت که این مدل از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

جدول ۱۱- نتایج آماری تحلیل حساسیت به روش تک پارامتری

| پارامتر | وزن تئوری | وزن ۰/۰ تئوری | وزن مؤثر |       |        |              |
|---------|-----------|---------------|----------|-------|--------|--------------|
|         |           |               | میانگین  | حداقل | حداکثر | انحراف معیار |
| D       | ۵         | ۲۱/۷۴         | ۷/۲۵     | ۳     | ۱۹     | ۴/۰۶         |
| R       | ۴         | ۱۷/۴۰         | ۲۶/۶۱    | ۳     | ۳۲     | ۲/۹۲         |
| A       | ۳         | ۱۳/۰۴         | ۱۵/۱۷    | ۱۱    | ۲۱     | ۱/۹۳         |
| S       | ۲         | ۸/۷۰          | ۱۰/۴۳    | ۸     | ۱۵     | ۰/۹۵         |
| T       | ۱         | ۴/۳۴          | ۵/۵۰     | ۰     | ۱۰     | ۳/۰۵         |
| I       | ۵         | ۲۱/۷۴         | ۲۱/۱۴    | ۱۶    | ۳۲     | ۲/۴۶         |
| C       | ۳         | ۱۳/۰۴         | ۱۰/۳۵    | ۴     | ۲۲     | ۳/۹۲         |

قرار دارند. بنابراین، در این مناطق برای جلوگیری از آلودگی آب زیرزمینی بایستی مراقبت و کنترل بیشتری صورت گیرد. نتایج آماری حاصل از آنالیز حساسیت به روش حذف پارامتر و روش تک پارامتری نیز نشان می‌دهند که در هر دو مورد مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر شاخص آسیب‌پذیری، تغذیه‌ی خالص آبخوان است.

### مراجع

مؤدب، م.، ۱۳۸۴، "بررسی و ارزیابی آلودگی آبخوان ایرانشهر با استفاده از مدل دراستیک در محیط GIS"، پایان‌نامه‌ی کارشناسی

ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده‌ی علوم.

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*, Vol. 23: 303-324.

Aller, L., Bennet, T., Leher, J. H., Petty, R. J. & Hackett, G., 1987, "DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydro-geological setting", *U. S. Environmental Protection Agency, Ada OK., USA. EPA 600/2-87-035:622*

Almasri, M. N., 2008, "Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine", *J. Environ. Manag.*, Vol. 88: 577-593.

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", *Sci. Total Environ.*, Vol. 345: 127-140.

Chitsazan, M. & Akhtari, Y., 2008, "A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kherran Plain, Khuzestan, Iran", *Water Resources Manag.*, DOI 10.1007/s11269-008-9319-8.

Dixon, B., 2005, "Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool", *Applied Geography*, Vol. 25: 327-347.

Fritch, T. G., McKnight, C. L., Yelderman, J. C. & Arnold, J. G., 2000, "An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy aquifer, central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach", *Environ. Manag.*, Vol. 25 (3): 337-345.

Gogu, R. C. & Dassargues, A., 2000, "Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods", *Environ. Geol.*, Vol. 39 (6): 549-559.

نتایج آماری حاصل از آنالیز حساسیت به روش حذف پارامتر نشان می‌دهد که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر روی شاخص آسیب‌پذیری، تغذیه‌ی خالص است که با میانگین ضریب حساسیت ۱/۸۰ دارای بالاترین ضریب حساسیت می‌باشد. پس از آن بیشترین تأثیر را به ترتیب، پارامترهای توپوگرافی، عمق سطح ایستابی، محیط غیر اشباع، هدایت هیدرولیکی، محیط آبخوان و محیط خاک دارند. نتایج آماری حاصل از آنالیز حساسیت به روش تک پارامتری نیز نشان می‌دهند که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر روی شاخص آسیب‌پذیری، تغذیه‌ی خالص است که با میانگین ۲۶/۶۱ بیشترین وزن مؤثر را دارا می‌باشد. تحلیل حساسیت به روش تک پارامتری وزن مؤثر هر پارامتر را با وزن تئوری آن پارامتر مقایسه می‌کند. مقایسه‌ی وزن مؤثر هر پارامتر با وزن تئوری اختصاص داده شده به آن در آبخوان دشت خاش نشان می‌دهد که وزن مؤثر و تئوری پارامترهای دراستیک کاملاً بر هم منطبق نیستند. به‌عنوان مثال وزن تئوری تغذیه‌ی خالص ۱۷/۴۰ درصد و وزن مؤثر آن ۲۶/۶۱ درصد می‌باشد. در محدوده‌ی آبخوان خاش آنالیز حساسیت تک پارامتری نشان می‌دهد که پس از تغذیه‌ی خالص به ترتیب بیشترین تأثیر را پارامترهای محیط غیر اشباع، محیط آبخوان، محیط خاک، هدایت هیدرولیکی و عمق سطح ایستابی در شاخص آسیب‌پذیری دارند و توپوگرافی نیز با وزن مؤثر ۵/۵۰ و وزن تئوری ۴/۳۴ کمترین تأثیر را در شاخص آسیب‌پذیری آبخوان دارد.

### ۸- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل دراستیک نشان می‌دهد که آسیب‌پذیری آبخوان دشت خاش در دو محدوده‌ی آسیب‌پذیری کم و متوسط به ترتیب با نسبت‌های ۲۴/۵ و ۷۵/۵ درصد قرار می‌گیرند. مناطق با حساسیت کم، در بخش‌های جنوب، شرق و مرکز آبخوان دشت خاش و مناطق با حساسیت متوسط در قسمت‌های شمال، غرب و جنوب غرب آبخوان

*Hydrogeol., Int. Contributions for Hydrogeol., Hannover, Germany, 131p.*

**Gold, C. M., 2006,** "What is GIS and What is Not?", *Transactions in GIS, Vol. 10, No. 4: 505–519.*

**Hamza, M. H., Added, A., Frances, A. & Rodriguez, R., 2007,** "Validite de l'application des methodes de vulnerabilite DRASTIC, SINTACS et SI a l'etude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Métalline-Ras Jebel-Raf (Nord– East Tunisie)", *C. R. Geosci., Vol. 339: 493–505.*

**Knodel, K., Lange, G., & Voigt, H. J., 2007,** "Environmental Geology", *Handbook Field Methods and Case Studies, Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, 1357p.*

**Lee, S., 2003,** "Evaluation of waste disposal site using the DRASTIC system in southern Korea", *Environ. Geol., Vol. 44: 654–664.*

**Lodwick, W. A., Monson, W. & Svoboda L., 1990,** "Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis", *Int. J. Geogr. Intl. Sys., Vol. 4 (4): 413–428.*

**Mohammadi, K., Niknam, R. & Majd, V. J., 2008,** "Aquifer vulnerability assessment using GIS and fuzzy system: a case study in Tehran–Karaj aquifer, Iran", *Environ. Geol., DOI 10.1007/s00254-008-1514-7.*

**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., Vol. 235: 559–566.*

**Rahman, A., 2008,** "A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India", *Applied Geography, Vol. 28: 32–53.*

**Rosen, L., 1994,** "A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions", *Ground Water, Vol. 32: 278–285.*

**Stigter, T. Y., Ribeiro, L. & Carvalho Dill, A. M. M., 2006,** "Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal", *J. Hydrol., Vol. 14: 79–99.*

**Thirumalaivasan, D., Karmegam, M. & Venugopal, K., 2003,** "AHP-DRASTIC: Software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS", *Environ. Modelling & Software, Vol. 18: 645–656.*

**Vrba, J. & Zoporozec, A., 1994,** "Guidebook on mapping groundwater vulnerability", *Int. Assoc.*