

## مقایسه کارایی برخی مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلودگی در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت ابرکوه)

محمد حسن زاده نفوتی<sup>۱</sup>، زهره ابراهیمی خوسفی<sup>۲</sup>، علی‌اکبر جمالی<sup>۳</sup>

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۴

### چکیده

حفاظت از آب‌های زیرزمینی در مقابل آلودگی یک مقوله بسیار مهم است. نقشه‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، ابزاری مفید برای حفاظت از سفره‌ها و ارزیابی پتانسیل آلودگی به منظور بهبود کیفیت آب باتوجه به تغییرات در عملیات کشاورزی و کاربری اراضی است. باتوجه به اینکه در استان یزد و به‌ویژه دشت ابرکوه، بخش عمده‌ای از مصارف شرب و کشاورزی از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود، جلوگیری از آلودگی و ثبات کیفی این منابع موضوع مهمی است. بر این اساس، حساسیت‌پذیری ذاتی آبخوان ابرکوه به آلودگی با استفاده از مدل‌های SI، SINTACS، GODS، AVI و DRASTIC انجام شد. ابتدا اطلاعات مربوط به این مدل‌ها جمع‌آوری و پس از ورود به نرم‌افزار GIS لایه‌های موردنیاز مدل‌ها تهیه شد. سپس با استفاده از تکنیک‌های همپوشانی و پس از اعمال ضرایب وزنی لازم بر هر لایه، نقشه نهایی آسیب‌پذیری منطقه تهیه شد. در مرحله بعد، دقت مدل‌ها براساس ضریب تبیین حاصل از برازش خط بین مقادیر مشاهداتی نیترات و میزان پتانسیل آلودگی چاه‌های اندازه‌گیری موردارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که رابطه معنی‌داری بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی حاصل از روش‌های SI، SINTACS، AVI و GODS وجود ندارد؛ اما رابطه معنی‌داری در سطح یک درصد آماری بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی حاصل از روش دراستیک وجود دارد. از این رو می‌توان این مدل را به‌عنوان مدل مناسب برای پهنه‌بندی پتانسیل آلودگی منطقه مطالعاتی معرفی کرد. درنهایت، آبخوان دشت ابرکوه براساس مدل دراستیک به سه کلاس طبقه‌بندی شد. طبقات آسیب‌پذیری حاصل از این مدل نشان داد که بخش عمده منطقه در طبقه آسیب‌پذیری بدون خطر و خیلی کم قرار می‌گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** آسیب‌پذیری، دشت ابرکوه، دراستیک، گادز، SI، سینتکس، AVI، نیترات، آلودگی.

۱. استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد، نویسنده مسئول / hasanzadeh.m@gmail.com

۲. دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۳. استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد میبد

## مقدمه

طی سال‌های اخیر در ایران افزایش مصرف آب، محدودیت‌های فزاینده و پرهزینه بودن توسعه منابع آب سطحی، به فشارهای مضاعفی به منابع آب زیرزمینی منجر شده است. در صورت آلوده شدن آب زیرزمینی رفع آلودگی فرایندی پرهزینه و طولانی است و اغلب زمانی تشخیص داده می‌شود که رفع آن امکان‌پذیر نیست. یکی از ابزارهای مناسب که کمک موثری به مدیریت کیفی آب‌های زیرزمینی می‌کند، تهیه نقشه‌هایی است که در آن‌ها مناطق آسیب‌پذیر یا حساس به آلودگی مشخص می‌باشد (مثل نقشه پهنه‌بندی نترات). همچنین بر مبنای مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، شاخصی تعریف می‌گردد که می‌توان براساس آن، مناطقی را که بیشتر تحت تأثیر آلودگی هستند، از دیگر مناطق تمیز داد. بدین ترتیب می‌توان مناطق مختلف را با هم مقایسه کرد و معیاری واحد برای ارزیابی در اختیار داشت (کاوه‌کار و همکاران، ۲۰۰۷). ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی در دهه اخیر، از رشد چشمگیری برخوردار بوده و نتایج مطلوبی نیز به دنبال داشته است. اگرچه این روش‌ها در کشور ما هنوز به خوبی شناخته نشده، مطالعات زیادی در زمینه آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در داخل و خارج از کشور با روش‌های مختلفی انجام شده است؛ به طوری که اکبری و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل کالیبره شده دراستیک نشان داد که عمق آب زیرزمینی، توپوگرافی، لایه غیراشباع و گرادیان هیدرولیکی، از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی‌اند. جواد و همکاران (۲۰۱۱) از مدل دراستیک اصلاح شده برای تهیه نقشه حساسیت‌پذیری در برابر آلودگی با استفاده از اندازه‌گیری نترات در مناطق کشاورزی استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ضریب همبستگی بین مقدار شاخص حساسیت‌پذیری در مدل اصلاح شده و مقدار تجمع نترات ۶۸ درصد است که این مقدار ۲۳ درصد بیشتر از مقدار به دست آمده از طریق مدل اصلاح نشده است. هووان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی خود به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی حساسیت‌پذیری آب زیرزمینی به نترات براساس مدل دراستیک اصلاح شده در

شمال شرقی چین نشان دادند که صحت نقشه تولید شده براساس مدل کالیبره شده دراستیک به میزان ۴۰ درصد بیشتر از نقشه تولید شده براساس مدل کالیبره نشده است. خمیری<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۳) به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در برابر آلودگی در مناطق نیمه خشک (فوسانا در نواحی مرکزی تونس) از مدل‌های دراستیک، گادز، سیتکس و SI استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که نتایج مدل‌های سیتکس و SI ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند؛ اما مدل اصلاح شده دراستیک برای تعیین پتانسیل آلودگی در اقلیم‌های مدیترانه‌ای همانند منطقه مطالعاتی کاربرد بیشتری دارد. آیدی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیق خود نشان دادند که مدل SI از اعتبار بیشتری نسبت به مدل دراستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در برابر آلودگی برخوردار است. در سال‌های اخیر روش‌های گوناگونی جهت ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی توسعه یافته‌اند که انتخاب هر روش به وسعت منطقه مورد مطالعه، داده‌های موجود، شرایط اقتصادی و اجتماعی بستگی دارد (فاریابی، ۲۰۰۶). لذا به منظور ارتقای سطح مدیریت کیفی منابع آب زیرزمینی و اعمال مدیریت مناسب بر کاربری اراضی مرتبط با آبخوان دشت ابرکوه، کارایی مدل‌های GODS, SINTACS, AVI<sup>۴</sup> و SI<sup>۵</sup> با یکدیگر مقایسه شد تا بتوان کاربردی‌ترین مدل ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه را تعیین و از آن برای پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر استفاده کرد.

## مواد و روش‌ها

## موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی، آبخوان دشت ابرکوه در استان یزد و با مساحتی معادل ۱۲۰۰/۹ کیلومتر مربع است که در محدوده جغرافیایی ۵۳° تا ۳۲° ۵۳' طول شرقی و ۳۰° ۵۰' ۳۰" تا ۱۲۳۰' ۳۱" عرض شمالی و در زون ۳۹ جغرافیایی واقع شده است (شکل ۱). در این محدوده، ۶۴۶ حلقه چاه، ۱۹ دهانه چشمه و ۲۷ رشته قنات فعال موجود است. میزان تخلیه

2. Khemiri

3. Aydi

4. susceptibility model

5. Aquifer Vulnerability Index

1. Houan

استفاده می‌شود. ارزش کلاس‌های مختلف پارامترها از صفر تا یک تغییر می‌کند و به تمامی پارامترها وزن یکسانی اختصاص داده می‌شود. شاخص آسیب‌پذیری GODS از حاصل ضرب پارامترهای مذکور به دست می‌آید (فوستر<sup>۳</sup>، ۲۰۰۲).

### – ارزیابی آسیب‌پذیری به روش SINTACS

مدل سینتکس را اولین بار، سویتا<sup>۴</sup> (۱۹۹۱) برای بررسی آسیب‌پذیری در جنوب ایتالیا به کار بردند. در این مدل، هفت پارامتر عمق تا سطح ایستایی (S)، نفوذپذیری (I)، محیط غیراشباع (N)، محیط خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و توپوگرافی (شیب) (S)، به کار رفته است. تمامی این پارامترها از مدل دراستیک اشتقاق یافته‌اند؛ اما رتبه‌دهی و وزن دهی آن‌ها در این روش متفاوت است. اساساً این روش از چهار کلاس وزنی استفاده می‌کند؛ اما امکان ایجاد کلاس‌های جدید نیز وجود دارد (سویتا، ۲۰۱۰). پس از تهیه نقشه‌های پایه و هم‌پوشانی لایه‌های تهیه‌شده، نمایه آسیب‌پذیری سینتکس و نقشه خروجی بر طبق معادله (۲) تهیه و در نهایت کلاس‌بندی خواهد شد.

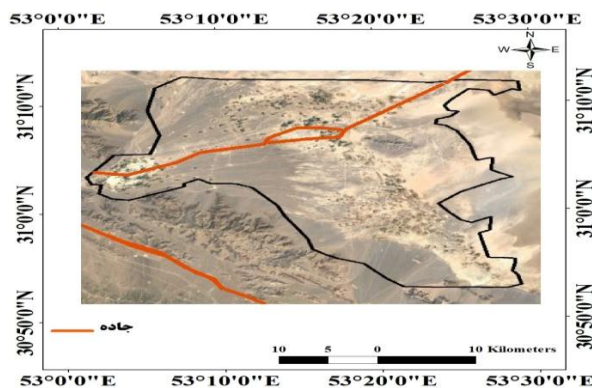
$$I_V = \sum P_{(1,7)} \times W_{(1,n)} \quad (2)$$

در این رابطه،  $I_V$  شاخص آسیب‌پذیری،  $P_{(1,7)}$  رتبه پارامترها،  $W_{(1,n)}$  وزن وابسته به تعداد آرایه‌های کلاس وزنی و  $n$  تعداد آرایه‌های کلاس وزنی است.

### – ارزیابی آسیب‌پذیری به روش AVI

در این روش با استفاده از دو پارامتر می‌توان شاخص آسیب‌پذیری سفره آبدار را تخمین زد. این دو پارامتر عبارت‌اند از: ضخامت هر واحد رسوبی بالای سفره آبدار (D) و هدایت هیدرولیکی تخمینی هر لایه (K). ضخامت لایه‌های رسوبی را می‌توان از لوگ چاه‌های حفاری در منطقه تعیین کرد. با این پارامترها میزان مقاومت هیدرولیکی سفره آبدار (C) براساس رابطه (۳) به دست می‌آید.

کل منابع آبی این محدوده، حدود ۱۸۱ میلیون مترمکعب در سال است. ارتفاع میانگین وزنی ۲۰۳۵/۲ متر، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۹۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه براساس روش دومارتن، گرم و خشک است.



شکل (۱): موقعیت آبخوان دشت ابرکوه

### روش تحقیق

#### – ارزیابی آسیب‌پذیری به روش SI

روش SI با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در برابر آلاینده‌های کشاورزی ارائه شده است. در این روش، از پنج پارامتر عمق سطح آب زیرزمینی (D)، تغذیه سالیانه (R)، لیتولوژی آبخوان (A)، توپوگرافی (T) و کاربری اراضی (LU) استفاده شده است (ریبیرو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰؛ استیگتر<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۶). با مراجعه به جداول ارائه‌شده توسط این محققان که براساس واحدهای تشکیل‌دهنده است، فرایند ارزش‌گذاری (R) انجام می‌شود. در نهایت با ضرب در مقدار وزن اختصاص داده شده به هر پارامتر (W) که برای پارامترهای D، A، R، T و LU به ترتیب ۰/۱۸۶، ۰/۲۱۲، ۰/۲۵۹، ۰/۱۲۱ و ۰/۲۲۲ است، شاخص نهایی SI براساس معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$SI = D_R D_W + R_R R_W + A_R A_W + T_R T_W + L_U R L_U W \quad (1)$$

#### – ارزیابی آسیب‌پذیری به روش GODS

این روش تجربی بسیار ساده و عملی برای ارزیابی سریع آسیب‌پذیری آبخوان در برابر آلودگی به کار می‌رود. در این روش، از چهار پارامتر نوع آبخوان (G)، خصوصیات منطقه غیراشباع (O)، عمق آب زیرزمینی (D) و نوع خاک (S)

کم	<۴۵	کم	<۱۰۶
متوسط	۴۵-۶۴	متوسط	۱۰۶-۱۸۶
زیاد	۶۵-۸۴	زیاد	۱۸۷-۲۱۰
خیلی زیاد	۸۵-۱۰۰	خیلی زیاد	>۲۱۰
<b>AVI</b> مقاومت هیدرولیکی			
ناچیز	<۰/۱	خیلی زیاد	۰-۱۰
کم	۰/۱-۰/۳	زیاد	۱۰-۱۰۰
متوسط	۰/۳-۰/۵	متوسط	۱۰۰-۱۰۰۰
زیاد	۰/۵-۰/۷	کم	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰
خیلی زیاد	۰/۷-۱	خیلی کم	>۱۰۰۰۰
<b>DRASTIC</b> پتانسیل آلودگی			
		بدون خطر	۲۳-۵۳
		خیلی کم	۵۴-۷۴
		کم	۷۵-۱۰۵
		متوسط	۱۰۶-۱۳۶
		زیاد	۱۳۷-۱۶۷
		خیلی زیاد	۱۶۸-۱۹۸
		شدید	۱۹۹-۲۳۰

### صحت‌سنجی مدل‌ها

در بسیاری از مطالعات، نیترات به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و خطرات آلودگی انتخاب شده است (استیگتر و همکاران، ۲۰۰۲؛ آسف و ساد، ۲۰۰۹؛ هوان و همکاران، ۲۰۱۲). در این پژوهش، ابتدا مقادیر آلودگی برآورد شده براساس لایه‌های اطلاعاتی حاصل از مدل‌های GODS، SI، SINTACS و AVI در محل چاه‌هایی که مقدار نیترات آن‌ها اندازه‌گیری شده استخراج شد، سپس اقدام به برقراری روابط همبستگی بین مقادیر تخمینی آلودگی براساس لایه‌های مذکور با مقادیر حاصل از نتایج آنالیز شیمیایی (مقادیر واقعی نیترات) گردید. درنهایت با مقایسه نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل‌ها، بهترین مدل برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری منطقه مطالعاتی تعیین شد.

### نتایج

مقادیر نیترات مربوط به چاه‌های اندازه‌گیری نیترات در دشت البرکوه در خرداد ۱۳۹۰ در جدول (۲) آنالیز شده و موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{K_i} \quad (3)$$

در این رابطه،  $C$  مقاومت هیدرولیکی سفره آبدار،  $d_i$  ضخامت لایه‌های بالای سفره آبدار،  $n$  تعداد لایه‌ها (بدون بعد) و  $K_i$  هدایت هیدرولیکی تخمینی هر لایه ( $m/day$ ) است. در روش AVI به‌طور غیرمستقیم از پارامترهای مدل دراستیک به‌جز توپوگرافی و نوع سفره آبدار استفاده می‌شود (اگاگو و همکاران، ۱۹۹۹). برای تعیین پتانسیل آلودگی آبخوان در این روش، ابتدا مقدار پارامتر  $C$  برای هر یک از چاه‌ها محاسبه و سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، نقشه هم‌مقدار مقاومت هیدرولیکی آبخوان تهیه و درنهایت با استفاده از جدول (۱) میزان پتانسیل آلودگی دشت مشخص خواهد شد.

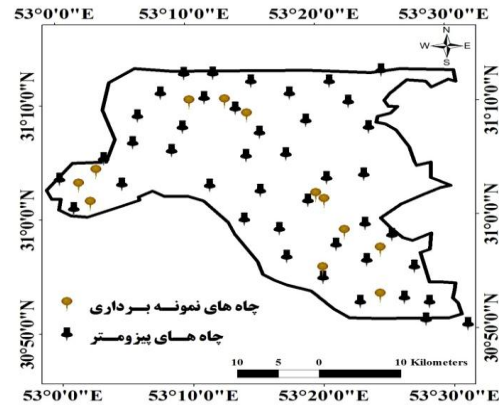
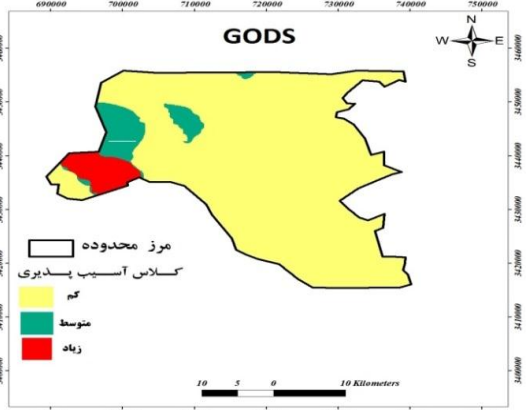
### - ارزیابی آسیب‌پذیری به روش DRASTIC

در روش دراستیک، به هر یک از پارامترهای کیفی مانند محیط خاک ( $S$ )، محیط غیراشباع ( $I$ )، و محیط اشباع ( $A$ ) براساس نوع خاک و مواد زمین‌شناسی تشکیل دهنده و به هر یک از پارامترهای عددی دراستیک عمق ( $D$ )، تغذیه خالص ( $R$ )، توپوگرافی ( $T$ )، هدایت هیدرولیکی ( $C$ ) براساس محدوده‌ها یا کلاس‌های عددی متفاوت، ارزشی بین ۱ تا ۱۰ داده می‌شود. محدوده‌های عددی مؤثر در حوزه موردنظر، براساس اثر آن‌ها بر پتانسیل آلودگی تعیین می‌شوند. به هر یک از پارامترهای هفت‌گانه دراستیک نیز به نسبت اهمیت آن در آسیب‌پذیری وزنی بین ۱ تا ۵ داده می‌شود. به مهم‌ترین پارامتر وزن ۵ و به کم‌اهمیت‌ترین آن‌ها وزن ۱ داده می‌شود (آلر<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۸۷). درنهایت، شاخص آسیب‌پذیری دراستیک از مجموع حاصل ضرب وزن و رتبه هفت پارامتر فوق‌الذکر مطابق رابطه (۴) محاسبه و براساس جدول (۱) کلاس‌بندی شد.

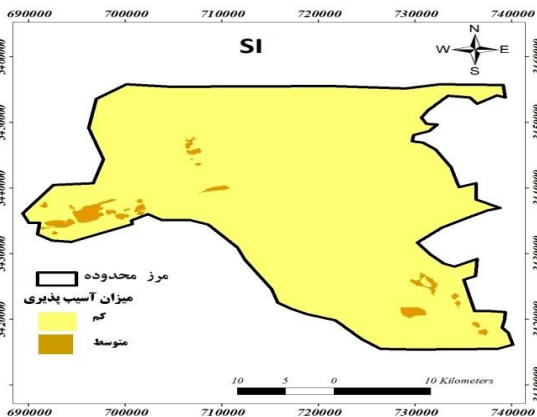
$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j \times R_j) \quad (4)$$

جدول (۱): کلاس‌های آسیب‌پذیری شاخص‌های مختلف آسیب‌پذیری

پتانسیل آلودگی SINTACS پتانسیل آلودگی SI

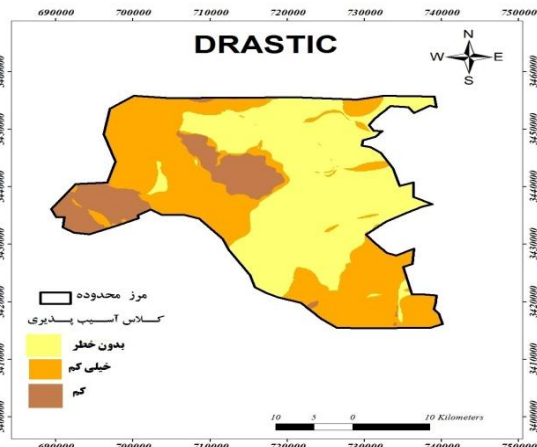


شکل (۲): موقعیت چاه‌های پیزومتر و نمونه برداری دشت ابرکوه (خرداد ۱۳۹۰)

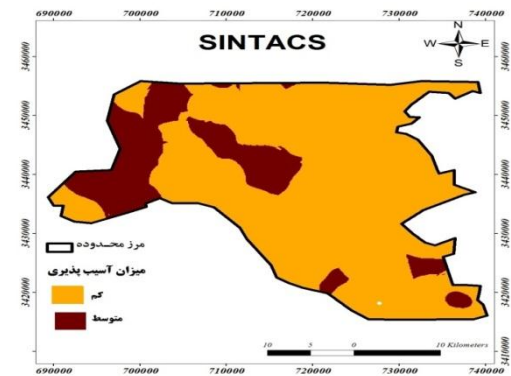
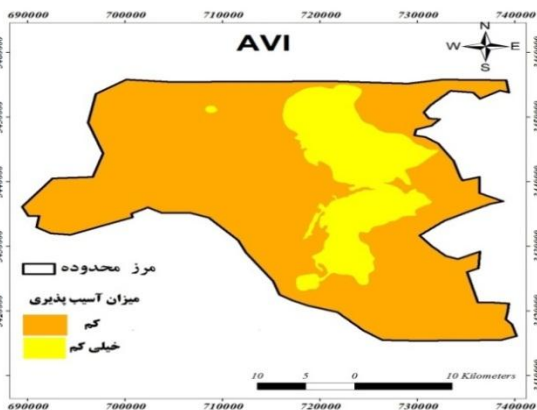


جدول (۲): مشخصات چاه‌های اندازه‌گیری نیتراژ و مقادیر مربوط به آن در دشت ابرکوه (خرداد ۱۳۹۰)

نیتراژ (ppm)	عرض جغرافیایی (متر)	طول جغرافیایی (متر)	نام چاه
۲۳/۳	۳۴۳۳۱۲۶	۶۹۲۶۵۶	ده عرب
۱۱/۹	۳۴۵۰۵۶۲	۷۱۱۰۷۵۶	هروک
۱۱	۳۴۵۰۴۱۰	۷۰۶۷۶۹	تیزوک
۱۰/۶	۳۴۴۸۲۸۱	۷۱۳۸۱۵	مریم‌آباد
۲۲	۳۴۳۳۹۵۷	۶۹۴۷۰۲	فراغه
۲۰	۳۴۳۶۸۸۴	۶۹۳۲۵۷	فراغه
۱۷/۶	۳۴۴۸۲۸۱	۷۱۳۸۱۵	تیجرد ۱
۱۸/۹	۳۴۵۰۴۳۵	۷۰۶۷۷۶	تیجرد ۲
۱۳	۳۴۳۳۹۵۷	۶۹۴۷۰۲	مزرعه عرب
۱۷/۱	۳۴۱۹۰۷۰	۷۳۰۱۵۶	اسفندآباد
۱۲/۳	۳۴۳۲۸۱۷۹	۷۱۸۶۹۴	بداف
۱۱/۸	۳۴۳۵۳۵۶	۷۲۲۲۵۷	اردی



نقشه نهایی کلاس‌های آسیب‌پذیری دشت ابرکوه براساس مدل‌های GODS, SI, SINTACS, AVI و DRASTIC در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): نقشه ریسک آسیب‌پذیری دشت ابرکوه براساس مدل‌های مختلف

درصد و مساحت کلاس‌های آسیب‌پذیری مدل‌های مذکور نیز در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۳): درصد و مساحت کلاس‌های آسیب‌پذیری آبخوان دشت ابرکوه براساس مدل‌های مختلف

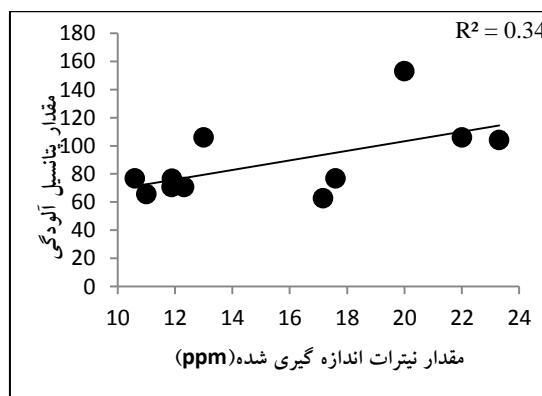
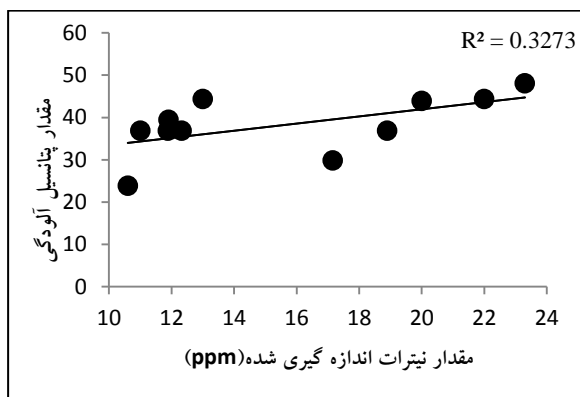
کلاس آسیب‌پذیری	محدوده شاخص SI	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت
کم	>۴۵	۱۱۷۵/۵	۹۷/۹
متوسط	۴۵-۶۴	۲۵/۴	۲/۱
کلاس آسیب‌پذیری	محدوده شاخص گادز	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت
کم	۰/۱-۰/۳	۱۰۷۰/۷	۸۹/۲
متوسط	۰/۳-۰/۵	۷۷/۵	۶/۵
زیاد	۰/۵-۰/۷	۵۳/۷	۴/۴
کلاس آسیب‌پذیری	محدوده شاخص سینتکس	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت
کم	<۱۰۶	۹۵۷/۷	۷۹/۷
متوسط	۱۰۶-۱۸۶	۲۴۳/۲	۲۰/۳
کلاس آسیب‌پذیری	محدوده شاخص AVI	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت
خیلی کم	>۱۰۰۰۰	۲۳۳/۹	۱۹/۵
کم	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۹۶۷	۸۰/۵
کلاس آسیب‌پذیری	محدوده شاخص دراستیک	مساحت (km <sup>2</sup> )	درصد مساحت
بدون خطر	۳۸-۵۹	۵۵۹/۶	۴۶/۶
خیلی کم	۵۹-۷۵	۴۹۵/۳	۴۱/۲
کم	۷۶-۱۰۵	۱۴۶	۱۲/۲

مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر نیترا و مقادیر پتانسیل آلودگی حاصل از مدل‌های مختلف در جدول (۴) و نمودار برازش بین پتانسیل آلودگی و مقدار نیترا اندازه‌گیری شده در

جدول (۴): مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر نیترا و مقادیر پتانسیل آلودگی حاصل از مدل‌های مختلف

	NO3(ppm)	SI	SINTACS	AVI	GODS	DRASTIC
<b>NO3(ppm)</b>	Pearson Correlation	1	.572	.588	-.597	.529
	Sig. (2-tailed)		.066	.057	.052	.095
	N	12	11	11	11	11

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).



نمودار (۲): مقدار ضریب تبیین بین مقادیر نیترا و پتانسیل آلودگی براساس مدل

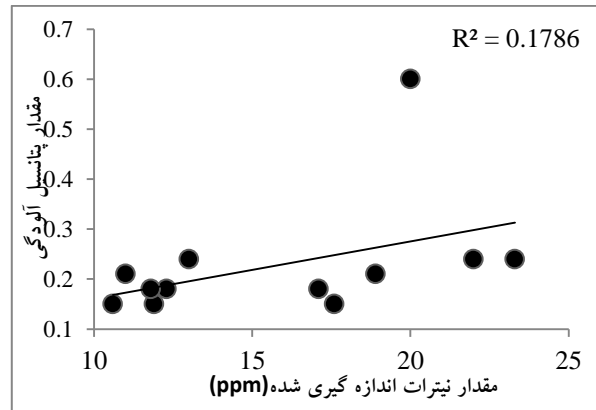
SI

نمودار (۱): مقدار ضریب تبیین بین مقادیر نیترا و پتانسیل آلودگی براساس مدل

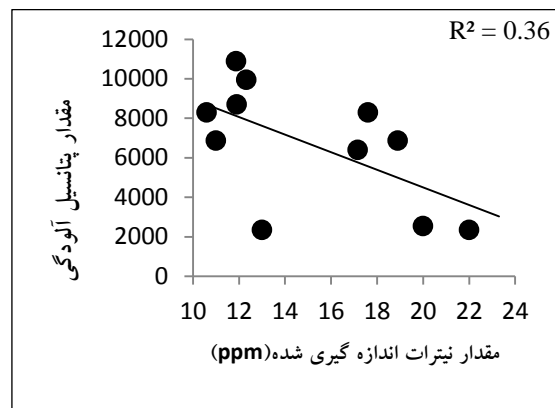
SINTACS



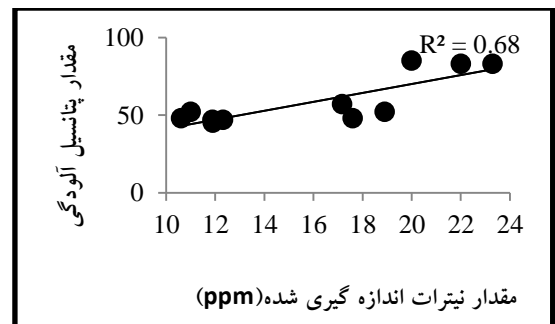
ایستایی و شیب و نوع کاربری (باغات) در این نواحی از دلایل آسیب‌پذیری بالاتر این بخش از آبخوان است. بررسی شکل (۳) نشان می‌دهد که بخش عمده منطقه (۸۹ درصد) در کلاس آسیب‌پذیری کم و بخش کوچکی از آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری زیاد قرار می‌گیرد. این در حالی است که نتایج حاصل از مدل SI نشان داد که در محدوده آبخوان ابرکوه، پتانسیل آلودگی زیاد وجود ندارد و نواحی‌ای که براساس GODS در محدوده آسیب‌پذیری زیاد قرار می‌گیرند، براساس مدل SI در کلاس متوسط قرار می‌گیرند. با مقایسه این دو روش می‌توان نتیجه گرفت که روش SI، میزان آسیب‌پذیری آبخوان را کمتر از روش GODS برآورد می‌کند. اما اینکه کدام روش به دیگری برتری دارد، باید براساس ضریب همبستگی بین مقادیر نیترات چاه‌های نمونه‌برداری و مقادیر پتانسیل آلودگی چاه‌های مذکور ارزیابی شود. بررسی نقشه پتانسیل آلودگی حاصل از مدل سیتکس (شکل ۳) نیز حاکی از آن است که بخش عمده آبخوان (۷۹/۷ درصد) از لحاظ ریسک آسیب‌پذیری در کلاس کم قرار می‌گیرد. اما در مقایسه با مدل‌های SI و GODS، بخش وسیع‌تری از آبخوان در طبقه‌بندی حاصل از این مدل (غرب، شمال‌غرب و جنوب‌شرق) در محدوده متوسط قرار گرفته است؛ جنس محیط اشباع و غیراشباع، بالاتر بودن میزان نفوذپذیری خاک، میزان تغذیه و هدایت هیدرولیکی و پایین بودن شیب توپوگرافی در این نواحی از دلایل عمده این امر است. نقشه ریسک آسیب‌پذیری براساس مدل AVI نشان می‌دهد که بخش عمده آبخوان دارای ریسک آسیب‌پذیری کم (۸۵/۵ درصد) و بخش‌هایی از آبخوان در امتداد شمال تا شرق در محدوده آسیب‌پذیری خیلی کم (مقاومت هیدرولیکی بالا) واقع شده است (شکل ۳). از نظر انطباق بصری، همپوشانی کمتری بین کلاس‌های آسیب‌پذیری در نقشه حاصل از این روش با سایر روش‌ها وجود دارد. به‌طوری‌که در مقایسه کلاس‌های آسیب‌پذیری براساس شاخص AVI، نواحی‌ای که در امتداد شمال تا شرق واقع شده‌اند، ریسک آسیب‌پذیری کمتری نسبت به سایر نواحی آبخوان دارند، این در حالی است که براساس سایر مدل‌ها نواحی غربی و جنوب‌شرق، ریسک آسیب‌پذیری بیشتری نسبت به سایر نواحی



نمودار (۳): مقدار ضریب تبیین بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی براساس مدل GODS



نمودار (۴): مقدار ضریب تبیین بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی براساس مدل AVI



نمودار (۵): مقدار ضریب تبیین بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی براساس مدل DRASTIC

### بحث

بررسی نقشه کلاس آسیب‌پذیری دشت ابرکوه براساس مدل SI نشان می‌دهد که بخش عمده آبخوان ابرکوه در محدوده آسیب‌پذیری کم قرار گرفته است. بخش‌هایی در غرب و جنوب‌غربی آبخوان نیز دارای آسیب‌پذیری متوسط است که بالاتر بودن میزان تغذیه خالص، پایین بودن عمق تا سطح

دارند؛ این امر می‌تواند به دلیل خطای امتیازبندی به چاه‌های دامنه وسیع مقاومت هیدرولیکی تعریف‌شده برای کلاس‌های آسیب‌پذیری باشد.

براساس نقشه ریسک آسیب‌پذیری حاصل از مدل دراستیک (شکل ۳) بخش عمده آبخوان در محدوده آسیب‌پذیری بدون خطر و خیلی کم (۸/۸ درصد) قرار گرفته است که ریزدانه بودن محیط‌های اشباع، غیراشباع و محیط خاک، پایین بودن میزان هدایت هیدرولیکی، تغذیه خالص و عمق تا سطح ایستایی از دلایل آسیب‌پذیری پایین بخش عمده آبخوان براساس شاخص دراستیک است. اما ۱۲/۲ درصد از آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری کم واقع شده است که این قسمت با نواحی ریسک متوسط در مدل‌های SI و SINTACS و نواحی با ریسک آسیب‌پذیری بالا در شاخص گادز همپوشانی نسبی دارد.

مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مذکور نشان می‌دهد که در هر پنج روش، بخش عمده آبخوان دشت ابرکوه در گروه آسیب‌پذیری کم قرار می‌گیرد؛ ولی حدود گسترش این محدوده متفاوت است. روش‌های دراستیک و سیتکس از بیشترین پارامترهای مؤثر در آسیب‌پذیری ذاتی برای پهنه‌بندی استفاده می‌کنند؛ در نتیجه، هزینه و زمان بیشتری را نسبت به سایر روش‌ها می‌طلبند؛ زیرا در این روش‌ها از هفت پارامتر برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده می‌شود و در برخی موارد فراهم کردن همه پارامترها به دلیل کمبود آمار و اطلاعات پایه امکان‌پذیر نیست. پس چنانچه امکان دسترسی به پارامترهای موردبررسی وجود داشته باشد، از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار خواهند بود. تعیین استعداد آبخوان براساس روش‌های AVI و GODS به دلیل دخیل بودن تعداد پارامترهای کمتر، ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر از سه روش دیگر است؛ اما به دلیل لحاظ نکردن تمام پارامترهای مؤثر در آسیب‌پذیری ذاتی به‌ویژه تغذیه سطحی، دقت کمتری دارند. بنابراین استفاده از روش‌های دراستیک و سیتکس، علی‌رغم پرهزینه بودن از دقت نسبی بیشتری برخوردار است؛ اما یکی از معایب تمام این روش‌ها این است که کلاسه‌بندی و ارزش‌گذاری پارامترها تا حدودی کارشناسی است، که همین موضوع باعث عدم قطعیت در نتایج می‌شود. لذا از آنجاکه براساس نتایج حاصل تا این مرحله از

پژوهش نمی‌توان درباره میزان پتانسیل آلودگی و کلاس آسیب‌پذیری نواحی مختلف آبخوان اظهار نظر قطعی کرد؛ از این رو به منظور رفع مشکل عدم قطعیت نتایج، کارایی و صحت نتایج پنج مدل SI، SINTACS، AVI، GODS و DRASTIC براساس مقدار ضریب همبستگی (R) بین پتانسیل آلودگی حاصل از لایه‌های اطلاعاتی مذکور در محل چاه‌های اندازه‌گیری نیترات با مقدار نیترات اندازه‌گیری شده به‌عنوان عامل آلوده‌کننده آبخوان ابرکوه موردبررسی قرار گرفت. بررسی جدول (۴) و نمودارهای (۱) تا (۵) نشان می‌دهد که ضرایب همبستگی بین پتانسیل آلودگی حاصل از مدل‌های SI، SINTACS و GODS با مقادیر نیترات فاقد رابطه معنی‌دار در سطوح ۱ یا ۵ درصد آماری است. لذا علی‌رغم بالابودن نسبی ضریب همبستگی ( $R > 0.5$ )، مناسب بودن این مدل‌ها برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان ابرکوه رد می‌شود. شایان ذکر است که در بررسی کارایی مدل AVI براساس نقشه هم‌مقاومت هیدرولیکی آبخوان، کلاس‌های آسیب‌پذیری مشخص می‌شود و به‌طور کمی، دامنه مقادیر پتانسیل آلودگی در این مدل بیان نشده است؛ در نتیجه امکان برقراری رابطه همبستگی بین مقادیر پتانسیل آلودگی و نیترات وجود ندارد؛ اما از آنجاکه با افزایش مقاومت هیدرولیکی، ریسک آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد (رابطه معکوس)، می‌توان بین نیترات به‌عنوان مهم‌ترین شاخص آلاینده در آبخوان و مقاومت هیدرولیکی نیز رابطه همبستگی برقرار کرد؛ نتایج حاصل از برقراری این رابطه، حاکی از ضریب همبستگی نسبتاً بالا ( $R = -0.597$ ) و رابطه معکوس بین مقادیر مذکور است (نک: جدول ۴ و نمودار ۴). اما علی‌رغم بالابودن ضریب تبیین، این رابطه در سطح ۱ یا ۵ درصد آماری معنی‌دار نیست و کارآمد بودن مدل مذکور برای برآورد پتانسیل آلودگی در منطقه مطالعاتی رد می‌شود.

بررسی جدول (۴) همچنین حاکی از آن است که مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی براساس مدل دراستیک، به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر مذکور براساس سایر مدل‌هاست. همچنین مقدار ضریب همبستگی بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی براساس مدل دراستیک ( $R = 0.81$ ) در سطح ۱ درصد آماری



توصیه شده است (U.S.EPA,1995). باتوجه‌به اینکه حداکثر غلظت نیترات در دشت ابرکوه کمتر از ۲۴ میلی‌گرم در لیتر است، در حال حاضر خطری از لحاظ آلودگی نیترات متوجه آب زیرزمینی دشت ابرکوه نیست. نتایج بررسی غلظت‌های مختلف نیترات و انطباق آن با نتایج حاصل از مدل دراستیک، می‌تواند مؤید بهینه‌بودن مدل دراستیک برای پهنه‌بندی آبخوان از لحاظ پتانسیل آلودگی باشد؛ البته علی‌رغم فعالیت‌های نسبتاً گسترده کشاورزی در منطقه مطالعاتی، پایین بودن غلظت نیترات می‌تواند ناشی از اختلاط عمودی آرام در زون اشباع باشد که باعث رقیق شدن غلظت‌های ورودی مختلف نیترات به سفره در طول مسیر جریان آب می‌شود. لذا باتوجه‌به پایین بودن ریسک آلودگی در آبخوان دشت ابرکوه و به‌منظور حفظ وضعیت موجود، پیشنهاد می‌شود که در رابطه با مصرف صحیح کودهای شیمیایی، کنترل علمی و عملی صورت پذیرد تا از افزایش احتمالی این یون در خاک و حرکت آن به طرف آبخوان جلوگیری شود.

معنی‌دار است؛ این در حالی است که با وجود بالا بودن نسبی ضرایب همبستگی سایر مدل‌ها ( $R>0.5$ )، هیچ رابطه معنی‌داری براساس سایر مدل‌ها وجود ندارد. لذا از بین ۵ مدل موردبررسی در مطالعه حاضر، تنها می‌توان مدل دراستیک را به‌عنوان مدل بهینه برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان ابرکوه در برابر آلودگی معرفی کرد. نتایج تحقیق جواد و همکاران (۲۰۱۱) و هووان و همکاران (۲۰۱۲) در معرفی مدل دراستیک به‌عنوان مدل مناسب برای نشان دادن پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی، مؤید نتایج تحقیق حاضر است. از طرفی، بررسی غلظت‌های نیترات در چاه‌های نمونه‌برداری نشان می‌دهد که بیشترین میزان نیترات در محدوده غربی دشت ابرکوه به میزان ۲۳/۳ میلی‌گرم در لیتر است که به‌نظر می‌رسد علت آن میزان بیشتر فعالیت‌های کشاورزی در این بخش به‌دلیل کیفیت مناسب آب برای کشاورزی است. درضمن، کمترین میزان نیترات در بخش‌های شمالی دشت به میزان ۱۰ میلی‌گرم در لیتر است. باتوجه‌به استانداردهای سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، حداکثر غلظت نیترات آب برای مصرف شرب ۴۵ میلی‌گرم در لیتر

## منابع

1. Akbari. G.H. and Rahimi. M., 2011. Sensitivity analysis of water at higher risk subjected to soil contaminations. Computational Methods Civil Engineering. Vlo. 2., No. 1., pp: 83-94
2. Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H. and Petty, R. J., 1987. DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrologic settings. US EPA Report, 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK, 641 pp
3. Assaf H, Saadeh M. Geostatistical assessment of groundwater nitrate contamination with reflection on DRASTIC vulnerability assessment: the case of the Upper Litani Basin, Lebanon. Water Resour Manage 2009; 23(5):775-96.
4. Aydi, W., Saidi, S., Chalbaoui, M., Chaibi, S., and Ben Dehi, H. 2013. Evaluation of the Groundwater Vulnerability to Pollution Using an Intrinsic and a Specific Method in a GIS Environment: Application to the Plain of Sidi Bouzid (Central Tunisia). Arabian Journal for Science and Engineering. 38(7): 1815-1831
5. Civita., V. 2010. The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination. J. Water Resource and Protection, 2: 14-28
6. Civita, M, 1991. La carte della vulnerabilita` degli acquiferi all'inquinamento: Teoria e Pratica, Pitagora editrice, Bologne, Italie.,
7. Faryabi M., Kalantari N., Rahimi, M.H., 2006. The hydrogeo assessment of groundwater in the Baghmalek plain using composite diagrams, saturation index and ion ratios. Conference of Geology, 24p.
8. Foster S.S.D., Hirata R., Gomes D., D'Elia M., and Paris M., 2002 Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies. The World Bank, Washington, D.C., 103 pp
9. Gogu, R. & Dassargues, A., Current trend and future challenge in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods, Journal of environmental geology (1999) 39(6) 549-559
10. Houan, H., Wang. J., 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. Vol(440).1.14-23

11. Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M.H., and Mohammadi, K., 2011. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using Nitrate measurements in agricultural areas. *Journal of Agriculture Science*. Vol 13(2), 239-249.
12. Kavehkar N., Javadi S., Mohammadi K., Khayat kholghi M., 2007. Modified DRASTIC method and its application in Iran, Twenty-eighth Conference of Earth Sciences, 70P.
13. Khemiri, S., Khnissi, A., Ben Alaya, M., Saidi, S., and Zargouni, F., 2013. Using GIS for the Comparison of Intrinsic Parametric Methods Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Scenarios of Semi Arid Climate. The Case of Foussana Groundwater in the Central of Tunisia. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 835-845
14. Ribeiro, L., 2000. Desenvolvimento de um índice para avaliar a susceptibilidade dos aquíferos a`contaminacao, Nota interna (nao publicada), ERSHA-CVRM, Portugal.
15. Stigter T, Almeida P, Carvalho DA, Ribeiro L. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison on a regional scale. *Hydrogeol J* 2006; 14(3): 79–99.
16. U.S. EPA., 1995, *Drinking Water Standards*. U.S. EPA, New York.

## Comparison of methods of evaluating groundwater vulnerability to contamination in arid regions: a case study of Abarkooh plain

Mohammad Hasanzadeh nafooti<sup>1\*</sup>, Zohre Ebrahimi<sup>2</sup>, Aliakbar Jamali<sup>3</sup>

Received: 22/2/2017

Accepted: 10/5/2017

### Abstract

The issue of protection of groundwater against pollution is of crucial significance. Groundwater vulnerability maps provide useful information to protect groundwater resources and evaluate the potential for water quality improvement with changes in agricultural practices and land use applications. In Yazd province, especially in Abarkooh, the majority of agricultural and drinking water is provided by groundwater; thus, the prevention of pollution and quality consistency is very important. The intrinsic vulnerability of the Abarkooh aquifer to contamination was assessed using the well-known SI, SINTACS, GODS, AVI and DRASTIC methods. The data from these models was first collected and entered into the software of a geographic information system (GIS) to provide the required layers. The use of overlapping techniques and weight coefficients for each layer provided the final plain of vulnerability. In the next step, the accuracy of the models was evaluated by fitting a regression line between the observations and estimated values in the sampling wells. The results showed that there was no significant relation between the NO<sub>3</sub> values and pollution potential as shown by GODS, but there was a significant relation at the 1% level ( $R = 0.81$ ) between these values in DRASTIC. This model is introduced as suitable for classifying of the pollution potential in the study area. The aquifer of Barkooh plain was divided to three vulnerability classes based on the DRASTIC model. The vulnerability classes from this model showed that most of the plain is without risk and has very low vulnerability.

**Keywords:** Vulnerability, Abarkooh plain, DRASTIC, GODS, SI, SINTACS, AVI, Nitrate, Pollution.

1. Associate professor, Department of Agricultural and Natural Recourses Engineering, Islamic Azad University, Meybod Branch

2. PhD in de-desertification, Faculty of Natural Resources, University of Kashan

3. Associate professor, Department of Agricultural and Natural Recourses Engineering, Islamic Azad University, Meybod Branch