

## مقایسه پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان حوزه نکارود با استفاده از مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI

مریم مروتی\*<sup>۱</sup>، سیده عالمه صباغ<sup>۲</sup>، عارف صابری<sup>۳</sup>

### چکیده

آب زیرزمینی اصلی‌ترین منبع آب شیرین در منطقه نکارود در استان مازندران است. افزایش جمعیت، توسعه کشاورزی و صنایع تأثیر منفی بر خصوصیات کمی و کیفی آب زیرزمینی در دشت نکارود گذاشته است. مدیریت و حفاظت این منابع امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین برای جلوگیری از آسیب‌های محیط‌زیستی حاصل از آلودگی و برداشت منابع آب زیرزمینی در این منطقه برنامه‌ریزی اصولی در منطقه باید صورت گیرد. در این تحقیق با استفاده از سه مدل DRASTIC، SINTACS و SI به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت نکارود پرداخته شد. برای این منظور ابتدا پارامترهای لازم برای مدل‌های مذکور شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه، منطقه غیراشباع، نوع خاک، محیط آبخوان، توپوگرافی، هدایت هیدرولیکی و کاربری اراضی منطقه ارزیابی، امتیازدهی و نقشه هم‌پوشانی تهیه شد. برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌ها از داده‌های نیترات و pH در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ نیز استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل DRASTIC دارای بیشترین مقدار همبستگی با نیترات که عامل اصلی در آلودگی منابع آب زیرزمینی است می‌باشد و منطقه شمال و شمال غربی حوزه دارای بیشترین مقدار آسیب‌پذیری با ۵۲/۹۷ درصد است. آزمون من‌کنندال برای تعیین روند عناصر نیز نشان داد که عناصر نیترات روندی ندارد ولی مقدار شاخص ZS برای pH در سال ۱۳۹۳ برابر با ۸/۶۳۸ بوده و روند افزایشی دارد، این بدین معنا است که این شاخص در سال ۱۳۹۴ روند افزایشی و معنی‌دار در سطح ۰/۹۵ داشته است. نتیجه کلی نشان داد که DRASTIC مدل مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری دشت است و برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران می‌توانند به عنوان راهکاری مناسب و با صرفه در جلوگیری از افزایش آلودگی بهره بگیرند.

**واژگان کلیدی:** آب زیرزمینی، آزمون من‌کنندال، آسیب‌پذیری آبخوان، پهنه‌بندی آلودگی، حوزه نکارود.



### مقاله پژوهشی

۱. دانشیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

[mymorovati@ardakan.ac.ir](mailto:mymorovati@ardakan.ac.ir)

\* نویسنده مسئول

۲. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

[s.a.sabbagh72@gmail.com](mailto:s.a.sabbagh72@gmail.com)

۳. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

[aref.saberi@yahoo.com](mailto:aref.saberi@yahoo.com)

۲۲۰۴-۱۰۲۳

شناسه مقاله:

۱۸۴-۱۹۷

شماره صفحه پیاپی:

۱۴۰۷/۰۱/۲۱

تاریخ دریافت:

۱۴۰۷/۰۵/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۷/۰۶/۳۰

انتشار آنلاین:

۱۴۰

زمان پذیرش: روز

### استناددهی:

مروتی، م، صباغ، س.ع.، و صابری، ع. (۱۴۰۱). مقایسه پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان حوزه نکارود با استفاده از مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI. مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی، ۲(۲)، ۴۶-۵۹.

## ۱- مقدمه

آب زیرزمینی یکی از منابع مهم و عظیم در عرصه استفاده از منابع آب شیرین است که به دلیل فراوانی، کیفیت و هزینه نسبتاً پایین بهره‌برداری در بخش‌های کشاورزی و شرب به خصوص در کشورهای در حال توسعه بسیار حائز اهمیت است (Kandahar et al., 2016). به طوری که فعالیت‌های انسانی در دو مقیاس منطقه‌ای و جهانی باعث روند افزایش بهره‌وری از این منبع شده است (MacDonald et al., 2016). حساسیت منابع آب زیرزمینی به آلودگی نسبت به منابع آب سطحی بیشتر است و در سراسر جهان نیز تصفیه طبیعی منابع آب زیرزمینی به دلیل توسعه شهرنشینی کاهش یافته است. از طرفی وجود سیستم‌های زهکشی غیربرنامه‌ریزی شده، آلودگی محلی و فعالیت‌های انسانی ریسک آسیب‌پذیری منابع آب را افزایش داده است (Kumar et al., 2015; Nlend et al., 2018; Howard and Gerber, 2018). آلوده شدن این منابع متأثر از عوامل طبیعی و انسانی در هر جامعه است که از بین رفتن کیفیت منابع آب زیرزمینی ناشی از فعالیت‌های انسانی نگرانی جدی به همراه دارد، زیرا تقریباً نیمی از جمعیت جهان هستی برای تامین بخشی از نیازهای روزمره وابسته به این منابع هستند (Brindha and Elango, 2015; Victorine Neh et al., 2015). افزایش جمعیت و هزینه زیاد توسعه منابع آب سطحی، باعث وارد آمدن فشارهای مضاعف به منابع آب زیرزمینی شده است. به طوری که امروزه بخش قابل توجهی از منابع مصرفی (شرب، کشاورزی و صنعتی) توسط منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. ولی استفاده گزاف از این منبع مشکلاتی را به دنبال خواهد داشت و در صورت آلودگی این منبع اقدامات رفع آلودگی بسیار هزینه‌بر، زمان‌بر و فرآیند آن پیچیده خواهد بود. بنابراین جلوگیری از آلودگی منابع آب زیرزمینی بهترین راه حل است که این کار با شناسایی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان مقدور می‌شود. مفهوم آسیب‌پذیری آبخوان در سال ۱۹۶۰ در فرانسه برای آگاهی بخشی در مورد آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (ندیری و همکاران، ۱۳۹۶). با این حال روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک آبخوان وجود دارد که مدل‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی حساسیت این منابع را نسبت به آلودگی تخمین می‌زنند و به شکل نقشه آسیب‌پذیری بیان می‌شوند که به نوبه خود منطقه را به چندین زیرحوضه هیدروژئولوژیکی با سطوح مختلف از شدت آلودگی جدا می‌کند (Kumar et al., 2015). در میان روش‌های مبتنی بر اطلاعات آماری، مدل DRASTIC در ایجاد نقشه‌های آسیب‌پذیری، یکی از روش‌های مناسب برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی است (Şener and Şener, 2015; Ribeiro et al., 2017). تحقیقات زیادی در داخل و خارج از کشور برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان صورت گرفته است از جمله؛ حسن‌زاده نفوتی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به بررسی حساسیت‌پذیری ذاتی آبخوان ابرکوه به آلودگی با استفاده از مدل‌های SI، SINTACS، GODS، AVI و DRASTIC و صحت‌سنجی با استفاده از نیترات پرداختند. نتایج نشان داد که رابطه معنی‌داری بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی حاصل از روش‌های SI، SINTACS، GODS و AVI وجود ندارد ولی در سطح یک درصد آماری بین مقادیر نیترات و پتانسیل آلودگی مدل DRASTIC رابطه معنی‌دار می‌باشد. رادمنش و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت جارمه با استفاده از دو مدل DRASTIC و SINTACS پرداختند. با صحت‌سنجی نتایج پارامترهای دو مدل با نقشه نیترات مدل SINTACS به عنوان مدل مناسب برای منطقه تعیین شد. اصغری‌مقدم و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل‌های DRASTIC و SINTACS به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اشنویه پرداختند. پس از بهینه‌سازی و کارایی بیشتر مدل‌ها و تعیین همبستگی هریک از پارامترهای مدل با مقادیر نیترات، نتایج نشان داد که مدل DRASTIC اصلاحی با ۷۶/۳ درصد به عنوان مدل مناسب در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان دشت می‌باشد. اصغری‌مقدم و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش‌های SI، SINTACS و DRASTIC پرداختند. پس از محاسبه شاخص همبستگی<sup>۱</sup> و تعیین رابطه مدل‌های SI، SINTACS و DRASTIC با نقشه نیترات منطقه، نتایج نشان داد که مدل DRASTIC دارای بیشترین مقدار همبستگی با مقدار نیترات می‌باشد. Mencio et al. (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌های SI، SINTACS و IPNOA به بررسی آلودگی آبی ناشی از نیترات با منشأ کشاورزی در کاتالونیا<sup>۲</sup> (شمال شرقی اسپانیا) که یک منبع اصلی آلوده کننده محسوب می‌شود، پرداختند. نتایج نشان داد که غلظت نیترات در مناطقی با کاربری کشاورزی و دامداری به صورت گسترده متمرکز شده است. Hamza et al. (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای در ناحیه متلین-راس<sup>۳</sup> در شمال تونس با بکارگیری مدل‌های SI، SINTACS و DRASTIC به این نتیجه رسیدند که مدل SI کارایی بهتری در تعیین مناطق مستعد آلودگی نسبت به بقیه دارد و روش DRASTIC و SINTACS ماهیت آلاینده و کاربری زمین را به عنوان عامل مدیریتی آسیب‌پذیری ویژه در نظر نمی‌گیرد. Rahman et al. (۲۰۲۱) به ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در بخش جنوب مرکزی بنگلادش با استفاده از مدل DRASTIC پرداختند. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC نشان داد که سیستم آبخوان منطقه مورد مطالعه (۵۷ درصد) از نظر آلودگی در معرض خطر متوسطی قرار دارد. شاخص کیفیت آب زیرزمینی نشان داد که ۸۹ درصد از منطقه مورد مطالعه کیفیت آب ضعیفی داشته و برای شرب نامناسب است. Kumar et al. (۲۰۲۲) از تکنیک‌های MCDA در بهینه‌سازی وزن‌ها و رتبه‌بندی، مدل DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. یافته‌های این مطالعه این است که استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی MCDA برای بهینه‌سازی وزن‌ها و رتبه‌بندی‌ها، مدل DRASTIC برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به در دسترس بودن

1. Correlation Index (CI)

2. Catalonia

3. Metline-Ras

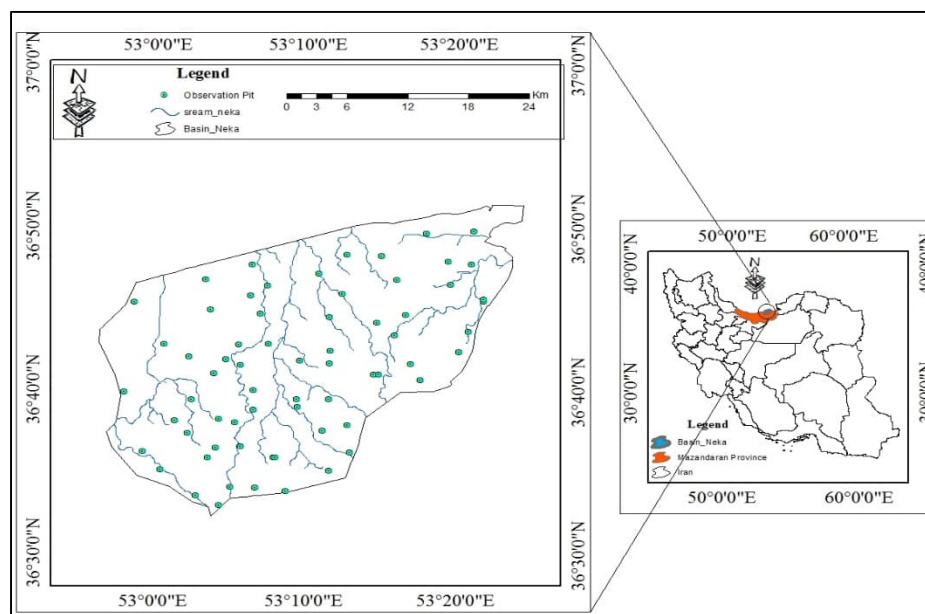
داده‌های هیدروژئولوژیکی، منطقه مورد مطالعه آزمایشی و سطح دقت مورد نیاز برای اختصاص داده‌ها بستگی دارد. حسن‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) آسیب‌پذیری آبخوان دشت حاجی‌آباد را بر اساس روش‌های DRATIC و SINTACS ارزیابی کردند. نتایج نشان داد طبق برآورد نقشه‌های آسیب‌پذیری تهیه شده برای هر دو روش، بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری مربوط به قسمتی از بخش مرکزی و شرقی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. اسحاقی ایل‌بیگی و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان سبزوآباد با استفاده از مدل DRATIC پرداختند. نقشه DRATIC نشان داد، مساحت خیلی کمی از غرب منطقه مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری کم و مناطق مرکزی دشت دارای آسیب‌پذیری بالا می‌باشد. بقیه قسمت‌های دیگر منطقه دارای آسیب‌پذیری متوسط می‌باشد.

با توجه به اهمیت منابع آب‌زیرزمینی در استان مازندران در مصارف کشاورزی، در این تحقیق به بررسی منابع آب زیرزمینی حوزه آبخیز نکارود در استان مازندران و ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت با استفاده از مدل‌های DRATIC، SINTACS و SI و صحت‌سنجی نتایج مدل با استفاده از تعیین نقشه عناصر آلوده‌کننده منابع آب (نیترات و pH) پرداخته شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهرستان نکا در استان مازندران در عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۹ دقیقه غربی نصف‌النهار گرینویچ در ۲۲ کیلومتری جنوب دریای مازندران قرار گرفته است. رودخانه نکارود از میان شهر می‌گذرد. موقعیت آبخوان دشت نکارود بین ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه و ۵۴ ثانیه تا ۳۶ درجه ۵۳ دقیقه ۱۰ ثانیه عرض شمالی (اختلاف جنوبی‌ترین تا شمالی‌ترین منطقه ۳۲ دقیقه ۱۶ ثانیه) و ۵۳ درجه و ۱۴ دقیقه ۲۴ ثانیه تا ۵۴ درجه و ۱۷ دقیقه و ۴۸ ثانیه طول جغرافیایی قرار گرفته است. رودخانه نکارود دارای آب دائمی است و میانگین بارندگی ناحیه ۹۰۰ میلی‌متر در سال است. شکل ۱ موقعیت حوزه آبخیز نکارود را نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز نکارود در استان مازندران

### ۲-۲- مواد و روش‌ها

اساس مدل DRATIC شامل هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی عمق آب زیرزمینی<sup>۱</sup>، تغذیه<sup>۲</sup>، محیط آبخوان<sup>۳</sup>، محیط خاک<sup>۴</sup>، توپوگرافی<sup>۵</sup>، تاثیر ناحیه غیراشباع<sup>۶</sup> و ضریب هدایت هیدرولیکی<sup>۷</sup> می‌باشد. هریک از ضرایب مدل توسط نرم‌افزار ARC GIS پردازش می‌شوند. رتبه مدل بین ۱ تا ۱۰ متغیر است و از کمترین (۱) تا بیشترین (۱۰) خطر آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود (Panagopoulos et al., 2006). مجموع وزن دهی پارامترهای مدل DRATIC در رابطه ۱ نشان داده شده است (Aller et al. 1987).

1. Depth to water (D)
2. Recharge (R)
3. Aquifer media (A)
4. Soil media (S)

5. Topography.(T)
6. Impact of Vadose zone (I)
7. Conductivity of aquifer (C)

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه ۱، DI شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC؛ حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه؛ r نرخ ارزش (رتبه) و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶).

مدل SINTACS نیز برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده است. روش SINTACS اولین بار در جنوب ایتالیا برای بررسی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه توسط Civita (۱۹۹۰) استفاده شد. اساس این روش نیز مانند مدل DRASTIC شامل هفت پارامتر عمق تا سطح ایستابی<sup>۱</sup>، تغذیه<sup>۲</sup>، اثر منطقه غیراشباع<sup>۳</sup>، نوع خاک<sup>۴</sup>، لایه هدایت هیدرولیکی<sup>۵</sup>، هدایت هیدرولیکی<sup>۶</sup> و توپوگرافی<sup>۷</sup> برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد. روش SINTACS مشتق شده مدل DRASTIC است. یعنی پارامترهای مشترکی دارند فقط با این تفاوت که وزن‌دهی دو روش با هم فرق دارد و همچنین روش SINTACS از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است (Civita, 1990). هریک از پارامترها بر اساس تاثیر در آسیب‌پذیری، رتبه‌ای بین صفر تا ۱۰ به خود اختصاص می‌دهند و به آنها وزن نسبی بین ۱ تا ۵ داده می‌شود و در نهایت شاخص آسیب‌پذیری با رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه بالا  $P_i$  رتبه هر پارامتر و  $W_i$  وزن نسبی پارامترها است (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶).  
مدل SI: این روش نیز برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به مواد آلاینده ارائه شده است. در این روش پنج پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، توپوگرافی و کاربری اراضی<sup>۸</sup> مثل مدل DRASTIC مورد استفاده قرار می‌گیرد (معروفی و همکاران، ۱۳۹۱). هر پارامتر بر اساس واحدهای تشکیل دهنده بین ۱۰ تا ۱۰۰ ارزش‌گذاری شده و پس از وزن‌دهی و تلفیق، شاخص نهایی SI بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶).

$$SI = DrDw + RrRw + ArAw + TrTw + LUrLUw \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه ۳، SI شاخص آسیب‌پذیری است و حروف بزرگ در رابطه ۳ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه؛ r نرخ ارزش (رتبه)؛ w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود. وزن‌دهی و کلاسه‌بندی هریک از پارامترهایی مدل DRASTIC در جدول ۱ نشان داده شده است. نحوه تهیه لایه‌های عمق آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان و توپوگرافی همانند روش DRASTIC است. نقشه کاربری اراضی منطقه ارزیابی و رتبه‌دهی شد. رتبه‌دهی چهار پارامتر مدل SI مشابه DRASTIC است با این تفاوت که محدوده رتبه‌ها در این روش بر خلاف DRASTIC بین ۱۰ تا ۱۰۰ است.

جدول (۱): وزن‌دهی پارامترهای مدل SI

پارامتر	عمق آب زیرزمینی	تغذیه خالص	محیط آبخوان	توپوگرافی	کاربری اراضی
وزن	۰/۱۸۶	۰/۲۱۲	۰/۲۵۹	۰/۱۲۱	۰/۲۲۲

عمق آب زیرزمینی: فاصله بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی، عمق برخورد را مشخص می‌کند. نقاط پیژومتری در محیط Arc GIS 10.5 با استفاده از روش کریجینگ<sup>۹</sup> پهنه‌بندی و نقشه عمق چاه‌ها بدست آمد.

تغذیه آب زیرزمینی: تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می‌رسد. تغذیه خالص نیاز به بیلان آب زیرزمینی دارد. جهت تهیه نقشه تغذیه خالص از روش پیسکوپو (۲۰۰۱) استفاده شد. رابطه ۴ معادله پیسکوپو را برای برآورد مقدار تغذیه در حوضه نمایش می‌دهد.

$$\text{Nutrition amount} = S+R+S\% \quad \text{رابطه (۴)}$$

برای محاسبه تغذیه خالص ابتدا نقشه بارندگی منطقه با توجه به داده‌های متوسط ماهانه بارش و ارتفاع ایستگاه‌ها تهیه شد. سپس نقشه شیب نیز با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی تهیه شد. در ادامه نقشه نفوذپذیری، با توجه به گروه‌های هیدرولوژیکی خاک تهیه و در نهایت طبق جدول ۲ نقشه تغذیه خالص برای حوزه با روش پیسکوپو در محیط Arc GIS 10.5 تهیه شد.

1. Groundwater Table Depth from Surface (S)  
2. Actual Infiltration (I)  
3. Self-Depuration Effect Unsaturated Zone (N)  
4. Overburden Type (T)  
5. Hydrogeological Characteristics of the Aquifer (A)

6. Hydraulic Conductivity (C)  
7. Topographical (S)  
8. Land use  
9. Kriging

محیط آبخوان: محیط آبخوان نیازمند خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده منطقه اشباع مانند میزان تخلخل، جنس، اندازه، ذرات و جورشدگی ذرات است (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶). برای این منظور با استفاده از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای منطقه جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان (بخش اشباع) مشخص شد.

جدول (۲): رتبه پارامترهای تغذیه آبخوان با روش بیسکوپو (۲۰۰۱)

میزان تغذیه		نفوذپذیری خاک		بارندگی (میلی متر)		درصد شیب	
رتبه	دامنه	رتبه	شدت	رتبه	میزان	رتبه	میزان
۱۰	۱۱-۱۳	۵	زیاد	۴	بیشتر از ۸۵۰	۴	کمتر از ۲
۸	۹-۱۱	۴	متوسط تا زیاد	۳	۷۵۰-۸۰۰	۳	۲-۱۰
۵	۷-۹	۳	متوسط	۲	۵۰۰-۷۰۰	۲	۱۰-۳۳
۳	۵-۷	۲	کم	۱	کمتر از ۵۰۰	۱	بیشتر از ۳۳
۱	۳-۵	۱	خیلی کم				

محیط خاک: خاک و محیط آن در حرکت آلاینده‌ها تاثیر بسزایی دارد. بافت ریزدانه حرکت مواد را کند و بافت درشت‌دانه حرکت مواد را سریع‌تر می‌کند (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۹۶). برای این منظور جهت تهیه نهایی محیط خاک از نقشه رقوم محیط خاک، استفاده شده است. توپوگرافی: لایه رقوم ارتفاعی منطقه در پیکسل سائز مناسب تهیه و رتبه‌دهی و وزن هر طبقه بدست آمد. این لایه تغییرات شیب سطح زمین را نشان می‌دهد.

محیط غیراشباع: منطقه غیراشباع، رسوبات موجود از سطح ایستابی تا سطح خاک را شامل می‌شود. برای تهیه این نقشه از روشی مشابه لایه محیط آبخوان استفاده شد با این تفاوت که از ضخامت و جنس لایه‌های بالای سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای استفاده می‌شود. هدایت هیدرولیکی: این لایه مربوط به نفوذپذیری سفره یا توانایی مواد سفره به منظور انتقال آب یا مواد محلول می‌باشد. با استفاده از اطلاعات قابلیت انتقال سفره و ضخامت اشباع آبخوان، میزان هدایت هیدرولیکی محاسبه و نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان دشت، تهیه شد.

## ۲-۳- تجزیه و تحلیل‌های زمین آماری

روش‌های درون‌یابی را می‌توان به دو روش، درون‌یابی قطعی و درون‌یابی زمین آماری تقسیم‌بندی کرد. درون‌یابی قطعی شامل فاصله وزنی معکوس<sup>۱</sup>، توابع پایه‌ای شعاعی، روش چند جمله‌ای جهانی و روش چند جمله‌ای محلی می‌باشد (صابری و همکاران، ۱۳۹۵). همچنین روش‌های رایج در درون‌یابی زمین آماری شامل کریجینگ، کوکریجینگ<sup>۲</sup> می‌باشد، که در این پژوهش به منظور درون‌یابی و تهیه نقشه‌ها از روش‌های درون‌یابی کریجینگ استفاده گردید. این روش متکی بر میانگین متحرک وزنی است که علاوه بر مقادیر برآورد شده، میزان خطای تخمین در هر نقطه را نیز مشخص می‌نماید (صابری و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات پارامترهای نیترا و pH در این تحقیق با استفاده از روش من‌کندال<sup>۳</sup> محاسبه گردید.

## ۳- نتایج

در این مطالعه با استفاده از پارامترهای موجود، ارزیابی با مدل DRASTIC، SINTACS و SI انجام شد. لایه‌های تهیه شده به صورت رستر<sup>۴</sup> ذخیره و در محیط Arc GIS 10.5 براساس تابع هم‌پوشانی تلفیق و نقشه آسیب‌پذیری دشت نکارود تهیه گردید (شکل ۲). لایه‌های سه مدل DRASTIC، SINTACS و SI هرکدام دارای وزن خاصی هستند. برای ترکیب و تلفیق این لایه‌ها از محیط Arc GIS 10.5 استفاده شد. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC برای دشت نکارود با استفاده از لایه‌های موجود بین ۲۵۸ تا ۵۵۰ بدست آمد که با توجه به طبقه‌بندی Aller et al. (۱۹۸۷) به چهار طبقه (کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم شد. سپس مشخص شد که مقدار این شاخص برای منطقه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد تنها ۱۷/۳۳ درصد و شاخص با پتانسیل آسیب‌پذیری کم ۵۲/۹۷ درصد از کل مساحت را به خود اختصاص داده است (جدول ۳). با مراجعه به شکل ۳ نیز مشخص می‌شود که بیشترین درصد پتانسیل آلودگی در قسمت شمال و شمال غربی دشت قرار گرفته است.

نتایج ارزیابی با مدل SINTACS نشان داد که درصد مساحت منطقه با پتانسیل آلودگی خیلی زیاد بیشتر از مدل DRASTIC برآورد شده است. مقدار پتانسیل مدل در طبقه خیلی زیاد برابر با ۷۱۲/۸۶ و منطقه با پتانسیل کم ۵۲/۳۸ درصد برآورد شد. وضعیت کمی آلودگی مدل SINTACS در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به هم‌پوشانی پارامترهای موثر در مدل SINTACS طبق شکل ۴ گستره آلودگی حوضه براساس خروجی مدل SINTACS از شمال غرب تا شمال شرق حوضه واقع شده است.

1. Inverse Distance Weighting (IDW)

2. Cokriging

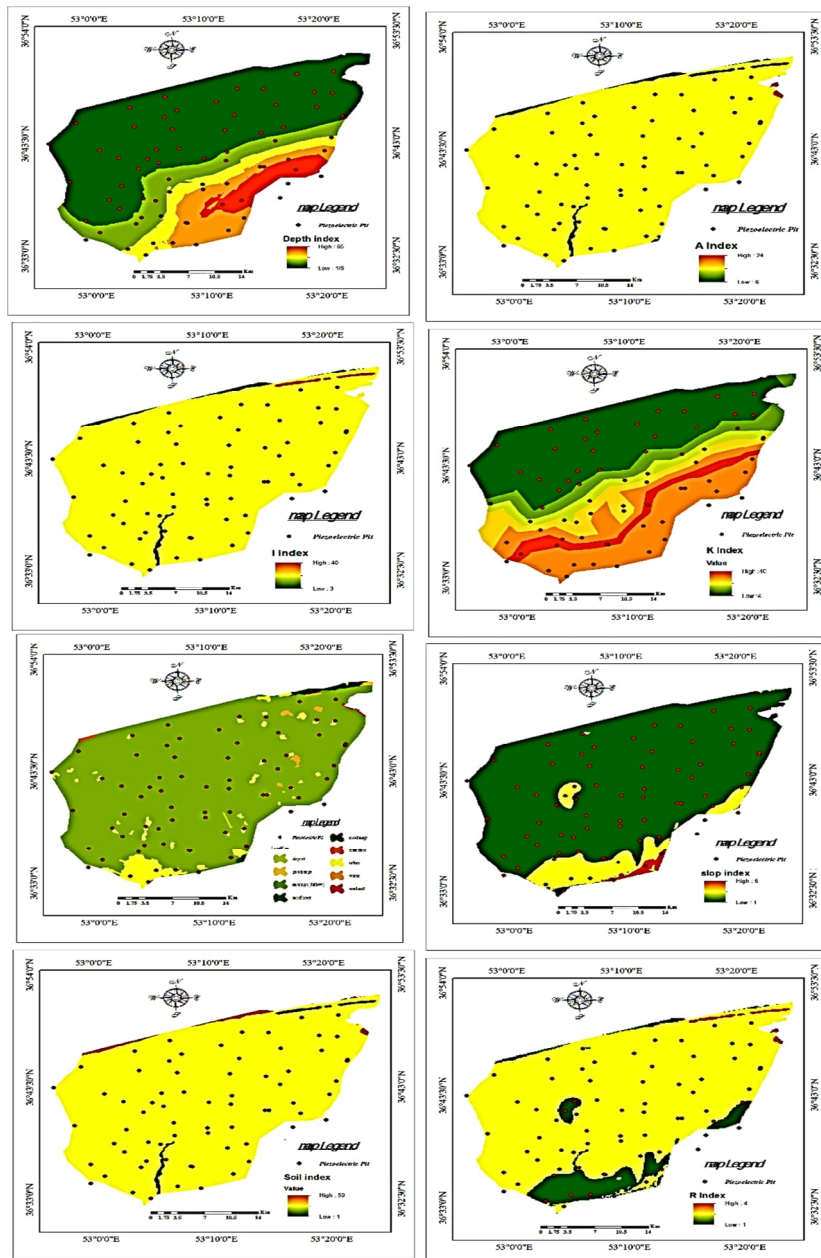
3. Mann-Kendall

4. Raster

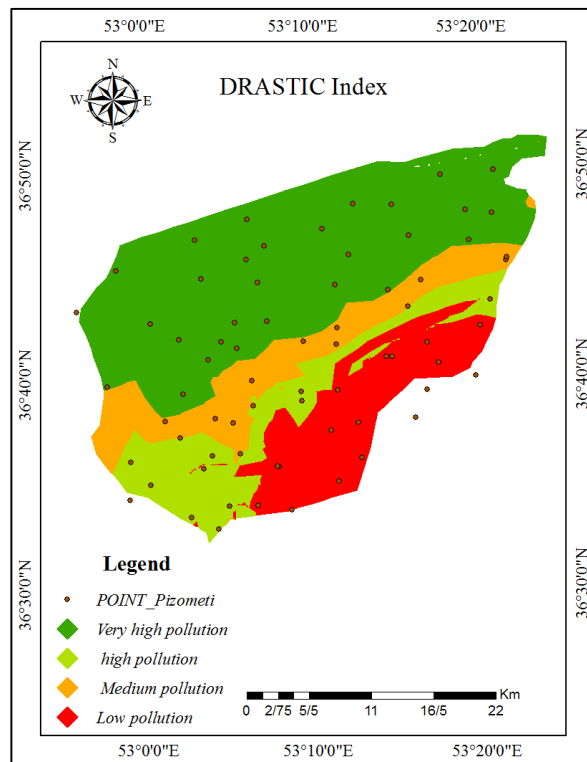
نتایج مدل SI تا حدودی متفاوت با دو مدل DRASTIC و SINTACS است. در این مدل پنج پارامتر در ارزیابی آلودگی آب زیرزمینی دشت نکارود ارزیابی شدند. نقشه کاربری اراضی منطقه در این مدل، با چهار پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان و توپوگرافی، امتیازدهی و نقشه نهایی مدل بدست آمد. نتایج مدل نشان داد، مناطق با ریسک آسیب‌پذیری زیاد دارای مساحت بیشتر بوده و ۶۲/۳ درصد از کل مساحت منطقه را شامل می‌شود. شکل ۵ وضعیت گرافیکی گستره آلودگی را نشان می‌دهد؛ که منطقه با ریسک آلودگی بالا دامنه شمال غربی و شرقی حوضه را فراگرفته است. وضعیت کمی آلودگی مدل SI در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (۳): مساحت طبقه‌های آسیب‌پذیری حوزه آبخیز نکارود با مدل SINTACS, DRASTIC و SI

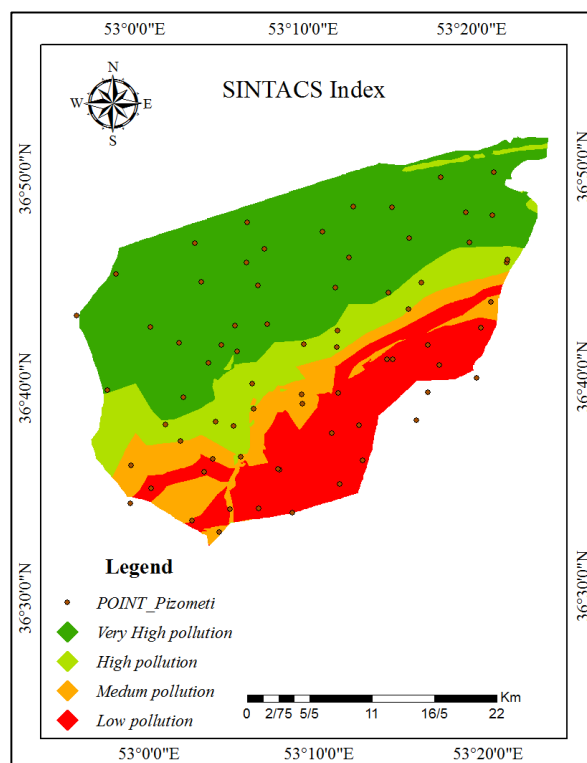
شاخص SI			شاخص SINTACS			شاخص DRASTIC		
درصد مساحت	مساحت	طبقه‌بندی	درصد مساحت	مساحت	طبقه‌بندی	درصد مساحت	مساحت	طبقه‌بندی
۷/۲۲	۶۴/۰۵۶	کم	۲۰/۷۲	۱۸۴/۴۲	کم	۱۷/۳۴	۱۵۲/۹۲	کم
۱۱/۲۲	۹۹/۵۱۱	متوسط	۱۱/۵۷	۱۰۳/۰۵	متوسط	۱۴/۷۵	۱۳۰/۹۸	متوسط
۱۹/۲۶	۱۷۰/۱۸۲	زیاد	۱۵/۳۳	۱۳۶/۴۶	زیاد	۱۴/۹۴	۱۳۲/۶۱	زیاد
۶۲/۳	۵۵۲/۶۹۵	خیلی زیاد	۵۲/۳۸	۴۶۶/۳۵	خیلی زیاد	۵۲/۹۷	۴۷۰/۳۴	خیلی زیاد



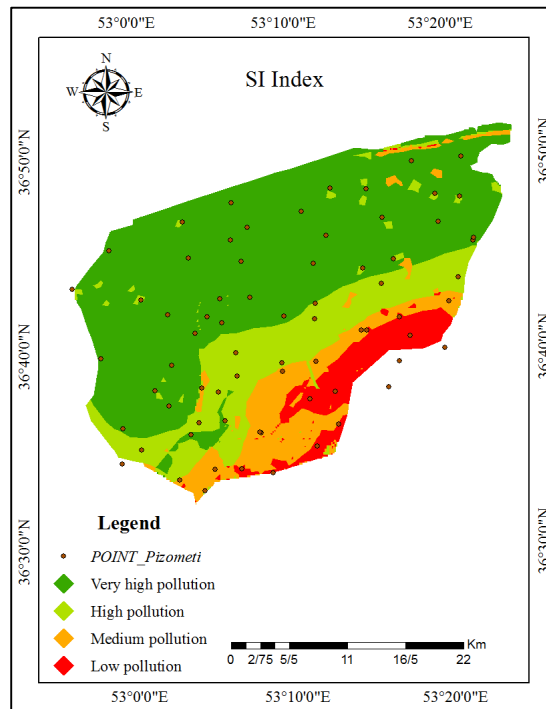
شکل (۲): نقشه پارامترهای موثر در ارزیابی آسیب‌پذیری دشت نکارود



شکل (۳): نقشه همپوشانی مدل DRASTIC بر اساس هفت پارمتر موثر در ارزیابی آلودگی دشت نکارود



شکل (۴): نقشه همپوشانی مدل SINTACS بر اساس هفت پارمتر موثر در ارزیابی آلودگی دشت نکارود



شکل (۵): نقشه هم‌پوشانی مدل SI بر اساس هفت پارامتر موثر در ارزیابی آلودگی دشت نکارود

### ۳-۱- واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI

ارزیابی منابع آب زیرزمینی در حوزه آبخیز نکارود به دلیل شرایط حساس و وضعیت مناسب برای کشاورزی از اهمیت زیادی برخوردار است. در منطقه دشتی حوزه چاه‌های موجود از لحاظ مقدار آلودگی نیترات حاصل از فعالیت صنعتی، مسکونی و بیشتر کشاورزی ارزیابی شد. چون منطقه دارای شیب کم و دارای وضعیت آبی مناسبی می‌باشد، در منطقه فعالیت کشاورزی رواج بیشتری دارد. بنابراین برای ارزیابی دقت مدل‌های انتخابی در تحقیق از عناصر نیترات و وضعیت pH چاه‌های موجود در حوضه در سال ۹۳ و ۹۴ استفاده شد. مقدار تغییرات این دو پارامتر (نیترات و pH) با روش کریجینگ پهنه‌بندی شد. این روش به دلیل کمترین مقدار خطا به عنوان مدلی مناسب برای پهنه‌بندی انتخاب شد که مقدار میانگین مربع خطاها<sup>۱</sup> برای نیترات و pH به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۱/۰۱ می‌باشد (جدول ۴).

جدول (۴): مقادیر خطای برآورد شده مقادیر NO<sub>3</sub> و pH

روش فاصله وزنی معکوس	توان	میانگین مربع خطاها	میانگین درصد مطلق خطا <sup>۲</sup>	میانگین درصد خطا <sup>۳</sup>
نیترات	۱	۱.۰۹	۱/۵۸	۱/۹۵
	۲	۱/۰۵	۱/۸۱	۱/۷۴
	۳	۱.۱	۱/۲۱	۲/۱۱
pH	۱	۱/۱۱	۱/۹	۲/۱۲
	۲	۱/۱۵	۲/۰۵	۱/۳۵
	۳	۱/۰۹	۱/۸	۲/۲۲
روش کریجینگ	توان	میانگین مربع خطاها	میانگین درصد مطلق خطا	میانگین درصد خطا
نیترات	۱	۰.۹۸	۱/۳۴	۱/۱۵
	۲	۰/۹۹	۱/۵۵	۱/۰۷
	۳	۰/۹۸	۱/۱۷	۱/۵۵
pH	۱	۱/۰۵	۱/۶۸	۱/۲۸
	۲	۱/۰۱	۱/۱۲	۱/۰۵
	۳	۱/۰۸	۱/۳۵	۱/۱۱

1. Root Mean Square Error (RMSE)

2. Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

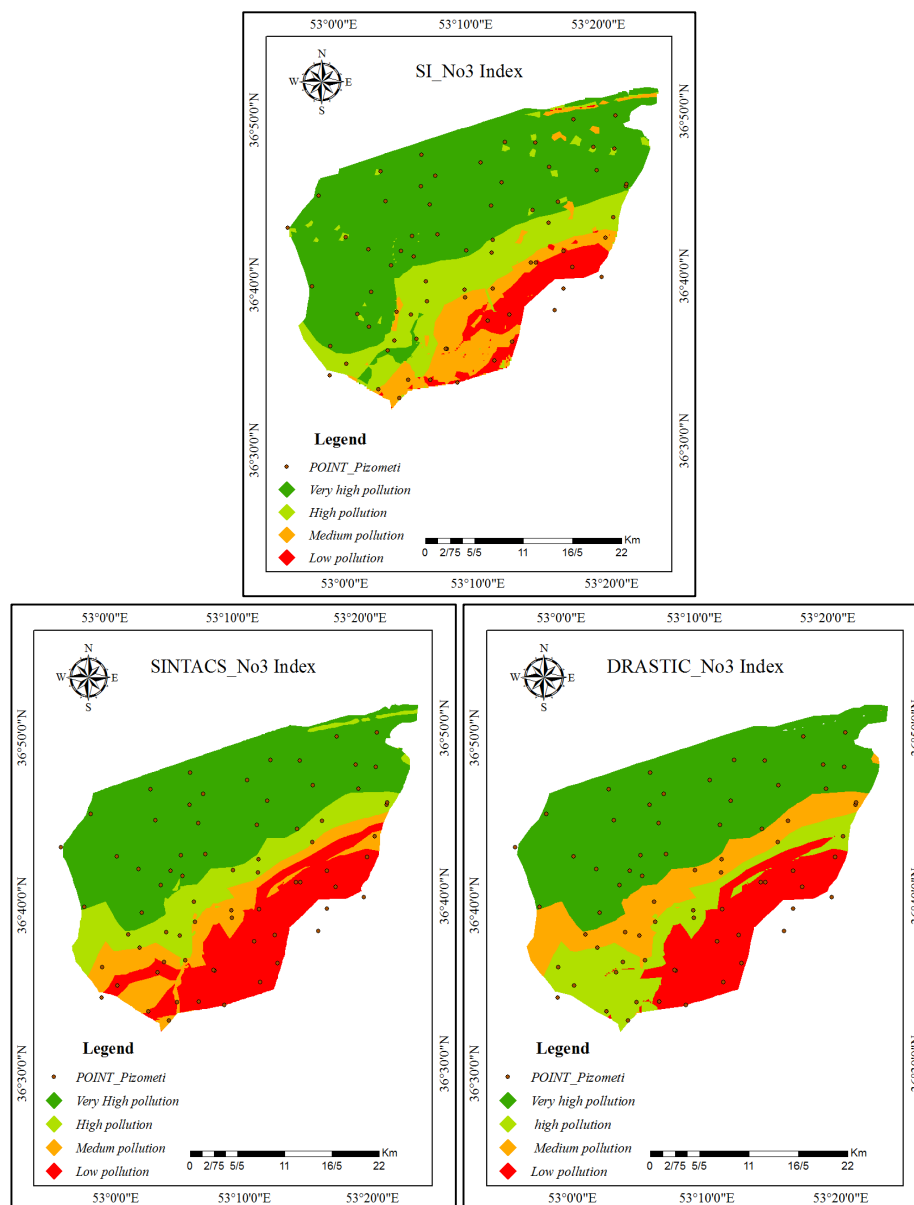
3. Mean Percentage Error (MPE)



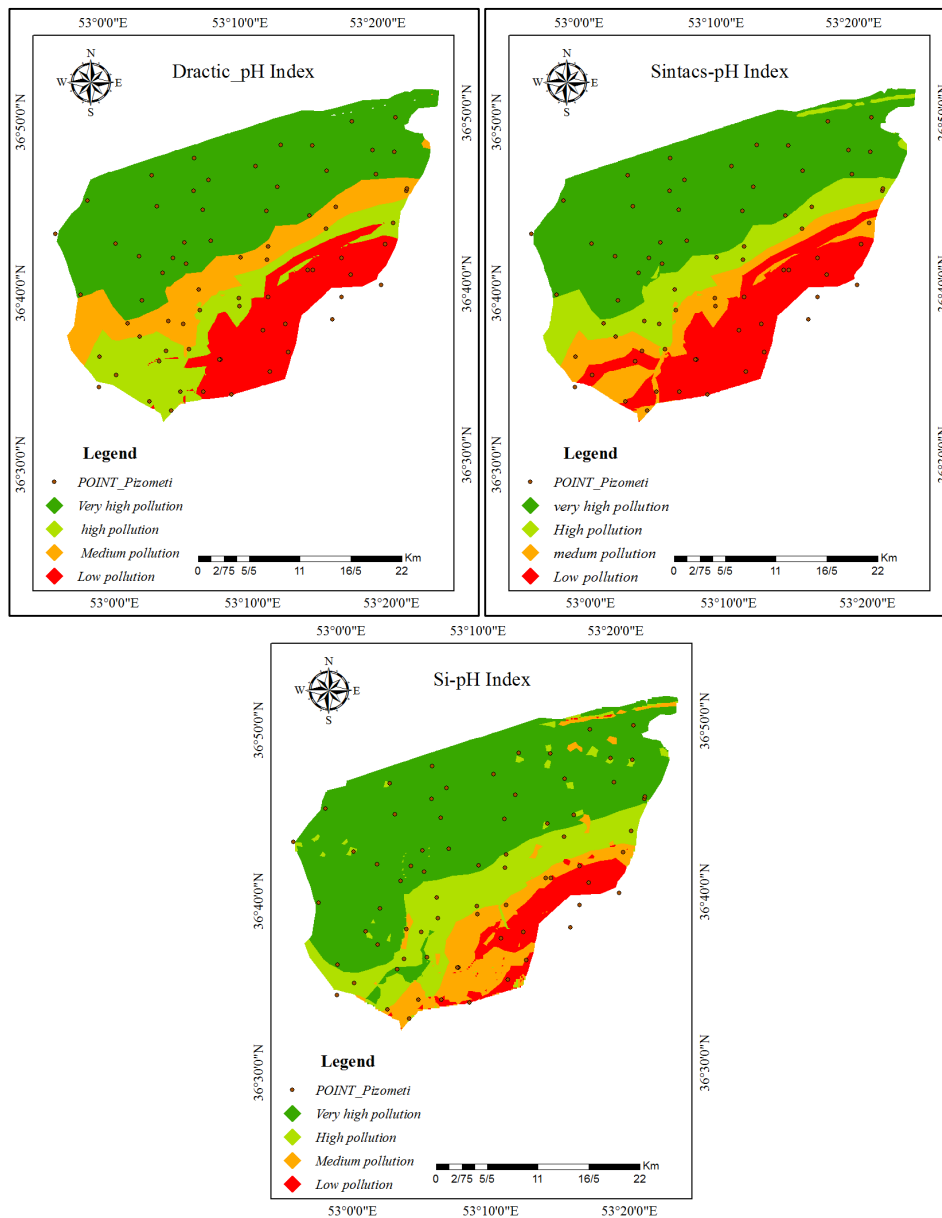
برای صحت‌سنجی مدل‌های استفاده شده در تحقیق با عناصر کیفی منابع آب زیرزمینی از آزمون همبستگی پیرسون نیز استفاده شد. نتایج آزمون در جدول ۵ قابل مشاهده است. نتایج نشان داد که مدل DRASTIC با مقدار تغییرات نیترات در سال ۱۳۹۴ بیشترین همبستگی را داشته و ارتباط معنی‌داری در جهت معکوس دارند؛ بدین معنی که کاهش مقدار آب زیرزمینی می‌تواند تاثیر مثبتی در افزایش مقدار نیترات داشته باشد. مدل SINTACS نیز با نیترات در سطح ۹۵ درصد همبستگی بالایی در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ دارد ولی مدل SI با این عنصر فقط در سال ۱۳۹۳ همبستگی خوب داشته و در سال ۱۳۹۴ همبستگی کمتر شده است. در انتها برای بررسی ارتباط بین تغییرات عناصر نیترات و pH با مدل‌های انتخاب شده در تحقیق از همپوشانی نقشه‌ها استفاده شد که نتایج در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول (۵): ضریب همبستگی عناصر کیفی بامدل‌های پتانسیل آسیب‌پذیری DRASTIC، SINTACS و SI

مدل	نیترات ۲۰۱۴		نیترات (۲۰۱۵)		pH (۲۰۱۴)		pH (۲۰۱۵)	
	همبستگی	p-value	همبستگی	p-value	همبستگی	p-value	همبستگی	p-value
DRASTIC	-۰/۵۸۶	۰/۴۱۴	-۰/۷۵۶	۰/۲۴۴	-۰/۹۸۳*	۰/۰۱۷	-۰/۳۵۹	۰/۶۴۱
SINTACS	-۰/۶۲۵*	۰/۳۷۵	-۰/۶۶۵	۰/۳۳۵	-۰/۳۴۶	۰/۶۵۴	-۰/۷۹۳*	۰/۰۲۷
SI	۰/۷۶۲	۰/۴۳۲	۰/۰۱۲	۰/۲۷۳	-۰/۳۸۲**	۰/۰۰۰	-۰/۰۶۲	۰/۶۱۵



شکل (۶): نقشه همپوشانی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI بر اساس عنصر نیترات در ارزیابی آلودگی دشت نکارود



شکل (۷): نقشه هم‌پوشانی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI براساس عنصر pH در ارزیابی آلودگی دشت نکارود

بررسی روند تغییرات پارامترهای نیترات و pH در این تحقیق با استفاده از روش من‌کندال در جدول ۶ نشان داد که مقدار ZS عنصر نیترات در سال‌های آماری ۹۳ و ۹۴ کمتر از  $\pm 1/96$  می‌باشد که نشان‌دهنده این است که روندی ندارند و pH در سال ۱۳۹۴ نیز مقدار کمتر  $\pm 1/96$  بوده ولی در سال ۱۳۹۳ مقدار آن بیشتر از  $\pm 1/96$  بوده و روند افزایشی دارد. این بدین معنا است که این شاخص در سال ۱۳۹۴ روند افزایشی و معنی‌دار در سطح  $0/95$  داشته است.

جدول (۶): بررسی روند تغییرات پارامترهای نیترات و pH با استفاده از آزمون من‌کندال

پارامتر	ZS	S	p	روند
نیترات (۱۳۹۳)	۱/۱۹۴	۹۲۶	-/۲۳۳	ندارد
نیترات (۱۳۹۴)	۰/۶۲۳	۱۲۱	-/۵۳۳	ندارد
pH (۱۳۹۳)	۸/۶۳۸	۱۵۳۹	۵/۶۸۶	دارد و به صورت صعودی
pH (۱۳۹۴)	۰/۵۸۱	۱۱۲	-/۵۶۱	ندارد

## ۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج همبستگی مدل‌های DRASTIC، SINTACS و SI در جدول ۴ نشان داد که DRASTIC نسبت به دو مدل دیگر برای تعیین آسیب‌پذیری حوضه مناسب‌تر است. این دلیلی بر کارآمد بودن مدل DRASTIC در ارزیابی آسیب‌پذیری دشت نکارود دارد. بر اساس نتایج حاصله از هم‌پوشانی لایه‌های مدل DRASTIC مقدار آن برای منطقه با آسیب‌پذیری خیلی زیاد تنها ۱۷/۳۳ درصد از کل مساحت را به خود اختصاص داده است ولی شاخص با پتانسیل آسیب‌پذیری کم ۵۲/۹۷ درصد را شامل می‌شود. نتایج مدل SINTACS نشان داد که درصد مساحت منطقه با پتانسیل آلودگی خیلی زیاد بیشتر از مدل DRASTIC برآورد شده است. مقدار پتانسیل مدل در طبقه خیلی زیاد برابر با ۷۱۲/۸۶ است و منطقه با پتانسیل کم ۵۲/۳۸ درصد برآورد شد. در نهایت نتایج مدل SI نشان داد که منطقه با پتانسیل آسیب‌پذیری دارای مساحت ۵۵۲/۶۹۵ کیلومتر مربع و ۶۲/۳ درصد از کل مساحت منطقه می‌باشد و پتانسیل آلودگی کم ۷/۲۲ درصد را شامل می‌شود. در هر سه حالت بیشتر منطقه با پتانسیل آلودگی بالا در قسمت شمال و شمال‌غرب حوضه واقع شده است این دلیلی بر وجود ذرات درشت دانه (با اندازه تقریبی ۱-۵/۰)، جنس ذرات ماسه ریز تا درشت در بیشتر مناطق و ذرات با اندازه سیلت (قطر بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ میلی‌متر)، عمق منابع آب زیرزمینی (بطور متوسط در اعماق ۸-۱۵ متری سطح زمین)، کاربری اراضی (کشاورزی آبی و چمنزارها) و در نواحی پایین دست و نزدیک به دریا (بطور متوسط ۵ کیلومتری از دریا) است. با توجه به آثار زیان‌بار آلودگی منابع آب زیرزمینی بر کیفیت آب زیرزمینی و زندگی بشر بهتر است که استفاده از کودهای شیمیایی در منطقه کاهش یابد و از ایجاد واحدهای صنعتی مولد آلودگی در منطقه جلوگیری شود. نتایج این تحقیق با جودوی و همکاران (۱۴۰۱) غلظت عناصر سنگین مانند آرسنیک در برخی از چاه‌ها به دلیل وجود عوامل زمین‌شناسی بیشتر از حد مجاز برای شرب معرفی کردند. نتایج اصغری مقدم و همکاران (۱۳۹۶) که نتایج مدل با ارزیابی آبخوان دشت اردبیل با سه مدل DRASTIC، SINTACS و SI و دقت بالای مدل DRASTIC که ۴۴/۳۶ درصد آبخوان دشت اردبیل را شامل می‌شود همخوانی دارد. معروفی و همکاران (۱۳۹۱) با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر مدل DRASTIC را به عنوان مناسب‌ترین مدل و فعال‌اقدام و همکاران (۱۳۹۶) در دشت بیلوردی بر مبنای ترکیب دو مدل DRASTIC و SINTACS روش DRASTIC را به عنوان روش مناسب در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان منطقه معرفی کردند. نتایج این پژوهش همچنین با تحقیقات Nadiri et al (۲۰۱۷) با نشان دادن وضعیت سفره‌های آب زیرزمینی از لحاظ آلودگی و مناسب بودن مدل DRASTIC ارتباط نزدیکی دارند و تخلخل و بافت خاک را عاملی برای انتقال منابع آلودگی ارائه کردند Jaunat et al (۲۰۱۹) در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ابرفتی کم عمق بیگوگلیا<sup>۱</sup> در جزیره کوریسکای<sup>۲</sup> فرانسه با مدل‌های DRASTIC، SINTACS، Modified-DRASTIC و SI اشاره کردند که آلودگی چاه بصورت نقطه‌ای تحت تاثیر منابع تغذیه کننده و بافت خاک است و در نهایت مدل SINTACS را برای مناطق مدیترانه‌ای و ابرفتی مناسب‌تر اعلام کردند که با نتایج پژوهش ارتباط نزدیکی دارد. در این پژوهش نیز مدل SINTACS نیز به صورت مناسبی وضعیت آلودگی را نشان داد. Nazzal et al. (۲۰۱۹) در منطقه لیوا<sup>۳</sup> عرب برای صحت‌سنجی از پارامتر نیترات استفاده کردند که دقت مدل‌ها را نشان داد و با همبستگی بالا وضعیت تغییرات آلودگی را به خوبی نشان دادند. در این زمینه Mfonka et al (۲۰۱۸) با صحت‌سنجی نیترات در منطقه با مدل GOD وضعیت آبخوان منطقه ضعیف و نسبتاً آسیب‌پذیر معرفی کردند. بیاتی خطیبی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، با کمک روش DRASTIC و الگوریتم‌های فازی در دشت تبریز نشان دادند که قسمت‌های شمال‌غربی تا جنوب‌غربی (حدود بیست و پنج درصد) بیشترین پتانسیل و قسمت‌های جنوب‌غربی کمترین پتانسیل برای آلودگی (حدود بیست درصد) را دارا می‌باشد. ندیری و همکاران (۱۳۹۸) آسیب‌پذیری آبخوان دشت قروه دهگلان با استفاده از روش‌های DRASTIC، SINTACS و SI وضعیت آلودگی را به خوبی نشان دادند که ارتباط نزدیکی با نتیجه این پژوهش برای نشان دادن دقت این مدل‌ها به ترتیب برای ارزیابی ارتباط نزدیکی دارد. کاردان مقدم و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی روش‌های مختلف آسیب‌پذیری آبخوان ابرفتی و ساحلی استان گیلان محدوده آستانه- کوچکصفهان بر اساس شاخص‌های DRASTIC، SINTACS، SI، GALDIT و GODS. پارامتر عمق تا سطح ایستایی در سایر شاخص‌ها و پارامتر فاصله از دریا معیار حساس برای تعیین حساسیت آلودگی چاه به آلودگی است.

## منابع

- اسحاقی ایل‌بیگی، س.، گنجی نوروزی، ز.، درستکار، و.، موحد نژاد، م.، و.، اطاری، م. (۱۴۰۱). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان سبزوار (شمال شرق ایران) با استفاده از مدل دراستیک. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۱)، ۲۶۶-۲۵۵.
- اصغری مقدم، ا.، آدیگول‌پور، ع.، و محمدی، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اشنویه با استفاده از مدل‌های دراستیک و سینتکس. مخاطرات محیط طبیعی، ۷(۱۷)، ۹۹-۱۲۰.
- اصغری مقدم، ا.، قره‌خانی، م.، ندیری، ع.، کرد، م.، و فیجانی، ا. (۱۳۹۶). ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اردبیل با استفاده از روش‌های SI، SINTACS و DRASTIC. جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۱(۶۱)، ۷۴-۵۷.

1. Biguglia

2. Corsica Island

3. Liwa

- بیاتی خطیبی، م، رستمی، ف، و ولیزاده کامران، خ. (۱۴۰۰). بررسی و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، با کمک روش دراستیک و الگوریتم‌های فازی مطالعه‌ی موردی: دشت تبریز. *هیدروژئومورفولوژی*، ۸(۲۹)، ۸۷-۱۰۸.
- جوادی، ع، مجیدی خلیل‌آباد، ن، و مجیدی، م. (۱۴۰۱). طراحی شبکه پایش آلودگی منابع آب زیرزمینی بر اساس آسیب‌پذیری ذاتی، منابع آلودگی و ارزش آب زیرزمینی، مطالعه موردی: دشت خاش - پشتکوه، استان سیستان و بلوچستان. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۶(۱)، ۱۳-۲۵.
- حجازی، ا.ا، اندریانی، ص، الماس‌پور، ف، و مختاری‌اصل، ا. (۱۳۹۴). استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و سنجش از دور در محیط GIS برای بررسی مناطق حساس به وقوع سیلاب درحوضه لیقوان چای. *نشریه هیدروژئومورفولوژی*، ۳(۳)، ۶۱-۸۰.
- حسن‌زاده نفوتی، م، ابراهیمی خوسفی، ز، و جمالی، ع.ا. (۱۳۹۶). مقایسه کارایی برخی مدل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلودگی در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت ابرکوه). *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۶(۱۴)، ۶۸-۵۹.
- حسن‌زاده، م، مومنی رق‌آبادی، م، و رباطی، ا. (۱۴۰۰). آسیب‌پذیری آبخوان دشت حاجی‌آباد بر اساس روش‌های DRASTIC و SINTACS. *هیدروژئومورفولوژی*، ۸(۲۶)، ۲۰۲-۱۸۳.
- رادمنش، ف، صدیقی، س، و شهپازی، ع. (۱۳۹۶). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت جارمه توسط روش‌های دراستیک و سینتکس. آب و توسعه پایدار، ۴(۲)، ۱۱۱-۱۲۰.
- صابری، ع، سلطانی گردهرامری، س، و میریعقوب‌زاده، م. (۱۳۹۶). ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص هواشناسی و سنجش از دور مشتق شده (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه اردکان، اردکان، ۶۵ص.
- فعال اقدام، ر، ندیری، ع.ا، و نوین‌پور، ا.ع. (۱۳۹۶). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بیلوردی بر مبنای ترکیب روش‌های DRASTIC و SINTACS. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۳(۳)، ۱۵۰-۱۳۵.
- کاردان مقدم، ح، جوادی، س، و رحیم‌زاده کیوی، ز. (۱۳۹۹). ارزیابی روش‌های مختلف آسیب‌پذیری آبخوان آبرفتی و ساحلی (منطقه مورد مطالعه: استان گیلان محدوده آستانه-کوچصفهان). *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۰(۲)، ۲۰۳-۲۲۰.
- معروفی، ص، سلیمانی، س، قبادی، م.ح، رحیمی، ق، و معروفی، ح. (۱۳۹۱). ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملایر با استفاده از مدل‌های DRASTIC، SI و SINTACS. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۱۹(۳)، ۱۶۶-۱۴۱.
- ندیری، ع، جبرائیلی، ن، و قره‌خانی، م. (۱۳۹۸). مقایسه توانایی روش‌های مختلف ترکیبی در ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان دشت قروه-دهگلان. *اکوهیدرولوژی*، ۳(۳)، ۸۳۶-۸۲۱.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., and Petty, R.J. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. Oklahoma: US Environmental Protection Agency, 163P.
- Brindha, K., and Elango, L. (2015). Cross comparison of five popular 505 groundwater pollution vulnerability index approaches. *Journal of Hydrology*, 524, 597-613.
- Civita, M. (1990). Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. *Studi Sulla Vulnerabilita degli Acquiferi*, Pitagora Edit, Bologna.
- Hamza, M.H., Added, A., France's, A., and Rodri'guez, R. (2007). Validity of the vulnerability methods DRASTIC, SINTACS and SI applied to the study of nitrate pollution in the phreatic aquifer of Metline-Ras Jebel-Raf Raf (northeastern Tunisia). *Comptes Rendus Geoscience*, 339(7), 493-505.
- Howard, K., and Gerber, R. (2018). Impacts of urban areas and urban growth on groundwater in the Great Lakes Basin of North America. *Journal of Great Lakes Research*, 44(1), 1-13.
- Jaunat, J., Garel, E., Huneau, F., Erostate, M., Santoni, S., Robert, S., Fox, D., and Pasqualini, V. (2019). Combinations of geoenvironmental data underline coastal aquifer anthropogenic nitrate legacy through groundwater vulnerability mapping methods. *Science of The Total Environment*, 658, 1390-1403.
- Kandhar, I.A., Khaskheli, G.B., Sahito, A., and Bux Mahar, R. (2016). Effect of Canal Bank Filtration on Quality of Water Long Hyderabad City. *Mehran University Research Journal of Engineering and Technology*, 35(3), 437-452.
- Kendall, M.G. (1975). Rank correlation measures, London: Charles Griffin Inc.
- Victorine Neh, A., Ako Ako, A., Ayuk, A.R., and Hosono, T. (2015). DRASTIC-GIS model for assessing vulnerability to pollution of the phreatic aquiferous formations in Douala- Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 102, 180-190.
- Khosravi, K., Sartaj, M., Tsai, F.T.C., Singh, V.P., Kazakis, N., Melesse, A.M., Prakash, I., Bui, D.T., and Pham, B.T. (2018). A comparison study of DRASTIC methods with various objective methods for groundwater vulnerability assessment. *Science of The Total Environment*, 642, 1032-1049.
- Kumar, P., Bansod, B.K.S., Debnath, S.K., Thakur, P.K., and Ghanshyam, C. (2015). Index-based groundwater vulnerability mapping models using hydrogeological settings: a critical evaluation. *Environmental Impact Assessment Review*, 51, 38-49.
- Kumar, P., Sharma, R., and Bhaumik, S. (2022). MCDA techniques used in optimization of weights and ratings of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment. *Data Science and Management*, 5(1), 28-1.
- MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Ahmed, K.M., Burgess, W.G., Basharat, M., Calow, R.C., Dixit, A., Foster, S.S.D., Gopal, K., Lapworth, D.J., Lark, R.M., Moench, M., Mukherjee, A., Rao, M.S., Shamsudduha, M., Smith, L., Taylor, R.G., Tucker, J., van Steenberg, F., and Yadav, S.K. (2016). Groundwater quality and depletion in the indo-gangetic basin mapped from in situ observations. *Nature Geoscience*, 9(10), 762-766.
- Mencio, A., Mas-Pla, J., Otero, N., Regàs, O., Boy-Roura, M., Puig, R., Bach, J., Domènech, C., Zamorano, M., Brusi, D., and Folch, A. (2017). Nitrate pollution of groundwater; all right ..., but nothing else?. *Science of the Total Environment*, 539, 241-251.
- Mfonka, Z., Ndam Ngoupayou, J.R., Ndjigui, P.D., Kpoumie, A., Zammouri, M., Ngouh, A.N., Moucherou, O.F., Rakotondrabe, F., and Rasolomanana, E.H. (2018). A GIS-Based DRASTIC and GOD models for assessing alterites aquifer of three experimental watersheds in Fouban (Western-Cameroon). *Groundwater for Sustainable Development*, 7, 250-264.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., and Gharekhani, M. (2017). Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. *Science of The Total Environment*, 593-594, 75-90.
- Nazzal, Y., Howari, F.M., Iqbal, J., Ahmed, I., Bou Orm, N., and Yousef, A. (2019). Investigating aquifer vulnerability and pollution risk employing modified DRASTIC model and GIS techniques in Liwa area, United Arab Emirates. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 567-578.

- Nlend, B., Celle-Jeanton, H., Huneau, F., Ketchemen-Tandia, B., Fantong, W.Y., Ngo Boum-Nkot, S., and Etame, J. (2018). The impact of urban development on aquifers in large coastal cities of West Africa: Present status and future challenges. *Land Use Policy*, 75, 352-363.
- Panagopoulos, G.P., Antonakos, A.K., and Lambrakis, N.J. (2006). Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14(6), 894-911.
- Piscopo, G. (2001). Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment. New South Wales: NSW Department
- Rahman, M., Morshedul Haque, M., and Tareq, S.M. (2021). Appraisal of groundwater vulnerability in south-central part of Bangladesh using DRASTIC model: An approach towards groundwater protection and health safety. *Environmental Challenges*, 5, 1-11.
- Ribeiro, L., Pindo, J.C., and Dominguez-Granda, L. (2017). Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer, Ecuador, using the susceptibility index method. *Science of The Total Environment*, 574, 1674-1683.
- Şener, E., and Şener, Ş. (2015). Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using fuzzy analytic hierarchy process method. *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8405-8424.

## Comparison of vulnerability potential of Aquifer of Nekarud Basin using DRASTIC, SINTACS and SI models

Maryam Morovati \*<sup>1</sup>, Seyedah Alemah Sabagh<sup>2</sup>, Aref Saberi<sup>3</sup>



### Research Article

1. Associate Professor, Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

[mymorovati@ardakan.ac.ir](mailto:mymorovati@ardakan.ac.ir)

\* Corresponding author

2. Ph.D. Student in Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Natural Resources & Marine Sciences, Trabiati Modares University, Tehran, Iran.

[s.a.sabbagh72@gmail.com](mailto:s.a.sabbagh72@gmail.com)

3. Ph.D. Student in Watershed Science & Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

[aref.saberi@yahoo.com](mailto:aref.saberi@yahoo.com)

Article Code: 2204-1023  
Continous Pagnation: 184-197

Received: 10 April 2022  
Accepted: 17 August 2022  
Online: 21 September 2022  
Review speed: 130 days

#### Citation:

Morovati, M., Sabagh, S.A., and Saberi, A. (2022). Comparison of vulnerability potential of Aquifer of Nekarud Basin using DRASTIC, SINTACS and SI models. *Management of Natural Ecosystems*, 2(2), 46-59.

### Abstract

Groundwater is the main source of fresh water in Nekarud region of Mazandaran Province. Population growth and the development of agriculture and industries has had a negative impact on the quantitative and qualitative characteristics of underground water in Nekarudd plain. Management and of these resources is necessary and unavoidable. Therefore in order to prevent environmental damages resulting from pollution and extraction of underground water resources in this region, principled planning should be done in the region. In this research, using three models DRASTIC, SINTACS and SI, the vulnerability of Nekarud plain aquifer was evaluated. For this purpose, first, the necessary parameters for the mentioned models including groundwater depth, nutrition, unsaturated zone, soil type, aquifer environment, topography, hydraulic conductivity, and land use were assessed and scored to prepare the overlay map. The nitrate and pH data of 2013 and 2014 were also used to validate the outputs of the models. The results showed that the DRASTIC model has the highest correlation value with nitrate, which is the main cause of groundwater pollution, and the north and northwest regions of the basin has the highest vulnerability value with 52.97%. The Mann-Kendall test to determine the trend of elements also showed that there is no trend of nitrate elements. But the value of ZS index for pH in 2013 was equal to 8.638 and it has an increasing trend. This means that this index had an increasing and significant trend at the level of 0.95 in 2014. The general result showed that DRASTIC is a suitable model for evaluating the vulnerability of the plain and planners and decision makers can use it as a suitable and cost-effective solution to prevent the increase of pollution.

**Key Words:** Groundwater, Mann-Kendall Test, Aquifer vulnerability, Pollution zoning, Nekarud Basin.