



ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های چندگانه با استفاده از چهار چوب‌های عملی DRASTIC، SINTACS

عطالله ندیری^{۱*}، زهرا صدقی^۲

۱- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

* نویسنده مسئول: Nadiri@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۹

چکیده

منابع آب زیرزمینی در محدوده ورزقان به عنوان منبع اصلی آب مورد نیاز برای شرب، صنعت، کشاورزی و همچنین به دلیل حضور معادن مس، طلا و مولیبدن و نیز توسعه وسیع دامداری به شدت تحت تأثیر شیرابه حاصل از مواد معدنی و کودهای نیترا ته و فضولات حیوانی می‌باشند که باعث افزایش مقادیر نیترات تا ۵ برابر استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) شده و لذا ارزیابی آسیب‌پذیری و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. در طی این پژوهش، از چهار چوب‌های DRASTIC و SINTACS، برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان چندگانه (آزاد و تحت فشار) دشت ورزقان استفاده و همچنین SINTACS برای اولین بار تصحیح و در ارزیابی آبخوان تحت فشار با نام Corrected SINTACS به کار گرفته شد. برای صحت‌سنجی این چهار چوب‌ها از داده‌های غلظت نیترات و ضریب همبستگی آن با شاخص آسیب‌پذیری در منطقه استفاده شد و نتایج مقایسه نشان داد DRASTIC با داشتن ضریب تعیین (R^2) و شاخص همبستگی (CI) بالاتر نسبت به SINTACS چهار چوب بهتری برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آزاد دشت ورزقان است ولی در آبخوان تحت فشار، Corrected SINTACS نسبت به DRASTIC در تعیین مناطق آسیب‌پذیر دقیق‌تر عمل کرده است. بر اساس نتایج بدست آمده، برای آبخوان آزاد ۳۳، ۵۹، ۸ درصد و تحت فشار ۲۶، ۵۳، ۲۱ درصد به ترتیب در مناطق با آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شده‌اند. بر اساس بهترین نتایج بدست آمده در ارزیابی هر دو آبخوان، بخش‌های شرقی و مرکزی آبخوان آزاد و قسمت جنوبی آبخوان تحت فشار که ضخامت لایه نفوذناپذیر کمتر است به عنوان مناطق آسیب‌پذیر معرفی شده است.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، آبخوان چندگانه، دشت ورزقان، DRASTIC، Corrected SINTACS، SINTACS.

مقدمه

شود و یافتن منبع آبی جایگزین همیشه امکان‌پذیر نیست. بنابراین، بهترین و مؤثرترین راه‌حل، جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به این منبع با ارزش است. تعیین میزان آلودگی آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین مطالعات هیدروژئولوژیکی است. مفهوم آسیب‌پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه برای آگاهی بخشی در مورد آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (وربا و همکاران، ۱۹۹۴). آسیب‌پذیری یک ویژگی ذاتی آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ

آبخوان‌های آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آبی هر کشور است که متأسفانه بی‌توجهی به آن موجب نشر و انتقال آلاینده‌های مختلف به این منابع شده است. سیستم آب زیرزمینی نسبت به آلودگی‌ها پاسخ سریعی نمی‌دهد و زمان رسیدن آلودگی‌ها به محدوده آب زیرزمینی و انتشار آن در آبخوان معمولاً طولانی است. برای پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی آلوده و مصرف مجدد آن، اغلب باید وقت و هزینه زیادی صرف

اهمیت بیشتری می‌دهد (کورنیلو و همکاران، ۱۹۹۷). بر اساس مطالعاتی که در شمال کشور پرتغال به منظور کاربرد DRASTIC و SI برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل آلودگی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی انجام گرفته، نتیجه این بوده که SI در مقایسه با DRASTIC نتایج قابل اعتمادتری را ارائه می‌دهد (استیگر و همکاران، ۲۰۰۶). یکی از بزرگ‌ترین مزایای چهارچوب‌های رتبه‌دهی انجام بررسی با استفاده از تعداد بیشتری لایه‌های ورودی است (اوان و مایرز، ۱۹۹۰). چهارچوب‌های رتبه‌دهی تأثیر خطاها و یا عوامل نامعلوم را بر روی خروجی نهایی محدود می‌کنند (روزن، ۱۹۹۴). در سال‌های اخیر به منظور بهینه‌سازی و تدقیق نتایج چهارچوب‌هایی مانند DRASTIC و SINTACS از مدل‌های هوش مصنوعی که توانایی بالایی در تجزیه و تحلیل سیستم‌های پیچیده‌ای مانند محیط‌های هیدروژئولوژیکی دارند استفاده شده که در همین راستا طی پژوهشی که در دشت اردبیل انجام شده است با استفاده از DRASTIC به ارزیابی آسیب‌پذیری این دشت پرداخته شده سپس به منظور بهینه‌سازی DRASTIC از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی پیشرو و برگشتی استفاده شده است که نتایج دقیق‌تری نسبت به DRASTIC ارائه دادند (قره‌خانی و همکاران، ۱۳۹۴). طی پژوهشی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه ورزقان از چهارچوب‌های DRASTIC و کاتاستروف فازی استفاده شده و به منظور بهینه‌سازی نتایج، مدل ماشین بردار پشتیبان به کار برده شده که نتایج بیان‌کننده برتری مدل ماشین بردار پشتیبان در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه بوده و همچنین در پژوهش دیگری جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه ورزقان، برای بهینه‌سازی نتایج DRASTIC از مدل‌های هوش مصنوعی فازی ساگنو، ممدانی، لارسن و مدل ترکیبی SCFL استفاده شده که هر سه مدل فازی نتایج دقیق‌تری در تعیین مناطق با آسیب‌پذیری بالا ارائه داده و SCFL نسبت به این ۳ مدل فازی نتایج با خطای کمتر و CI بالاتر ارائه داده است (ندیری و

و انتشار آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (بابیکر و همکاران، ۲۰۰۵). آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است که به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (آنتوناکوس و لمبراکیس، ۲۰۰۷). ارزیابی آسیب‌پذیری برای تعیین آلودگی آب‌های زیرزمینی، بخشی از مدیریت آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان به شمار می‌رود. تاکنون روش‌های مختلفی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده است که می‌توان این تکنیک‌ها را به سه دسته کلی تقسیم کرد. این سه دسته عبارتند: از رتبه‌دهی توصیفی (PCSM)، آماری و تحلیلی و روش ترکیبی (نیکنام و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از چهارچوب‌های متداول برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، DRASTIC است که پرکاربردترین چهارچوب عملی از دسته PCSM است در دسته PCSM علاوه بر طبقه‌بندی پارامترهای مختلف، ضرایب وزنی نسبی برای هر عامل تعیین می‌شود. از مهم‌ترین چهارچوب‌های رتبه‌دهی می‌توان به DRASTIC، SINTACS، GODS، GOD، AVI، SI اشاره کرد. این چهارچوب‌ها بر پایه تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده‌اند که اساس کار یکسانی دارند و همچنین بر ارزیابی توصیفی و کمی آسیب‌پذیری تکیه دارند. این دسته‌ها در به کارگیری نوع و تعداد پارامترها با هم تفاوت دارند و در نهایت منجر به ثبت یک شاخص عددی یا امتیاز برای هر ویژگی می‌گردند. در کشورهای مختلف جهان ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی با چهارچوب‌های مختلف و به‌طور عمده با DRASTIC انجام شده است. DRASTIC توسط انجمن ملی آب زیرزمینی با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالت متحده معرفی شده است (آلر و همکاران، ۱۹۸۷). طی پژوهشی که در ایتالیا انجام شده به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی از DRASTIC، SINTACS، GOD و AVI استفاده شده و در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که محدوده کلاس آسیب‌پذیری DRASTIC وسیع‌تر از SINTACS بوده و SINTACS به پارامترهای مرتبط با نوع کاربری زمین

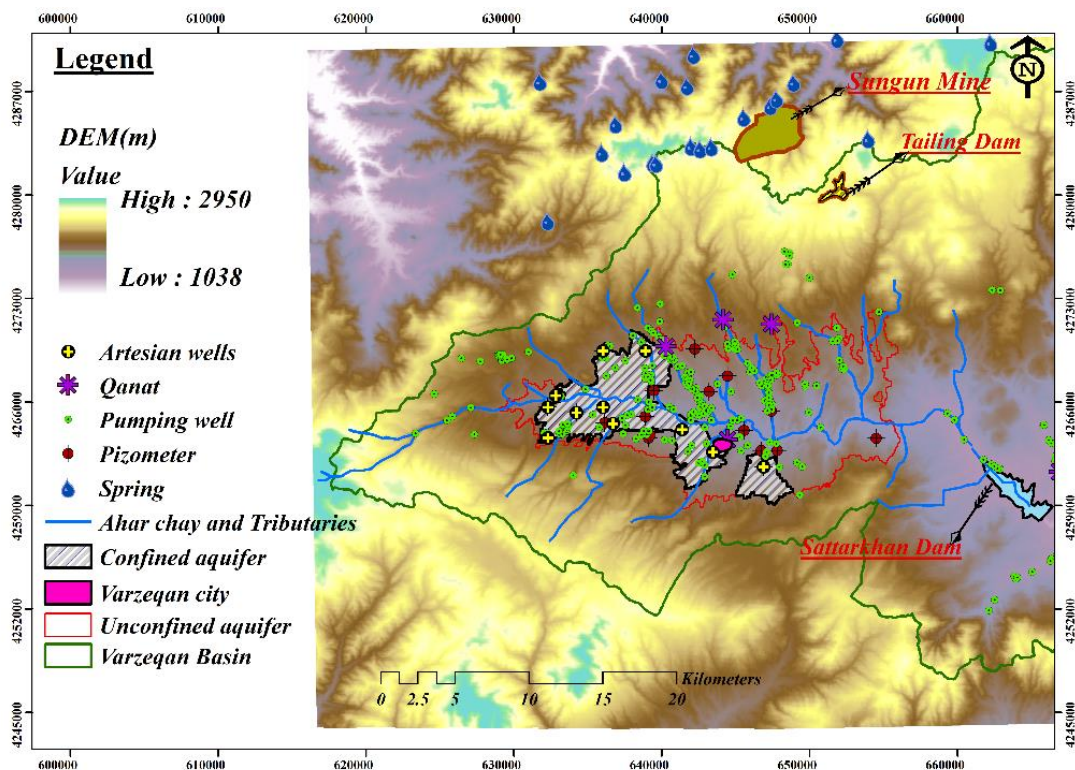
کنترل آلاینده‌های منابع آبی این منطقه باشد. در این تحقیق برای اولین بار، بررسی آسیب‌پذیری آبخوان آزاد و تحت فشار منطقه ورزقان همزمان باهم و تهیه ساختار لایه‌ای متفاوت برای هر دو نوع آبخوان منطقه با استفاده از DRASTIC، SINTACS و ارائه چهارچوب جدیدتر برای ارزیابی آبخوان تحت فشار صورت پذیرفته است تا با معرفی عوامل مهم در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار، بهترین چهارچوب برای ارزیابی آسیب‌پذیری هر دو نوع آبخوان انتخاب شود.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی مورد نظر آبخوان دشت ورزقان است. شهرستان ورزقان در استان آذربایجان شرقی در ۷۰ کیلومتری شمال تبریز واقع شده است. وسعت محدوده مطالعاتی ۵۰۰ کیلومترمربع دربرگیرنده بخش‌های غربی حوضه آبریز رودخانه اهرچای است. ارتفاع متوسط منطقه مطالعاتی در حدود ۱۷۵۰ متر از سطح آزاد دریاهاست. مرتفع‌ترین نقاط شهرستان ورزقان با ارتفاع تقریبی ۲۸۱۵ متر مربوط به بخش‌های شمالی و پست-ترین نقاط محدوده مطالعاتی نیز در بخش‌های میانی و با ارتفاع تقریبی ۱۳۸۰ متر است. رودخانه اهرچای و شاخه‌های فرعی آن بر بستری جریان دارند که از طرفین شمالی و جنوبی توسط ارتفاعات احاطه شده‌اند. همین امر نیز موجب شده تا جهت جریان آب‌های زیرزمینی و همچنین زهکشی منابع آب سطحی به سمت بخش‌های شرقی و خروجی حوضه آبریز رودخانه اهر-چای باشد. مهم‌ترین رودخانه موجود در منطقه ورزقان یعنی رودخانه اهرچای در جهت غرب به شرق جریان یافته و پس از زهکشی بخش بزرگی از منطقه، از سمت شرق ورزقان وارد منطقه اهر شده و با طی مسیری طولانی به دریای خزر می‌ریزد. بیشترین میزان بارش در محدوده مورد مطالعه مربوط به ماه‌های خرداد و آبان با میانگین بارش ۶۱ میلی‌متر و کمترین میزان بارش به‌طور متوسط ۶ میلی‌متر مربوط به ماه‌های مرداد و دی است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و محدوده تخمینی آبخوان آزاد و تحت فشار را نشان می‌دهد.

همکاران، ۲۰۱۸a و ۲۰۱۷). در تحقیقی که برای دشت اردبیل انجام شده در جهت تدقیق نتایج به دست آمده از DRASTIC از روش ویلکاکسن برای بهینه‌سازی رتبه‌های DRASTIC و از مدل الگوریتم ژنتیک به منظور بهبود ضرایب وزنی بهره برده‌اند و در ادامه از مدل ماشین بردار پشتیبان برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر این دشت استفاده شده که نتایج این مدل نسبت به DRASTIC و روش‌های استفاده شده دقیق‌تر و با ضریب همبستگی بالا بوده است (ندیری و همکاران، ۲۰۱۸b). در دشت مراغه- بناب جهت ارزیابی آبخوان و تعیین مناطق آسیب‌پذیر از DRASTIC استفاده شده و برای بهینه‌سازی نتایج، روش تئوری فازی کاتاستروف به کار رفته که وزن پارامترهای DRASTIC را با در نظر گرفتن شرایط محلی دشت مراغه- بناب تخمین زده است و نتایج دقیق‌تری را نسبت به DRASTIC ارائه دهد (صادق فام و همکاران، ۲۰۱۶). طی پژوهشی ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت ملکان در دو سطح انجام شده که سطح ۱ مقایسه ساختار دو چهارچوب و سطح ۲ هم شامل مدل ماشین بردار پشتیبان برای استفاده از خروجی‌های سطح ۱ است که با توجه به مقادیر نیترا اندازه‌گیری شده، مدل ماشین بردار پشتیبان در تعیین مناطق آسیب‌پذیر دقیق‌تر عمل کرده است (ندیری و همکاران، ۲۰۱۹). هدف از انجام این پژوهش، بررسی مؤثرترین چهارچوب کلاسیک در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه دشت ورزقان است. با توجه به این مسئله که محدوده مطالعاتی ورزقان یکی از قطب‌های معدن در کشور و فعال از نظر کشاورزی و جزء دشت‌های آلوده به نیترا بوده و همچنین آبخوان منطقه مورد مطالعه جزء آبخوان‌های چندگانه (آزاد و تحت فشار) است و بررسی آسیب‌پذیری با استفاده از این چهارچوب‌ها تا به حال برای این نوع آبخوان‌ها انجام نشده و شناسایی مناطق آسیب‌پذیر الزامی است. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق دارای پتانسیل آلودگی و ساختار هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی آبخوان چندگانه منطقه جزء اولویت‌های حال حاضر است، تا در سطح مدیریتی کمکی به



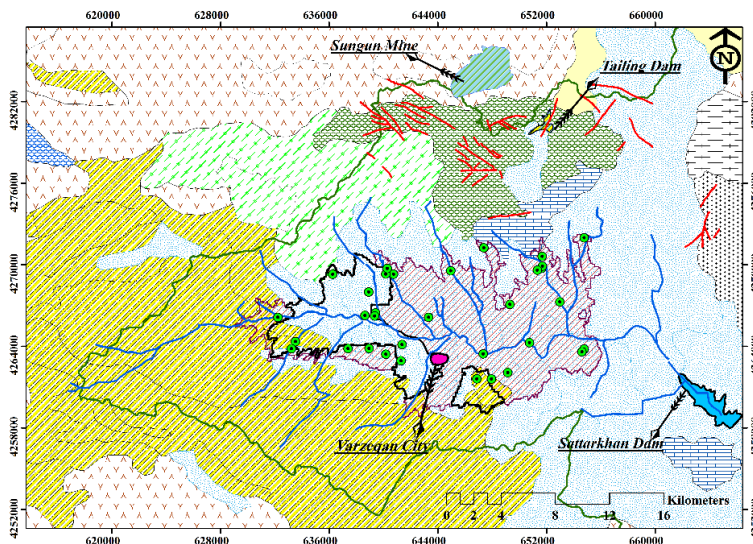
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و محدوده آبخوان آزاد و آبخوان تحت فشار.

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

کهن‌ترین سنگ‌های منطقه مورد مطالعه را مجموعه سنگ‌های دگرگون‌شده کلبیر با سن قدیمی‌تر از ژوراسیک تشکیل می‌دهد. در شمال غرب چهارگوش ورزقان گستره‌ای وسیع از سنگ‌های ولکانیکی با ترکیب آندزیت تا تراکی آندزیت قرار دارد. عامل زمین‌ساخت و فعالیت فراوان آتشفشان‌های زیردریایی و احتمالاً اختلاف سطوح ریخت‌شناسی در این حوزه‌های رسوبی موجب ته‌نشست رسوبی-تخریبی و رخساره‌های آتشفشانی با ترکیب گوناگون شده است. بخش اعظمی از نهشته‌ها و رخساره‌های آئوسن در ورزقان را واحدهای آتشفشانی، سنگ‌های ولکانوژنیک و ماسه‌سنگ کمی کربناته تشکیل می‌دهد. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بخش

های گسترده‌ای از جنوب شرق منطقه ورزقان توسط مواد گدازه-های مربوط به دوره چهارم پوشیده شده است. ادامه رخساره‌های کواترنر در ورزقان، دشت‌های آبرفتی است که با رخساره‌های سیلت، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، رس و به ندرت عدسی‌های گچ (Q^{II}) پوشانده می‌شود.

به صورت محلی در نواحی مرکزی ورزقان این واحد توسط آب‌های آهک‌دار و در بعضی مواقع همراه با کمی سیلیس آهکی، سیلیسی‌شده و سخت‌شدگی پیدا نموده‌اند. آبرفت‌های رودخانه-ای (Q^{al})، متشکل از شن، رس، سیلت و ماسه اغلب بستر رودخانه‌های بزرگ (کلبیر - ایلگنه چای - اهر چای و ...) که به شکل دره‌های تنگ و باز بوده و همچنین پادگانه‌های جوان و مخروط افکنه‌های جوان را تشکیل می‌دهد (مهندسیین مشاور یکم، ۱۳۸۸).



راهنمای نقشه زمین شناسی شهرستان ورزقان



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (مهرپرتو و همکاران، ۱۳۷۱).

وارد دشت ورزقان می شود آبخوان دشت ورزقان را تغذیه و همچنین ۶ رودخانه فصلی هم در فصول پربابی، آبخوان دشت را تغذیه می کنند و علاوه بر آن از سمت شمال و جنوب، آبخوان دشت از طریق سازندهای کنگلومرای پلیوسن نیز تغذیه می شود.

مشخصات آبخوان چندگانه دشت ورزقان در دشت ورزقان ۲۷ حلقه چاه اکتشافی وجود دارد. رودخانه های دوریق چای و اهرچای که از بلندی های شمال و غرب محدوده ورزقان سرچشمه گرفته و از سمت غرب و شمال شرقی

DRASTIC یک چهارچوب عملی کمی است که برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی در یک مقیاس ناحیه‌ای طراحی شده است. بر اساس آن پارامترهای مختلف هیدروژئولوژیکی تأثیرگذار در انتقال آلودگی با یک ضریب وزنی و یک ضریب ارزش با یکدیگر جمع شده و در نهایت نقشه آسیب پذیری را ارائه می‌دهند (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸). DRASTIC نخستین بار در سال ۱۹۸۷ توسط آلر معرفی شده و آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا آن را در سال ۱۹۹۰ توسعه داد که به این طریق بتوانند این چهارچوب را به عنوان یک سیستم استاندارد شده جهت ارزیابی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار دهند (بوقریبا و همکاران، ۲۰۰۹). امروزه استفاده از DRASTIC به دلیل دسترسی آسان به اطلاعات مورد نیاز جهت به‌کارگیری آن در مناطق مطالعاتی زیادی در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است (رحمان، ۲۰۰۸). در ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از DRASTIC ۴ فرض در نظر گرفته می‌شود که شامل (۱) آلودگی از سطح زمین وارد آب زیرزمینی می‌شود، (۲) آلودگی از طریق بارندگی شسته شده و وارد آب زیرزمینی می‌شود، (۳) انتقال آلودگی از طریق آب و با سرعتی مشابه آن صورت می‌گیرد و (۴) منطقه مورد مطالعه توسط این چهارچوب عملی باید ۴ هکتار یا بزرگ‌تر باشد (وودوریز و همکاران، ۲۰۱۰). DRASTIC برگرفته از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی شامل؛ عمق آب (D)، میزان تغذیه (R)، محیط آبخوان (A)، جنس بافت خاک (S)، شیب توپوگرافی (T)، تأثیر محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی سفره (C) است که به هر کدام از این پارامترها با توجه به پتانسیل آلودگی آن، نرخی از ۱ تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود. ۱ به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود (پاناگوپولوس و همکاران، ۲۰۰۵). هریک از پارامترهای DRASTIC با توجه به اهمیت نسبی آن در توانایی انتقال آلودگی به سیستم آب زیرزمینی در ضریب وزنی (وزن ۱ تا ۵) ضرب می‌شود (سامی و گنگ، ۲۰۰۸). از این‌رو

بر اساس نتایج آماربرداری سال ۱۳۸۸، ۲۵۲ حلقه چاه، ۱۵۰ دهانه چشمه و ۲۰ رشته قنات در منطقه مطالعاتی وجود دارد. با توجه به نتایج حاصل از لاگ چاه‌های اکتشافی و پیژومترها، در دشت ورزقان دو نوع سفره آب زیرزمینی وجود دارد. سفره اول از نوع آزاد با وسعتی بالغ بر ۱۴۰ کیلومترمربع عمدتاً از رسوبات دریاچه‌ای مانند رس، سیلت، و ماسه با ذخیره آبی کم تشکیل شده است. این آبخوان در ورودی و مرکز دشت دانه درشت بوده و به طرف خروجی دانه ریزتر می‌شود. علاوه بر آبخوان آزاد، آبخوان تحت فشاری گسترش دارد که به طور پراکنده در بخش‌هایی از دشت اثرات آن را می‌توان به صورت چاه‌های آرتزین مشاهده نمود. در منطقه مورد مطالعه بررسی‌های زمین‌شناسی درباره کنار هم واقع شدن دو آبخوان آزاد و تحت فشار بیانگر این مطلب است، که ادامه رخساره کواترنر در ورزقان، دشت‌های آبرفتی است که با رخساره‌های سیلت، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، رس و به ندرت عدسی‌های گچ (Q^{II}) پوشانده می‌شود. در گذر زمان در امتداد شاخه‌های اصلی رودخانه اهر چای که اصلی‌ترین رودخانه تغذیه‌کننده آبخوان ورزقان می‌باشد، دره‌هایی تشکیل شده و بر اثر رسوب‌گذاری مواد ریزدانه مانند رس و سیلت بر روی رسوبات آبرفتی در امتداد دره‌ها آبخوان تحت فشاری به وجود آمده که با گذشت زمان گسترش بیشتری یافته است و همچنین وجود گسل‌هایی که باعث جا به جایی لایه‌های رسوبی تشکیل‌دهنده آبخوان آزاد که شامل میان لایه‌های رسی می‌باشد و محتمل است که علت واقع شدن لایه رسی در قسمت فوقانی آبخوان باشد و آبخوان آزاد تبدیل به آبخوان تحت فشار شده است. البته نظریه دوم در این مورد هنوز اثبات نشده است. آبخوان تحت فشار در دو قسمت جنوبی و جنوب غربی دشت مشهود است. وسعت تخمینی برای آبخوان تحت فشار در حدود ۵۷ کیلومترمربع می‌باشد، که در شکل ۱ محدوده آبخوان‌های دشت ورزقان نشان داده شده است.

روش مطالعه:
DRASTIC

تحت فشار برای ۴ لایه، متفاوت از آبخوان آزاد انجام شده، که این ۴ لایه عبارتند از لایه عمق، محیط آبخوان، محیط غیراشباع و اگر آبخوان تحت فشار در زیر آبخوان آزاد واقع شده باشد علاوه بر این سه پارامتر نحوه رتبه‌دهی و محاسبه تغذیه خالص هم متفاوت خواهد بود که این مورد برای آبخوان منطقه مورد مطالعه صادق نیست. در تهیه لایه عمق برای آبخوان تحت فشار، ژرفای کف لایه محبوس کننده به عنوان عمق سطح ایستایی و لایه محیط آبخوان از زیر لایه نفوذناپذیر تا سنگ کف و محیط غیراشباع به صورت لایه محصورکننده در نظر گرفته شده که شامل سیلت و رس غیرقابل نفوذ است و طبق نظر آلر و همکاران بدون توجه به ضخامت لایه نفوذناپذیر در رتبه‌بندی DRASTIC به عنوان لایه محبوس کننده امتیاز ۱ را می‌گیرد. در آبخوان تحت فشار نیز شاخص DRASTIC بزرگ‌تر نشان دهنده حساسیت بیشتر منطقه نسبت به آلودگی و عدد کوچک‌تر حساسیت کمتر را نشان می‌دهد که در نهایت نقشه آسیب‌پذیری منطقه تهیه می‌شود.

شاخص DRASTIC بر اساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود (آلماسری، ۲۰۰۸).

$$DI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad [1]$$

در رابطه بالا DI شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC و حروف بزرگ نشان‌دهنده پارامترهای هفت‌گانه و r نرخ ارزش (رتبه) و w وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود. پس از محاسبه شاخص آسیب‌پذیری، نواحی آسیب‌پذیر آبخوان مشخص شده که بزرگ‌تر بودن این شاخص، بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر آب‌های زیرزمینی است. اعداد و مقادیر مربوط به رتبه‌بندی و محدوده تقسیمات پارامترهای DRASTIC در جدول ۱ ارائه شده است. نتیجه نهایی برای هر مجموعه هیدروژئولوژیکی یک ارزش عددی است که از مجموع حاصل ضرب وزن هر پارامتر در رتبه آن به دست می‌آید و به عنوان شاخص DRASTIC (DRASTIC Index) معرفی می‌شود. بر طبق مقاله آلر و همکاران (۱۹۸۷) در تعیین شاخص DRASTIC برای آبخوان تحت فشار، وزن‌دهی مانند آبخوان آزاد است با این تفاوت که رتبه‌دهی در آبخوان

جدول ۱ - کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری کلاس‌های مربوط به هر کدام از پارامترهای DRASTIC (Aller et al., 1987).

توپوگرافی (درصد)		محیط خاک		محیط آبخوان		تغذیه (سانتی‌متر در سال)		عمق آب زیرزمینی (متر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱۰	۰ - ۲	۴	لوم سیلتی	۳	رس و سیلت با کمی ماسه	۱	۰ - ۵,۰۸	۱۰	۱,۵ - ۰
۹	۲ - ۶	۶	لوم ماسه‌ای	۵	ماسه با کمی سیلت	۳	۵,۰۸ - ۱۰,۱۶	۹	۱,۵ - ۴,۶
۵	۶ - ۱۲	۷	ماسه لومی	۵	ماسه با کمی سیلت	۶	۵,۰۸ - ۱۷,۷۸	۵	۴,۶ - ۹,۱
۳	۱۲ - ۱۸	۸	گراول و ماسه	۳	و رس	۸	۱۷,۷۸ - ۲۵,۴	۳	۲۲,۹ - ۱۵,۲
۱	۱۸ <			۸	ماسه و گراول	۹	۲۵,۴ <	۲	۲۲,۹ - ۳۰,۵
								۱	۳۰,۵ <
هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)					محیط غیر اشباع				
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۱	۴ >	۲		۲		۲		۲	
۲	۴ - ۱۲	۴		۴		۴		۴	
۴	۱۲ - ۲۸	۶		۶		۶		۶	
		۸		۸		۸		۸	

جدول ۲- وزن‌های اختصاص یافته به پارامترهای DRASTIC (Aller et al., 1987).

وزن نسبی	پارامترهای DRASTIC
۵	عمق آب زیرزمینی
۴	تغذیه خالص
۳	محیط آبخوان
۲	محیط خاک
۱	توپوگرافی
۵	محیط غیراشباع
۳	هدایت هیدرولیکی

شاخص آسیب‌پذیری با رابطه ۲ محاسبه می‌شود که در این رابطه، I شاخص آسیب‌پذیری SINTACS، P_i رتبه هر پارامتر و W_i وزن نسبی پارامترهاست. وزن‌های پارامترهای SINTACS در جدول ۳ و بازه‌ها و رتبه‌های مربوط به هر پارامتر در جدول ۴ آورده شده است. در این پژوهش برای بررسی آسیب‌پذیری با استفاده از SINTACS به دلیل اینکه آبخوان دشت ورزقان چندگانه بوده، بررسی آسیب‌پذیری آبخوان آزاد مانند آبخوان‌های یکپارچه انجام شد ولی در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار برای اولین بار Corrected SINTACS، ارائه شد.

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i * W_i$$

جدول ۳- وزن‌دهی پارامترهای SINTACS (AL Kuisi et al., 2006).

وزن نسبی	پارامترهای SINTACS
۵	عمق آب زیرزمینی
۴	تغذیه خالص
۵	محیط آبخوان
۴	محیط خاک
۳	توپوگرافی
۳	محیط غیراشباع
۲	هدایت هیدرولیکی

SINTACS

SINTACS اولین بار توسط سیویتا و همکاران در سال ۱۹۹۰ برای بررسی آسیب‌پذیری جنوب ایتالیا به کار برده شده و در آن هفت پارامتر عمق سطح ایستابی (S)، تغذیه خالص (I)، اثر منطقه غیراشباع (N)، نوع خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C)، و شیب (S) برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان به کار رفته است. SINTACS از نظر نوع و تعداد پارامترها شبیه DRASTIC بوده ولی در واقع رتبه‌های SINTACS متفاوت از DRASTIC است. فرآیند وزن و رتبه‌دهی پارامترها در SINTACS انعطاف بیشتری دارد. در این چهارچوب عملی،

جدول ۴- محدوده و نرخ پارامترهای SINTACS (Majdang and Sarapirome.,2013).

محیط آبخوان		نوع خاک		منطقه غیراشباع		تغذیه (میلی متر در سال)		عمق آب زیرزمینی (متر)	
رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
۸	گراول با کمی ماسه	۱	رس و سیلت	۲	رس	۱	۰-۲۵	۹	۰-۲,۵
۷	ماسه	۴	لوم سیلتی	۳	سیلت	۲	۲۵-۴۰	۸	۲,۵-۴,۵
۵	ماسه لومی	۵	لوم ماسه‌ای	۴	رس ماسه‌ای	۳	۴۰-۶۵	۷	۴,۵-۶
۳	گراول و ماسه	۶	ماسه لومی	۵	ماسه رسی	۴	۶۵-۹۰	۶	۶-۸
		۸	گراول	۷	ماسه	۵	۹۰-۱۱۰	۵	۸-۱۰
				۸	گراول	۶	۱۱۰-۱۳۵	۴	۱۰-۱۷
						۷	۱۳۵-۱۶۵	۳	۱۷-۲۵
						۸	۱۶۵-۱۹۰	۲	۲۵-۴۰
						۹	۱۹۰-۲۲۵	۱	۴۰ <
توپوگرافی		هدایت هیدرولیکی (متر بر ثانیه)							
		رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده	رتبه	محدوده
		۹	۰-۲	۴	۳ × ۱۰ ^۶ - ۵,۵ × ۱۰ ^۶	۱۰	۲۲۵-۲۷۵		
		۸	۲-۴	۵	۵,۵ × ۱۰ ^۶ - ۱ × ۱۰ ^۵	۹	۲۷۵-۳۱۵		
		۷	۴-۶	۶	۱ × ۱۰ ^۵ - ۳ × ۱۰ ^۵	۸	۳۱۵-۳۵۰		
		۶	۶-۹	۷	۳ × ۱۰ ^۵ - ۹ × ۱۰ ^۵	۷	۳۵۰-۳۷۵		
		۵	۹-۱۲	۸	۹ × ۱۰ ^۵ - ۳ × ۱۰ ^۴	۶	۳۷۵-۴۰۰		
		۴	۱۲-۱۵			۵	۴۰۰-۴۳۵		
		۳	۱۵-۱۸			۴	۴۳۵-۵۱۰		
		۲	۱۸ <						

لایه‌های DRASTIC و SINTACS

عمق آب زیرزمینی (D) و (S)

است برای تهیه لایه عمق آب زیرزمینی در سفره آزاد از داده‌های عمق سطح ایستابی پیژومترها استفاده، اما برای آبخوان تحت فشار، ژرفای کف لایه محبوس‌کننده به عنوان عمق سطح ایستابی در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه هر چه ضخامت لایه نفوذناپذیر بیشتر باشد احتمال انتقال آلاینده در آبخوان تحت فشار کمتر خواهد بود و لایه عمق به همراه لایه محیط غیراشباع در تعیین شاخص آسیب‌پذیری با داشتن بیشترین وزن مهم‌ترین پارامتر محسوب می‌شود.

تغذیه خالص (R) و (I)

تغذیه خالص مقدار آبی است که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می‌رسد. یکی از راه‌های اصلی انتقال آلاینده‌ها به آب زیرزمینی تغذیه است. تغذیه آب موجب می‌گردد تا آلوده

فاصله بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی، عمق سطح ایستابی را مشخص می‌کند. این پارامتر تعیین‌کننده عمقی است که آلوده‌کننده بایستی طی کند تا به سطح ایستابی برسد. هر چه عمق سطح ایستابی بیشتر باشد، زمان بیشتری طول می‌کشد تا این مواد آلاینده به آبخوان برسد و امکان پخش شدن، رقیق شدن و جذب مواد آلاینده در خاک وجود خواهد داشت. در هر دو چهارچوب استفاده شده، به پارامتر عمق آب زیرزمینی به همراه محیط وادوز بیشترین وزن اختصاص داده شده است. در فرایند رتبه‌دهی برای پارامتر عمق آب زیرزمینی، طول بازه رتبه های چهارچوب SINTACS نسبت به DRASTIC گسترده‌تر

اطلاعات مربوط به محیط آبخوان از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی استفاده و بر حسب جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان به هر کدام نرخ بین ۱ تا ۱۰ اختصاص داده شد. در هر دو چهارچوب استفاده شده، به پارامتر محیط آبخوان وزن ۳ اختصاص یافته است در چهارچوب DRASTIC همانند SINTACS برای انواع مواد تشکیل دهنده از بازه کمتر تا بازه بیشتر رتبه‌دهی انجام شده با این تفاوت که سیویتا و همکاران برای SINTACS رس و سیلت را هم در رتبه‌دهی آورده و کمترین بازه رتبه‌دهی (۱-۳) برای سیلت و رس است در واقع SINTACS نسبت به DRASTIC از لحاظ جنس مواد تشکیل دهنده و هم بازه رتبه‌دهی گسترده‌تر است. رتبه‌دهی برای محیط آبخوان در بخش تحت فشار با در نظر گرفتن ضخامت لایه نفوذناپذیر و همچنین با توجه به جنس و ضخامت لایه‌های تشکیل دهنده محیط اشباع انجام شد.

محیط خاک (S) و (T)

محیط خاک معمولاً با ضخامتی حدود ۰/۵ تا ۲ متر به لحاظ میکروبیولوژی منطقه بسیار فعال به شمار می‌رود. لایه خاک به دلیل فعالیت نسبتاً بالای میکروبی، وجود مواد آلی بالا و ریشه گیاهان، برای حذف و کاهش غلظت آلاینده‌ها از پتانسیل بالایی برخوردار است. برای تهیه لایه محیط خاک از نقشه خاک منطقه استفاده گردید. این نقشه پس از رقوم‌سازی در محیط ArcGIS به حالت رستری تبدیل شد. در DRASTIC به ۱۰ نوع خاک رتبه ۱ تا ۱۰ اختصاص یافته که به ترتیب کمترین و بیشترین رتبه برای رس غیر متراکم و گراول است. در SINTACS رتبه‌دهی به صورت بازه بوده و در این چهارچوب ۱۳ نوع خاک تعیین شده که رتبه‌های ۱ تا ۵ را برای خاک‌های رسی در نظر گرفته است، تفاوت این پارامتر در ساختار هر دو چهارچوب این است که در SINTACS میزان وزن اختصاص یافته به نوع خاک ۲ برابر DRASTIC یعنی ۴ به ۲ است. در نتیجه پارامتر خاک در تعیین شاخص آسیب‌پذیری با استفاده از SINTACS نسبت به DRASTIC فاکتور مهمی برای ارزیابی آسیب‌پذیری در هر دو

کننده در جهت ثقل انتقال یافته و به سطح ایستابی برسد و به صورت افقی در آبخوان حرکت کند. برای تعیین آسیب‌پذیری با استفاده از SINTACS و DRASTIC به پارامتر تغذیه خالص وزن ۴ اختصاص یافته است. برای این پارامتر بازه‌های رتبه‌دهی در SINTACS نسبت به DRASTIC گستردگی بیشتری دارد. در هر دو چهارچوب استفاده شده، نحوه محاسبه مقدار تغذیه برای هر دو نوع آبخوان یکسان است ولی در صورتی که آبخوان آزاد در بالای آبخوان تحت فشار واقع شده باشد، لایه تغذیه هم جزء لایه‌هایی است که محاسبه متفاوت در تعیین شاخص آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار خواهد داشت. در محدوده مطالعاتی ورزقان به دلیل واقع شدن آبخوان آزاد و تحت فشار در مجاورت هم، برای محاسبه میزان تغذیه خالص در هر دو نوع آبخوان در ابتدا اختلاف سطح آب پیزومترهای دو سال آبی متوالی را به دست آورده و در محیط ArcGIS برای داده‌های اختلاف سطح آب پیزومترها پلیگون تیسن رسم و مساحت پلیگون‌ها محاسبه شد، برای به دست آوردن میزان پمپاژ، تخلیه تعداد چاه‌های آماربرداری شده برای منطقه در هر پلیگون تعیین و میزان حجم آب کاهش یافته برای هر پیزومتر از حاصل ضرب ضریب ذخیره در مساحت پلیگون و اختلاف سطح آب پیزومترهای دو سال متوالی محاسبه شد در نتیجه حجم آب کاهش یافته برای هر پیزومتر محاسبه و در نهایت میزان پمپاژ به میزان حجم آب کاهش یافته اضافه و میزان تغذیه خالص به مترمکعب بر سال برای هر دو نوع آبخوان آزاد و تحت فشار تعیین شد.

محیط آبخوان (A) و (A)

محیط آبخوان شامل فضاهای خالی و شکستگی‌هایی است که آب را در خود نگه داشته و عبور می‌دهند. بنابراین مواد تشکیل دهنده آبخوان بر جریان درون آن تأثیر می‌گذارد که این مسیر، جریان حرکت آلاینده‌ها را از طریق این محیط تعیین می‌کند. بنا به گفته آلر و همکاران برای آبخوان آزاد محیط آبخوان از سطح ایستابی تا سنگ کف و برای آبخوان تحت فشار از کف لایه نفوذناپذیر تا سنگ کف در نظر گرفته شد. برای به دست آوردن

رتبه در Corrected SINTACS برای ارزیابی آبخوان تحت فشار متفاوت تر از DRASTIC برای این آبخوان انجام شد. این پارامتر در هر دو چهارچوب مانند لایه عمق بیشترین وزن (۵) را به خود اختصاص می‌دهد.

هدایت هیدرولیکی (C) و (C)

هدایت هیدرولیکی، توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در انتقال آب را گویند که به درصد فضاهای خالی مرتبط به هم در لایه آبدار بستگی دارد. این مشخصه، حرکت آلاینده و پخش آن را در منطقه اشباع کنترل می‌کند. پس هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد امکان جریان یافتن آلاینده‌ها در آبخوان بیشتر خواهد بود. اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل و مقادیر به دست آمده به فرمت قابل قبول برای ArcGIS تبدیل و درون‌یابی شد. در واقع نحوه محاسبه هدایت هیدرولیکی برای هر دو نوع آبخوان یکسان است.

نتایج و بحث

به منظور اجرای چهارچوب SINTACS و DRASTIC در محیط ArcGIS مراحل آماده‌سازی نقشه‌های معیار چهارچوب‌ها، وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی اعمال شدند. در SINTACS و DRASTIC به ترتیب چگونگی محاسبه رتبه و وزن‌دهی به پارامترها بر اساس طبقه‌بندی آلر و همکاران و سیویتا و همکاران به صورت زیر انجام می‌شود.

چهارچوب عملی DRASTIC

نقشه پارامترهای DRASTIC که شامل عمق آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، محیط غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) است به صورت هفت لایه رستری تهیه شد که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. این هفت لایه رستری در محیط نرم‌افزار ArcGIS بر اساس تابع هم‌پوشانی تلفیق و نقشه آسیب پذیری آبخوان چندگانه دشت ورزقان تهیه گردید. با توجه به این که لایه‌های مورد نظر در DRASTIC هر یک دارای وزن خاصی بودند، برای ترکیب و تلفیق داده‌ها از تابع هم‌پوشانی وزنی از

نوع آبخوان به حساب می‌آید. بنابراین چهارچوب SINTACS در اختصاص رتبه و وزن نسبت به DRASTIC گستردگی بیشتری برای پارامتر خاک دارد. برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان تحت فشار با استفاده از Corrected SINTACS ۲ متر بالایی خاک که عمدتاً از رس و سیلت تشکیل شده است و با توجه به داشتن وزن بیشتر فاکتور خاک در SINTACS نسبت به DRASTIC در کاهش آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار فاکتور مهمی برای مهار آلودگی به حساب می‌آید.

توپوگرافی (T) و (S)

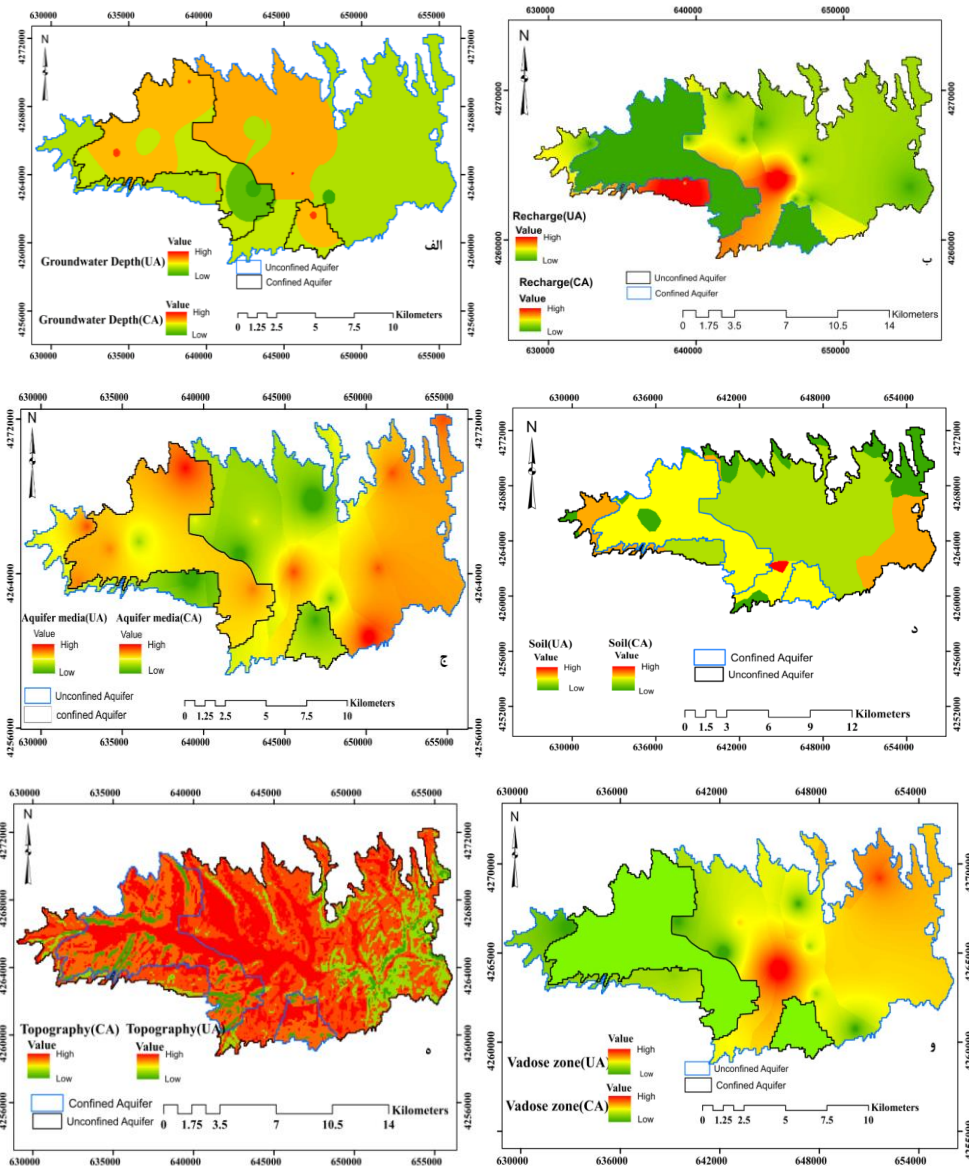
این لایه به تغییرات شیب سطح زمین مربوط می‌شود. توپوگرافی بر حسب شیب و تغییرات آن، عامل کنترل‌کننده‌ای در نفوذ آلاینده‌ها و تشکیل رواناب به شمار می‌رود. افزایش شیب توپوگرافی موجب کاهش ماندگاری آب بر روی سطح زمین و کاهش نرخ نفوذ و کاهش شیب نیز موجب افزایش نرخ نفوذ شده است و پتانسیل آلودگی بیشتری را ایجاد می‌کند. پس ناحیه با شیب کمتر، رتبه بیشتر و ناحیه با شیب بیشتر رتبه کمتر را در محاسبه شاخص آسیب‌پذیری خواهد داشت. تهیه لایه توپوگرافی برای هر دو نوع آبخوان یکسان است.

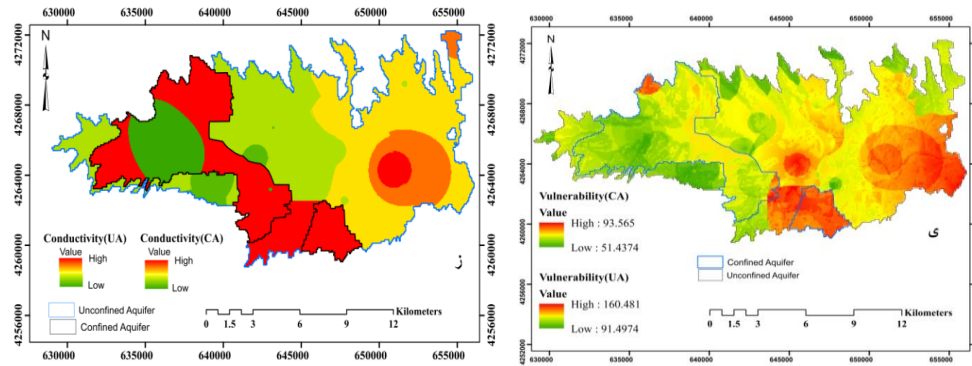
محیط غیر اشباع (I) و (N)

منطقه غیراشباع، رسوبات موجود از سطح ایستابی تا زون خاک را شامل می‌شود که اساساً غیراشباع است و عبور و رقیق شدن مواد آلاینده را به منطقه اشباع کنترل می‌کند. برای تهیه لایه محیط غیراشباع، در هر دو چهارچوب، از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی استفاده شده است. رتبه‌دهی برای آبخوان آزاد در هر دو چهارچوب ارزیابی آسیب‌پذیری، تقریباً یکسان است. لایه محیط غیراشباع در ارزیابی آسیب‌پذیری با DRASTIC برای آبخوان تحت فشار به صورت لایه محصورکننده در نظر گرفته می‌شود که شامل سیلت و رس غیرقابل نفوذ است و در رتبه‌بندی DRASTIC به صورت لایه محصورکننده امتیاز ۱ را می‌گیرد. در چهارچوب SINTACS بازه رتبه‌دهی برای سیلت و رس نسبت به DRASTIC گسترده‌تر است و اختصاص

منطقه مورد مطالعه به ترتیب در مناطق با آسیب پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شده و برای آبخوان تحت فشار به ترتیب ۴۵، ۳۳، ۲۲ درصد در مناطق با آسیب پذیری کم، متوسط و زیاد قرار دارد.

منوی Raster calculator در نرم افزار ArcGIS برای تلفیق لایه ها استفاده و تعیین آسیب پذیری برای هر یک از آبخوان های آزاد و تحت فشار انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده شاخص DRASTIC برای آبخوان آزاد ۱۶۰-۹۱ و برای آبخوان تحت فشار ۹۳-۴۸ برآورد شد که برای آبخوان آزاد ۳۳، ۵۹، ۸ درصد





شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی پارامترهای DRASTIC: الف) ژرفای آب زیرزمینی؛ ب) تغذیه؛ ج) محیط آبخوان؛ د) محیط خاک؛ ه) شیب سطح زمین؛ و) زون غیراشباع؛ ز) هدایت هیدرولیکی؛ ی) نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه، UA: Unconfined Aquifer و Confined Aquifer. CA:).

چهارچوب عملی SINTACS

آبخوان آزاد

نقشه‌های مربوط به هر کدام از پارامترهای SINTACS برای آبخوان آزاد همانند نقشه‌های DRASTIC تهیه شده است. شاخص SINTACS برای آبخوان آزاد ورزقان با استفاده از لایه‌های اطلاعاتی رتبه‌بندی شده و بر اساس رابطه ۲ و جدول ۴ محاسبه گردید و نقشه آسیب‌پذیری آبخوان آزاد تهیه شد (شکل ۴). شاخص SINTACS برای آبخوان آزاد عددی بین ۱۸۸-۱۲۳ به دست آمد که در ۳ گروه آسیب‌پذیری کم (۱۵۲-۱۲۳)، متوسط (۱۶۱-۱۵۲) و زیاد (۱۸۸-۱۶۱) قرار می‌گیرد. بر اساس نتایج حاصل از SINTACS، ۱۲ درصد دشت در منطقه با آسیب‌پذیری کم و ۵۳ درصد در محدوده با آسیب‌پذیری متوسط و ۳۵ درصد در ناحیه با آسیب‌پذیری زیاد قرار می‌گیرد.

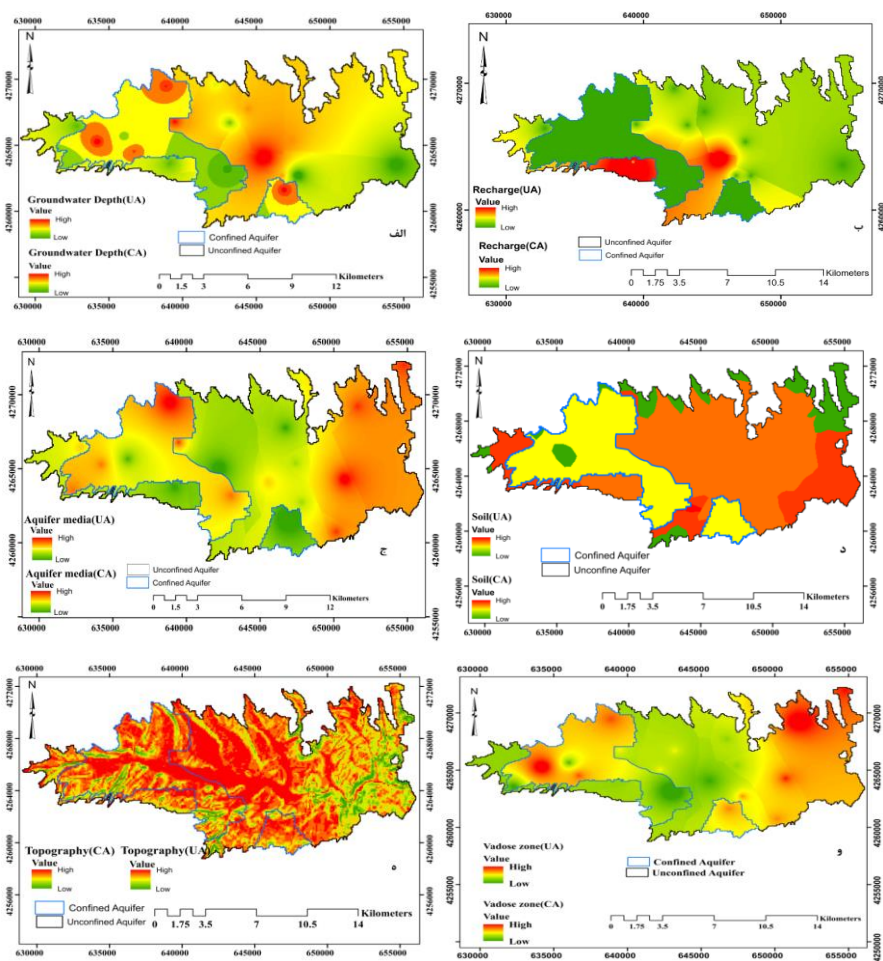
آبخوان تحت فشار

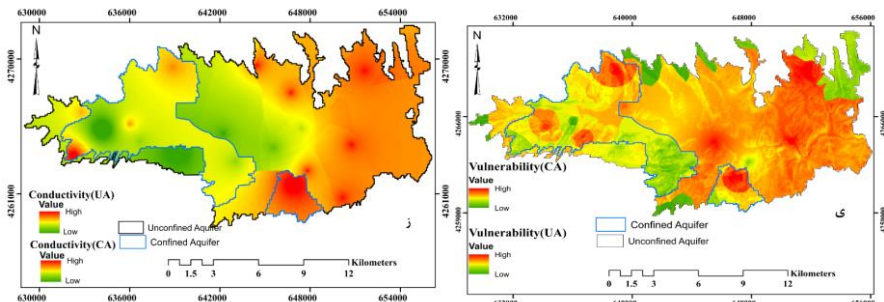
در این پژوهش برای اولین بار، برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار چهارچوب Corrected SINTACS ارائه شده است که ساز و کار این چهارچوب برگرفته از DRASTIC در ارزیابی آبخوان تحت فشار و نحوه رتبه‌دهی و اختصاص وزن چهارچوب ارائه شده همانند SINTACS در آبخوان آزاد است. تفاوت DRASTIC و SINTACS با چهارچوب ارائه شده (Corrected SINTACS) برای آبخوان تحت فشار در نحوه تهیه لایه‌ها و تفاوت رتبه‌دهی برای این چهارچوب است. در

چهارچوب ارائه شده، تهیه لایه‌های محیط آبخوان، محیط وادوز و لایه عمق متفاوت‌تر از آبخوان آزاد است. محاسبه پارامترهای دیگر از جمله تغذیه خالص، هدایت هیدرولیکی، محیط خاک و توپوگرافی برای آبخوان تحت فشار همانند آبخوان آزاد و تقریباً فرآیند رتبه‌دهی و وزن‌دهی برای ۴ لایه ذکر شده، همانند Corrected SINTACS است. در تهیه لایه عمق آب زیرزمینی سفره آزاد از داده‌های ژرفای سطح ایستابی استفاده اما برای آبخوان تحت فشار، ضخامت کف لایه محبوس‌کننده به عنوان ژرفای سطح ایستابی در نظر گرفته شد. در تهیه این لایه برای آبخوان تحت فشار، از اطلاعات لاگ‌های اکتشافی استفاده شد و به مناطقی که ضخامت لایه نفوذناپذیر کمتر بود رتبه بیشتر و به قسمت‌هایی که ضخامت بالایی داشت کمترین رتبه اختصاص یافت. برای تهیه لایه محیط غیراشباع، از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی استفاده شد. بخش غیراشباع لاگ‌های موجود در آبخوان تحت فشار عمدتاً از رس و کمی سیلت تشکیل شده که برای آبخوان تحت فشار به صورت لایه محصورکننده شامل سیلت و رس غیرقابل نفوذ است. برای پارامتر محیط غیراشباع هرچه ضخامت لایه نفوذناپذیر و یا در واقع محیط غیراشباع آبخوان بیشتر باشد، امکان انتقال آلاینده کاهش می‌یابد و تا زمانی که به محیط آبخوان برسد فرآیند رقیق‌سازی انجام شده است و خطر آلودگی محیط آبخوان کاهش خواهد داشت. با توجه به ضخامت لاگ‌های موجود، به بیشترین ضخامت محیط غیراشباع در

عمق) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار مهم‌ترین نقش را ایفا می‌کند. در نهایت با همپوشانی ۷ لایه مؤثر در تعیین شاخص آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار، شاخص عددی آسیب‌پذیری بین ۱۳۳-۸۰ بدست آمد. در تعیین نقاط آسیب‌پذیر آبخوان تحت فشار مهم‌ترین فاکتور ضخامت لایه نفوذناپذیر (رس و سیلت) است که هرچه ضخامت بیشتری داشته باشد امکان انتقال آلاینده و مقادیر شاخص آسیب‌پذیری کاهش خواهد یافت (شکل ۴).

آبخوان تحت فشار یعنی ۳۰ متر، کمترین رتبه از بازه رس و سیلت و به کمترین ضخامت یعنی ۲ متر، بیشترین رتبه اختصاص یافت. در تهیه لایه محیط آبخوان برای تحت فشار، بخش اشباع آبخوان از کف لایه نفوذناپذیر تا سنگ کف در نظر گرفته شد و بر طبق جنس و ضخامت لایه‌های تشکیل‌دهنده و ضخامت قسمت غیراشباع آبخوان، رتبه‌دهی انجام شد در واقع در Corrected SINTACS برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار، لایه نفوذناپذیر و ضخامت آن مهم‌ترین فاکتور بوده، که در تهیه هر سه لایه (محیط آبخوان، محیط غیراشباع و لایه





شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی پارامترهای SINTACS؛ الف) ژرفای آب زیرزمینی؛ ب) تغذیه؛ ج) محیط آبخوان؛ د) محیط خاک؛ ه) شیب سطح زمین؛ و) زون غیراشباع؛ ز) هدایت هیدرولیکی، ی) نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه.

دسته کم، متوسط، زیاد تقسیم‌بندی شده و سپس تعداد چاه‌هایی که مقادیر نیترات آن با نقشه‌های آسیب‌پذیری دارای ارزش یکسانی است و در یک گروه قرار دارند به ۳ ضرب و آن تعداد از چاه‌هایی که مقادیر نیترات و گروه آسیب‌پذیری آن به مقدار ۱ و ۲ اختلاف دارند به ترتیب در ۲ و ۱ ضرب می‌شوند و سپس مقادیر حاصل باهم جمع بسته شده و شاخص همبستگی (CI) به دست می‌آید که این می‌تواند همبستگی بین چهارچوب‌های آسیب‌پذیری و مقادیر نیترات را نشان می‌دهد که CI بالاتر به معنی همبستگی بیشتر است (فیجانی و همکاران، ۲۰۱۳). صحت سنجی DRASTIC با استفاده از داده‌های غلظت نیترات در منطقه انجام شد که نتایج همبستگی بین غلظت‌های نیترات و مقادیر آسیب‌پذیری، برتری DRASTIC را نسبت به SINTACS و Corrected SINTACS را نسبت به DRASTIC به ترتیب در پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر آبخوان آزاد و تحت فشار نشان داد. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده DRASTIC و Corrected SINTACS در ارزیابی آسیب‌پذیری به ترتیب با داشتن بیشترین شاخص همبستگی (CI) برای آبخوان آزاد و تحت فشار از اولویت بالاتری برخوردار می‌باشند.

انطباق چاه‌های با سه سطح آلودگی نیترات و دسته‌های آسیب‌پذیری پیش‌بینی شده توسط DRASTIC, SINTACS و Corrected SINTACS در جدول ۵ و ۶ برای هر دو نوع آبخوان آورده شده است شکل ۵ انطباق یون نیترات با نقشه‌های آسیب‌پذیری را برای چهارچوب‌ها را نشان می‌دهد.

صحت سنجی چهارچوب‌های DRASTIC, SINTACS

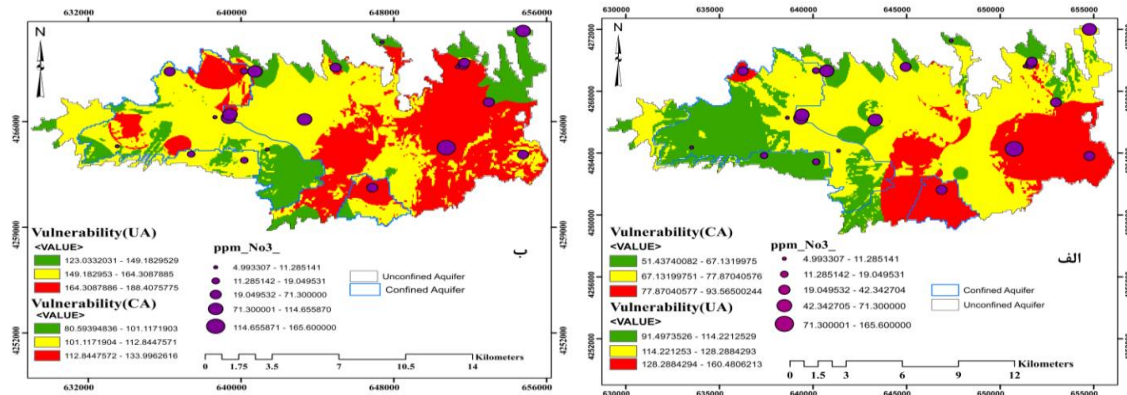
در مبحث همپوشانی لایه‌ها، از تلفیق هفت لایه وزن‌دار اطلاعاتی، شاخص DRASTIC و متعاقب آن نقشه آسیب‌پذیری منطقه به دست آمد. به دلیل اینکه نسبت وزن‌های در نظر گرفته شده برای لایه‌ها متفاوت است لذا، داشتن معیاری برای مقایسه و تأیید چهارچوب ارائه شده ضروری است در نتیجه، صحت‌سنجی چهارچوب‌های به کار برده شده برای آبخوان چندگانه محدود مورد مطالعه با استفاده از یون نیترات انجام شد. در صورتی که غلظت یون نیترات در نقاطی با پراکندگی مناسب و برای یک دوره زمانی مشخص در دسترس باشد می‌توان مرحله صحت‌سنجی را انجام داد. داده‌های نیترات از آنالیز نمونه‌های محدود مورد مطالعه به دست آمده که بیشترین و کمترین میزان نیترات اندازه‌گیری شده به ترتیب ۱۶۵ و ۵ میلی‌گرم بر لیتر است. برای صحت‌سنجی چهارچوب‌های استفاده شده در محدوده مورد مطالعه به طور جداگانه برای هر دو نوع آبخوان، از داده‌های غلظت نیترات استفاده شد که برای آبخوان آزاد نتایج همبستگی نسبی با مقدار R^2 برابر با ۰/۵۹ و ۰/۲۴ را به ترتیب برای DRASTIC و SINTACS نشان می‌دهد. در صحت‌سنجی نتایج چهارچوب‌ها برای آبخوان تحت فشار، مقدار R^2 به ترتیب برای Corrected SINTACS و DRASTIC ۰/۵۵ و ۰/۳ است، در همین راستا برای صحت‌سنجی دقیق‌تر و همچنین انتخاب بهترین چهارچوب ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه ورزقان، از روش CI استفاده شد. برای این منظور مقادیر نیترات به سه

جدول ۵ - تطبیق چاه‌های اندازه‌گیری نیترات در سه سطح آلودگی با DRASTIC, SINTACS برای آبخوان آزاد.

DRASTIC	نیترات			CI
	کم	متوسط	زیاد	
کم	۴	۴	۱	۶۰
متوسط	۴	۵	۳	
زیاد	۰	۲	۲	
SINTACS				
کم	۲	۴	۱	۵۴
متوسط	۵	۲	۳	
زیاد	۱	۵	۲	

جدول ۶ - تطبیق چاه‌های اندازه‌گیری نیترات در سه سطح آلودگی با DRASTIC, Corrected SINTACS برای آبخوان تحت فشار.

DRASTIC	نیترات			CI
	کم	متوسط	زیاد	
کم	۱	۱	۰	۲۳
متوسط	۳	۲	۰	
زیاد	۰	۳	۰	
Corrected SINTACS				
کم	۱	۲	۰	۲۴
متوسط	۲	۳	۰	
زیاد	۱	۲	۰	



شکل ۵- انطباق یون نیترات با نقشه‌های آسیب‌پذیری الف (DRASTIC ب) SINTACS, Corrected SINTACS

نتایج و بحث

DRASTIC بوده که آبخوان آزاد بالای آبخوان تحت فشار واقع شده و نمونه این پژوهش توسط برزرگر و همکاران در سال ۱۳۹۲ برای آبخوان چندلایه دشت تبریز صورت گرفته است. در پژوهش حاضر برای اولین بار ارزیابی آسیب‌پذیری همزمان آبخوان‌های چندگانه دشت ورزقان که لایه آزاد و تحت فشار در مجاورت هم واقع شده، انجام یافته است. با توجه به مقایسه نتایج DRASTI

نتایج تحقیق و بررسی در پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها نشان می‌دهد که در اکثر پژوهش‌ها فقط ارزیابی آسیب‌پذیری برای آبخوان‌های آزاد انجام یافته است. در پژوهش‌هایی که بررسی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار انجام شده است، بررسی آسیب‌پذیری آبخوان چند لایه با استفاده از

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ارزیابی همزمان آسیب‌پذیری ذاتی دو آبخوان تحت فشار و آزاد دشت ورزقان انجام و تعیین مناطق دارای پتانسیل آلودگی بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محدوده مورد مطالعه بررسی شده است. جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار Corrected SINTACS ارائه شده است. برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان چندگانه محدوده مورد مطالعه، از ترکیب چهارچوب‌های کلاسیک با سیستم اطلاعات جغرافیایی برای هر دو نوع آبخوان استفاده شد. شاخص آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه ورزقان نشان می‌دهد که این آبخوان از نظر طبقه‌بندی استعداد آلودگی در محدوده متوسط تا زیاد قرار می‌گیرد که در آبخوان آزاد به دلیل عمق کم سطح ایستابی، ضخامت کمتر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی بالا و برای آبخوان تحت فشار به علت ضخامت کمتر لایه نفوذناپذیر است. به منظور اطمینان از نتایج چهارچوب‌های استفاده شده، از مقادیر نیترا موجود در آب زیرزمینی برای صحت‌سنجی استفاده و مشاهده گردید که DRASTIC و Corrected SINTACS هم‌خوانی بیشتری را با مقادیر نیترا به ترتیب در آبخوان آزاد و تحت فشار دارد که برای این ارزیابی، ضریب تعیین (R^2) و شاخص همبستگی (CI) بین هر دو چهارچوب کلاسیک و مقادیر نیترا محاسبه گردید و نتایج نشان داد که شاخص DRASTIC بالاترین همبستگی را در آبخوان آزاد با مقادیر نیترا دارد که این نشان دهنده کارآمد بودن DRASTIC در تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان آزاد دشت ورزقان است. در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار Corrected SINTACS با R^2 و CI بالاتر نسبت به DRASTIC بهترین چهارچوب عملی برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر انتخاب شد. پیشنهاد می‌شود با توجه به مشخص شدن مناطق با آسیب‌پذیری بالا در دشت ورزقان و با وجود سد باطله معدن مس سونگون در نزدیکی محدوده مورد مطالعه از دفع مواد آلاینده در مناطق آسیب‌پذیر خودداری و رفتارنگاری دقیق و مداوم نیترا در سطح دشت انجام شود.

و SINTACS که در بخش صحت‌سنجی آورده شده، نتایج نشان می‌دهد که در آبخوان آزاد DRASTIC با داشتن ضریب تعیین بالاتر نسبت به SINTACS به عنوان بهترین چهارچوب ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان آزاد عمل کرده، در آبخوان تحت فشار Corrected SINTACS با داشتن R^2 بالاتر و CI بیشتر نسبت به DRASTIC نتیجه بهتری ارائه داده است. با توجه به این نکته که ضخامت لایه نفوذناپذیر بالای محیط آبخوان مهم‌ترین پارامتر در اختصاص رتبه به لایه‌های مؤثر در ارزیابی آبخوان تحت فشار بوده و خروجی Corrected SINTACS مناطقی در آبخوان تحت فشار که لایه نفوذناپذیر (رس و سیلت) ضخامت کمتری نسبت به قسمت‌های دیگر داشته را آسیب‌پذیرتر معرفی کرده است. با توجه به این نکته که وزن اختصاصی به این فاکتور در SINTACS بیشترین مقدار و فاکتور مهمی در تعیین شاخص آسیب‌پذیری است، Corrected SINTACS با ارائه رتبه‌دهی متفاوت برای لایه‌های محیط آبخوان، محیط غیراشباع و عمق مناطق دارای کمترین ضخامت لایه نفوذناپذیر را جزء مناطق با آسیب‌پذیری بیشتر معرفی کرده است. همچنین در SINTACS نسبت به DRASTIC به فاکتور خاک وزن بیشتری اختصاص داده شده که در محاسبه شاخص آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار هم تأثیرگذار است. خاک بالای آبخوان تحت فشار عمدتاً از رس و کمی سیلت تشکیل شده و رس و سیلت به عنوان مانعی در برابر انتقال آلاینده تأثیرگذار بوده و میزان آلودگی آبخوان تحت فشار را کاهش داده است در نتیجه فاکتور خاک در تعیین دقیق‌تر مناطق دارای پتانسیل آلودگی نقش مهمی بازی می‌کند و به این علت Corrected SINTACS در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان تحت فشار عملکرد بهتری دارد. در حالت کلی با توجه به نتایج حاصل از بدست آوردن شاخص همبستگی (CI) و ضریب تعیین (R^2) برای هر دو نوع آبخوان، ارزیابی آسیب‌پذیری با چهارچوب DRASTIC و Corrected SINTACS به ترتیب برای آبخوان آزاد با سطح معنی‌داری ۰,۰۱ و آبخوان تحت فشار با سطح معنی‌داری ۰,۰۵ مناسب است.

- Evans, BM., Myers, WL. A., 1990. GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. *J SoilWater Conserv*, 45, 242– 5.
- Fijani, E., Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A., Tsai, FT-C., and Dixon, B., 2013. Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran. *Journal of hydrology*, 530,89-100.
- Majandang, J., and Sarapirome, S., 2013. Groundwater vulnerability assessment and sensitivity analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, using a GIS-based SINTACS model. *Environ Earth Science*, 68, 2025–2039.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., 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.
- Nadiri A.A, Sedghi Z, Khatibi R, Sadeghfam S., 2018a. Mapping Specific Vulnerability of multiple confined and unconfined aquifers by using artificial intelligence to learn from multiple DRASTIC frameworks. *Journal of Environmental Management*, 415-428.
- Nadiri A.A, Gharekhani M, Khatibi R., 2018b. Mapping Aquifer Vulnerability Indices using Artificial Intelligence-running Multiple Frame works (AIMF) With Supervised and unsupervised Learning. *Water resource Management*, 32(9), 3023-3040.
- Nadiri A.A, Norouzi, H., Khatibi, R., Gharekhani, M., 2019. Groundwater DRASTIC Vulnerability Mapping by Unsupervised and Supervised Techniques Using a Modelling Strategy in Two Levels. *Journal of Hydrology*, 574, 744-759.
- Sadeghfam S., Hassanzadeh, Y., Nadiri A.A, Zarghami, M., 2016. Localization of Groundwater Vulnerability Assessment Using Catastrophe Theory. *Water resource Management*, 30, 4585-4601.
- Niknam, R., Mohammadi, K., and Majd, VJ., 2007. Groundwater Vulnerability Evaluation of Tehran-Karaj Aquifer Using DRASTIC Method and Fuzzy Logic. *Iran Water Resources Research*, 2, 39-47.
- Panagopoulos, G., Antonakos, A., and Lambrakis, N., 2005. Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal* (published online).
- Rosen, L., 1994. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *GroundWater*, 32(2), 278 –85.
- Stigter, TY., Ribeiro, L., and Carvalho, D. A. M. M., 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination level in two agriculture regions in the south of Portugal. *Hydrogeology*, 14, 79-99.
- Samey, A.A., Gang, C., 2008. A GIS Based DRASTIC Model for the Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in West Mitidja: Blida City Algeria. *Research Journal of Applied Sciences*, 3(7), 500-507.
- Vrba, J., and Zoporozec, A., 1994. Guidebook on mapping groundwater vulnerability, International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise GmbH and Co, KG.
- منابع
اصغری مقدم، ا.، فیجانی، ا.، ندیری، ع.، ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک بر اساس GIS. *محیط‌شناسی*، شماره ۵۲، ۵۲-۶۴.
- قره خانی، م.، ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا.، صادقی اقدم، ف.، بهینه سازی مدل دراستیک با استفاده از ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اردبیل. *اوهیدرولوژی*، شماره ۳، ۳۲۴-۳۱۱
- مهرپرتو، م.، امینی فضل، آ.، رادفر، ج.، ۱۳۷۱. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- برزگر، ر.، ۱۳۹۲. ارزیابی کیفیت و کمیت منابع آب زیرزمینی دشت تبریز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.
- مهندسین مشاور یکم، ۱۳۸۸. گزارش و مطالعات نیمه تفصیلی آب‌های زیرزمینی دشت‌های تحت پوشش شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی در محیط GIS. مطالعات آب‌های زیرزمینی محدوده مطالعاتی اهر-ورزقان، ۲۰۸.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R., Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Ada, Oklahoma, U.S. and Environmental Protection Agency.
- Antonakos, A.K., and Lambrakis, N.J., 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology*, 288– 304.
- Almasri, M., 2008. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer Palestine. *Journal of Environmental Management*, 88-577-593.
- Al kuisi, M., El-Naqa, A., and Himmouri, N., 2006. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environmental Geology*, vol 50, 651- 667.
- Babiker, I.S., Mohamed, M.M.A., Hiyama, T & KatoK., 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara, Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345, 127–140.
- Boughriba, M., Barkaoui, A., Zarhloule, Y., Lahmer, Z., El-Houadi, B., Verdoya, M., 2009. Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment. *Arabian Journal of Geoscience*. 3, 207-220.
- Corniello, A., Ducci, D., and Napolitano, P., 1997. Comparison between parametric methods to evaluate aquifer pollution vulnerability using a GIS: An example in the Piana Campana. *Engineering Geology and the Environment*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1721-1726.