

# بهینه‌سازی مدل‌های DRASTIC و SINTACS مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: دشت اندیمشک)

مهرناز آصفی\*<sup>۱</sup>، فریدون رادمنش<sup>۲</sup>، حیدر زارعی<sup>۳</sup>

۱. کارشناس ارشد عمران، مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
۲. استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
feridon\_radmanesh@yahoo.com
۳. استادیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز  
zareih@scu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۹/۳۰

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۱/۱۸

## چکیده

مدل‌های DRASTIC و SINTACS جزو پرکاربردترین روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به شمار می‌روند، اما ضعف عمده این دو مدل، اعمال نظرهای کارشناسی برای نرخ‌بندی پارامترهای به‌کاررفته در آن‌هاست. از این رو، هدف اصلی این تحقیق، اصلاح هر دو مدل از طریق فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی دشت اندیمشک است، تا بدین ترتیب بتوان به نتایج نسبتاً صحیح‌تری از وضعیت آسیب‌پذیری (اعم از ذاتی و ویژه) آبخوان این منطقه دست یافت. در تحقیق حاضر از یون نیترات در آب زیرزمینی به‌منزله معیار اصلاح وزن پارامترهای مؤثر در آلودگی آبخوان استفاده شد. برای تعیین مدل بهینه، ضریب همبستگی بین غلظت نیترات آب زیرزمینی و شاخص آسیب‌پذیری برای هر دو مدل، با استفاده از روش آنالیز رگرسیون خطی ساده محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل DRASTIC اصلاح‌شده نسبت به مدل SINTACS اصلاح‌شده از همبستگی بهتری با غلظت نیترات برخوردار است. به همین علت، این مدل به‌منزله مدل بهینه برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت مورد مطالعه انتخاب شد. همچنین، برای ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان به آلودگی، وزن پارامتر کاربری اراضی نیز به روش AHP تصحیح و به پارامترهای هر دو مدل افزوده و بدین ترتیب نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان به هر دو روش CD و CS تهیه شد. به منظور تعیین مدل بهینه خطرپذیری آلودگی آبخوان، ضریب همبستگی هر دو شاخص با غلظت نیترات، محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. در این نوع ارزیابی آسیب‌پذیری نیز به علت همبستگی بیشتر شاخص CD اصلاح‌شده با غلظت نیترات آبخوان، این شاخص به‌منزله شاخص بهینه برای ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه دشت انتخاب شد. به طور کلی نتایج نشان داد که مدل‌های اصلاح‌شده نسبت به نرمال از همبستگی بیشتری با غلظت نیترات آبخوان برخوردارند. این امر نشان‌دهنده انطباق بیشتر مدل‌های اصلاح‌شده با شرایط واقعی آبخوان است.

## کلیدواژه

آسیب‌پذیری، دشت اندیمشک، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، DRASTIC، SINTACS.

## ۱. سرآغاز

محسوب می‌شوند (Bai, et al., 2011). از طرفی، در کشورهای نیمه‌خشکی مانند ایران که آب‌های زیرزمینی تنها منبع قابل اطمینان برای مصارف انسانی و کشاورزی و صنعتی به شمار می‌روند، مصرف بیش از حد از موجودی

آب‌های زیرزمینی مهم‌ترین منابع آب در کره زمین به شمار می‌روند، به گونه‌ای که منبع تأمین‌کننده آب برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی در بسیاری از کشورها

کاربردهای خاص تأثیر می‌گذارد (Gemitzi, et al., 2006). از بین این روش‌ها، داده‌های مورد نیاز روش‌های شاخص و هم‌پوشانی معمولاً به راحتی در دسترس قرار دارند. برای این روش‌ها، دو شیوه می‌تواند در نظر گرفته شود: روش سیستم سلسله‌مراتبی و سیستم پارامتری. روش‌های سیستم پارامتری به ۳ گروه اصلی سیستم‌های ماتریسی، سیستم‌های رتبه‌دهی و مدل‌های سیستم شمارش نقطه‌ای تقسیم می‌شوند. به طور کلی، مدل‌های سیستم شمارش نقطه‌ای، به علت اینکه اهمیت نسبی هر معیار را در خصوص آسیب‌پذیری کلی آب زیرزمینی در نظر می‌گیرند، بیشترین ارتباط را در خصوص واقعیت‌های زمین دارند. همچنین، این مدل‌ها، شناسایی شده‌ترین روش‌ها به شمار می‌روند و بارها در سطح بین‌المللی استفاده شده‌اند. DRASTIC و SINTACS از جمله این روش‌ها محسوب می‌شوند (Gogu and Dassargues, 2000). از آنجا که در دشت اندیمشک، فعالیت‌های کشاورزی از رونق زیادی برخوردارند، کودهای شیمیایی نیز کاربرد فراوانی دارند. از این رو، کودهای شیمیایی استفاده‌شده در کشاورزی مهم‌ترین منبع آلوده‌کننده آبخوان مورد مطالعه به شمار می‌روند. ترکیبات و کودهای شیمیایی نیتراة پتانسیل انحلال‌پذیری بالایی در آب دارند، به همین علت انتظار می‌رود مهم‌ترین آلاینده در آب زیرزمینی، نیتراة حاصل از فروشت این کودها از سطح خاک باشد. به عبارت دیگر، به علت آنکه معمولاً نیتراة در شرایط طبیعی در آب زیرزمینی وجود ندارد و به طور معمول از لایه سطحی وارد آب‌های زیرزمینی می‌شود، می‌توان از آن به منزله شاخصی برای نشان‌دادن وضعیت آسیب‌پذیری واقعی منطقه استفاده کرد. از سوی دیگر، به علت واقع‌شدن اندیمشک در محدوده منطقه مورد مطالعه، فعالیت‌های صنعتی، مرغداری و دامداری، سبب تولید فاضلاب‌های شهری و صنعتی و در نتیجه افزایش احتمال آلودگی آبخوان شده است. همچنین، به علت اینکه منابع آب زیرزمینی نقش مهمی در تأمین آب شرب مردم ساکن در

آب‌های زیرزمینی، به علت رشد پیوسته جمعیت و صنعتی‌شدن، کیفیت بسیاری از آبخوان‌ها را تهدید می‌کند (Khodapanah, et al., 2009). از آنجا که پایش آبخوان‌های آلوده، پرهزینه و اغلب غیرممکن است، حفاظت و نگهداری از منابع آب زیرزمینی در برابر آلودگی، برای برنامه‌ریزی، مدیریت و آمایش زمین ضروری و مهم تلقی می‌شود. بنابراین، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، برای مدیریت معقول این منابع دارای اهمیت است (Bai, et al., 2011). اصطلاح آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به آلودگی، نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ از سوی جین مارگات ارائه شد (Hasiniaina, et al., 2010). آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بر اساس هدف مورد ارزیابی به دو نوع ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان (ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی) و ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان نسبت به آلاینده یا آلاینده‌های خاص (ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه) تقسیم می‌شود. در ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی، ظرفیت آلودگی با توجه به وضعیت‌های طبیعی، از جمله زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژی و آلودگی‌های ایجادشده از طریق فعالیت‌های انسانی، بدون در نظر گرفتن آلاینده یا آلاینده‌هایی خاص مشخص می‌شود. این در حالی است که هدف ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه، ارزیابی حساسیت آبخوان نسبت به آلاینده یا گروه خاصی از آلاینده‌هاست و به اثر متقابل آلاینده با عوامل مختلف آسیب‌پذیری ذاتی بستگی دارد (Zhou, et al., 2010). به طور کلی نمی‌توان گفت برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی روش مطلقی وجود دارد. با این حال، در جهان روش‌هایی برای تخمین حساسیت آبخوان‌ها به آلودگی گسترش یافته است (Gemitzi, et al., 2006). این روش‌ها می‌توانند به ۳ طبقه اصلی روش‌های شاخص و هم‌پوشانی<sup>۱</sup>، مدل‌های شبیه‌سازی پردازشی<sup>۲</sup> و روش‌های آماری<sup>۳</sup> تقسیم شوند (Samey and Gang, 2008). هر کدام از این روش‌ها مزایا و معایبی دارند که روی مناسب‌بودن آن‌ها برای

را به طور جداگانه با یکدیگر تلفیق کردند. همچنین، برای تهیه نقشه خطرپذیری آلودگی، لایه کاربری اراضی را به پارامترهای قبلی اضافه و برای تعیین وزن بهینه این پارامتر نیز از روش‌های آماری استفاده کردند و بدین ترتیب نقشه آسیب‌پذیری منطقه ترسیم شد. بای و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از مدل DRASTIC به ارزیابی آب‌های زیرزمینی منطقه بائوتو در چین پرداختند. در این مطالعه ابتدا برای بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از مدل DRASTIC استفاده و نتایج آن را با کیفیت آب زیرزمینی آن منطقه مقایسه کردند. اما از آنجا که نتایج مدل مذکور با کیفیت آب زیرزمینی مطابقت نداشت، مدل DRASTIC را بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی و با به کارگیری تئوری ترویج<sup>۵</sup> و روش تحلیل سلسله‌مراتبی اصلاح کردند. نتایج این بررسی نشان داد که در ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه، نتایج حاصل از مدل DRASTIC اصلاح‌شده نسبت به نتایج حاصل از مدل DRASTIC نرمال مطابقت بیشتری با شرایط واقعی دارد. سینر و داوواز (۲۰۱۲) به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی حوضه دریاچه اجیردیر در ترکیه از مدل DRASTIC بهینه‌سازی شده استفاده کردند. برای این منظور، پارامترهای «درز و شکافتگی» و «کاربری اراضی» را که در انتقال مواد آلاینده به آبخوان نقش دارند به پارامترهای مدل افزودند. آن‌ها وزن این پارامترها را بر اساس نظر کارشناسی و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین کردند. بدین ترتیب علاوه بر مدل DRASTIC نرمال، دو مدل بهینه‌سازی شده برای آبخوان مورد مطالعه اجرا شد. آن‌ها به علت گسترده بودن فعالیت‌های کشاورزی در منطقه از غلظت نترات آبخوان به‌منزله معیار اصلاح مدل استفاده کردند. برای انتخاب مدل بهینه، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده، همبستگی بین غلظت نترات آبخوان و آسیب‌پذیری تعیین شد. در نهایت نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که مدل DRASTIC اصلاح‌شده از طریق روش تحلیل سلسله‌مراتبی از همبستگی بیشتری با غلظت

منطقه دارند، به منظور اطمینان از اینکه این منابع بتوانند به‌منزله منبعی سالم برای تأمین آب شرب در آینده باقی بمانند، شناسایی نواحی حساس به آلودگی امری ضروری به‌شمار می‌رود. با اینکه مدل‌های DRASTIC و SINTACS جزو پرکاربردترین مدل‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به‌شمار می‌روند، اما، باید در هر منطقه بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی تصحیح شوند تا در نهایت بتوان به نتایج صحیح‌تری دست یافت. برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، پژوهش‌های زیادی در ایران و سراسر جهان انجام شده، اما تاکنون در ایران مطالعات محدودی در زمینه بهینه‌سازی و اصلاح مدل‌های DRASTIC و SINTACS بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی صورت گرفته است. از این رو، هدف اصلی این مطالعه، بهینه‌سازی مدل‌های مذکور بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی حاکم بر دشت اندیمشک با استفاده از غلظت یون نترات و در نهایت ارائه مدل بهینه نهایی، برای ارزیابی نسبتاً صحیح‌تر وضعیت آسیب‌پذیری ذاتی و ویژه آبخوان مورد مطالعه است. شایان یادآوری است که عمل تصحیح وزن پارامترها، بر پایه وزن‌دهی به روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۴</sup> صورت گرفته است. متکان و همکاران (۱۳۸۷) به منظور پهنه‌بندی آسیب‌پذیری نترات آب‌های زیرزمینی دشت همدان، از روش‌های آماری و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی برای وزن‌دهی این پارامترها استفاده کردند. آن‌ها همچنین، علاوه بر نرخ‌بندی‌های معمول در مدل DRASTIC، برای هم‌مقیاس‌سازی نقشه‌های معیار و آماده‌سازی آن‌ها برای تلفیق و تعیین وزن مناسب، همبستگی بین غلظت نترات و پارامترها و ضرایب از همبستگی اسپیرمن و کندال از روش فازی استفاده کردند. بر این اساس ۳ پارامتر عمق سطح ایستابی، محیط آبخوان و خاک بیشترین همبستگی را با داده‌های نترات نشان دادند و به رابطه جدیدی به نام DAS دست یافتند. بنا بر وزن‌های به‌دست‌آمده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، لایه‌های قطعی و فازی DRASTIC

نیترا ت آبخوان برخوردار است. از این رو، نتایج حاصل از این مدل نسبت به سایر مدل‌ها اعتبار بیشتری دارد.

## ۲. شرح مدل‌های DRASTIC و SINTACS

DRASTIC در امریکا و به منظور حفاظت از منابع آب زیرزمینی توسعه یافت. DRASTIC مدلی تجربی است که آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی نسبت به آلودگی را بر اساس وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه مربوطه برآورد می‌کند (Hasiniaina, et al., 2010). به عبارت دیگر، این مدل بر پایه مفهوم محیط هیدروژئولوژیکی استوار است. محیط هیدروژئولوژیکی در حقیقت توصیف‌کننده ترکیبی از تمام عوامل زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی است که حرکت آب‌های زیرزمینی را در ورود، درون و خروج از سیستم در یک ناحیه تحت تأثیر قرار می‌دهد و کنترل می‌کند. واژه DRASTIC از ۷ پارامتر به کاررفته در این مدل تشکیل شده است که عبارت‌اند از: عمق تا سطح ایستابی<sup>۱</sup>، تغذیه خالص<sup>۲</sup>، محیط آبخوان<sup>۳</sup>، محیط خاک<sup>۴</sup>، توپوگرافی<sup>۵</sup>، تأثیر محیط غیراشباع<sup>۶</sup> و هدایت هیدرولیکی<sup>۷</sup> (Babiker, et al., 2005). به هر پارامتر بر اساس استعداد و حساسیت نسبی در برابر آلاینده، یک وزن نسبی از ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. همچنین، رتبه‌بندی بر اساس مقیاس ۱ تا ۱۰ و اهمیت نسبی آن در پتانسیل آلودگی منطقه مورد ارزیابی انجام می‌شود. شاخص DRASTIC از طریق جمع فاکتورهای وزنی هر بخش از منطقه و شاخص آسیب‌پذیری از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود. به طور کلی، بالاتر بودن مقدار شاخص DRASTIC، آسیب‌پذیری بیشتر نسبت به آلودگی آب زیرزمینی را نشان می‌دهد (Hasiniaina, et al., 2010).

(۱)

$$DRASTIC\ Index = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

مدل SINTACS از سوی سیویتا (۱۹۹۴، ۱۹۹۳، ۱۹۹۰) و سیویتا و دامیو (۱۹۹۷) به منظور ارزیابی قابلیت آسیب‌پذیری آلودگی نسبی آب‌های زیرزمینی با استفاده از

۷ پارامتر هیدروژئولوژیکی به کار گرفته شد. این مدل از DRASTIC امریکایی تکامل یافته است و به وسیله ۷ پارامتر عمق سطح ایستابی، نفوذ مؤثر، شرایط اشباع‌نشده، محیط خاک، خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان، هدایت هیدرولیکی، شیب توپوگرافی محاسبه می‌شود. به هر فاکتور بر اساس تأثیر و اهمیتی که در میزان آسیب‌پذیری دارد، نمره‌ای بین صفر تا ۱۰ نسبت داده می‌شود. سپس، نمره‌ها به واسطه وزن‌ها اصلاح می‌شوند که وزن‌ها با شرایط محیطی ویژه یا شرایط انسان‌منشأ یا هر دو ارتباط دارند. شاخص آسیب‌پذیری ذاتی از طریق جمع نمره‌های به دست آمده از طریق وزن‌ها، بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود. در این رابطه،  $P_i$  نمره هر ۷ پارامتر و  $W_i$  وزن نسبی پارامترهاست (Al Kuisi, et al., 2006).

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

مدل‌های تلفیق نقشه برای اجرا در سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل منطق بولین، مدل هم‌پوشانی شاخص، مدل منطق فازی و مدل وزن‌های نشانگر است (Bonham-Carter, 1994).

## ۳. نقش سامانه اطلاعات جغرافیایی در محاسبه

### ارزیابی آسیب‌پذیری

اطلاعات جغرافیایی سامانه‌ای قدرتمند برای ذخیره‌سازی، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی محسوب می‌شوند و این داده‌ها به منظور تصمیم‌گیری در مناطق مختلف، در رشته‌های مهندسی و زیست‌محیطی کاربرد دارند (Balakrishnan, et al., 2010). هزینه کم، دقت محاسباتی بالا، استفاده از توابع تحلیلی پیچیده، قابلیت تفکیک طیفی، مکانی و زمانی درخور توجه و قابلیت‌های ویرایشی و به‌هنگام‌سازی سریع داده‌ها، مدل‌سازی و تهیه گزارش به اشکال متعدد از ویژگی‌های دیگر این سامانه است (Mace, 1997). این سیستم در علم هیدروژئولوژی ابزار محسوب می‌شود و در زمینه شناسایی، مدیریت و بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی کمک زیادی به

#### ۱.۴. مزایای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

از جمله مزایای این روش می‌توان موارد زیر را ذکر کرد:  
- فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی از جامع‌ترین سیستم‌های طراحی شده برای تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه است. این تکنیک امکان فرموله کردن مسئله را به صورت سلسله‌مراتبی فراهم می‌کند. همچنین، امکان در نظر گرفتن معیارهای مختلف کمی و کیفی و تحلیل حساسیت معیارها را در مسئله دارد.

- این فرایند از مبنای تئوری قوی برخوردار و بر اساس اصول بدیهی بنا شده است و با توجه به مبنای مقایسه زوجی، قضاوت و محاسبات را تسهیل می‌کند.  
- این فرایند مجموعه‌ای از قضاوت‌ها (تصمیم‌گیری‌ها) و ارزش‌گذاری‌های شخصی به شیوه منطقی است. به طوری که می‌توان گفت تکنیک از یک طرف وابسته به تصورات شخصی و تجربه برای شکل دادن و طرح‌ریزی سلسله‌مراتبی مسئله است و از طرف دیگر به منطق، درک و تجربه برای تصمیم‌گیری و قضاوت نهایی مربوط می‌شود (قدسی‌پور، ۱۳۷۹).

#### ۵. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

دشت اندیمشک با مساحتی حدود ۲۹۵ کیلومتر مربع و مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی در شمال غرب استان خوزستان واقع شده است (شکل ۱). این دشت از شمال و شمال غرب و غرب به ارتفاعات، از شرق به رودخانه دز و از جنوب و جنوب غرب به تاقدیس شیرین آب محدود می‌شود (شرکت مهندسان مشاور بهکار آب اهواز، ۱۳۹۰).

#### ۱.۵. زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، سازندهای آغاچاری، لهربری، بختیاری و رسوبات حال حاضر را شامل می‌شود. به علت حضور کنگلومرای بختیاری در این دشت و

متخصصان کرده است (Prasad, et al., 2008). بنابراین، سامانه اطلاعات جغرافیایی، به علت ویژگی‌ها و توانایی‌های خاص خود، در بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی ابزاری بسیار مفید محسوب می‌شود.

#### ۴. شرح روش تحلیل سلسله‌مراتبی

روش تحلیل سلسله‌مراتبی به علت داشتن مبنای نظری قوی، دقت بالا، سهولت استفاده، دارا بودن ارزش و اعتبار و درستی دقت نتیجه یکی از معتبرترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است (عطایی، ۱۳۸۹). ساعتی در سال ۱۹۸۰ فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی را توسعه داد. در این فرایند، سلسله‌مراتب مؤلفه‌های تصمیمات در فرایند تصمیم‌گیری استفاده می‌شوند. در واقع فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی پروسه‌ای متقابل است که در آن تصمیم‌گیرنده یا گروهی از تصمیم‌گیرندگان اولویت‌هایشان را به تحلیل‌گر منتقل می‌کنند و می‌توانند در خصوص نتایج و عقاید خود بحث و مناظره کنند. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی بر پایه ترکیبی از یک سری ماتریس‌های مقایسه دو به دو است که همه معیارها را با یکدیگر مقایسه می‌کند. این فرایند به منظور برآورد وزن‌دهی و درجه‌بندی هر یک از معیارها در مقایسه با سایر معیارهاست. این امتیازدهی، نشانه اهمیت هر یک از این معیارهای شرکت‌داده‌شده برای نیل به هدف کلی است. ساعتی در سال ۱۹۸۰ مقیاسی از ۱ تا ۹ را برای عناصر ماتریس‌های مقایسه دو به دو پیشنهاد داد، که در آن عدد ۱ نشان می‌دهد که معیارها اهمیت یکسانی دارند و عدد ۹ نشان می‌دهد که معیار تحت بررسی در مقایسه با دیگر معیارها دارای اهمیت بسیاری است. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی مسئله مطرح‌شده از سوی تصمیم‌گیرنده را به ساختار سلسله‌مراتبی تجزیه می‌کند. عناصر یک سطح به خصوص سلسله‌مراتب به صورت دو به دو، همان‌طور که در بالا شرح داده شد، مقایسه می‌شوند (Thirumalaivasan, et al., 2003).

ساده<sup>۱۶</sup> محاسبه شد. بدین منظور، در این تحقیق، از مقادیر نیترات ۳۳ حلقه چاه در منطقه در مرداد ۱۳۹۰، به‌منزله پارامتر کنترل‌کننده اصلی (آلاینده شاخص) استفاده شده است. در نهایت بر اساس ضریب همبستگی بیشتر هر شاخص با غلظت نیترات، مدل بهینه برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان مورد مطالعه معرفی شد.

#### ۷. تهیه نقشه‌های معیار مدل

در ابتدا بر اساس داده‌های جمع‌آوری‌شده به تهیه نقشه‌های معیار مورد نیاز مدل، بر پایه توابع سیستم اطلاعات جغرافیایی اقدام شد. به منظور تهیه لایه عمق سطح ایستابی، از داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای دشت مورد مطالعه استفاده شد. اطلاعات مورد نیاز برای تهیه این لایه برای یک دوره ۱ ساله از مهر ۸۸ تا شهریور ۸۹ جمع‌آوری شد. برای تهیه لایه عمق آب زیرزمینی، از اطلاعات حداقل عمق آب زیرزمینی چاه‌های مشاهده‌ای در منطقه استفاده شد. از این رو، برای دستیابی به این اطلاعات، ابتدا هیدروگراف واحد دشت در سال آبی ۸۸-۸۹ ترسیم شد. طبق هیدروگراف واحد حداقل عمق آب زیرزمینی مربوط به مرداد انتخاب شد. برای تهیه این لایه از اطلاعات ۱۵ حلقه چاه مشاهده‌ای استفاده شد. در نهایت به منظور تبدیل نقاط مذکور به سطح، از درون‌یابی کریجینگ استفاده و لایه رستری عمق تا سطح ایستابی منطقه تهیه شد.

برای تهیه لایه تغذیه خالص از روش پیسکوپو (۲۰۰۱) استفاده شد. بدین منظور، ابتدا مدل رقومی ارتفاعی<sup>۱۷</sup> منطقه تهیه، سپس نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی استخراج و با استفاده از معیارهای مربوطه رده‌بندی شد. نقشه خاک منطقه نیز با توجه به معیارهای تعریف‌شده، تهیه و رده‌بندی شد. همچنین، به منظور تهیه نقشه بارش با استفاده از داده‌های ارائه‌شده از سوی سازمان آب و برق خوزستان، نقشه بارش محدوده مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۱ ساله تهیه شد. پس از تهیه تمام نقشه‌های

تخریب، فرسایش و حمل مواد این سازند در قسمت اعظم محدوده، آبرفت دشت مورد مطالعه، بیشتر شامل مواد دانه درشت و قلوهای است. با توجه به نتایج آزمون پمپاژ انجام‌شده در یکی از چاه‌های واقع در جنوب منطقه مورد مطالعه، مقدار ضریب آب‌گذری، هدایت هیدرولیکی، ظرفیت ویژه و ضریب ذخیره در این چاه به ترتیب برابر با ۸۵۰ متر مربع در روز، ۱۲/۵ متر مربع در روز، ۶۰/۷۱۴ لیتر بر ثانیه بر متر و ۱۷/۵ درصد است (شرکت مهندسان مشاور بهکار آب اهواز، ۱۳۹۰).

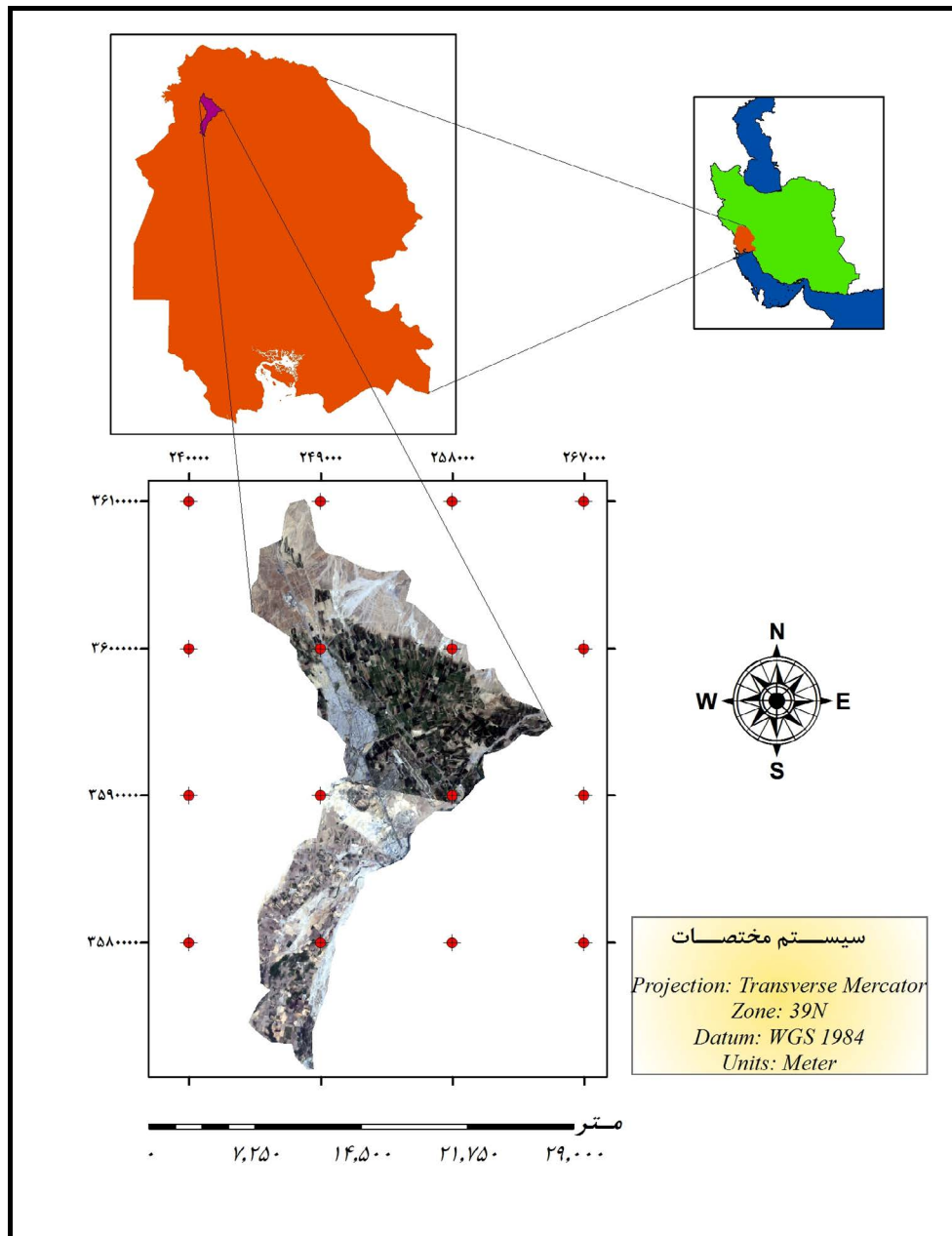
#### ۶. مواد و روش‌ها

برای مدل‌سازی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت اندیمشک در محیط GIS، به دو روش DRASTIC و SINTACS، پس از جمع‌آوری داده و اطلاعات مورد نیاز برای هر مدل، اقدام به ساخت پایگاه اطلاعاتی شد. برای تهیه نقشه‌های معیار<sup>۱۳</sup>، با اعمال تبدیلاتی، داده‌های جمع‌آوری‌شده به لایه‌های رستری تبدیل شد و بر اساس معیارهای تعریف‌شده در مدل‌های مورد بررسی، وزن‌دهی، رتبه‌دهی و کلاس‌بندی صورت گرفت. برای تهیه نقشه‌های معیار مورد نیاز مدل، آنالیزهای مکانی مختلفی روی داده‌های مورد نیاز، صورت گرفت که از آن جمله می‌توان به تبدیل داده‌های نقطه‌ای به سطح، شامل درون‌یابی کریجینگ<sup>۱۴</sup>، ایجاد شبکه تیسن<sup>۱۵</sup> و ... اشاره کرد. هدف اصلی از تهیه نقشه‌های معیار، تلفیق آن‌ها با یکدیگر با استفاده از تکنیک هم‌پوشانی و در نتیجه تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان مورد مطالعه است. در تحقیق حاضر، علاوه بر نرخ‌بندی پارامترهای ورودی بر اساس تئوری روش‌های DRASTIC و SINTACS نرمال، از وزن‌های اصلاح‌شده با کاربرد روش AHP و بر اساس قضاوت‌های کارشناسی، برای تهیه نقشه‌های معیار استفاده شد. به منظور تعیین وزن بهینه هر پارامتر، ضرایب همبستگی بین شاخص‌های آسیب‌پذیری محاسبه‌شده از طریق هر دو روش و غلظت نیترات با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی

مشاهده‌ای و بهره‌برداری در منطقه استفاده شد. سپس، بر اساس نسبت جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در هر کدام از چاه‌های مذکور، به هر یک رتبه‌ای بر اساس معیارهای تئوری روش DRASTIC اختصاص یافت. سپس، شبکه تیسن منطقه بر اساس موقعیت چاه‌ها و نسبت به مرز منطقه مورد مطالعه تهیه شد. در نهایت لایه به دست آمده، بر اساس رتبه داده شده به هر چاه به لایه رستری تبدیل شد.

مذکور، برای به دست آوردن لایه تغذیه، نقشه‌های شیب و خاک همراه رتبه بارندگی منطقه (که در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱ است) هم‌پوشانی شدند. سپس، لایه به دست آمده با استفاده از این روش با توجه به معیارهای جدول ۱ طبقه‌بندی شد. معادله پيسكوپو برای محاسبه تغذیه پتانسیل یک منطقه به صورت زیر است (Piscopo, 2001):

تغذیه = نفوذپذیری خاک + میزان بارندگی + شیب  
 برای تهیه لایه محیط آبخوان از لاگ چاه‌های



شکل ۱. نقشه موقعیت دشت اندیمشک

ضريب قابليت انتقال اندازه گيري مي شود، اطلاعات و موقعيت جغرافيايي مربوط به ضريب قابليت انتقال و هم ضخامت اشباع آبخوان دشت، از نقشه هاي تهيه شده از سوي سازمان آب و برق به دست آمد. سپس، نقشه ضريب قابليت انتقال بر نقشه هم ضخامت آبخوان، تقسيم و نقشه هدايت هيدروليكي دشت به دست آمد. در نهايت، نقشه هدايت هيدروليكي با توجه به تئوري مدل DRASTIC، کلاس بندي و ارزش گذاري شد.

پس از انجام مراحل بالا، نقشه هاي معيار تهيه شده بر اساس معيارهاي روش DRASTIC نرمال، نرخ بندي و ارزش گذاري شدند. سپس، طبق رابطه ۱ با تکنیک هم پوشاني شاخص تلفيق شدند و شاخص آسيب پذيري ذاتي آبخوان مورد مطالعه، به روش DRASTIC نرمال محاسبه شد. براي محاسبه شاخص SINTACS نرمال نیز دقیقاً مانند روش DRASTIC عمل شد. با اين تفاوت که نقشه هاي معيار تهيه شده با توجه به معيارهاي ارائه شده در مدل SINTACS، وزن دهی، رتبه دهی و ارزش گذاري و بر اساس رابطه ۲، لايه هاي به دست آمده با يکديگر تلفيق شدند. بدین صورت شاخص آسيب پذيري ذاتي آبخوان دشت مورد مطالعه به روش SINTACS نرمال نیز محاسبه شد. به منظور ارزيابي صحت وزن هاي اختصاص داده شده به پارامترهاي مدل DRASTIC و SINTACS، بر اساس شرايط واقعي منطقه، اقدام به تحليل حساسيت مدل شد.

براي تهيه لايه محيط خاک، با استفاده از نقشه هاي خاک، تپ هاي مختلف خاک از نظر بافت شناسي در منطقه مطالعاتي شناسايي شد. سپس، بر اساس بافت هاي خاک در منطقه بر اساس معيارهاي تعريف شده در تئوري مدل DRASTIC ارزش گذاري و کلاس بندي شد.

به منظور تهيه لايه توپوگرافي، ابتدا مدل رقومي ارتفاعي منطقه با مقياس ۱:۲۵۰۰۰ تهيه، سپس نقشه شيب از اين مدل رقومي ارتفاعي استخراج شد. در نهايت براي تهيه لايه توپوگرافي، نقشه شيب به دست آمده با استفاده از استانداردها و معيارهاي تعريف شده در مدل DRASTIC، کلاس بندي و ارزش گذاري شد.

براي تهيه لايه محيط غيراشباع از لاگ چاه هاي مشاهده اي و بهره برداري در دشت استفاده شد. براي تهيه اين لايه روشي مشابه تهيه نقشه پارامتر محيط آبخوان به کار برده شد. هر يك از چاه ها بر اساس وضعيت ليتولوژيكي، ضخامت و جنس رسوبات بخش غيراشباع و ميزان تأثير آن ها در انتقال آلودگي به آبخوان، بر اساس رتبه هاي تعريف شده در مدل DRASTIC، رتبه بندي شد. در اين لايه همانند لايه محيط آبخوان، شبکه تيسن منطقه بر اساس موقعيت نسبت به مرز منطقه مورد مطالعه تهيه شد. در انتها، لايه تهيه شده به اين روش، بر اساس رتبه داده شده به هر چاه به لايه رستري تبديل شد. با توجه به آنکه در آزمون هاي پمپاژ مقدار پارامتر

جدول ۱. نمره هاي تغذيه براي منطقه مورد مطالعه

میزان تغذيه		ج) نفوذ پذيري خاک		ب) بارندگي		الف) شيب	
نمره	محدوده	فاکتور	محدوده	فاکتور	بارش (ميلي متر)	فاکتور	شيب (%)
۱۰	۱۱-۱۳	۵	زياد	۴	> ۸۵۰	۴	< ۲
۸	۹-۱۱	۴	متوسط تا زياد	۳	۷۰۰-۸۵۰	۳	۲-۱۰
۵	۷-۹	۳	متوسط	۲	۵۰۰-۷۰۰	۲	۱۰-۳۳
۳	۵-۷	۲	کم	۱	< ۵۰۰	۱	> ۳۳
۱	۳-۵	۱	خيلى کم				

(Piscopo, 2001)



آلودگی نیترات بر اساس این شاخص دارای بازه‌ای بین ۲۸ تا ۲۸۰ است و از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

(۴)

$$CD\ Index = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r + L_w L_r$$

در این رابطه،  $L_w$ : وزن نسبی پتانسیل خطرپذیری مرتبط با کاربری اراضی،  $L_r$ : رتبه پتانسیل خطرپذیری مرتبط با کاربری اراضی و بقیه پارامترها، مشابه پارامترهای به‌کاررفته در رابطه ۱ است. نقشه پتانسیل خطرپذیری مرتبط با کاربری اراضی با استفاده از متدولوژی مشابه به‌کاررفته برای سایر پارامترهای شاخص DRASTIC تهیه (Martinez-Bastida, et al., 2010) و شاخص CD بر اساس جدول ۲ طبقه‌بندی می‌شود. شایان یادآوری است که برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ویژه به روش SINTACS نیز همانند روش DRASTIC عمل می‌شود.

جدول ۲. بازه‌های آسیب‌پذیری مربوط به شاخص CD

بازه (شاخص CD)	آسیب‌پذیری
< ۱۰۰	خیلی کم
۱۰۰-۱۴۵	کم
۱۴۵-۱۹۰	متوسط
۱۹۰-۲۳۵	زیاد
≥ ۲۳۵	خیلی زیاد

(Martinez-Bastida, et al., 2010)

### ۱.۱. بحث و نتایج

با تلفیق ۷ نقشه معیار به‌کاررفته در مدل‌های DRASTIC و SINTACS در محیط GIS، به روش هم‌پوشانی شاخص، شاخص‌های نهایی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه به هر دو روش محاسبه شد. بر این اساس، شاخص نهایی آسیب‌پذیری ذاتی، به ترتیب برای روش DRASTIC بین ۷۳ تا ۱۵۷ و برای روش SINTACS بین ۹۰ تا ۱۷۱ قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت تک‌پارامتری مدل DRASTIC (جدول ۳) نشان می‌دهد که مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه، پارامتر

### ۸. تحلیل حساسیت<sup>۱۸</sup>

تحلیل حساسیت یکی از مؤلفه‌های اصلی پروژه‌های مدل‌سازی محسوب می‌شود، زیرا امکان ارزیابی صحت نتیجه را فراهم می‌آورد (Hasiniaina, et al., 2010). این تحلیل به مطالعه سهم متغیرها و پارامترهای ورودی به صورت منفرد در خروجی مدل تحلیلی می‌پردازد (Napolitano and Fabbri, 1996). به منظور تحلیل حساسیت مدل‌های به‌کاررفته از روش تحلیل حساسیت تک‌پارامتری استفاده شد.

### ۹. تحلیل حساسیت تک‌پارامتری

میزان حساسیت تک‌پارامتری برای ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترهای DRASTIC روی شاخص آسیب‌پذیری طراحی شده است. در این روش تحلیل، وزن «مؤثر» یا «واقعی» هر پارامتر ورودی در هر پلی‌گون با وزن «تئوریک» اختصاص یافته از طریق مدل تحلیلی مقایسه می‌شود. وزن مؤثر هر پلی‌گون با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$W = (P_r P_w / V) \times 100 \quad (3)$$

در این رابطه،  $W$  وزن «مؤثر» هر پارامتر،  $P_r$  و  $P_w$  به ترتیب مقدار رتبه و وزن هر پارامتر و  $V$  شاخص کلی آسیب‌پذیری است (Babiker, et al., 2005). شایان یادآوری است که تحلیل حساسیت مدل SINTACS نیز به روش بالا انجام می‌شود.

### ۱۰. آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی نیترات

آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی نیترات از طریق شاخص DRASTIC مرکب (شاخص CD)<sup>۱۹</sup> محاسبه می‌شود. این شاخص اقتباسی از شاخص DRASTIC است که با افزودن ۱ پارامتر جدید به آن، پتانسیل خطرپذیری مربوط به کاربری اراضی ( $L$ ) را تعیین می‌کند. هدف این روش، ارزیابی وسعت تأثیر پتانسیل کاربری اراضی روی کیفیت آب زیرزمینی در نتیجه استفاده از بافت خاک و محیط ناحیه غیراشباع طی زمان است. آسیب‌پذیری ویژه به

در مقایسه با فرضیات مدل SINTACS، تأثیر بیشتری روی شاخص آسیب‌پذیری منطقه مطالعاتی دارند. با توجه به تطابق نداشتن وزن‌های اختصاص‌یافته به پارامترها در هر دو مدل با نتایج تحلیل حساسیت، به تصحیح وزن پارامترهای هر دو مدل بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه اقدام شد. بدین منظور از روش AHP که بیشتر بر اساس قضاوت‌های کارشناسی استوار است، استفاده شد. به عبارتی، عملیات وزن‌دهی پارامترها با استفاده از دانش کارشناسی انجام گرفت. با توجه به این توضیحات، ۷ پارامتر در مدل‌های SINTACS و DRASTIC (به طور جداگانه)، بر اساس اهمیت و نقشی که در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان منطقه مورد مطالعه داشتند، اولویت‌بندی و معیارها، به صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه و اهمیت آن‌ها نسبت به یکدیگر تعیین شدند. سپس، ۱ ماتریس تشکیل شد که ورودی آن همان وزن‌های تعیین‌شده از طریق دانش کارشناسی است. وزن‌های کارشناسی‌شده به‌منزله ورودی به نرم‌افزار Super Decisions 2.0.8 داده شدند و در نهایت از خروجی نرم‌افزار، که در واقع وزن‌های نسبی مربوط به معیارها به شمار می‌روند، برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان مورد مطالعه استفاده شد.

برای کاهش خطای تصمیم‌گیری و انتخاب صحیح‌تر وزن‌ها، از چندین قضاوت کارشناسی استفاده و در نتیجه چندین مدل برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری اجرا شد. در نهایت بر اساس همبستگی شاخص آسیب‌پذیری نهایی و غلظت نترات در آبخوان مورد نظر، بهترین وزن‌دهی انتخاب شد. به عبارت دیگر، در میان مدل‌های اجراشده، هر چه همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری نهایی و غلظت نترات بیشتر باشد، آن مدل به‌منزله مدل بهینه منطقه گزینش می‌شود. به منظور محاسبه این ضریب همبستگی، از مقادیر نترات ۳۳ حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه به‌منزله پارامتر کنترل‌کننده اصلی (آلاینده شاخص) استفاده شد. به منظور تعیین رابطه آماری میان غلظت نترات آب

ناحیه غیراشباع (با میانگین وزن مؤثر ۲۸/۵۹ درصد) است. مقایسه وزن مؤثر هر پارامتر با وزن تئوریک آن در آبخوان مورد مطالعه نشان می‌دهد که وزن‌های مؤثر و تئوریک پارامترهای مدل کاملاً بر یکدیگر منطبق نیستند. همچنین، نتایج این تحلیل نشان می‌دهند که پس از پارامتر ناحیه غیراشباع، پارامترهای محیط آبخوان، هدایت هیدرولیکی، محیط خاک و توپوگرافی نسبت به وزن تئوریک آن‌ها در مدل DRASTIC وزن مؤثر بیشتری دارند. این در حالی است که پارامترهای تغذیه خالص و عمق تا سطح ایستابی، وزن مؤثر کمتری نسبت به وزن تئوریک نشان می‌دهند. همچنین، نتایج آماری حاصل از تحلیل حساسیت تک‌پارامتری مدل SINTACS (جدول ۴) نشان می‌دهند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار روی شاخص آسیب‌پذیری ذاتی، پارامتر تأثیر ناحیه غیراشباع است که با میانگین ۲۹/۳۲ درصد، بیشترین میانگین وزن مؤثر را در بین پارامترهای مدل داراست. مقایسه وزن مؤثر هر پارامتر با وزن تئوریک اختصاص‌داده‌شده به آن در آبخوان دشت مورد مطالعه، نشان می‌دهد که وزن‌های مؤثر و تئوریک پارامترهای مدل SINTACS کاملاً بر هم منطبق نیستند. برای مثال، وزن تئوریک پارامتر عمق تا سطح ایستابی ۲۱/۳۳ درصد و وزن مؤثر آن ۱۰/۱۵ درصد است. تحلیل حساسیت به روش تک‌پارامتری نشان می‌دهد که پس از پارامتر ناحیه غیراشباع، پارامتر محیط آبخوان نیز نسبت به وزن تئوریک وزن مؤثر بیشتری دارد، اما پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه خالص، عمق تا سطح ایستابی، محیط خاک و توپوگرافی نسبت به وزن تئوریک اختصاص‌یافته به آن‌ها از طریق مدل SINTACS وزن مؤثر کمتری دارند. به عبارت دیگر، این نتایج نشان می‌دهند که پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه خالص، عمق تا سطح ایستابی، محیط خاک و توپوگرافی در مقایسه با مدل تئوریک SINTACS تأثیر کمتری روی شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دشت مورد مطالعه دارند. در مقابل پارامترهای تأثیر ناحیه غیراشباع و محیط آبخوان

به DRASTIC نرمال افزایش چشمگیری نداشته است. پس از تعیین ضرایب همبستگی در مدل‌های مختلف روش SINTACS، بیشترین ضریب همبستگی برابر ۰/۶۵۹ به دست آمد که به علت همبستگی بالاتر نسبت به مدل SINTACS نرمال ( $R=0/636$ ) به‌منزله مدل SINTACS بهینه برای آسیب‌پذیری آبخوان مورد مطالعه تعیین شد. به طور کلی، از میان مدل‌های اجراشده، با توجه به همبستگی بیشتر شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC اصلاح‌شده با غلظت نترات آبخوان مورد مطالعه، مدل DRASTIC اصلاح‌شده در حکم مدل بهینه برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اندیمشک پیشنهاد می‌شود.

زیرزمینی و نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان، آنالیز رگرسیون خطی ساده برای تمامی مدل‌های اجراشده انجام شد. در این آنالیز، مقادیر نترات چاه‌های نمونه‌برداری شده به‌منزله متغیر وابسته و مقادیر آسیب‌پذیری متناظر هر یک از این چاه‌ها در حکم متغیر مستقل در نظر گرفته شده است. از بین مدل‌های اجراشده برای روش DRASTIC، بهترین ضریب همبستگی برابر ۰/۷۵۲ به دست آمد (نمودار ۱) که به علت همبستگی بالاتر نسبت به مدل DRASTIC نرمال ( $R=0/741$ )، به‌منزله مدل DRASTIC بهینه برای آسیب‌پذیری آبخوان مورد مطالعه انتخاب شد. البته به علت اینکه مدل DRASTIC نرمال در سطح اعتماد قابل اطمینانی قرار دارد، ضریب همبستگی مدل بهینه‌شده نسبت

جدول ۳. نتایج آماری تحلیل حساسیت تک‌پارامتری شاخص DRASTIC

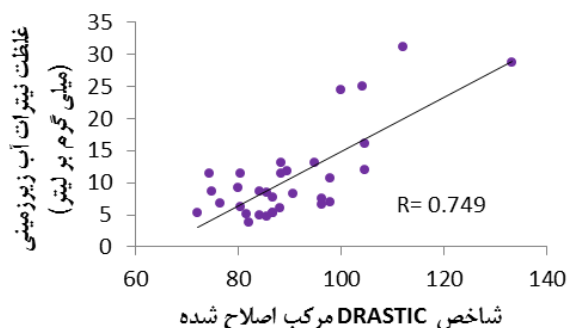
پارامتر	وزن تئوریک	وزن تئوریک (%)	وزن مؤثر (%)		
			میانگین	کمینه	بیشینه
D	۵	۲۱/۷۳	۱۰/۲۸	۳/۸۷	۳۶/۰۸
R	۴	۱۷/۳۹	۱۳/۴۹	۳/۲۷	۲۱/۰۵
A	۳	۱۳/۰۴	۱۶/۲۲	۸/۵۷	۲۶/۹۶
S	۲	۸/۶۹	۸/۹۵	۴/۵۸	۱۶/۸۶
T	۱	۴/۳۴	۸/۸۳	۰/۹۱	۱۲/۳۲
I	۵	۲۱/۷۳	۲۸/۵۹	۱۷/۳۶	۴۴/۸۷
C	۳	۱۳/۰۴	۱۳/۳۵	۴/۸	۲۳/۰۷

جدول ۴. نتایج آماری تحلیل حساسیت تک‌پارامتری شاخص SINTACS

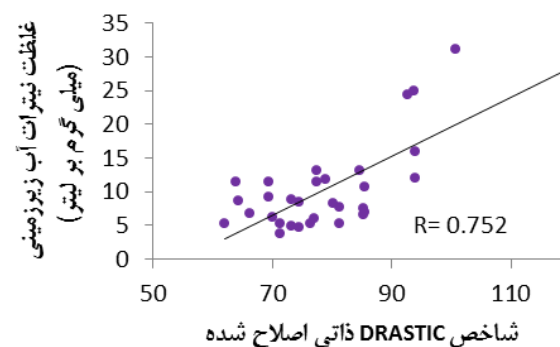
پارامتر	وزن تئوریک	وزن تئوریک (%)	وزن مؤثر (%)		
			میانگین	کمینه	بیشینه
S	۵	۲۱/۷۳	۱۰/۱۵	۳	۳۰
I	۴	۱۷/۳۹	۱۰/۹۰	۲	۱۷
N	۳	۱۳/۰۴	۲۹/۳۲	۲۱	۴۱
T	۲	۸/۶۹	۷/۷۵	۴	۱۴
A	۱	۴/۳۴	۱۵/۹۸	۸	۲۴
C	۵	۲۱/۷۳	۱۵/۵۷	۱۲	۲۳
S	۳	۱۳/۰۴	۷/۰۴	۰	۱۰

زوجی انجام شد. بر این اساس پس از اجرای مدل‌های مختلف و تعیین ضرایب همبستگی آن‌ها با غلظت نیترات، بهترین مدل آسیب‌پذیری ویژه آبخوان دشت مورد مطالعه بر اساس بیشترین میزان ضریب همبستگی با غلظت نیترات به هر دو روش تعیین شد. به گونه‌ای که میزان همبستگی مدل اصلاح‌شده آسیب‌پذیری ویژه به روش DRASTIC مرکب به ۰/۷۴۹ و به روش SINTACS مرکب به ۰/۶۵۷ رسید. به طور کلی، وزن‌های بهینه مدل DRASTIC مرکب بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی دشت اندیمشک در جدول ۵ ارائه شده است. شایان یادآوری است که وزن پارامترهای مدل‌های DRASTIC و SINTACS حاصل از روش AHP، دارای بازه صفر تا ۱، اما اوزان اختصاص‌یافته در این مدل دارای بازه ۱ تا ۵ است. به همین علت، برای استفاده از وزن‌های نسبی به‌دست‌آمده از روش AHP، این وزن‌ها به بازه ۱ تا ۵ تبدیل شدند.

۱۲. محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی نیترات به منظور تهیه نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان مورد مطالعه، ابتدا به علت اهمیت کاربری اراضی در انتقال آلودگی به آبخوان، این پارامتر طبق رابطه ۴، با وزن ۵ به پارامترهای هر دو مدل DRASTIC و SINTACS، در حالت نرمال، افزوده شد. به منظور صحت وزن داده‌شده به این پارامتر طبق شرایط واقعی منطقه، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده، میزان همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری ویژه محاسبه‌شده از طریق هر دو مدل و غلظت نیترات آبخوان تعیین شد. این میزان ضریب همبستگی برای هر دو شاخص CD و CS به ترتیب برابر ۰/۶۵۱ و ۰/۵۲۹ محاسبه شد. به منظور تعیین وزن بهینه این پارامتر بر اساس شرایط واقعی منطقه، از روش وزن‌دهی AHP استفاده شد. به گونه‌ای که وزن بهینه این پارامتر همانند عملیات تصحیح اوزان پارامترها در مدل‌های DRASTIC و SINTACS، بر اساس چندین قضاوت کارشناسی، بین ۷ پارامتر هر دو مدل مذکور و پارامتر کاربری اراضی، مقایسه



نمودار ۲. همبستگی شاخص DRASTIC مرکب اصلاح‌شده با غلظت نیترات



نمودار ۱. همبستگی شاخص DRASTIC ذاتی اصلاح‌شده با غلظت نیترات

جدول ۵. وزن بهینه پارامترهای مدل DRASTIC و DRASTIC مرکب

وزن بهینه		وزن اولیه	پارامتر
DRASTIC مرکب	DRASTIC		
۳/۹۳	۳/۸۶	۵	عمق تا سطح ایستابی
۲/۲۸	۲/۰۳	۴	تغذیه خالص
۱/۳۵	۱/۲۲	۳	محیط آبخوان
۲/۸۴	۲/۵۵	۲	محیط خاک
۱	۱	۱	توپوگرافی
۵	۵	۵	تأثیر ناحیه غیراشباع
۱/۷۲	۱/۵۹	۳	هدایت هیدرولیکی
۱/۱	—	۵	کاربری اراضی
۰/۰۵۲	۰/۰۳۵	—	نرخ ناسازگاری

## ۱۳. نتیجه‌گیری

گلک و سنجر آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، خیلی کم و نواحی اطراف روستاهای بنوار حسین، شوهان علیا و زاویه مشعلی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان، کم است. همچنین، با توجه به میزان همبستگی شاخص‌های CD و CS (به ترتیب ۰/۷۴۹ و ۰/۶۵۷)، نقشه آسیب‌پذیری ویژه حاصل از شاخص CD، برای بررسی خطرپذیری آبخوان در نظر گرفته شد. شاخص آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی شاخص CD اصلاح‌شده بین ۶۵/۸۳ تا ۱۳۵/۸۵ قرار گرفت. این نقشه بر اساس جدول ۲، به دو طبقه آسیب‌پذیری ویژه خیلی کم و کم تقسیم‌بندی شده است (شکل ۳). در این میان طبقه اول، ۶۵/۰۵ درصد از کل مساحت دشت مورد مطالعه (۱۹۰/۷۰ کیلومتر مربع) و طبقه دوم، ۳۴/۹۴ درصد از کل مساحت دشت (۱۰۲/۴۴ کیلومتر مربع) را شامل می‌شود (جدول ۷). همان‌گونه که در شکل ۳، مشاهده می‌شود، برخی نواحی واقع در شمال، شمال شرق و شرق منطقه و نواحی جنوبی دشت مورد مطالعه از خطرپذیری آلودگی نیتراة بالاتری نسبت به سایر نواحی دشت برخوردارند. به طوری که اطراف اندیمشک، شهرک دوکوهه، روستاهای قلعه لور، چم گلک و سنجر خطرپذیری آلودگی نیتراة آبخوان خیلی کم ارزیابی شده است. روستاهای قلعه لور و چم گلک واقع در شمال شرق و شرق دشت مورد مطالعه از خطرپذیری آلودگی نیتراة کمی برخوردارند. به طور کلی، با توجه به نقشه خطرپذیری به‌دست‌آمده از طریق شاخص CD، خطرپذیری آلودگی آبخوان دشت اندیمشک در سطح بالایی نیست. محدوده غلظت نیترات در آبخوان دشت ۳۱/۱۹-۳/۸۲ میلی‌گرم در لیتر اندازه‌گیری شده است که با توجه به حداکثر غلظت مجاز تعیین‌شده از سوی مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای مصارف آشامیدنی (۵۰ میلی‌گرم در لیتر) (WHO, 2004) و مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۸۸)، غلظت نیترات در آبخوان مورد مطالعه پایین‌تر از حد مجاز تعیین‌شده از سوی سازمان‌های مذکور

در این تحقیق، پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اندیمشک با تصحیح وزن پارامترهای به‌کاررفته در مدل‌های DRASTIC و SINTACS با کاربرد روش تحلیل سلسله‌مراتبی و بر اساس غلظت نیترات، به‌منزله شاخص آلودگی ناشی از فاضلاب‌های شهری و پساب‌های کشاورزی صورت گرفت. واسنجی این مدل به میزان همبستگی میان شاخص آسیب‌پذیری آبخوان و غلظت نیترات بستگی دارد. در این مطالعه، این ضریب همبستگی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده محاسبه شد. با مقایسه ضرایب همبستگی شاخص آسیب‌پذیری ذاتی DRASTIC و SINTACS بهینه با غلظت نیترات، مدل DRASTIC بهینه به علت همبستگی بیشتر نسبت به مدل SINTACS، به‌منزله مدل بهینه برای ارزیابی آسیب‌پذیری دشت اندیمشک تعیین شد. به طور کلی، افزایش ضریب همبستگی شاخص‌های DRASTIC و SINTACS، بهینه با غلظت نیترات آبخوان مورد مطالعه، نشان می‌دهد که مدل‌های آسیب‌پذیری بهینه‌سازی‌شده بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی، با شرایط واقعی آبخوان مورد مطالعه مطابقت بیشتری دارند. نتایج نشان دادند، شاخص آسیب‌پذیری مدل DRASTIC اصلاح‌شده، بین ۵۸/۸۱ تا ۱۲۲/۶۹ قرار دارد. برای درک بهتر و نشان‌دادن وضعیت آسیب‌پذیری ذاتی منطقه، شاخص نهایی به‌دست‌آمده به دو کلاس مختلف طبقه‌بندی شد. بر این اساس، ۸۴/۰۳ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه (۲۴۶/۳۳ کیلومتر مربع) دارای آسیب‌پذیری خیلی کم و ۱۵/۹۶ درصد از منطقه (۴۶/۸۱ کیلومتر مربع) در محدوده آسیب‌پذیری کم قرار دارد (جدول ۶). همان‌گونه که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، نواحی شمالی دشت از میزان آسیب‌پذیری ذاتی کمتری نسبت به نواحی جنوبی برخوردارند. به عبارت دیگر از سمت شمال به جنوب دشت بر میزان آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان افزوده شده است. به طوری که نواحی اطراف اندیمشک، شهرک دوکوهه، قلعه لور، چم

در نتیجه افزایش دفع فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی بایستی مدیریت زیست‌محیطی قاطعی در منطقه شکل گیرد. این مهم نیز فقط با مشارکت افراد جامعه، کارشناسان و مسئولان مربوطه و برنامه‌ریزی صحیح کاربری اراضی محقق خواهد شد.

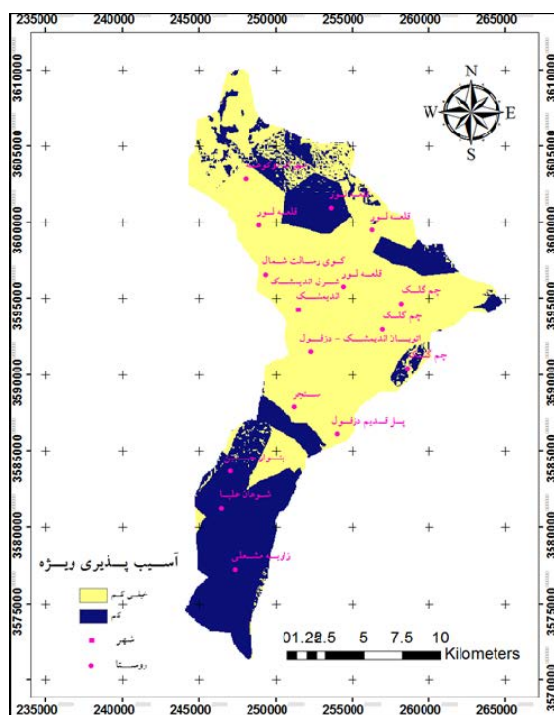
است. علاوه بر نتایج حاصل از همبستگی میان غلظت نیترات و شاخص CD، مطابقت قابل قبولی بین غلظت نیترات اندازه‌گیری شده و کلاس‌های خطرپذیری وجود دارد. البته با اینکه خطرپذیری آبخوان مورد مطالعه نسبت به آلودگی، بالا ارزیابی نشده است، با توجه به اقلیم منطقه، افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه کشاورزی و

جدول ۶. شاخص مدل DRASTIC اصلاح شده برای منطقه مورد مطالعه

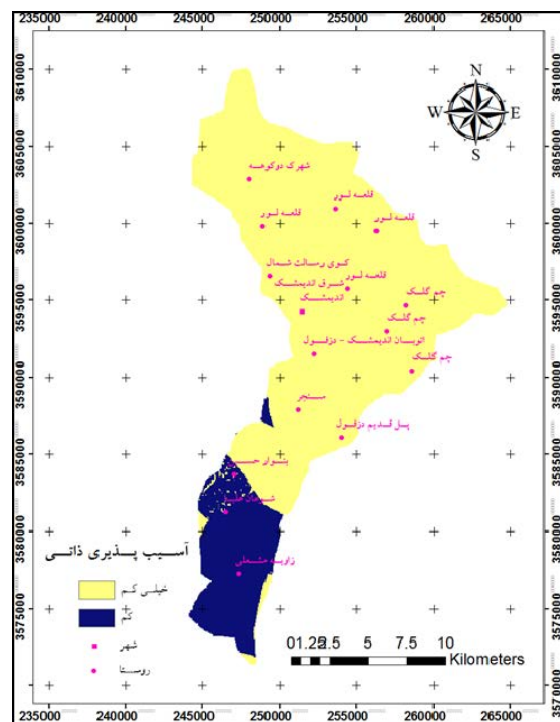
شاخص DRASTIC	محدوده DRASTIC	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
آسیب‌پذیری ذاتی خیلی کم	< ۱۰۰	۲۴۶/۳۳	۸۴/۰۳
آسیب‌پذیری ذاتی کم	۱۰۰-۱۲۵	۴۶/۸۱	۱۵/۹۶
	جمع کل	۲۹۳/۱۴	۱۰۰

جدول ۷. شاخص مدل DRASTIC مرکب اصلاح شده برای منطقه مورد مطالعه

شاخص DRASTIC مرکب	محدوده DRASTIC مرکب	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد مساحت
آسیب‌پذیری ویژه خیلی کم	< ۱۰۰	۱۹۰/۷۰	۶۵/۰۵
آسیب‌پذیری ویژه کم	۱۰۰-۱۴۵	۱۰۲/۴۴	۳۴/۹۴
	جمع کل	۲۹۳/۱۴	۱۰۰



شکل ۳. نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان تحت مطالعه



شکل ۲. نقشه آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان تحت مطالعه

## یادداشت‌ها

1. Overlay and Index methods
2. Process-based simulation models
3. Statistical methods
4. Analytical Hierarchy Process (AHP)
5. Extension theory
6. Depth to watertable (D)
7. net Recharge (R)
8. Aquifer media (A)
9. Soil media (S)
10. Topography (T)
11. Impact of vadose zone (I)
12. hydraulic Conductivity (C)
13. Criterion maps
14. Kriging
15. Thiessen
16. Simple Linear Regression Analysis (SLRA)
17. Digital Elevation Model (DEM)
18. Sensitivity Analysis
19. Composite DRASTIC index (CD index)

## منابع

- شرکت مهندسان مشاور بهکار آب اهواز. ۱۳۹۰. *مطالعات هیدروژئولوژی نیمه‌تفصیلی دشت دزفول-اندیمشک*، سازمان آب و برق خوزستان.
- عطایی، م. ۱۳۸۹. *تصمیم‌گیری چندمعیاره*، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.
- قدسی‌پور، س. ح. ۱۳۷۹. *فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)*، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- متکان، ع. ا؛ ناصری، ح. ر؛ استادهاشمی، ز. ۱۳۸۷. «تصحیح روش دراستیک مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی با استفاده از روش‌های آماری و تحلیل سلسله‌مراتبی»، مطالعه موردی دشت همدان، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال چهارم، شماره ۳، صص ۲۰۵-۲۲۲.
- مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. ۱۳۸۸. *آب آشامیدنی- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی*، تجدیدنظر پنجم، صص ۱-۱۸.
- Al Kuisi, M., El-Neqa, A. and Hammouri, N. 2006. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. *Environmental Geology*, Vol. 50 (5), PP: 651-667.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A. A., Hiyama, T. and Kikuo, K. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, Vol. 345(1-3), PP: 127-140.
- Bai, L., Wang, Y. and Meng, F. 2011. Application of DRASTIC and extension theory in the groundwater vulnerability evaluation. *Water and Environment Journal*, Vol. 26(3), PP: 381-391.
- Balakrishnan, P., Saleem, A. and Mallikarjun, N. D. 2011. Groundwater quality mapping using geographic information system (GIS): a case study of Gulbarg city, Karnataka, India. *African Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 5(12), PP: 1069-1084.
- Bonham-carter, G. F. 1994. *Geographic Information System for Geoscientists: Modeling with GIS*, Pergamon, Ontario.
- Civita, M. 1990. *Legenda unificata per le Carte della vulnerabilita dei corpi idrici sotterranei/ Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps. Studi sulla Vulnerabilita degli Acquiferi*, Pitagora Edit, Bologna.
- Civita, M. 1993. Groundwater vulnerability maps: a review. *Proceedings of the IX symposium on pesticide chemistry "mobility and degradation of xenobiotics"*, Piacenza, PP: 587-631.
- Civita, M. 1994. *Le Carte della Vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento. Teoria and Pratica*. Pitagora Editrice, Bologna.
- Civita, M. and De Maio, M. 1997. SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della Vulnerabilita degli acquiferi all'inquinamento, *Metodologia and Automatizzazione*, Vol. 60, Pitagora Editrice, Bologna.
- Gemitzi, A., Petalas, C. Tsihrantzis, V. and Pinaras, V. 2006. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. *Environmental Geology*, Vol. 49(5), PP: 653-673.

- Gogu, R. C., and Dassargues, A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overly and index methods. *Environmental Geology*, Vol. 39(6), PP: 549-559.
- Hasiniaina, F., Zhou, J. and Guoyi, L. 2010. Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamtsag basin, Mongolia using drastic model. *Journal of American Science*, Vol. 6(11), PP: 65-78.
- Khodapanah, L., Sulaiman, W. N. A. and Khodapanah, N. 2009. Groundwater quality assessment for different purpose in Eshtehard District, Tehran, Iran. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 36(4), PP: 543-553.
- Mace, E. Robert. 1997. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. *Ground Water*, Vol. 35(5), PP: 738-742.
- Martinez-Bastida, J. J., Arauzo, M. and Valladolid, M. 2010. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, Vol. 18(3), PP: 681-698.
- Napolitano, P., and Fabbri, A. G. 1996. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. *IAHS Public*, No. 235, PP: 559-566.
- Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. Department of Land and Water Conservation, Australia.
- [http://www.dlwc.nsw.gov.au/care/water/groundwater/reports/pdfs/castlereagh\\_map\\_notes.pdf](http://www.dlwc.nsw.gov.au/care/water/groundwater/reports/pdfs/castlereagh_map_notes.pdf).
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M. V. and Singh, V. S. 2008. Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS, *Environmental Geology*, Vol. 55(3), PP: 467-475.
- Samey, A. A. and 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*, Vol. 3(7), PP: 500-507.
- Sener, E. and Davraz, A. 2012. Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal*, DOI 10.1007/s10040-021-0947-y.
- Thirumalaivasan, D., Karmegam, M. and Venugopal, K. 2003. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modeling & Software*, Vol. 18, PP: 645-656.
- World Health Organization (WHO). 2004. *Guideline for Drinking-Water Quality (Third edn.)*. 1. Recommendations. WHO, Switzerland.
- Zhou, J. G., Li, F., Liu, Y., Wang, and Guo, X. 2010. DRAV model and its application in assessing groundwater vulnerability in arid area: a case study of pore phreatic water in Tarim Basin, Xinjiang, Northwest China. *Environmental Earth Science*, Vol. 60(5), PP: 1055-1063.