تصحیح مدل سینتکس به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در محیط GIS جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان؛ مطالعه موردی دشت اندیمشک

مهرناز آصفی[۱]، حیدر زارعی[۲]، فریدون رادمنش[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱

چکیده

افزایش جمعیت، صنعتی شدن و توسعه فعالیت‌های کشاورزی باعث افزایش دفع فاضلاب‌های شهری و صنعتی و استفاده بی‌رویه از کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها و درنتیجه آلودگی منابع آب زیرزمینی گردیده است. از آن‌جایی که مشکل اصلی مدل سینتکس، اعمال نظرات کارشناسی جهت نرخ‌بندی پارامتری به‌کاررفته در آن می‌باشد، در این مطالعه، مدل مذکور توسط روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی مورد اصلاح واقع گردید. جهت دستیابی به مدل بهینه، ضریب همبستگی میان شاخص آسیب‌پذیری و غلظت نیترات موجود در آبخوان به‌عنوان شاخص آلودگی با کاربرد آنالیز رگرسیون خطی ساده تعیین گردید. نتایج نشان داد که مدل سینتکس بهینه نسبت به مدل سینتکس نرمال از میزان همبستگی بیشتری با غلظت نیترات برخوردار می‌باشد. همچنین به‌منظور ارزیابی خطرپذیری آبخوان دشت اندیمشک به آلودگی، پارامتر کاربری اراضی منطقه با پارامترهای به‌کاررفته در مدل سینتکس، افزوده و بدین ترتیب نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان مورد مطالعه تهیه گردید. نتایج حاصل از این نقشه نشان داد که خطرپذیری آلودگی آبخوان دشت مورد مطالعه در سطح بالایی قرار ندارد.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، آسیب‌پذیری، دشت اندیمشک، سینتکس، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی.

[۱] . کارشناس ارشد عمران-مهندسی محیط‌زیست، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، تلفن: ۰۹۱۶۳۷۱۸۱۹۳ پست الکترونیکی: mehrnaz_assefi@yahoo.com (نویسنده مسئول)
[۲] . استادیار، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، تلفن: ۰۹۱۶۳۰۳۳۰۵۵، پست الکترونیکی: zareih@scu.ac.ir
[۳] . استادیار، گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، تلفن: ۰۹۱۶۶۱۸۲۱۶۷، پست الکترونیکی: feridon_radmanesh@yahoo.com

مقدمه

در کشورهای نیمه خشک مانند ایران که آب‌های زیرزمینی تنها منبع قابل اطمینان جهت مصارف انسانی و همچنین مصارف کشاورزی و صنعتی به شمار می‌رود، مصرف بیش از حد از موجودی آب‌های زیرزمینی به علت رشد پیوسته جمعیت و صنعتی شدن، کیفیت بسیاری از آبخوان‌ها را تهدید می‌کند (خداپناه و همکاران، ۲۰۰۹). از سوی دیگر، پایش آبخوان‌های آلوده، هزینه‌بر و اغلب غیرممکن می‌باشد. از این‌رو، در سال‌های اخیر، به دلیل کمبود منابع آب زیرزمینی، افراد بیشتر به حفاظت از منابع آب زیرزمینی توجه کرده و در این بین، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی به موضوعی ویژه و مهم تبدیل شده است (بای و همکاران، ۲۰۱۱). کمیته‌ای تحت نظارت انجمن ملی تحقیقات آمریکا، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را به‌صورت «تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به وجود آمدن آن‌ها در برخی مکان‌ها، در بالاترین سطح آبخوان» تعریف می‌کند (سامی و گانگ، ۲۰۰۸). به‌طورکلی، آسیب‌پذیری متمایز از خطرپذیری آلودگی می‌باشد. خطر آلودگی نه تنها به آسیب‌پذیری بلکه به میزان بارگذاری آلاینده عمده (آلاینده شاخص) وارد شده به محیط زیرسطحی نیز بستگی دارد. یک آبخوان ممکن است قابلیت آسیب‌پذیری بالایی داشته باشد، درحالی‌که بارگذاری آلاینده عمده و شاخصی در آن وجود نداشته باشد. علاوه‌براین، ممکن است آبخوان مورد نظر، علی‌رغم داشتن خطرپذیری آلودگی بالا، دارای قابلیت آسیب‌پذیری پائینی باشد (رحمان، ۲۰۰۹).

روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای تخمین آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در جهان توسعه پیدا کرده است. رایج‌ترین این روش‌ها و مدل‌ها عبارتند از: مدل DRASTIC[1]، مدل GOD[2]، روش رتبه‌دهی AVI[3]، روش SINTACS[4]، روش ISIS[5]، Irish perspective[6]، روش German[7] و روش EPIK[8] (جمیتزی و همکاران، ۲۰۰۶). تاکنون در ایران و سراسر جهان مطالعاتی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از مدل سینتکس صورت گرفته اما مطالعات بسیار اندکی در خصوص اصلاح این مدل براساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی صورت گرفته است. میرزائی و همکاران (۱۳۸۸)، به بررسی آسیب‌پذیری آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از مدل سینتکس پرداختند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد اندیس سینتکس در این دشت بین ۵۰ تا ۱۳۰ قرار می‌گیرد؛ که حدود ۶/۸ درصد منطقه مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری خیلی‌کم، ۶۹/۱ درصد آسیب‌پذیری کم و حدود ۲۴/۱ دارای آسیب‌پذیری متوسط می‌باشد. کورنیلو و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از مدل سینتکس به بررسی وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان منطقه سورنتو پنینسولا با استفاده از مدل سینتکس پرداختند. در این مطالعه، نقشه آسیب‌پذیری منطقه مورد نظر به کمک مدل سینتکس تهیه شد. نتایج حاصل از این نقشه نشان داد که عوامل مرفولوژیکی و لیتولوژیکی بر روی ارزیابی آسیب‌پذیری آلودگی آب زیرزمینی مؤثر می‌باشند. بای و همکاران (۲۰۱۱)، به ارزیابی آب‌های زیرزمینی منطقه بائوتو در چین پرداختند. در این مطالعه ابتدا برای بررسی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از مدل دراستیک استفاده نموده و نتایج آن را با کیفیت آب زیرزمینی آن منطقه مقایسه کردند؛ اما از آن‌جایی که نتایج مدل مذکور با کیفیت آب زیرزمینی مطابقت نداشت، مدل دراستیک بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی و با به کارگیری تئوری ترویج و روش فرآیند سلسله مراتبی مورد اصلاح قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که در ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه، نتایج حاصل از مدل

1. DRASTIC system (Aller et al., 1987)
2. GOD system (Foster, 1987)
3. AVI rating system (Van Stempvoort et al., 1993)
4. SINTACS method (Civita, 1994)
5. ISIS method (Civita and De Regibus, 1995)
6. Irish perspective (Daly et al., 2002)
7. German method (Von Hoyer and Sofner, 1998)
8. EPIK method (Doerfliger et al., 1999)

دراستیک اصلاح شده به کمک تئوری ترویج و روش سلسله مراتبی نسبت به نتایج حاصل از مدل دراستیک نرمال مطابقت بیشتری با شرایط واقعی دارد. سینر و داوراز (۲۰۱۲)، به‌منظور ارزیابی آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی حوضه دریاچه اجیردیر در ترکیه از مدل دراستیک بهینه‌سازی شده استفاده نمودند. برای همین منظور، پارامترهای «درز و شکافتگی» و «کاربری اراضی» را که بر انتقال مواد آلاینده به آبخوان نقش دارند را به پارامترهای مدل دراستیک نرمال اضافه کردند. آن‌ها وزن این پارامترها را بر اساس نظر کارشناسی و نیز با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی تعیین نمودند. بدین ترتیب علاوه بر مدل دراستیک نرمال، دو مدل بهینه‌سازی شده برای آبخوان مورد مطالعه اجرا گردید. به دلیل گسترده بودن فعالیت‌های کشاورزی در منطقه از غلظت نیترات آبخوان به‌عنوان معیار اصلاح مدل استفاده کردند. برای انتخاب مدل بهینه، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده[1]، همبستگی بین غلظت نیترات آبخوان و آسیب‌پذیری تعیین گردید. در نهایت نتایج حاصل از این آنالیز نشان داد که مدل دراستیک اصلاح شده توسط روش تحلیل سلسله مراتبی از همبستگی بیشتری با غلظت نیترات آبخوان برخوردار است. از این‌رو، نتایج حاصل از این مدل از اعتبار بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل سینتکس

مدل سینتکس توسط سیویتا (۱۹۹۴، ۱۹۹۳، ۱۹۹۰) و سیویتا و د مایو (۱۹۹۷) به منظور ارزیابی قابلیت آسیب‌پذیری آلودگی نسبی آب‌های زیرزمینی با استفاده از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی به کار گرفته شد. این مدل از مدل دراستیک آمریکایی تکامل یافته است (الکویسی و همکاران، ۲۰۰۶)، با این تفاوت که فرآیند رتبه‌دهی در روش سینتکس از انعطاف بیشتری برخوردار می‌باشد (سیویتا، ۱۹۹۴). مدل‌های پارامتری مانند سینتکس متعلق به گروه مدل‌های شمارشی هستند که در آن هر پارامتر علاوه بر اینکه به صورت منفرد رتبه‌بندی می‌شود، به‌منظور کاهش یا افزایش اهمیت پارامترها، هر پارامتر، وزنی متفاوت داشته که در فرآیند تجزیه و تحلیل لحاظ می‌شود. این مدل توسط هفت پارامتر عمق سطح ایستابی[2]، نفوذ مؤثر[3]، شرایط اشباع نشده[4]، محیط خاک[5]، خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان[6]، هدایت هیدرولیکی[7] و شیب توپوگرافی[8] محاسبه می‌گردد. به هر فاکتور بر اساس تأثیر و اهمیتی که در میزان آسیب‌پذیری دارد، نمره‌ای بین صفر تا ۱۰ نسبت داده می‌شود. سپس نمرات به واسطه وزن‌ها اصلاح می‌شوند که وزن‌ها مربوط به شرایط محیطی ویژه یا شرایط انسان منشأ و یا هر دو می‌باشند. شاخص آسیب‌پذیری ذاتی (I) از طریق جمع نمرات به دست آمده توسط وزن‌ها، بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در این رابطه، P_i نمره هر هفت پارامتر و W_i وزن نسبی پارامترها می‌باشد (الکویسی و همکاران، ۲۰۰۶).

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

روش تحلیل سلسله مراتبی[9]

روش تحلیل سلسله مراتبی به‌دلیل داشتن مبنای نظری قوی، دقت بالا، سهولت استفاده، دارا بودن ارزش و اعتبار و درستی دقت نتیجه، یکی از معتبرترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد (عطایی، ۱۳۸۹). در این فرآیند، سلسله مراتب مؤلفه‌های تصمیمات در فرآیند تصمیم گیری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع فرآیند

[1]. Simple Linear Regression Analysis (SLRA)

[2]. water table depth (S)
[3]. effective infiltration (I)
[4]. unsaturated conditions (N)
[5]. Soil media (T)
[6]. aquifer hydrogeologic characteristics (A)
[7]. hydraulic Conductivity (C)
[8]. topographic slope (S)
[9]. Analytical Hierarchy Process (AHP)

تحلیل سلسله مراتبی یک پروسه متقابل است که در آن تصمیم‌گیرنده یا گروهی از تصمیم‌گیرندگان اولویت‌هایشان را به تحلیل‌گر منتقل می‌کنند و می توانند نتایج و عقاید خود را مورد بحث و مناظره قرار دهند. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بر پایه ترکیبی از یک سری از ماتریس‌های مقایسه دو به دو می‌باشد که همه معیارها را با یکدیگر مقایسه می‌کنند. این فرآیند به‌منظور برآورد وزن‌دهی و درجه‌بندی هر یک از معیارها در مقایسه با سایر معیارها می‌باشد. این امتیازدهی، نشانگر اهمیت هر یک از این معیارهای شرکت داده شده برای نیل به هدف کلی است. ساعتی (۱۹۸۰) به منظور مقایسه دو به دو هر یک از معیارها، از ۱ تا ۹ استفاده نمود که در آن عدد یک نشان می‌دهد که معیارها دارای اهمیت یکسان می‌باشند و عدد ۹ نشان می‌دهد که معیار تحت بررسی به مقدار قابل توجهی در مقایسه با دیگر معیارها دارای اهمیت می‌باشد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، مسئله مطرح شده توسط تصمیم‌گیرنده را به ساختار سلسله مراتبی تجزیه می‌کند. عناصر یک سطح به خصوص سلسله مراتب به صورت دو به دو همان‌طور که در بالا شرح داده شد مورد مقایسه قرار می‌گیرند (تیرومالاوایسان و همکاران، ۲۰۰۳).

مطالعه موردی

دشت اندیمشک بخشی از دشت وسیع دزفول-اندیمشک که مهم‌ترین دشت استان خوزستان محسوب می‌شود، است. در این دشت به علت وجود منابع آب سطحی و زیرزمینی، خاک حاصلخیز و زمین‌های هموار، کشاورزی و باغداری از رونق خاصی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل استفاده از انواع کودهای شیمیایی و حیوانی در منطقه بسیار زیاد می‌باشد؛ که همین امر می‌تواند باعث افزایش احتمال آلودگی آبخوان این دشت به منابع آلاینده، به ویژه نیترات گردد. از طرف دیگر، به علت واقع شدن شهر اندیمشک در محدوده منطقه مورد مطالعه، فعالیت‌های صنعتی، مرغداری و دامداری صورت گرفته، باعث تولید فاضلاب‌های شهری و صنعتی و در نتیجه افزایش احتمال آلودگی آبخوان شده است. از آن‌جایی که منابع آب زیرزمینی نقش مهمی در تأمین آب شرب مردم ساکن در منطقه دارند، به منظور اطمینان از اینکه این منابع بتوانند به عنوان منبعی سالم جهت تأمین آب شرب در آینده باقی بماند، شناسایی نواحی حساس به آلودگی امری ضروری به شمار می‌رود. از این جهت، هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اندیمشک و شناسایی و طبقه‌بندی مناطق حساس به آلودگی با استفاده از مدل سینتکس در محیط GIS می‌باشد. با اینکه این مدل، یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان می‌باشد، به دلیل اعمال نظر کارشناسی جهت تعیین وزن‌ها و رتبه‌ها و عدم اصلاح روش مذکور در به‌کارگیری آن‌ها براساس شرایط محلی، نتایج حاصله مطابق با شرایط واقعی نمی‌باشد. از این‌رو، هدف اصلی از این مطالعه، اصلاح روش سینتکس براساس شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان مورد مطالعه و کاهش خطاهای کارشناسی تا حد امکان، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می‌باشد. به عبارتی، در این تحقیق، از مزایای مدل سینتکس استفاده و با اصلاح میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی مدل در انتقال آلودگی به آبخوان مورد مطالعه، بر اساس میزان ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و غلظت نیترات آبخوان، این مدل بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی محلی واسنجی شده است.

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

دشت اندیمشک، واقع در شمال غرب استان خوزستان 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، بخشی از دشت وسیع دزفول-اندیمشک محسوب می‌شود (شکل ۱). این دشت از شمال و شمال غرب و غرب به

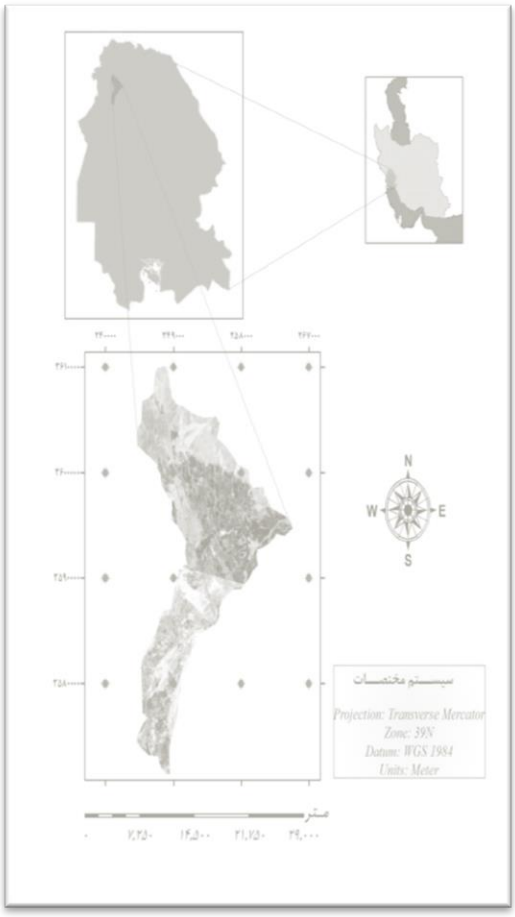
ارتفاعات، از شرق به رودخانه دز و از جنوب و جنوب غرب به تاقدیس شیرین آب محدود می‌گردد (شرکت مهندسین مشاور بهکارآب اهواز، ۱۳۹۰).

زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

به لحاظ زمین‌شناسی در اطراف منطقه مورد مطالعه، سازندهای آغاجاری، لهبری، بختیاری و رسوبات عهد حاضر به ترتیب قدمت رخنمون دارد. به علت حضور کنگلومرای بختیاری در این دشت و تخریب، فرسایش و حمل مواد این سازند در قسمت اعظم محدوده، آبرفت دشت مورد مطالعه، بیشتر شامل مواد دانه درشت و قلوه‌ای می‌باشد. با توجه به نتایج آزمون پمپاژ انجام شده در یکی از چاه‌های واقع در جنوب منطقه مورد مطالعه، مقدار ضریب آبگذری، هدایت هیدرولیکی، ظرفیت ویژه چاه و ضریب ذخیره در این چاه به ترتیب برابر با ۸۵۰ متر مربع در روز، ۱۲/۵ متر مربع در روز، ۶۰ لیتر بر ثانیه بر متر و ۱۷/۵ درصد می‌باشد (شرکت مهندسین مشاور بهکارآب اهواز، ۱۳۹۰).

روش انجام کار

جهت مدل‌سازی پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی دشت اندیمشک در محیط GIS، پس از جمع‌آوری داده و اطلاعات مورد نیاز مدل، اقدام به ساخت پایگاه اطلاعاتی گردید. بدین منظور جهت تهیه نقشه‌های معیار[1]، داده‌های جمع‌آوری شده ابتدا به فرمت نقطه‌ای در محیط Excelتبدیل و سپس به نرم‌افزار ArcGIS 9.3 معرفی گردید. برای تهیه نقشه‌های معیار مورد نیاز مدل، آنالیزهای مکانی مختلفی بر روی داده‌های مورد نیاز صورت گرفت که از آن جمله می‌توان به تبدیل داده‌های نقطه‌ای به سطح، شامل درون‌یابی کریجینگ[2]، ایجاد شبکه تیسن[3] و تبدیل بردار به رستر اشاره نمود. هدف اصلی از تهیه نقشه‌های معیار، تلفیق آن‌ها با یکدیگر با استفاده از تکنیک هم‌پوشانی و در نتیجه تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان مورد مطالعه می‌باشد. در مطالعه حاضر علاوه بر نرخ‌بندی پارامترهای ورودی بر اساس تئوری مدل سینتکس نرمال، از وزن‌های اصلاح شده پارامترهای مدل، جهت تهیه نقشه‌های معیار استفاده شد.



شکل (۱): نقشه موقعیت دشت اندیمشک

بدین منظور، با استفاده از یون نیترات به‌عنوان شاخص آلودگی، اقدام به تصحیح وزن پارامترهای مدل سینتکس بر پایه وزن‌دهی به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی گردید. از این‌رو، در این تحقیق، از مقادیر نیترات ۳۳ حلقه چاه موجود در منطقه در مردادماه ۱۳۹۰، به عنوان پارامتر کنترل کننده اصلی (آلاینده شاخص) استفاده شده است. سپس به‌منظور تعیین وزن بهینه هر پارامتر، همبستگی بین

[1]. Criterion maps
[2]. Kriging
[3]. Thiessen

شاخص‌های آسیب‌پذیری محاسبه شده و غلظت نیترات با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده محاسبه گردید.

تهیه نقشه‌های معیار مدل

پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز مدل، اقدام به تهیه نقشه‌های معیار موردنیاز مدل، بر پایه توابع سیستم اطلاعات جغرافیایی گردید. به‌منظور تهیه لایه عمق سطح ایستابی دشت اندیمشک، از آمار حداقل عمق آب زیرزمینی ۱۵ حلقه چاه پیزومتری واقع در دشت موردمطالعه، در دوره یک ساله از مهرماه ۸۸ تا شهریور ۸۹ استفاده گردید. براساس هیدروگراف واحد آب زیرزمینی دشت موردمطالعه در سال آبی ۸۹-۸۸، ماه مرداد با کمترین عمق سطح ایستابی انتخاب شد. برای تهیه لایه نفوذ مؤثر از روش پیسکوپو (۲۰۰۱) استفاده شد. بدین منظور، ابتدا یک مدل رقومی ارتفاعی از منطقه تهیه گردید. سپس شیب منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده، استخراج و با استفاده از معیارهای مربوطه رده‌بندی شد. نقشه خاک منطقه نیز با توجه به معیارهای تعریف شده در جدول ۱، تهیه و رده‌بندی گردید. همچنین به منظور تهیه نقشه بارش با استفاده از داده‌های ارائه شده توسط سازمان آب و برق خوزستان، نقشه بارش محدوده مورد مطالعه طی دوره آماری ۲۱ ساله تهیه گردید. پس از تهیه تمام نقشه‌های مذکور، برای به‌دست آوردن لایه تغذیه، نقشه‌های شیب و خاک به همراه رتبه بارندگی منطقه (که در منطقه موردمطالعه 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 پیسکوپو برای محاسبه تغذیه پتانسیل یک منطقه به صورت زیر است (پیسکوپو، ۲۰۰۱):

تغذیه= نفوذپذیری خاک + میزان بارندگی + شیب

جدول (۱): نمرات تغذیه برای منطقه مورد مطالعه (پیسکوپو، ۲۰۰۱)

الف) شیب		ب) بارندگی		ج) نفوذپذیری خاک		میزان تغذیه	
شیب (٪)	فاکتور	بارش (میلی‌متر)	فاکتور	محدوده	فاکتور	محدوده	نمره
< ۲	۴	> ۸۵۰	۴	زیاد	۵	۱۳-۱۱	۱۰
۲-۱۰	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	متوسط تا زیاد	۴	۱۱-۹	۸
۱۰-۳۳	۲	۷۰۰-۵۰۰	۲	متوسط	۳	۹-۷	۵
> ۳۳	۱	< ۵۰۰	۱	کم	۲	۷-۵	۳
				خیلی کم	۱	۵-۳	۱

برای تهیه لایه محیط اشباع نشده از لاگ چاه‌های پیزومتری و بهره‌برداری موجود در دشت استفاده گردید. برای تهیه این لایه روشی مشابه با تهیه نقشه پارامتر محیط آبخوان به کار برده شد، با این تفاوت که ضخامت و جنس لایه‌های بالای عمق برخورد به آب مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس به هر یک از چاه‌ها بر اساس وضعیت لیتولوژیکی، ضخامت و جنس رسوبات بخش غیراشباع و میزان تأثیر آن‌ها در انتقال آلودگی به آبخوان، براساس رتبه‌های تعریف شده در مدل سینتکس، رتبه‌بندی گردید. سپس، شبکه تیسن منطقه بر اساس موقعیت نسبت به مرز منطقه تهیه شد. در انتها لایه تهیه شده، بر اساس رتبه داده شده به هر چاه به لایه رستری تبدیل گردید. برای تهیه لایه محیط خاک، با استفاده از نقشه‌های خاک موجود، تیپ‌های مختلف خاک از نظر بافت‌شناسی در منطقه مطالعاتی شناسایی گردید. سپس بر اساس بافت‌های خاک موجود در منطقه و بر اساس معیارهای تعریف شده در تئوری مدل سینتکس، این لایه ارزش‌گذاری و کلاس‌بندی گردید. برای تهیه لایه محیط آبخوان از لاگ چاه‌های پیزومتری و بهره‌برداری

موجود در منطقه استفاده گردید. سپس بر اساس نسبت جنس مواد تشکیل دهنده آبخوان در هر کدام از چاه‌های مذکور، به هر یک رتبه‌ای بر اساس معیارهای تئوری روش سینتکس اختصاص داده شد. سپس، شبکه تیسن منطقه براساس موقعیت چاه‌ها نسبت به مرز منطقه مورد مطالعه تهیه شد. در نهایت لایه به دست آمده، براساس رتبه داده شده به هر چاه به لایه رستری تبدیل گردید. با توجه به آن که در آزمون‌های پمپاژ مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال اندازه‌گیری می‌شود، اطلاعات و موقعیت جغرافیایی مربوط به ضریب قابلیت انتقال و هم‌ضخامت اشباع آبخوان دشت، از نقشه‌های تهیه شده توسط سازمان آب و برق به دست آمد. سپس، نقشه ضریب قابلیت انتقال بر نقشه هم‌ضخامت آبخوان، تقسیم و نقشه هدایت هیدرولیکی دشت به‌دست آمد. نقشه هدایت هیدرولیکی با توجه به تئوری مدل سینتکس، کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری گردید. به‌منظور تهیه لایه توپوگرافی، ابتدا مدل رقومی ارتفاعی منطقه با استفاده از نقشه‌های تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و سپس نقشه شیب از این مدل رقومی ارتفاعی استخراج گردید. در نهایت برای تهیه لایه توپوگرافی، نقشه شیب به دست آمده با استفاده از استانداردها و معیارهای تعریف شده در مدل سینتکس، کلاس‌بندی و ارزش‌گذاری گردید.

مدل‌های موجود تلفیق نقشه برای اجرا در سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل منطق بولین، مدل هم‌پوشانی شاخص، مدل منطق فازی و مدل وزن‌های نشانگر می‌باشد (بونهام کارتر، ۱۹۹۴). در مطالعه حاضر از مدل هم‌پوشانی شاخص جهت تلفیق لایه‌ها برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان استفاده گردید. پس از تهیه نقشه‌های معیار و تلفیق آن‌ها جهت محاسبه شاخص آسیب‌پذیری آبخوان، به‌منظور مطابقت وزن‌های اختصاص یافته به پارامترهای مدل بر اساس شرایط واقعی منطقه، اقدام به تحلیل حساسیت مدل گردید.

تحلیل حساسیت[1]

تحلیل حساسیت یکی از مؤلفه‌های اصلی پروژه‌های مدل‌سازی محسوب می‌شود، زیرا امکان ارزیابی صحت نتیجه را فراهم می‌آورد (حسینیاینا و همکاران، ۲۰۱۰). از این‌رو، به منظور تحلیل حساسیت آسیب‌پذیری دشت مورد مطالعه، از دو نوع تحلیل حساسیت استفاده گردید.

تحلیل حساسیت حذف نقشه[2]

این نوع تحلیل حساسیت توسط لودویک و همکاران (۱۹۹۰) معرفی شد. در این نوع تحلیل حساسیت، ارزیابی ضرورت یا عدم ضرورت استفاده از هفت پارامتر سینتکس مطرح می‌باشد. میزان حساسیت حذف نقشه، حساسیت نقشه آسیب‌پذیری نسبت به حذف یک یا تعداد بیشتری نقشه از نقشه آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد و به کمک رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. در این رابطه، S میزان حساسیت بیان شده از لحاظ شاخص تغییرپذیری، V و 'V به ترتیب شاخص آسیب‌پذیری غیرآشفته (شاخص واقعی و بدون حذف پارامتر) و شاخص آسیب‌پذیری آشفته، Nو n به ترتیب تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه V و 'V می‌باشد. شاخص آسیب‌پذیری واقعی به‌دست‌آمده با کاربرد هر هفت پارامتر به‌عنوان آسیب‌پذیری غیرآشفته در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که آسیب‌پذیری محاسبه شده با استفاده از تعداد کمتری از لایه‌های اطلاعاتی، به‌عنوان آسیب پذیری آشفته در نظر گرفته می‌شود (بابیکر و همکاران، ۲۰۰۵).

$$S = \left(\left|V/N - V'/n\right|\right)\times 100 \qquad (۲)$$

تحلیل حساسیت تک پارامتری[3]

میزان حساسیت تک پارامتری جهت ارزیابی تأثیر هر یک از پارامترهای سینتکس روی شاخص آسیب

---

1. Sensitivity Analysis
2. Map removal sensitivity analysis
3. Single-parameter sensitivity analysis

پذیری طراحی شده است. در این روش تحلیل، وزن «مؤثر» یا «واقعی» هر پارامتر ورودی در هر پلی‌گون با وزن «تئوریک» اختصاص یافته توسط مدل تحلیلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. وزن مؤثر هر پلی‌گون با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید. 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 می باشد (بابیکر و همکاران، ۲۰۰۵).

$$W = \left(\frac{P_r P_w}{V} \right) \times 100 \qquad (۳)$$

تصحیح وزن پارامترهای مدل به روش AHP

به‌منظور تعیین میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی مدل در انتقال آلودگی به آبخوان موردمطالعه مطابق با شرایط واقعی، از روش AHP که بیشتر برپایه نظرات کارشناسی استوار می‌باشد، استفاده گردید. بدین منظور، ابتدا هفت پارامتر موجود در مدل بر اساس اهمیت و نقشی که در تعیین آسیب‌پذیری آبخوان منطقه موردمطالعه داشتند، اولویت‌بندی و سپس معیارها، به‌صورت دو به دو با یکدیگر مقایسه و اهمیت آن‌ها نسبت به یکدیگر تعیین گردید. جهت مقایسه دو به دو بین پارامترهای مدل، اقدام به تشکیل یک ماتریس گردید که ورودی آن همان وزن‌های تعیین شده توسط دانش کارشناسی می‌باشد. سپس وزن‌های کارشناسی شده به عنوان ورودی به نرم‌افزار Super Decisions 2.0.8 داده شد. سپس نرخ ناسازگاری ارائه شده توسط نرم‌افزار، به‌منظور جلوگیری از تصادفی بودن قضاوت‌های کارشناسی مورد بررسی قرار گرفت (نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ قابل‌قبول می‌باشد). در نهایت از خروجی نرم‌افزار که در واقع وزن‌های نسبی مربوط به معیارها می‌باشند، جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان دشت موردمطالعه استفاده گردید. جهت کاهش خطای تصمیم‌گیری و انتخاب صحیح‌تر اوزان، از چندین نظر کارشناسی استفاده و درنتیجه چندین مدل برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری اجرا گردید. سرانجام براساس همبستگی شاخص آسیب‌پذیری نهایی و غلظت نیترات موجود در آبخوان موردمطالعه، بهترین وزن‌دهی انتخاب گردید. به عبارتی، هرچه همبستگی شاخص آسیب‌پذیری نهایی با غلظت نیترات آبخوان بیشتر باشد، آن مدل به‌عنوان مدل بهینه جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان موردمطالعه گزینش می‌گردد.

آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی نیترات

پس از تهیه نقشه آسیب‌پذیری منطقه موردمطالعه، خطرپذیری آبخوان موردمطالعه توسط محاسبه شاخص آسیب‌پذیری ویژه ارزیابی گردید. آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی نیترات توسط شاخص دراستیک مرکب (شاخص CD)[1] محاسبه می‌گردد. این شاخص اقتباسی از شاخص دراستیک می‌باشد که با اضافه کردن یک پارامتر جدید به آن، پتانسیل خطرپذیری مربوط به کاربری اراضی (L) را تعیین می‌نماید. هدف این روش، ارزیابی وسعت تأثیر پتانسیل کاربری اراضی بر روی کیفیت آب زیرزمینی در نتیجه استفاده از بافت خاک و محیط ناحیه اشباع نشده در طول زمان می‌باشد. آسیب‌پذیری ویژه به آلودگی نیترات بر اساس این شاخص دارای بازه‌ای بین ۲۸ تا ۲۸۰ می‌باشد و به وسیله رابطه ۴ محاسبه می‌گردد. در این رابطه، L_w، وزن نسبی پتانسیل خطرپذیری مربوط به کاربری اراضی، L_r، رتبه پتانسیل خطرپذیری مربوط به کاربری اراضی و بقیه پارامترها، پارامترهای به کار رفته در مدل نرمال می‌باشد. نقشه پتانسیل خطرپذیری مربوط به کاربری اراضی با استفاده از متدولوژی مشابه به کار رفته برای سایر پارامترهای شاخص دراستیک تهیه می‌شود (مارتینز-باستیدا و همکاران، ۲۰۱۰). بازه‌های آسیب‌پذیری شاخص CD با استفاده از جدول طبقه‌بندی می‌گردد.

[1]. Composite DRASTIC index (CD index)

$$CD\ index = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r + L_w L_r \quad (۴)$$

از آنجایی که تنها تفاوت روش دراستیک و سینتکس در فرآیند رتبه‌دهی پارامترهای به کار رفته در آن‌ها می‌باشد، دقیقاً به روش فوق، شاخص آسیب‌پذیری ویژه آبخوان دشت اندیمشک به روش سینتکس تهیه گردید.

جدول (۲): بازه‌های آسیب‌پذیری مربوط به شاخص CD (مارتینز-باستیدا و همکاران، ۲۰۱۰)

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

بحث و نتایج

آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اندیمشک

با تلفیق نقشه‌های معیار تهیه شده بر اساس رابطه ۱، نقشه نهایی آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه، بر اساس نرخ‌بندی مدل سینتکس نرمال تهیه گردید. نتایج نشان داد که شاخص نهایی سینتکس نرمال، بین ۹۰ تا ۱۷۱ قرار می‌گیرد. همانطور که در بخش های پیشین ذکر شد، به‌منظور ارزیابی صحت وزن‌های اختصاص داده شده به پارامترهای مدل سینتکس بر اساس شرایط واقعی منطقه، اقدام به تحلیل حساسیت گردید. نتایج آماری حاصل از تحلیل حساسیت به روش حذف نقشه، نشان می‌دهد که مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر روی تغییرات شاخص آسیب‌پذیری، پارامتر تأثیر ناحیه غیراشباع می‌باشد که با میانگین تغییرات شاخص آسیب‌پذیری ۲/۱۴ درصد دارای بالاترین ضریب حساسیت می‌باشد. این موضوع به دلیل وسعت زیاد محدوده با رتبه بالا (درشت دانه بودن اکثر رسوبات واقع در ناحیه غیراشباع) می‌باشد. پس از این پارامتر، بیشترین تأثیر را به ترتیب پارامترهای عمق سطح ایستابی، توپوگرافی، محیط خاک، تغذیه خالص، خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان و هدایت هیدرولیکی دارا می‌باشند. از این میان پارامتر هدایت هیدرولیکی با میانگین تغییرات آسیب‌پذیری ۰/۰۱ درصد، دارای پایین‌ترین ضریب حساسیت نسبت به سایر پارامترهای مدل می‌باشد. به عبارتی حذف پارامتر هدایت هیدرولیکی از مدل، کمترین تأثیر را در تغییر شاخص آسیب‌پذیری دارد (جدول ۳).

جدول (۳): نتایج آماری تحلیل حساسیت حذف نقشه

پارامتر حذف شده	تغییرات شاخص آسیب‌پذیری			
	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف معیار
S	۰/۶۳	۲	۰	۰/۶۹
I	۰/۱۳	۲	۰	۰/۳۷
N	۲/۱۴	۵	۱	۰/۷۶
T	۰/۵۰	۲	۰	۰/۵۳
A	۰/۰۶	۱	۰	۰/۲۴
C	۰/۰۱	۲	۰	۰/۱۲
S	۰/۵۱	۲	۰	۰/۵۰

همچنین، نتایج آماری حاصل از تحلیل حساسیت به روش تک پارامتری نشان می‌دهد که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر روی شاخص آسیب‌پذیری، پارامتر تأثیر محیط غیراشباع می‌باشد که با میانگین ۲۹/۳۲ درصد، بیشترین میانگین وزن مؤثر را در بین پارامترهای مدل دارا می‌باشد و نتایج حاصل از تحلیل حساسیت حذف نقشه را تأیید می‌نماید. مقایسه وزن مؤثر هر پارامتر با وزن تئوریک اختصاص داده شده به آن در آبخوان دشت مورد مطالعه، نشان می‌دهد که وزن‌های مؤثر و تئوریک پارامترهای مدل سینتکس کاملاً بر هم منطبق نمی‌باشند. به‌عنوان مثال وزن تئوریک پارامتر عمق تا سطح ایستابی ۲۱/۷۳ درصد و وزن مؤثر آن ۱۰/۱۵ درصد می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که پس از پارامتر تأثیر محیط غیراشباع، پارامتر محیط آبخوان نیز دارای وزن مؤثر بیشتر نسبت به وزن تئوریک می‌باشد. ولی پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه خالص، عمق سطح ایستابی، محیط خاک و توپوگرافی دارای وزن مؤثر کمتری نسبت به وزن تئوریک اختصاص یافته به آن‌ها توسط مدل سینتکس می‌باشد (جدول ۴). به دلیل عدم تطابق وزن‌های اختصاص یافته به پارامترها در مدل سینتکس نرمال با نتایج تحلیل حساسیت مدل، اقدام به تصحیح وزن پارامترهای مدل بر اساس شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش وزن‌دهی AHP گردید.

جدول (۴): نتایج آماری تحلیل حساسیت تک پارامتری

پارامتر	وزن تئوریک	وزن تئوریک (٪)	وزن مؤثر (٪)			
			میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار
S	۵	۲۱/۷۳	۱۰/۱۵	۳	۳۰	۶/۷۷
I	۴	۱۷/۳۹	۱۰/۹۰	۲	۱۷	۳/۴۶
N	۳	۱۳/۰۴	۲۹/۳۲	۲۱	۴۱	۴/۱۲
T	۲	۸/۶۹	۷/۷۵	۴	۱۴	۳/۱۴
A	۱	۴/۳۴	۱۵/۹	۸	۲۴	۳/۰۷
C	۵	۲۱/۷۳	۱۵/۵۷	۱۲	۲۳	۱/۹۹
S	۳	۱۳/۰۴	۷/۰۴	۰	۱۰	۱/۰۳

به‌منظور تعیین رابطه آماری میان غلظت نیترات آب زیرزمینی و نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان، آنالیز رگرسیون خطی ساده انجام شد. در این آنالیز، مقادیر نیترات چاه‌های نمونه‌برداری شده به عنوان متغیر وابسته و مقادیر آسیب‌پذیری متناظر هر یک از این چاه‌ها به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است. پس از تعیین ضرایب همبستگی در مدل‌های مختلف، بیشترین ضریب همبستگی برابر ۰/۶۵۹ به‌دست آمد (شکل ۲) که به دلیل همبستگی بالاتر نسبت به مدل سینتکس نرمال (۰/۶۳۶)، به عنوان مدل بهینه جهت ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه تعیین گردید. با توجه به در نظر گرفتن تعداد ۳۳ حلقه چاه در آنالیز رگرسیون خطی ساده انجام شده، مقدار ضریب همبستگی بهینه به‌دست آمده، طبق جدول ۵، در سطح اعتماد قابل‌قبولی قرار دارد؛ به عبارت دیگر، میزان ضریب همبستگی برای شاخص آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان و غلظت نیترات در روش اصلاح شده برابر ۰/۶۵۹ می‌باشد که در مقایسه با مقادیر بحرانی در سطح اطمینان ۵ درصد و یک درصد، معنی‌دار بودن آن اثبات می‌گردد (جدول ۵).

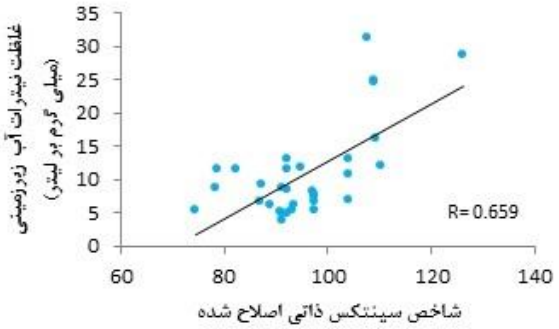
جدول (۵): حدهای بحرانی R در سطح معنی‌دار ۰/۰۵ و ۰/۰۱ (اهدایی، ۱۳۶۸)

تعداد نمونه‌ها	سطح معنی‌دار	
	۰/۰۵	۰/۰۱
۲۸	۰/۳۶۱	۰/۴۶۳
۲۹	۰/۳۵۵	۰/۴۵۶
۳۰	۰/۳۴۹	۰/۴۴۹
۳۵	۰/۳۲۵	۰/۴۱۸
۴۰	۰/۳۰۴	۰/۳۹۳

از این‌رو، جهت ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان دشت اندیمشک و اخذ تصمیمات مدیریتی، می‌توان به نتایج حاصل از این مدل اطمینان نمود. البته به دلیل اینکه مدل سینتکس نرمال در سطح اعتماد قابل اطمینانی قرار دارد، ضریب همبستگی مدل بهینه شده نسبت به سینتکس نرمال، افزایش چشمگیری نداشته است. بر این اساس، شاخص آسیب‌پذیری ذاتی مدل سینتکس اصلاح شده برای دشت اندیمشک، بین ۶۹/۸۲ تا ۱۳۲/۳۹ به دست آمد. وزن بهینه پارامترهای مدل سینتکس براساس شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه، در جدول ۶ ارائه گردیده است.

جدول (۶): وزن بهینه پارامترهای مدل سینتکس

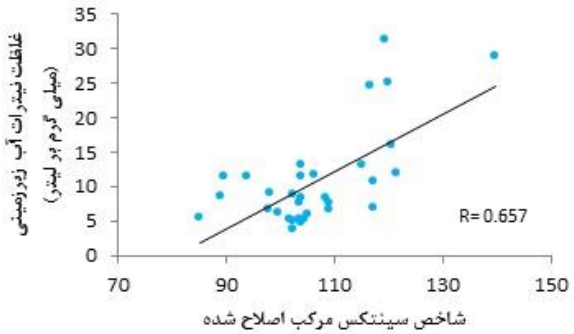
پارامتر	وزن اولیه	وزن بهینه
عمق سطح ایستابی	۵	۳/۸۶
نفوذ مؤثر	۴	۲/۰۳
محیط اشباع نشده	۵	۵
محیط خاک	۲	۲/۵۵
خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان	۳	۱/۲۲
هدایت هیدرولیکی	۳	۱/۵۹
شیب	۱	۱
نرخ ناسازگاری	۰/۰۳۵	



شکل (۲): نمودار همبستگی شاخص سینتکس ذاتی اصلاح شده با غلظت نیترات

ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان دشت اندیمشک

جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری ویژه آبخوان دشت مورد مطالعه، پارامتر کاربری اراضی منطقه به پارامترهای مدل سینتکس افزوده شد. بدین منظور ابتدا به دلیل اهمیت پارامتر کاربری اراضی در انتقال آلودگی به آبخوان، این پارامتر با وزن ۵ به پارامترهای مدل سینتکس نرمال افزوده شد. به‌منظور صحت وزن داده شده به این پارامتر طبق شرایط واقعی منطقه، با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده میزان همبستگی میان شاخص آسیب‌پذیری ویژه محاسبه شده و غلظت نیترات آبخوان تعیین گردید (۰/۵۲۹). به منظور تعیین وزن بهینه این پارامتر بر اساس شرایط واقعی منطقه، نیز از روش وزن‌دهی AHP استفاده گردید. به گونه‌ای که وزن بهینه این پارامتر همانند عملیات تصحیح اوزان پارامترهای مدل سینتکس، براساس چندین نظر کارشناسی، بین هفت پارامتر مدل سینتکس و پارامتر کاربری اراضی، مقایسه زوجی انجام شد. بر این اساس پس 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 تعیین گردید. به گونه‌ای که میزان همبستگی مدل اصلاح شده آسیب‌پذیری ویژه به ۰/۶۵۷ رسید (شکل ۳). بر این اساس، شاخص آسیب‌پذیری ویژه مدل سینتکس اصلاح شده برای دشت اندیمشک، بین ۷۴/۸۱ تا ۱۴۶/۳۰ به دست آمد. وزن بهینه پارامترهای مدل سینتکس مرکب براساس شرایط هیدروژئولوژیکی منطقه مورد مطالعه، در جدول ۷ ارائه گردیده است.



شکل (۳): نمودار همبستگی شاخص سینتکس مرکب اصلاح شده با غلظت نیترات

جدول (۷): وزن بهینه پارامترهای مدل سینتکس مرکب

پارامتر	وزن اولیه	وزن بهینه
عمق سطح ایستابی	۵	۳/۹۳
نفوذ مؤثر	۴	۲/۲۸
محیط اشباع نشده	۵	۵
محیط خاک	۲	۲/۸۴
خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان	۳	۱/۳۵
هدایت هیدرولیکی	۳	۱/۷۲
شیب	۱	۱
کاربری اراضی	۵	۱/۱
نرخ ناسازگاری	۰/۰۵۲	

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه دشت اندیمشک از دشت‌های مهم استان خوزستان به شمار می‌رود، برای مطالعه انتخاب گردید. در این مقاله پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان دشت اندیمشک با استفاده از یون نیترات به عنوان شاخص آلودگی ناشی از فاضلاب‌های شهری و پساب‌های کشاورزی با تصحیح وزن پارامترهای به کار رفته در مدل سینتکس با کاربرد روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و در محیط GIS صورت گرفت. اصلاح این مدل بستگی به میزان همبستگی میان شاخص آسیب‌پذیری آبخوان و غلظت نیترات بستگی دارد. این ضریب همبستگی با استفاده از آنالیز رگرسیون خطی ساده محاسبه گردید. افزایش میزان ضریب همبستگی شاخص‌های سینتکس و سینتکس مرکب اصلاح شده با غلظت نیترات نسبت به مدل‌های سینتکس و سینتکس مرکب نرمال نشان داد که نتایج حاصل از مدل‌های اصلاح شده مطابقت بیشتری با شرایط واقعی حاکم بر منطقه دارند. شاخص آسیب‌پذیری مدل سینتکس اصلاح شده، بین ۶۹/۸۲ تا ۱۳۲/۳۹ قرار گرفته است. جهت درک بهتر از وضعیت آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان مورد مطالعه، شاخص آسیب‌پذیری به سه طبقه تقسیم‌بندی شده است (جدول ۸). همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ناحیه کوچکی واقع در شمال منطقه دارای آسیب‌پذیری خیلی کم، برخی نواحی واقع در شمال، شرق و نواحی جنوبی دشت مورد مطالعه دارای آسیب‌پذیری متوسط و سایر نواحی دشت از آسیب‌پذیری کمی برخوردار می‌باشند. به طوری که محدوده‌ای واقع در شمال شهر اندیمشک و مجاور کوی رسالت شمال شرق اندیمشک دارای آسیب‌پذیری خیلی کم، قلعه لور واقع در شمال دشت و روستاهای بنوار حسین، شوهان علیا و زاویه مشعلی واقع در نواحی جنوبی دشت دارای آسیب‌پذیری متوسط، محدوده اطراف شهر اندیمشک، شهرک دوکوهه، چم گلک و سنجر از آسیب‌پذیری کمی برخوردار می‌باشند. شاخص آسیب‌پذیری ویژه آلودگی آبخوان دشت اندیمشک که با استفاده از تلفیق پارامترهای مدل سینتکس و کاربری اراضی محاسبه شده است بین ۷۴/۸۱ تا ۱۴۶/۳۰ قرار گرفت. این نقشه به سه طبقه آسیب‌پذیری خیلی کم، کم و متوسط تقسیم‌بندی شده است (جدول ۹). همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، ناحیه‌ای در شمال غربی دشت واقع در اطراف پل قدیم دزفول و روستای سنجر و نیز به صورت پراکنده برخی نواحی مرکزی دشت از خطرپذیری خیلی کم برخوردار می‌باشند. منطقه کوچکی در جنوب دشت مورد مطالعه، واقع میان دو روستای شوهان علیا و زاویه مشعلی دارای خطرپذیری متوسط می‌باشند. اطراف شهر اندیمشک، خطرپذیری آلودگی نیتراته آبخوان در دو طبقه خیلی کم و کم قرار دارد. به عبارتی، نقشه خطرپذیری به دست آمده، نمایانگر آن است که محدوده‌ای واقع در جنوب دشت منطقه مورد مطالعه (واقع در حومه روستاهای شوهان علیا و زاویه مشعلی) دارای حداکثر خطر آلودگی نسبت به سایر نواحی می‌باشد. به طورکلی، با توجه به نقشه آسیب‌پذیری ویژه نهایی دشت اندیمشک (شکل ۵)، خطرپذیری آلودگی آبخوان دشت مورد مطالعه در سطح بالایی نمی‌باشد. محدوده غلظت نیترات موجود در آبخوان دشت (۳/۸۲-۳۱/۱۹ میلی‌گرم در لیتر) اندازه‌گیری شده است که با توجه به حداکثر غلظت مجاز تعیین شده توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای مصارف آشامیدنی (۵۰ میلی‌گرم در لیتر)، غلظت نیترات موجود در آبخوان مورد مطالعه پائین‌تر از حد مجاز تعیین شده توسط سازمان‌های مذکور می‌باشد. علاوه بر نتایج حاصل از همبستگی میان شاخص سینتکس اصلاح شده و غلظت نیترات، مطابقت قابل قبولی میان 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، کمبود بارندگی، خشکسالی‌های اخیر، افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، افزایش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و

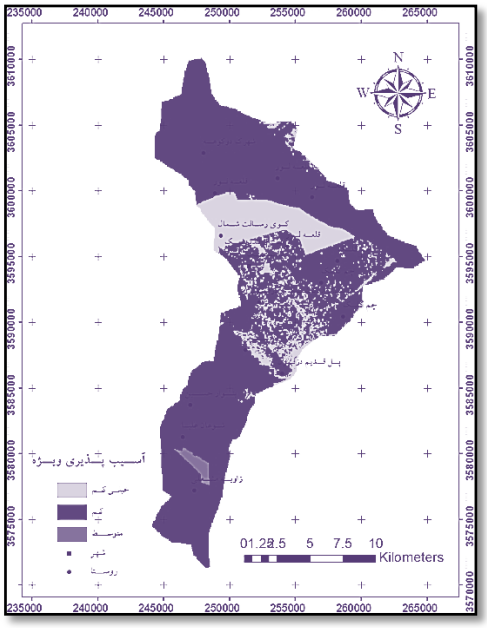
در نتیجه افزایش آلودگی‌های ناشی از فاضلاب‌های شهری، پساب‌های کشاورزی و صنعتی و در مقابل افزایش نیازمندی به آب، بایستی نظارت زیست‌محیطی قاطعی در منطقه صورت پذیرد. این امر نیز از طریق فرهنگ‌سازی زیست‌محیطی در جامعه و تشریح اهمیت بیش از حد منابع آب زیرزمینی در توسعه پایدار برای سیاستگذاران و مسئولین امر حاصل خواهد شد.

جدول (۸): شاخص مدل سینتکس برای منطقه مورد مطالعه

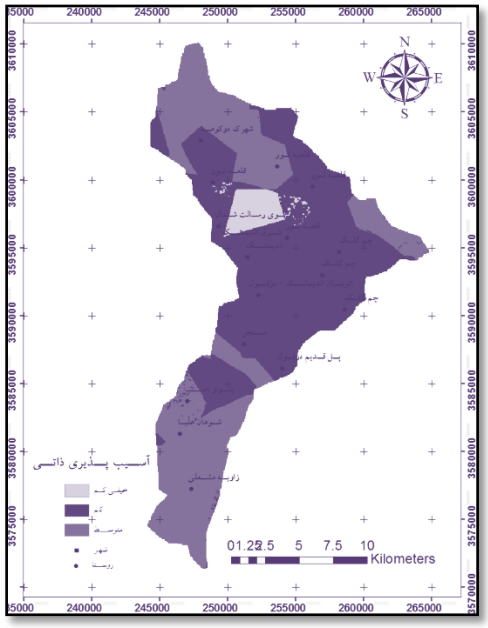
شاخص سینتکس	محدوده	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت
آسیب‌پذیری ذاتی خیلی کم	۸۰-۱۰۵	۴۶/۵۸	۱۵/۸۹
آسیب‌پذیری ذاتی کم	۱۰۵-۱۴۰	۲۴۴/۰۳	۸۳/۲۴
آسیب‌پذیری ذاتی متوسط	۱۴۰-۱۸۶	۲/۵۲	۰/۸۶
	جمع کل	۲۹۳/۱۴	۱۰۰

جدول (۹): شاخص مدل سینتکس اصلاح شده برای منطقه مورد مطالعه

شاخص سینتکس مرکب	محدوده	مساحت (کیلومترمربع)	درصد مساحت
آسیب‌پذیری ویژه خیلی کم	<۱۰۰	۴۶/۵۸	۱۵/۸۹
آسیب‌پذیری ویژه کم	۱۰۰-۱۴۵	۲۴۴/۰۳	۸۳/۲۴
آسیب‌پذیری ویژه متوسط	۱۴۵-۱۹۰	۲/۵۲	۰/۸۶
	جمع کل	۲۹۳/۱۴	۱۰۰



شکل (۴): نقشه آسیب‌پذیری ذاتی نهایی آبخوان اندیمشک



شکل (۵): نقشه آسیب‌پذیری ویژه نهایی آبخوان اندیمشک

منابع

اهدایی، ب. ۱۳۶۸. آمار تجربی عمومی، مرکز انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم، صص ۴۶۷.

شرکت مهندسین مشاور بهکار آب اهواز. ۱۳۹۰. مطالعات هیدروژئولوژی نیمه تفصیلی دشت دزفول- اندیمشک. سازمان آب و برق خوزستان.

عطائی، م. ۱۳۸۹. تصمیم‌گیری چند معیاره، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ اول، صص ۳۳۳.

میرزائی، س.، م، نادری، ح. بیگی و ج. محمدی. ۱۳۸۸. ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت شهرکرد با استفاده از GIS و مدل SINTACS. سومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران، مهرماه ۱۳۸۸.

Al Kuisi, M., A. El-Neqa and N. Hammouri. 2006. Vulnerability mapping of shallow groundwater aquifer using SINTACS model in the Jordan Valley area, Jordan. J. Environmental Geology, 50 (5): 651-667.

Babiker, I. S., M. A. A. Mohamed, T. Hiyama and K. Kikuo. 2005. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. J. Science of the Total Environment, 345(1-3): 127-140.

Bai, L., Y. Wang and F. Meng. 2011. Application of DRASTIC and Extension theory in the groundwater vulnerability evaluation. Water and Environment Journal, 26(3), pp. 381-391.

Bonham-carter, G. F. 1994. Geographic Information System for Geoscientists: Modeling with GIS, Pergamon, Ontario.

Civita, M. 1993. Groundwater vulnerability maps: a review. Proceedings of the IX symposium on pesticide chemistry "mobility and degradation of xenobiotics", Piacenza, 587-631.

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. 1994. Le carte della vulnerability degli acquifer all' inquinamento. Teoria and practica (Aquifer vulnerability maps to pollution) Pitagora, Bologna.

Civita, M. and M. De Maio. 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.

Corniello, F., D. Ducci and G. Monti. M. 2004. Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento peninsila, southern Italy, evaluated by SINTACS method. J. Geofisica International, 43(4): 575-581.

Gemitzi, A., C. Petalas, C. Tsihrintzis and V. Pisinaras. 2006. Assessment of groundwater vulnerability to pollution: a combination of GIS, fuzzy logic and decision making techniques. Environmental Geology, 49(5): 653-673.

Hasiniaina, F., J. Zhou and L. Guoyi. 2010. Regional assessment of groundwater vulnerability in Tamtsag basin, Mongolia using drastic model. Journal of American Science, 6(11): 65-78.

Khodapanah, L., W. N. A. Sulaiman and N. Khodapanah. 2009. Groundwater quality assessment for different purpose in Eshtehard District, Tehran, Iran. J. European Journal of Scientific Research, 36(4): 543-553.

Lodwick, WA., W. N. A. Munson and L. Svoboda. 1990. Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. International Journal of Geographic Information Systems, 4(4): 413-428.

Martinez-Bastida, J. J., M. Arauzo and M. Valladolid. 2010. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. Hydrogeology Journal, 18(3): 681-698.

Piscopo, G. 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW. Departmant of Land and Water Conservation, Australia. "

<http://www.dlwc.nsw.gov.au./care/water/groundwater/reports/pdfs/castlereagh_map_notes.pdfs.>
Rahman, A. 2008. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. J. Applied Geography, 28(1): 32-53.
Samey, A. A. and C. Gang. 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.
Sener, E. and A. Davraz. 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., M. Karmegam and K. Venugopal. 2003. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. J. Environmental Modeling & Software, 18: 645-656.

Improvement of SINTACS Method Using Analytical Hierarchy Process in Geographic Information System Environment to Evaluate Aquifer Vulnerability (Case Study: Andimeshk Plain)

Mehrnaz Asefi[1], Heidar Zarei [2], Feridon Radmanesh [3]

Abstract

Population growth, industrialization and the development of agricultural activities are the causes of increasing municipal and industrial wastewaters and irregular use of fertilizers and pesticides, and consequently the contamination of groundwater resources. Since the main problem with SINTACS models, applies expertise rating parameters to be used in it, in this study, the model using Analytical Hierarchy Process based on local hydrogeological conditions were indeed improvement. To achieve efficient models, the correlation coefficients between nitrate concentrations in the aquifer vulnerability index as an indicator of contamination were determined using Simple Linear Regression Analysis (SLRA). The results showed that the optimal model SINTACS than model the normal SINTACS is correlated with higher nitrate concentrations. Also, in order to assess risk Andimeshk aquifer pollution, land use parameters with the parameters used in the SINTACS model are overlaid, thus in turn specific aquifer vulnerability map was provided. Results from the map showed that the risk of aquifer contamination is not high.

Keywords: groundwater, vulnerability, SINTACS, Analytical Hierarchy Process, Andimeshk Plain.

[1]. MSc in Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Email: mehrnaz_assefi@yahoo.com (Corresponding author)
[2] . Assistant Professor in Hydrology, Shahid Chamran University of Ahwaz, Email: zareih@scu.ac.ir
[3]. Assistant Professor in Hydrology, Shahid Chamran University of Ahwaz, Email: feridon_radmanesh@yahoo.com