

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۱۷، زمستان ۱۳۹۷، صص ۱۲۳-۱۰۳

وصول مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۴ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۸

## بهینه‌سازی روش SINTACS با استفاده از مدل فازی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بیلوردی

عطاالله ندیری<sup>\*۱</sup>

اسفندیار عباس نوین‌پور<sup>۲</sup>

رعنا فعال‌ا قدم<sup>۳</sup>

زهرا صدقی<sup>۴</sup>

### چکیده

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به منظور تعیین مناطق دارای پتانسیل آلودگی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، از روش SINTACS برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت بیلوردی استفاده شده است. در روش SINTACS پارامترهای مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری سفره‌ی آب زیرزمینی، شامل عمق سطح ایستابی، تغذیه‌ی خالص، جنس سفره، نوع خاک، شیب توپوگرافی، مواد تشکیل‌دهنده‌ی منطقه‌ی غیراشباع و هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود که به صورت ۷ لایه در محیط ArcGIS تهیه شدند که پس از اختصاص وزن و رتبه‌بندی و تلفیق ۷ لایه یاد شده، نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری آبخوان تهیه و شاخص SINTACS برای کل منطقه بین ۷۹-۱۶۹ برآورد شد. برای صحت‌سنجی روش از داده‌های غلظت نیترات در منطقه استفاده شد. برای بهبود نتایج روش SINTACS، از مدل فازی ممدانی استفاده و به این منظور داده‌های ورودی (پارامترهای SINTACS) و خروجی (شاخص آسیب‌پذیری تصحیح‌شده) و مقادیر نیترات مربوطه به ۲ دسته آموزش و

۱- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده‌ی مسئول).

E-mail:nadiri.ata@gamil.com

۲- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

آزمایش تقسیم شد و پس از آموزش مدل، با استفاده از مقادیر نیترا نتایج مدل در مرحله‌ی آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل MFL با افزایش ضریب تعیین روش SINTACS از ۰/۶۱ به ۰/۸۵ که حاصل حذف خطای نظر کارشناسی اعمال شده در روش کلاسیک می باشد، توانایی خود را در بهبود نتایج روش SINTACS اولیه نشان داد.

**کلمات کلیدی:** آسیب‌پذیری، آبخوان دشت بیلوردی، مدل فازی ممدانی (MFL)، روش SINTACS

#### مقدمه

سفره‌های آب زیرزمینی به دلیل کیفیت نسبتاً بالا و حساسیت کم در مقابل آلودگی، یکی از مهم‌ترین منابع آبی به شمار می‌رود (فoster و چیلتون<sup>۱</sup>، ۲۰۰۳: ۱۹۵۷). داشتن کیفیت بالای منابع آب زیرزمینی و کاهش آب‌های سطحی در اثر خشکسالی، سبب افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شده است. افزایش جمعیت، توسعه‌ی کشاورزی، صنعت و استفاده بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب افزایش افت سطح آب شده است. کاهش کیفیت آب در نتیجه‌ی انتقال آلودگی حاصل از فاضلاب‌های صنعتی، شهری و کودهای شیمیایی نیتروژن‌دار مورد استفاده در زمین‌های کشاورزی سبب بروز مشکلات جدی در سیستم آب زیرزمینی شده است. سیستم آب زیرزمینی نسبت به آلودگی‌ها پاسخ سریعی نمی‌دهد و زمان رسیدن آلودگی‌ها به محدوده‌ی آب زیرزمینی و انتشار آن در آبخوان معمولاً طولانی است. آلودگی آب‌های زیرزمینی زمانی مشخص می‌شود که از آبخوان جهت تأمین آب استفاده می‌شود. در این حالت رفع آلودگی فرآیند طولانی بوده و برای پاکسازی آب‌های زیرزمینی آلوده و مصرف مجدد آن، باید وقت و هزینه زیادی صرف شود که از نظر اقتصادی به صرفه نبوده و رفع کامل آلودگی اغلب غیرممکن است. بنابراین بهترین و مؤثرترین راه‌حل، جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به

1- Foster & Chilton

این منابع بالرش است در واقع جلوگیری از آلودگی آبخوان‌ها یک مسئله‌ی مهم محسوب می‌شود و نیازمند برنامه جامع برای مدیریت زیست‌محیطی منابع آب است. شناسایی مناطق آسیب‌پذیر دارای پتانسیل آلودگی می‌تواند راهکار مناسبی در جهت حفاظت از منابع آب زیرزمینی باشد. مفهوم آسیب‌پذیری اولین بار در اواخر سال (۱۹۶۰) میلادی در فرانسه برای آگاهی بخشی در مورد آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است (وربا و زوپوروزیک<sup>۱</sup>، ۱۹۹۴: ۱۳۵). آسیب‌پذیری به دو صورت ویژه و ذاتی قابل تعریف است. در آسیب‌پذیری ویژه‌ی حساسیت آبخوان به آلاینده یا گروه خاصی از آلاینده‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان به ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی بستگی دارد (گیالوگی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷: ۱۵۱۳) تعریف کمی و توصیفی از مفهوم آسیب‌پذیری، موجب افزایش درک انسان‌ها از آلودگی آب‌های زیرزمینی شده است که منجر به اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌های راهبردی در جهت کاهش آلودگی خواهد شد. تاکنون روش‌های زیادی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ارائه شده از جمله: (۱) روش‌های آماری: انتشار یک آلاینده‌ی خاص در یک منطقه مشخص را بیان می‌کند که روش قدرتمندی بوده و نیاز به داده‌های زیاد داشته که اغلب غیرقابل دسترس و سخت است. (۲) روش شاخص همپوشانی: بر اساس وزن پارامترها تعیین می‌شود که نسبت به روش‌های آماری آسان‌تر بوده و به داده‌های کمتر نیاز است و از نرم‌افزار ArcGIS استفاده می‌شود. (۳) روش سوم ادغام روش آماری و همپوشانی است روشی که اخیراً از طریق رگرسیون غیرخطی انجام گرفته است (گیالوگی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷: ۱۵۱۳). از روش‌های مختلف برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌ها روش PCSM<sup>۴</sup> ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های SI (استیگر و همکاران<sup>۵</sup>،

---

1- Vrba & Zoporozec

2- Gianluigi et al.,

3- Gianluigi et al.,

4- Point Count System Models

5- Stigter et al.,

AVI (سیویتا<sup>۱</sup>، ۱۹۹۰)، DRASTIC (آلر و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۸۷)، (۲۰۰۶) (وان استمپورت و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۹۹) و GODS (چیلتن و همکاران<sup>۴</sup>، ۱۹۹۰) اشاره کرد. اساس کار تمامی روش‌های PCSM بر پایه‌ی تلفیق لایه‌های پارامترهای مختلف با ارزش‌گذاری متفاوت است. در این تحقیق از روش SINTACS برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده شد که اولین بار توسط سیویتا در سال ۱۹۹۰ برای ارزیابی آسیب‌پذیری با شرایط مدیترانه‌ای ارائه شده است و پس از گذشت چند سال، توسط سیویتا و دی مایو<sup>۵</sup> در سال (۱۹۹۷) توسعه یافته است. پارامترهای روش SINTACS از روش DRASTIC مشتق شده است. اولین و عمده‌ترین تفاوت بین دو روش، در اختصاص رتبه و وزن به پارامترها بوده که در روش SINTACS رتبه‌ها گستردگی بیشتری داشته و همچنین علاوه بر وجود تفاوت ذاتی بین دو روش DRASTIC و SINTACS نتایج تحقیقات عموماً مشابه هم بوده است ولی نسبت به هم تفاوت‌های منطقه‌ای دارند. در واقع محاسبه‌ی شاخص همبستگی (CI) با نتیجه مطلوب، برتری هر یک از روش‌ها برای منطقه‌ی مطالعاتی مورد نظر را با توجه به ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی تعیین و انتخاب یکی از دو روش را برای بهینه‌سازی مشخص می‌کند. پارامترهای روش SINTACS به ترتیب مخفف واژه‌های ایتالیایی: عمق آب زیرزمینی (S)، تغذیه‌ی خالص (I)، اثر منطقه‌ی غیراشباع (N)، نوع خاک (T)، محیط آبخوان (A)، هدایت هیدرولیکی (C) و شیب (S) است. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص ارزیابی آسیب‌پذیری با روش SINTACS در سراسر جهان انجام شده است: همکاران<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۵۱۲؛ کومار و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۳: ۳۳۹؛ کورنیلو و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۰۴: ۵۷۵؛ ندیری و همکاران، ۱۳۹۶: ۱۰۸۰). با وجود محبوبیت روش‌های

1- Civita

2- Aller et al.,

3- Van Stempvoort et al.,

4- Chilton et al.,

5- Civita, De Maio

6- Kumar et al.,

7- Corniello et al.,

کلاسیک در ارزیابی پتانسیل آلودگی آبخوان‌ها، ممکن است به دلیل اعمال نظر کارشناسی در رتبه‌دهی و وزن‌دهی پارامترها یا استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در تجزیه و تحلیل اطلاعات داده‌های ورودی دچار خطای احتمالی شود که سبب عدم قطعیت در بیان نتایج خواهد شد. لذا با بهینه‌سازی روش‌های کلاسیک توسط مدل‌های هوش مصنوعی می‌توان نتایج را با دقت بیشتری بیان نمود که از آن جمله می‌توان به بهینه‌سازی روش SINTACS با منطق فازی و تحلیل سلسله مراتبی اشاره کرد (دی مارتینو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵: ۹۹؛ اوریچیو و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۴: ۱۸۹). در سال‌های اخیر کاربرد مدل‌های هوش مصنوعی منجر به بهبود روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی شده و این مدل‌ها توانایی بهبود نتایجی که با داده‌های کم و بکار بردن نظرات کارشناسی به دست آمده است را با ارائه نتایج دقیق‌تر در ارزیابی آسیب‌پذیری جبران می‌کنند (ندیری و همکاران، ۲۰۱۷ C: ۷۶؛ ۲۰۱۷b: ۸۵۶۳). تاکنون پژوهشی در زمینه بهینه‌سازی روش SINTACS با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی انجام نگرفته است و اولین بار برای ارزیابی آسیب‌پذیری دشت بیلوردی اجرا می‌شود. منطقه‌ی مطالعاتی دشت بیلوردی، از لحاظ کشاورزی و دامداری حائز اهمیت بوده و در برخی نقاط دشت به دلیل استفاده از کودهای نیتراژ برای اهداف کشاورزی، مقادیر نیتراژ اندازه‌گیری شده بالاتر از حد استاندارد جهانی گزارش شده است. مسئله مهم و جدی دیگر وجود معدن آرسنیک و لیلو در شمال دشت است که احتمال آلودگی به دلیل نشت زهاب حاصل از سد باطله معدن وجود دارد. لذا ارزیابی آسیب‌پذیری در منطقه‌ی مورد مطالعه برای کنترل و مدیریت منابع آب در جهت برنامه‌ریزی صحیح، ضروری است. هدف کلی این پژوهش: (۱) استفاده از روش SINTACS و تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری (۲) اجرای مدل هوش مصنوعی (مدل فازی ممدانی) برای بهبود نتایج

1- De martino et al.,

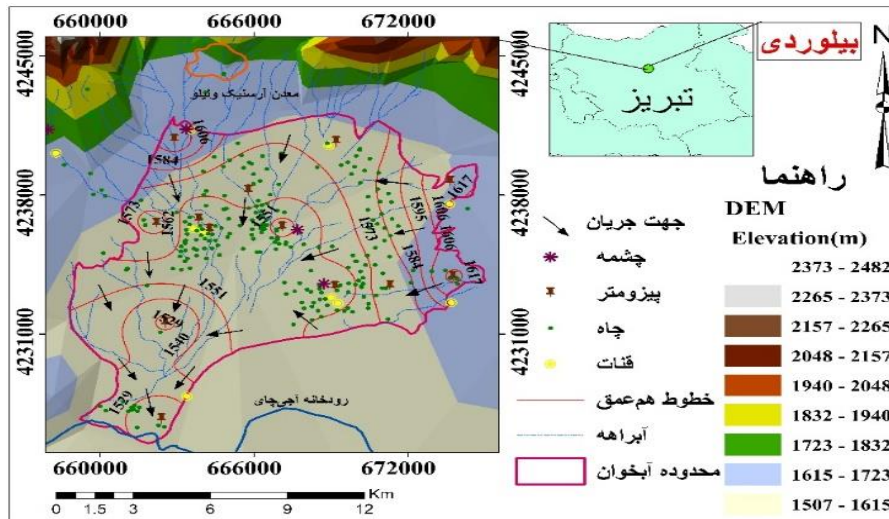
2- Uricchio et al.,

روش کلاسیک ۳) صحت‌سنجی روش کلاسیک و مدل هوش مصنوعی با مقادیر نیترات اندازه‌گیری شده در منطقه.

### مواد و روش‌ها

#### - ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

آبخوان دشت بیلوردی در استان آذربایجان شرقی و ۶۵ کیلومتری شهر تبریز واقع شده و از نظر تقسیمات هیدرولوژیکی، یکی از حوضه‌های آبریز دریاچه‌ی ارومیه است. وسعت دشت بیلوردی ۲۸۹ کیلومتر مربع بوده که از جنوب به حوضه‌ی آبریز آجی‌چای محدود شده است. مرتفع‌ترین نقاط دشت با ارتفاع تقریبی ۲۸۰۰ متر در روستای شهسوار و پست‌ترین نقاط نیز در روستای شیخ‌رجب با ارتفاع تقریبی ۱۳۲۰ متر از سطح دریاها‌ی آزاد قرار دارد. راه دسترسی به محدوده‌ی مورد مطالعه از طریق جاده‌ی آسفالت‌ه‌هر-تبریز امکان‌پذیر است. طبق مطالعات هیدرولوژیکی، دشت بیلوردی از نظر اقلیمی بر طبق اقلیم‌نمای آمبرژه دارای آب و هوای نیمه‌خشک سرد می‌باشد. براساس اطلاعات آماری سال آبی (۹۲-۹۳) گزارش شده از ایستگاه برازین، متوسط حداکثر دمای سالانه ۲۷/۵ و متوسط حداقل دمای سالانه ۶/۸- درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه برابر ۳۸۵ میلی‌متر است، و به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه سال مرداد و بهمن و از نظر میزان بارش به ترتیب پربارش و کم بارش‌ترین ماه، مهر و شهریور می‌باشد. نتایج داده‌های آماری دریافت شده از آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی (سال ۸۸-۱۳۸۷) در محدوده‌ی دشت بیلوردی بیانگر ۱۵۸ حلقه چاه عمیق، ۵۰ حلقه چاه نیمه‌عمیق، ۷ دهنه چشمه، ۱۷ رشته قنات و ۱۵ حلقه چاه پی‌زومتری حفر شده است. در دشت بیلوردی رودخانه‌ی آجی‌چای جریان دارد که از رشته کوه‌های سبلان و بزقوش سرچشمه گرفته و پس از طی مسیر ۲۶۰ کیلومتری به دریاچه‌ی ارومیه می‌ریزد. نقشه‌ی منابع آبی دشت در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) نقشه منابع آب منطقه‌ی مطالعاتی بر روی DEM

محدوده‌ی بیلوردی از نظر چینه‌شناسی شامل تناوبی از رسوبات کرتاسه تا کواترنری است. رسوبات کرتاسه و پالئوسن محدوده شمال غربی دشت را پوشانده است. رسوبات کرتاسه شامل تناوب ماسه‌سنگ و آهک، شیل و کنگلومرا و رسوبات پالئوسن دشت نیز شامل شیل‌های آبی خاکستری جایگزین شده با آهک، آهک‌های فسیل‌دار، لایه‌های نازک کنگلومرا با ماسه آهک‌دار است. رسوبات آئوسن در بخش شمال‌شرقی محدوده‌ی برونزد دارد که شامل سنگ‌های آتشفشانی، رسوبی، توف‌های داسیتی، میان‌لایه‌های پیروکلاستیک و ولکانوکلاستیک، آندزیت، تراکی‌آندزیت، ایگنمبریت، آندزیت‌های برشی‌شده و توف‌های سبز برشی است. محدوده نسبتاً وسیعی را، رسوبات میوسن پوشش داده که کیفیت آب منطقه‌ی مورد مطالعه متأثر از این رسوبات بوده، که شامل ژئپس، سیلتستون، ماسه سنگ، کنگلومرا با برش‌های قرمز و ژئپس مارن‌دار است. رسوبات کواترنری نیز شامل رسوبات آبرفتی عهد حاضر که تراس آبرفتی، پهنه‌های رسی و مارنی می‌باشد و مرکز دشت را پوشانده است.

## - روش پژوهش

در این پژوهش روش SINTACS برای ارزیابی پتانسیل آلودگی آبخوان دشت بیلوردی استفاده و سپس به منظور بهینه‌سازی این روش، از مدل فازی ممدانی استفاده شد. در این تحقیق منابع اطلاعاتی گوناگون از جمله داده‌های عمق آب زیرزمینی، نقشه‌ی بافت خاک منطقه، نقشه‌ی ارتفاعی رقومی و لاگ چاه‌های اکتشافی برای تهیه‌ی پارامترهای روش SINTACS به کارگرفته شد. لایه‌های روش SINTACS، پس از رتبه‌دهی و اختصاص وزن به صورت توابع همپوشانی در محیط ArcGIS تلفیق و نقشه‌ی نهایی آسیب‌پذیری منطقه تهیه شد (توضیحات کامل در خصوص چگونگی ارزیابی پارامترهای SINTACS و تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری در بخش نتایج و بحث آورده شده است). در مرحله‌ی بعد به منظور اجرای مدل فازی ممدانی، هفت پارامتر SINTACS به عنوان ورودی مدل و شاخص SINTACS تصحیح شده با نیترات به عنوان خروجی مدل انتخاب شد. پارامترهای هفت‌گانه روش SINTACS شامل لایه‌ی عمق آب زیرزمینی: فاصله‌ی بین سطح زمین تا سطح آب زیرزمینی است. برای تهیه‌ی لایه‌ی عمق از داده‌های آماربرداری ماهانه پیژومترهای منطقه استفاده شد. لایه‌ی تغذیه‌ی خالص: یکی از راه‌های اصلی انتقال آلاینده‌ها به آب زیرزمینی تغذیه می‌باشد. تغذیه مقدار آبی که از سطح زمین نفوذ کرده و به سطح ایستابی می‌رسد. حجم آب تغذیه‌شده میزان آب در دسترس برای رقیق‌شدگی آلاینده در منطقه‌ی اشباع و غیراشباع است. لایه‌ی محیط غیراشباع: این لایه به دلیل اهمیت بالا در انتقال آلاینده وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهد. برای تهیه‌ی لایه‌ی محیط غیراشباع از لاگ چاه‌های منطقه استفاده و با توجه به جنس رسوبات، مطابق با محدوده و نرخ پارامترهای SINTACS رتبه‌دهی انجام می‌شود. لایه‌ی خاک: محیط خاک معمولاً با ضخامتی حدود ۰/۵ تا ۲ متر به لحاظ میکروبیولوژی منطقه بسیار فعال به شمار می‌رود. لایه‌ی 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. لایه‌ی محیط آبخوان:



برای تهیه نقشه‌ی محیط آبخوان با استفاده از لاگ چاه‌های منطقه جنس مواد تشکیل‌دهنده‌ی آبخوان مشخص می‌شود. لایه‌ی هدایت هیدرولیکی: هدایت هیدرولیکی نفوذپذیری یا توانایی سفره در انتقال آب یا مواد محلول می‌باشد. هدایت هیدرولیکی عامل کنترل‌کننده‌ی زمان حرکت و ماندگاری مواد آلاینده یا آب که از سطح به سفره‌ی آب زیرزمینی منتقل می‌شود است. لایه‌ی شیب زمین: نقشه‌ی توپوگرافی یا شیب سطح زمین نیز حائز اهمیت بیشتری است هر چه شیب سطح زمین بیشتر باشد حرکت آلاینده بیشتر و فرصت نفوذ کمتر خواهد بود و هرچه شیب کمتر باشد فرصت برای نفوذ آلاینده بیشتر است. در این پژوهش بهینه‌سازی روش SINTACS برای اولین بار با استفاده از مدل فازی ممدانی انجام شد.

#### - روش SINTACS

روش SINTACS یکی از روش‌های مهم ارزیابی آسیب‌پذیری است که توسط سیویتا در سال (۱۹۹۹) از روش DRASTIC مشتق شده است و مقررات آن توسط هیدروژئولوژیست‌های ایتالیایی با معیارهای هیدروژئولوژیکی، آب و هوایی و شرایط مدیرانه‌ای در ایتالیا انتخاب شده است، روش SINTACS همچنین در سال ۱۹۹۷ توسط سیویتا و دی مایو اصلاح شده است (آلر و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۸۷: ۴۱). اختصاص وزن به پارامترهای روش SINTACS برحسب اهمیت و مشخصات محیطی و پراکندگی بالا از آب‌های سطحی به آب‌های زیرزمینی انجام می‌شود. رتبه‌های روش SINTACS دارای گستردگی زیادی نسبت به روش DRASTIC است (سیویتا، ۱۹۹۰: ۵۱۹). SINTACS مخفف واژه‌های ایتالیایی پارامترهای DRASTIC است پارامترهای روش SINTACS به ترتیب، عمق آب زیرزمینی ( $S^z$ )، تغذیه‌ی خالص ( $I^z$ )، اثر منطقه‌ی غیراشباع ( $N^z$ )، نوع

1- Aller et al.,

2- Soggin et al.,

3- Infiltration

4- Non saturated

خاک ( $T^1$ )، محیط آبخوان ( $A^2$ )، هدایت هیدرولیکی ( $C^3$ ) و شیب ( $S^4$ ) است. بسیاری از روش‌های پارامتریک مانند SINTACS براساس سیستم امتیازدهی به هر پارامتر برآورد می‌شود، که میزان رتبه در طول تجزیه و تحلیل بر اساس اهمیت آن پارامتر افزایش یا کاهش نسبی دارد. گستردگی پتانسیل آلودگی بستگی به ویژگی‌های منبع، مقدار و کیفیت آلاینده، سرعت جریان و مکانیزم انتشار دارد (سیویتا، ۱۹۹۴: ۳۲۵). در روش SINTACS به هر کدام از پارامترها با توجه به پتانسیل آلودگی آن، نرخی از ۱ تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود که ۱ به معنای کم‌ترین و ۱۰ بیشترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود. هریک از پارامترهای روش SINTACS با توجه به اهمیت نسبی آن در توانایی انتقال آلودگی به سیستم آب زیرزمینی در ضریب وزنی (۱ تا ۵) ضرب می‌شود شاخص SINTACS بر اساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر به صورت رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$I_{SINTACS} = S_r S_w + I_r I_w + N_r N_w + T_r T_w + A_r A_w + C_r C_w + S_r S_w \quad (1) \text{ رابطه‌ی (۱)}$$

$I$  شاخص آسیب‌پذیری SINTACS، حروف بزرگ نشان‌دهنده‌ی پارامترهای هفت‌گانه روش SINTACS،  $r$  رتبه هر پارامتر و  $w$  وزن نسبی پارامترهاست که به ترتیب عبارت است از ۵، ۴، ۵، ۴، ۳، ۳، ۲.

#### مدل فازی ممدانی (MFL)

اساس تئوری فازی اولین بار توسط زاده (۱۹۶۵) برای رشته‌های مختلف علوم معرفی شده است. ایده‌ی کلیدی در منطق فازی کمک به عناصر مجموعه‌های مختلف یک مجموعه‌ی جهانی است. مجموعه‌ی فازی دارای مرز مبهم و تدریجی بین مجموعه‌های تعریف شده می‌باشد که با ماهیت عدم قطعیت مناسب است (ندیری و همکاران، ۲۰۱۳):

1- Tipo logiacdella copertura

2- Acquifero

3- Conducibilita idraulita

4- Superficie topografica

۱۴۸۰). در مدل فازی پارامترها و قوانین برای کاهش خطا بهینه‌سازی شده است. مهم‌ترین روش استنادی منطق فازی، ساگنو<sup>۱</sup> و ممدانی<sup>۲</sup> است. منطق فازی ممدانی مرسوم‌ترین روش بوده که توسط ممدانی و اسیلیان<sup>۳</sup> در سال (۱۹۷۵) معرفی شده است. مزایای استفاده از منطق فازی ممدانی: (۱) مستقیماً قابل درک است، (۲) پذیرش گسترده‌ای دارد. از آن‌جا که این رویکرد نه تنها بر مجموعه‌ی داده‌ها متکی است بلکه تخصص کافی نیز روی سیستم‌های پیچیده دارد، یک مدل عمومی مؤثر برای پیش‌بینی است. برای محاسبه‌ی خروجی ممدانی باید سه مرحله‌ی اصلی انجام شود: الف) فازی کردن داده‌ها با تعریف تابع عضویت، ب) ایجاد ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی با تعریف قوانینی مانند اگر و آنگاه (if-then، ج) غیرفازی‌سازی داده‌ها با عملگرهای فازی and, or و not. در روش فازی ممدانی (MFL) تابع عضویت خروجی مجموعه فازی است که باید از حالت فازی خارج شود (ممدانی، ۱۹۷۷: ۶۷۱). برای مدل فازی ممدانی اکثراً روش خوشه‌بندی (FCM<sup>۴</sup>) استفاده می‌شود (بزدیک<sup>۵</sup>، ۱۹۸۱) و تابع عضویت برای برازش داده‌ها در روش ممدانی تابع گوسی است. قانون فازی ممدانی و تابع گوسی برای روش SINTACS به صورت زیر تعریف می‌شود:

Rulei: If (S belongs to MFis) and (I belongs to MFiI) and (N belongs to MFiN) and (T belongs to MFiT) and (A belongs to MFiA) and (C belongs to MFiC) and (S belongs to MFiS), then (CVI belongs to MFiCVI).

که CVI شاخص تصحیح شده، MFis، MFiI، S، i امین تابع عضویت، i امین تابع عضویت I و غیره است. عملگر برای and تابع عضویت ورودی یعنی کمینه و then قوانین خروجی یعنی بیشینه جمع‌بندی است. نحوه‌ی محاسبه‌ی CVI به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

---

1- Mamdani  
2- Sageno  
3- Mamdani & Assilian  
4- Fuzzy C-Means  
5- Bezdec

$$CVI = \frac{Vul_{max}}{(NO_3)_{max}} \times (NO_3)_i \quad \text{رابطه ی (۲)}$$

CVI شاخص SINTACS تصحیح شده،  $Vul_{max}$  حداکثر شاخص SINTACS،  $(NO_3)_{max}$  حداکثر غلظت نیترات و  $(NO_3)_i$  غلظت نیترات در هر نقطه را نشان می‌دهد.

### بحث و نتایج

در روشی که در این تحقیق برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است، سعی شده تا علاوه بر حفظ تمام مزایای پیشین و ساختار اساسی روش SINTACS، بهبود آن نیز صورت بگیرد و معیار تأثیر آن ضریب همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و غلظت نیترات است. هدف این پژوهش، افزون بر تهیه نقشه و تعیین مناطق با پتانسیل بالای آسیب‌پذیری، تطبیق آن با داده‌های آلودگی موجود در منطقه (نیترات) است. در واقع به منظور صحت‌سنجی و مقایسه‌ی پیش‌بینی روش SINTACS و مدل فازی ممدانی از غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شد. در این پژوهش از روش SINTACS برای ارزیابی آسیب‌پذیری دشت بیلوردی استفاده شد. ابتدا داده‌های مورد نیاز با استفاده از لاگ‌های اکتشافی و پیرومتری منطقه، نقشه‌ی ارتفاعی رقومی، اطلاعات چاه‌های بهره‌برداری و بازدیدهای صحرائی استخراج شد. به منظور اجرای روش SINTACS، نقشه‌ی مربوط به هر یک از پارامترهای SINTACS در محیط ArcGIS تهیه شد و سپس رتبه‌دهی و وزن‌دهی و در نهایت تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی انجام گرفت که چگونگی تهیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی به طور مختصر در زیر توضیح داده شده است لایه‌ها بر اساس رتبه‌های اختصاص داده شده در محیط ArcGIS به دو روش IDW و Kriging درونیابی و برحسب RMSE کمتر تأیید شد. پارامتر عمق آب زیرزمینی تعیین‌کننده‌ی عمقی است که آلوده‌کننده باید طی کند تا به سطح ایستابی برسد. هرچه عمق سطح ایستابی بیشتر باشد زمان بیشتری طول می‌کشد تا این مواد به آبخوان برسد. بنابراین، برای عمق‌های

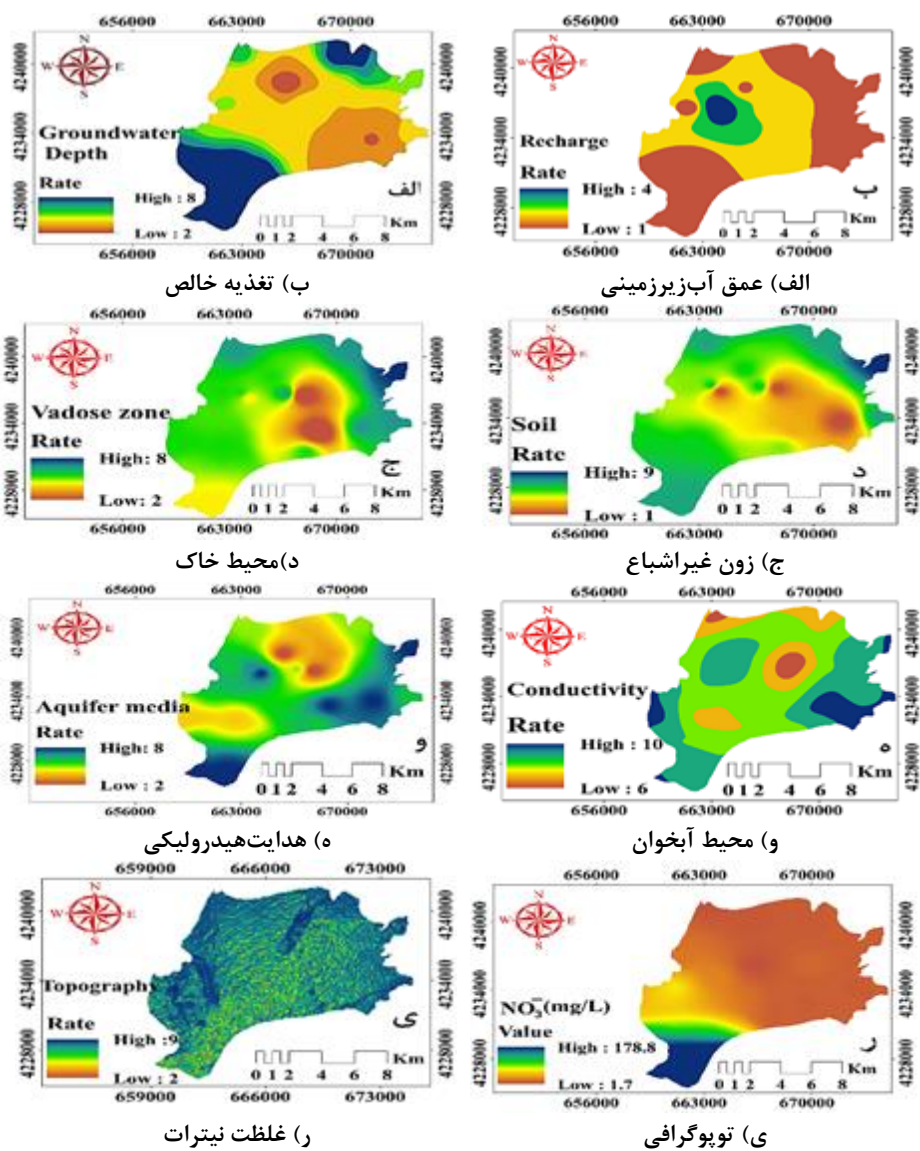
کمتر، بیشترین رتبه و برای عمق‌های بیشتر، کمترین رتبه اختصاص داده می‌شود. برحسب داده‌های آماربرداری پیژومترهای منطقه‌ی مورد مطالعه کمترین مقدار عمق آب ۲/۹۶ و بیشترین عمق آب ۳۳/۳۶ متر می‌باشد. برای ایجاد لایه‌ی تغذیه از بیلان آب زیرزمینی استفاده و میزان تغذیه محاسبه شد. با رسم پلیگون تیسن و محاسبه‌ی بیلان آب زیرزمینی، میزان تغذیه بر حسب واحد میلی‌متر بر سال بین ۱ تا ۹۰ محاسبه گردید. هرچه میزان تغذیه‌ی خالص بیشتر باشد میزان نفوذ آلاینده‌ها بیشتر و رتبه بالاتری اختصاص می‌یابد براساس مقدار تغذیه در منطقه‌ی مطالعاتی، به این لایه رتبه‌ی بین ۱ تا ۴ اختصاص یافت. نقشه‌ی محیط اشباع و غیراشباع با توجه به جنس رسوبات تهیه شد، که رسوبات دانه درشت رتبه بیشتر و رسوبات دانه ریز رتبه کمتر دارند. برای رسوبات ریزدانه سیلت و رس کمترین رتبه و رسوبات دانه درشت مانند شن و ماسه با خاصیت آبدهی بالا بیشترین رتبه (۱۰) اختصاص یافت و درون‌یابی انجام شد که رتبه‌های بین ۲ تا ۸ را به خود اختصاص می‌دهد. برای تهیه‌ی لایه‌ی محیط خاک از نقشه‌ی خاک منطقه استفاده گردید. این نقشه پس از رقوم‌سازی در ArcGIS به حالت رستری تبدیل شد. در روش SINTACS رتبه‌دهی به صورت بازه می‌باشد و همچنین ۱۳ نوع خاک تعیین شده که رتبه‌های ۱ تا ۵ برای خاک‌های رسی در نظر گرفته شده است. نقشه‌ی محیط خاک طبق جنس رسوبات بالایی منطقه‌ی غیراشباع رتبه‌بندی ۱ تا ۹ را به خود اختصاص داده است. برای تهیه‌ی لایه‌ی شیب، نقشه‌ی توپوگرافی در محیط ArcGIS به مدل رقوم‌ی تبدیل شد و رتبه‌دهی انجام شد هر چه شیب سطح زمین بیشتر باشد، فرصت نفوذ آلاینده کمتر و رتبه اختصاص داده شده کمتر خواهد بود و برعکس، که برای منطقه‌ی مطالعاتی بین ۲ تا ۹ درصد محاسبه گردید. نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی با داده‌های حاصل از لاگ‌های اکتشافی براساس جنس رسوبات و ضرایب قابلیت انتقال آن‌ها تهیه و پس از درون‌یابی به روش Kriging رتبه‌دهی انجام شد. به نقشه‌ی هدایت هیدرولیکی دشت بیلوردی با بیشترین هدایت هیدرولیکی ۱۰۰ متر بر روز و کمترین هدایت هیدرولیکی ۵ متر بر ثانیه رتبه ۶ تا ۱۰

اختصاص یافت. هرچه رسوبات دانه درشت تر باشد، مقدار هدایت هیدرولیکی بیشتر و میزان آسیب پذیری نیز بالاتر خواهد بود (شکل ۲). برای رتبه بندی هر یک از پارامترهای مورد نیاز در ارزیابی آسیب پذیری به روش SINTACS، وزن مربوط به هر پارامتر اعمال و تلفیق آنها با استفاده از تابع همپوشانی صورت گرفت و نقشه ی نهایی آسیب پذیری برای منطقه تهیه گردید (شکل ۳، الف). طبق رابطه ی (۱) شاخص آسیب پذیری SINTACS عددی بین ۷۰ تا ۱۶۹ برآورد شد که بر طبق نقشه ی نهایی آسیب پذیری، ۳،۳۰،۶۷ درصد منطقه ی مورد مطالعه به ترتیب در مناطق با آسیب پذیری کم، متوسط و زیاد واقع شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مناطق غرب، شمال غربی دشت و جنوب غربی با داشتن عمق آب کمتر و رسوبات دانه درشت با میزان هدایت هیدرولیکی بالا و رتبه دهی بالا برای لایه ها جزء مناطق با آسیب پذیری بالا می باشد و مرکز دشت با عمق آب بیشتر و دانه ریز بودن رسوبات محیط آبخوان و با اختصاص رتبه کمتر جز مناطق با آسیب پذیری پایین محسوب می شود (شکل ۲). به منظور بررسی دقیق تر روش SINTACS و مدل فازی ممدانی استفاده شده در این پژوهش، از روش محاسبه شاخص همبستگی استفاده شد (جدول ۱). برای محاسبه ی CI داده های غلظت نیترات و میزان آسیب پذیری در دو روش به سه دسته کم، متوسط و زیاد تقسیم می شود و سپس آن دسته از داده های نیترات که در رده ی یکسانی با شاخص آسیب پذیری قرار می گیرد در عدد ۳ ضرب می شود و دسته ای که اختلاف ارزشی ۱ دارند در عدد ۲ و دسته ای که اختلاف ۲ دارند در عدد ۱ ضرب می شود در نهایت از جمع مقادیر، شاخص همبستگی (CI) به دست می آید (ندیری و همکاران؛ ۲۰۱۷b، ۸۲۷۵؛ ۲۰۱۷c، ۸۷).

### نتایج مدل سازی توسط مدل فازی ممدانی (MFL)

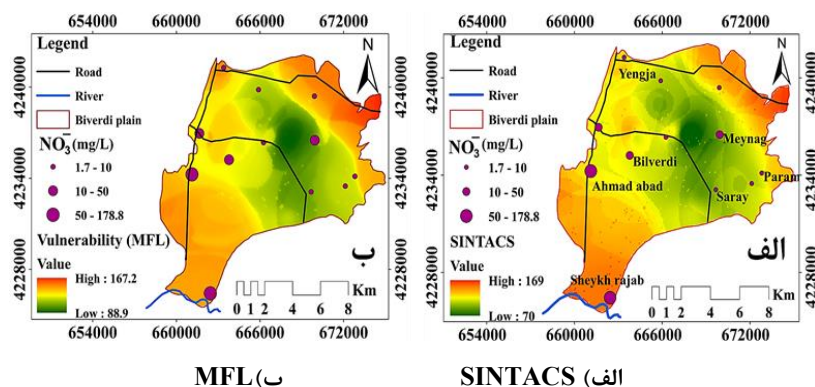
در این پژوهش برای ارزیابی آسیب پذیری از روش فازی ممدانی که به دلیل استفاده از تابع عضویت در خروجی مدل، توان بالایی در تحلیل داده هایی با عدم قطعیت بالا دارد، استفاده گردید. روش دسته بندی FCM برای تهیه ی مدل MFL استفاده شد در مدل

فازی ممدانی هفت پارامتر SINTACS به عنوان ورودی و شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده با مقادیر نیترا به عنوان خروجی مدل تعریف شد. نتایج نشان داد که بهترین اجرای مدل وقتی به دست آمد که تعداد دسته‌ها برای ورودی‌ها و خروجی‌های مدل MFL معادل ۶۵ بود. مدل پیشنهادی MFL در واقع دارای ۶۵ قانون بود که ورودی‌ها و خروجی‌ها را با استفاده از عملگر and به هم مرتبط می‌ساخت. خروجی قوانین با استفاده از عملگر or جمع می‌شد. نتایج مدل فازی ممدانی در مرحله‌ی آموزش برابر  $R^2=0.9$ ،  $RMSE=5.1$  و آزمایش  $R^2=0.85$ ،  $RMSE=7.79$  است (جدول ۱). مقایسه‌ی نقشه‌های حاصل از روش SINTACS و مدل MFL در شکل (۳) نشان می‌دهد که مدل فازی ممدانی با توجه به نتایج حاصل از پارامترها، شکل دقیق‌تری از میزان آسیب‌پذیری ارائه می‌دهد و برای مناطق با عمق آب کمتر و رسوبات دانه درشت آسیب‌پذیرتر است و محدوده‌ی آسیب‌پذیری با مرز نسبتاً دقیقی قابل تشخیص می‌باشد. شکل (۳) نتایج انطباق یون نیترا اندازه‌گیری شده با نقشه‌های آسیب‌پذیری را برای روش SINTACS و مدل MFL نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق، بررسی‌های تحقیقات گذشته را در بهبود نتایج روش کلاسیک توسط مدل هوش مصنوعی تأیید می‌کند. به طوری که در پژوهش‌های پیشین (ندیری و همکاران، ۱۳۹۶) بهینه‌سازی روش DRASTIC برای آبخوان چندگانه دشت ورزقان با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی را مورد تحقیق قرار داده‌اند که در این پژوهش هم، نتایج روش کلاسیک (DRASTIC) با استفاده از مدل هوش مصنوعی بهبود یافته است. در واقع عمده‌ی تفاوت این پژوهش با تحقیقات قبلی بهبود نتایج روش SINTACS با استفاده از هوش مصنوعی است.



شکل (۲) نقشه پهنه‌بندی پارامترهای SINTACS:





شکل (۳) نقشه‌ی آسیب‌پذیری منطقه با نیترات اندازه‌گیری شده روش‌های

جدول (۱) نتایج معیار ارزیابی (MFL) و SINTACS

مرحله	معیار ارزیابی	نوع مدل	
		SINTACS	MFL
آموزش	RMSE	-	۵/۱
	R <sup>2</sup>	۰/۶۱	۰/۹
	R	-	۰/۹۴
آزمایش	RMSE	-	۷/۷۶
	R <sup>2</sup>	-	۰/۸۵
	R	-	۰/۹۲
شاخص همبستگی		۲۹	۳۱

### نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش ارزیابی آسیب‌پذیری دشت بیلوردی با مقایسه‌ی نتایج روش SINTACS با مدل فازی ممدانی و انتخاب بهترین روش تعیین آسیب‌پذیری برای منطقه‌ی مورد مطالعه است. بیشترین آلودگی آب‌های زیرزمینی منطقه، مربوط به کودهای نیتروژن‌دار استفاده شده در فعالیت‌های کشاورزی است. افزایش فعالیت‌های کشاورزی، وجود معدن آرسنیک و لیلو در منطقه و همچنین احتمال نشت زهاب معدن

به منابع آبی منطقه، اهمیت بررسی آسیب‌پذیری را دوچندان می‌کند. در این پژوهش ابتدا بررسی آسیب‌پذیری با روش SINTACS انجام و شاخص آسیب‌پذیری عددی بین ۷۰ تا ۱۶۹ برآورد شد و سپس نقشه‌ی نهایی به سه گروه کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی شد. برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده، ضریب همبستگی بین داده‌های نیترات و شاخص SINTACS تعیین شد. در ادامه‌ی پژوهش، برای بهینه‌سازی نتایج روش SINTACS، با حذف نظر کارشناسی در اختصاص رتبه و وزن به پارامترها، از مدل فازی ممدانی استفاده شد. نتایج حاصل از مدل فازی ممدانی (MFL)، CI و  $R^2$  بالاتری نسبت به روش SINTACS ارائه داد. نتایج مدل بیان‌کننده این واقعیت است که قسمت‌های بیشتری از دشت در محدوده با آسیب‌پذیری متوسط و شمال‌شرق و جنوب‌غربی دشت نیز جزء مناطق با آسیب‌پذیری بالاست که نیازمند اتخاذ برنامه‌ها و سیاست‌های راهبردی در جلوگیری از آلودگی بیشتر آبخوان دشت بیلوردی است.

## منابع

- ندیری، عطاالله؛ صدقی، زهرا و نعیمه کاظمیان (۱۳۹۶). بهینه‌سازی روش **DRASTIC** با استفاده از هوش مصنوعی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان چندگانه دشت ورزقان، اکوهیدرولوژی، شماره ۴، صص ۱۰۸۹-۱۱۰۳.
- Antonakos, A.K., Lambrakis, N.I. (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, PP. 288-304.
- Corniello, A., Ducci, D., Monti, G.M. (2004), **Aquifer pollution vulnerability in the Sorrento peninsula, southern Italy, evaluated by SINTACS method**, Geofísica Internacional, Vol. 43, No. 4, PP. 575-581.
- Chilton, P.J., Vlugman, A., Foster, S. (1990), **A groundwater pollution risk assessment for public water supply sources in Barbados, American Water Resources Association International Conference on Tropical Hydrology and Caribbean Water resources, San Juan de Puerto Rico**, PP. 279-289.
- Civita, M. (1990), **La valutazione della vulnerabilità degli aquifer all'inquinamento, In Proceedings of 1st con. naz. protezione gestione delle acque sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi**, Maranosul Panaro, PP. 39-86.
- Di Martino, F., Sessa, S., Loia, V., (2005), **A fuzzy-based tool for modelization and analysis of the vulnerability of aquifers: a case study**, International Journal of Approximate Reasoning, Vol. 38, PP. 99-111.
- Foster, S.S.D., Chilton, P.J., (2003), **Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci**, Vol. 358, No.1440, PP. 1957-1972.
- Gianluigi, B., Nerantzis, K., Nicolo, C., & Micol, M. (2017), **A modified SINTACS method for groundwater vulnerability and pollution risk**

- assessment in highly anthropized regions based on NO<sub>3</sub> – and SO<sub>4</sub> 2– concentrations**, Science of the Total Environment, Vol. 609, PP. 1512-1523.
- Kazakis, N., Voudouris, K., (2015), **Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the drastic method using quantitative parameters**, Journal of Hydrology, Vol. 525, PP. 13-25.
- Kumar, S., Thirumalaivasan, D., Radhakrishnan, N., & Mathew, S, (2013), **Groundwater vulnerability assessment using SINTACS model**, Vol. 19, No. 6, PP.1947-5705.
- Mamdani, E.H., Assilian, S., (1975), **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**, International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, PP. 1-13
- Mamdani, E.H. (1997), **Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis**, Computer, IEEE Transaction C, Vol. 26, No. 12, PP.1182-1191.
- Nadiri, A.A., Garekhani, M., Khatibi, R., Moghadam, A.A., (2017,b), **Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models**, Environmental Science and Pollution Research, Vol. 24, No. 9, PP. 8562- 8577.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., Gharekhani, M., (2017c), **Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures**, Science of The Total Environment, Vol. 593-594, PP. 75-90.
- Nadiri, A.A. Fijani, E., Moghadam, A.A., (2013), **Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration**, Journal of Hydroinformatics, Vol. 15, No. 4, PP. 1474-1490.
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L and Carvalho Dill, 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**, Hydrogeol J, Vol. 14, PP. 79-99.

- Uricchio, V.F., Giordano, R., Lopez, N., (2004), **A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation**, Journal of Environmental Management, Vol. 73, PP.189-197.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L., Wassenaar, L., (1993), **Aquifer vulnerability index: a GIS-compatible method for groundwater vulnerability mapping**, Canadian Water Resources Journal, Vol. 1, PP. 25-37.