

# استفاده از روش‌های مختلف فازی برای بهینه‌سازی مدل دراستیک در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان، مطالعه موردی: آبخوان دشت تبریز

رحیم برزگر<sup>۱</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۲</sup>، عطااله ندیری<sup>۳</sup> و الهام فیجانی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> استاد، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده علوم طبیعی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۱۰

## چکیده

با توجه به تمرکز جمعیت، فعالیت‌های کشاورزی و کارخانه‌های صنعتی در دشت تبریز، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان این دشت برای توسعه، مدیریت، تصمیمات کاربری اراضی و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، آسیب‌پذیری آبخوان پیچیده دشت تبریز در برابر آلودگی به کمک مدل دراستیک در محیط GIS بررسی شده و بهینه‌سازی این مدل توسط روش‌های مختلف فازی صورت گرفت. در مدل دراستیک از پارامترهای مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی شامل ژرفای سطح ایستابی، تغذیه خالص، جنس محیط آبخوان، نوع خاک، شیب توپوگرافی، مواد تشکیل‌دهنده ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی استفاده می‌شود که به صورت هفت لایه در نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند و با وزن‌دهی و رتبه‌بندی و تلفیق این هفت لایه، نقشه نهایی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی تهیه و شاخص دراستیک برای منطقه بین ۴۰ تا ۱۲۶ برآورد شد. برای صحت‌سنجی مدل، از داده‌های غلظت نیترات در آب زیرزمینی منطقه استفاده شد که نشان داد همبستگی نسبی بین غلظت نیترات و مدل دراستیک تهیه شده وجود دارد. به منظور بهینه‌سازی مدل دراستیک، از روش‌های فازی ساجنو، ممدانی و لارسن استفاده گردید. برای این منظور، پارامترهای دراستیک به‌عنوان داده‌های ورودی و شاخص آسیب‌پذیری به‌عنوان خروجی برای مدل‌های فازی تعریف شدند و مقادیر نیترات مربوطه به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم شد. شاخص آسیب‌پذیری مربوطه به مرحله آموزش با مقادیر نیترات مربوطه تصحیح گردید و پس از آموزش مدل، با استفاده از مقادیر نیترات نتایج مدل‌ها در مرحله آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از مدل‌های مختلف فازی نشان دادند که روش فازی ساجنو روشی کارآ و مفید برای بهینه‌سازی مدل دراستیک است. بر اساس مدل نهایی، نواحی خاوری منطقه در محدوده شهر تبریز دارای بیشترین میزان پتانسیل آلودگی می‌باشند.

**کلیدواژه‌ها:** دشت تبریز، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، دراستیک، بهینه‌سازی، روش‌های فازی.

\*نویسنده مسئول: اصغر اصغری مقدم

E-mail: Moghaddam@tabrizu.ac.ir

## ۱- پیش‌نویس

آسیب‌پذیری ذاتی به امکان آلودگی در یک منطقه بدون در نظر گرفتن آلاینده‌های خاص اشاره دارد (Almasri, 2008). به عبارتی این نوع آسیب‌پذیری به ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی یک منطقه و فعالیت‌های بشری بستگی دارد و مستقل از ماهیت آلاینده‌ها است (Gogu & Dassargues, 2000). روش‌هایی همچون روش دراستیک (DRASTIC) [D (Depth of water) R (net Recharge) A (Aquifer media) S (Soil media) T (Topography) I (Impact of vadose zone) C (Hydraulic conductivity)] به منظور ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری استفاده می‌شود (Babiker et al., 2005; Hamza et al., 2007). آسیب‌پذیری ویژه نیز به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلاینده یا گروهی خاص از آلاینده‌ها اشاره دارد که به ویژگی‌های آلاینده و ارتباط آن با مؤلفه‌های مختلف آسیب‌پذیری ذاتی بستگی دارد (Stigter et al., 2006).

از میان روش‌های مختلفی که برای ارزیابی آسیب‌پذیری به کار برده شده است، روش دراستیک یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌ها می‌باشد که پرکاربردترین روش از مدل‌های (Point Count System Models) PCSM است (Aller et al., 1987). در این مدل‌ها علاوه بر طبقه‌بندی پارامترهای مختلف، ضرایب وزنی نسبی برای هر عامل تعیین می‌شود (Panagopoulos et al., 2006). روش دراستیک توسط انجمن ملی آب زیرزمینی (NGWA) (National Ground Water Association) با همکاری آژانس حفاظت محیطی ایالات متحده (United States Environmental Protection Agency) (USEPA) ایجاد شده است (Aller et al., 1987). و هفت عامل یا پارامتر قابل اندازه‌گیری برای سیستم

آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع آب شیرین بر روی زمین است (Villeneuve et al., 1990). به‌طور کلی کیفیت آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق فعال کشاورزی که از کودهای کشاورزی و حیوانی استفاده می‌شود، تحت پتانسیل آلودگی می‌باشد (Lake et al., 2003; Chae et al., 2004; Almasri, 2008). یکی از راه‌های پیشگیری آلودگی آب‌های زیرزمینی شناسایی مناطقی است که استعداد آلوده شدن بالایی دارند و به‌وسیله این شناخت می‌توان منطقه را از لحاظ آسیب‌پذیری پهنه‌بندی نمود و در نتیجه با اعمال تمهیدات لازم از آلوده شدن مناطق با آسیب‌پذیری بالا جلوگیری کرد (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸).

تاکنون تعاریف زیادی در مورد آسیب‌پذیری آبخوان و مفهوم آن در هیدروژئولوژی ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به تعریف کمیته ملی آمریکا در سال ۱۹۹۳ اشاره کرد (Stigter et al., 2006). این کمیته آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلودگی را، تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به یک مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی پس از به‌وجود آمدن آنها در برخی محل‌ها در بالای سطح آبخوان می‌داند (Almasri, 2008). آسیب‌پذیری نوعی ویژگی نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Babiker et al., 2005) و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos & Lambrakis, 2007).

اصطلاح آسیب‌پذیری آبخوان از نظر مفهومی در هیدروژئولوژی به دو صورت آسیب‌پذیری ذاتی و آسیب‌پذیری ویژه تقسیم می‌شود (Gogu & Dassargues, 2000).

میانگین دمای سالانه این دشت ۱۲/۸ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه آن ۲۳۰/۷ میلی‌متر است. با توجه به این داده‌ها و بر اساس روش اقلیم‌نمای آمبرژه اقلیم آن خشک سرد محاسبه شده است.

## ۲-۲. زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

منطقه تبریز، محل تلاقی سیستم کوهستانی البرز و زاگرس بوده و بر اساس تقسیم‌بندی Berberian (1976) که از لحاظ لرزه زمین‌ساخت صورت گرفته، جزئی از پهنه ایران مرکزی است. قدیمی‌ترین سازند زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه مربوط به سنگ‌های دگرگونی و آهکی دونین کربنیفر، پرمن-تریاس و کرتاسه پایینی و بالایی است که در شمال دشت و در کوه مورو در سطحی وسیع رخنمون پیدا کرده‌اند و از سیستم‌های دانه‌ریز، کوارتزیت، آهک و آهک بیتومینه تشکیل یافته‌اند و به وسیله نفوذی‌های آذرین به هم خورده‌اند. سازندهای قرمز بالایی (سری میوسن) در سطح بسیار وسیعی، شمال و شمال‌خاوری دشت را پوشانده است و از مارن‌های قرمز همراه با گچ و کنگلومرا و نمک و آهک‌های مارنی با ستبرایی بیش از ۱۰۰۰ متر تشکیل یافته است (شکل ۲). بر روی سازند قرمز بالایی لایه‌هایی از مارن زرد، ماسه‌سنگ همراه با لیگنیت و رس‌های خاکستری سبز مانند دریاچه‌ای مربوط به پلیوسن قرار گرفته‌اند که به طرف بالا، لایه‌های مارنی و رسی ماهی‌دار (Fish beds) را در خاور شهر تبریز تشکیل می‌دهند (برزگر، ۱۳۹۲؛ Asghari Moghaddam, 1991).

توف‌ها و آندزیت‌های پلیو - پلیستوسن آتشفشان سهند در سطح بسیار وسیعی بر روی لایه‌های پلیوسن قرار گرفته‌اند و دامنه‌های شمالی سهند را می‌پوشانند. سازندهای آذرآواری (پیروکلاستیک) سهند در قله بیشتر آندزیت و در دامنه‌ها از توف‌های آبرفتی تشکیل یافته است که ستبرای توف‌های آبرفتی در بعضی جاها بیش از ۵۰۰ متر گزارش شده است و از منابع آب زیرزمینی بسیار زیاد و با کیفیت خوب برخوردار است (Abkav Consulting Engineers Company, 1976).

رسوبات کواترنری نهشته‌های آبرفتی دشت تبریز بیشتر شامل شن، ماسه و سیلت و رس است که از خاور به سمت باختر به تدریج رسوبات دانه‌ریزتر می‌شوند. پادگانه‌های (تراس) رودخانه آجی‌چای از لایه‌های متناوب شن و ماسه و سیلت و رس با ستبرایی تا ۲۰۰ متر تشکیل یافته است (IRAB Engineering Company, 1977). رودخانه اصلی آجی‌چای و سه رودخانه فرعی ورودی از شمال دشت در طول مسیر خود عمدتاً از سازند قرمز بالایی عبور می‌کنند در نتیجه در دبی‌های زیاد دارای مواد معلق دانه‌ریز فراوان و در دبی‌های کم دارای شوری بالا هستند. سه رودخانه فرعی که از دامنه‌های شمالی سهند در جنوب دشت منشأ می‌گیرند، کیفیت خوب و مواد معلق دانه‌درشت دارند. بنابراین آن قسمت از آبخوان دشت که در شمال‌باختر رودخانه آجی‌چای و مجاور مناطق کوهستانی قرار گرفته از نوع آبخوان آزاد بوده و از نفوذپذیری کم و شوری بالایی برخوردارند (شکل ۳). آبخوان‌های موجود در مخروط‌افکنه‌های مناطق خاور و جنوب‌خاوری دشت از نوع آزاد هستند. بیشترین ستبرای سفره آزاد در دشت تبریز ۱۰۰ متر است که این ستبرای به طرف کوه و نیز به طرف مرکز دشت کاهش یافته و تا ۵۰ متر می‌رسد. آبخوان‌های تشکیل شده در پادگانه‌های رودخانه آجی‌چای چندلایه‌ای بوده و از نوع آزاد و تحت فشار می‌باشند (اصغری مقدم و برزگر، ۱۳۹۲). با آنکه پادگانه‌های رودخانه آجی‌چای آبخوان‌های چندلایه‌ای را تشکیل می‌دهند، ولی جدایی اصلی آبخوان آزاد از تحت فشار در ژرفای ۵۰ تا ۶۰ متری از سطح زمین صورت می‌گیرد. به طوری که کیفیت آب زیرزمینی تا ژرفای ۵۰ تا ۶۰ متری شور و از ۶۰ تا ۱۲۰ متری شیرین بوده است (Asghari Moghaddam, 1991; Barzegar et al., 2015). اگرچه امروزه به دلیل استخراج بیش از حد از آب زیرزمینی آبخوان تحت فشار، تعادل آبخوان‌ها به هم خورده و به نوعی اختلاط بین آب آبخوان‌های شیرین و شور به وجود آمده است که این امر سبب شده است که سفره‌های ژرف زیرین نیز در حال حاضر شور شوند (Barzegar et al., 2015). به طور کلی آبخوان آزاد دشت در کل لایه‌های آبدار

هیدروژئولوژیکی را در نظر می‌گیرد که برای برآورد پتانسیل آلودگی آبخوان ضروری هستند (Shukla et al., 2000).

تاکنون روش‌های مختلفی برای بهبود مدل دراستیک طبق شرایط ویژه محدوده مطالعاتی آنها به کار برده شده است. (Panagopoulos et al., 2006). برای بهینه‌سازی روش دراستیک از روش‌های آماری استفاده کردند. در بعضی از مطالعات نیز از پارامترهای اضافی مانند کاربری اراضی و نوع و شدت آبیاری برای بهبود مدل دراستیک استفاده شده است (Secunda et al., 1998; McLay et al., 2001). همچنین اخیراً از مدل‌های هوش مصنوعی مانند منطق فازی، شبکه عصبی مصنوعی و عصبی فازی به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی استفاده شده است (Dixon, 2009; Fijani et al., 2013). Dixon (2005b) با استفاده از منطق فازی، آسیب‌پذیری آبخوان آرکانزاس را در مقیاس منطقه‌ای پیش‌بینی کرد. اهداف تحقیق شامل تهیه مدل دراستیک با استفاده از فازی‌سازی پارامترها و تعریف قوانینی برای به دست آوردن مقادیر آسیب‌پذیری و حساسیت‌سنجی پارامترهای ورودی بود. در این تحقیق از مدل‌سازی فازی استفاده نشده بلکه از روش پارامترهای فازی و قوانین فازی استفاده شده و نتایج این روش با مدل دراستیک و نتایج تحلیل کیفی آبخوان مقایسه شد. اصغری مقدم و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از هوش مصنوعی بهینه‌سازی مدل دراستیک را برای دشت مراغه - بناب انجام دادند. در تحقیق آنها روش نروفازی به عنوان مدل بهینه انتخاب شد و نتیجه گرفتند که روش به کار گرفته شده می‌تواند برآورد نسبتاً دقیقی از میزان آسیب‌پذیری در پی داشته باشد.

دشت پهناور تبریز به سبب وجود خاک حاصل‌خیز و هموار بودن زمین و دارا بودن منابع عظیم آب زیرزمینی از فعالیت شدید کشاورزی به‌ویژه صیفی‌کاری برخوردار است و نیز به علت تمرکز بیشترین جمعیت استان آذربایجان شرقی در این منطقه دارای فعالیت شدید صنعتی است. ورود پساب‌های شهری و صنعتی فراوان به این دشت و آب برگشتی حاصل از آبیاری مزارع، دست به دست هم داده و منابع آب زیرزمینی این دشت را در معرض آلودگی قرار داده است. یکی از راه‌های مناسب برای جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق دارای پتانسیل آلودگی است. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه که برای مقاصد مختلف آشامیدن، کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مطالعه آسیب‌پذیری آبخوان و حفاظت از آن برای توسعه و مدیریت بهینه منابع آب ضروری به نظر می‌رسد.

بر اساس اطلاعات در دسترس، تا به حال آسیب‌پذیری دشت تبریز بررسی نشده است. از این رو، بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری ذاتی این دشت با استفاده از روش دراستیک برای نخستین بار در این منطقه انجام می‌شود. افزون بر این، همان‌طور که یاد شد، مطالعات پیشین تنها از پارامترهای فازی و قوانین فازی بدون ایجاد مدل فازی برای بهینه‌سازی مدل دراستیک استفاده کرده‌اند در صورتی که در این تحقیق اقدام به بهینه‌سازی مدل دراستیک با استفاده از سه روش مختلف فازی ممدانی، ساجو و لارسن و مقایسه کارایی آنها می‌شود که می‌تواند ارائه‌گر روشی جدید در انجام مطالعات آسیب‌پذیری در دشت‌ها و آبخوان‌های دیگر شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت تبریز در شمال‌باختر ایران در استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. این دشت از شمال به دامنه‌های جنوبی کوه‌های میشو، از جنوب به دامنه‌های شمالی سهند، از خاور به محدوده شهر تبریز و از باختر به اراضی شوره‌زار دریاچه ارومیه محدود می‌گردد (شکل ۱). وسعت تقریبی دشت مورد مطالعه ۷۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد و در ساحل خاوری دریاچه ارومیه واقع شده است. بر اساس داده‌های دراز مدت ایستگاه سینوپتیک فرودگاه تبریز برای یک دوره ۲۲ ساله (۹۰-۱۳۶۸)،

پارامترهای هفت گانه و نرخ ارزش (رتبه) و  $w$  وزنی است که به هر پارامتر تخصیص داده می‌شود. پس از محاسبه شاخص دراستیک، نواحی آسیب‌پذیر آبخوان مشخص می‌شوند. بزرگ‌تر بودن این شاخص بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

### ۳-۲. منطق فازی

اساس تئوری فازی برای نخستین بار توسط Zadeh (1965) معرفی شد. این تئوری قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند، صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد. مدل‌های فازی عموماً در مسائلی که با عدم قطعیت ذاتی همراه هستند، مناسب می‌باشند (Pulido & Gutierrez, 2009; Nadiri et al., 2014). هر سیستم فازی شامل سه بخش اصلی است: الف) فازی کردن داده‌ها با استفاده از تابع عضویت (ب) ایجاد ارتباط بین ورودی و خروجی با استفاده از یک سری قوانین مانند اگر آنگاه (if-then)، ج) بررسی سیستم و غیرفازی‌سازی داده‌ها به وسیله عمل‌گرهای فازی مانند  $or$  and  $no$  عمل‌گر  $and$  به صورت کمینه‌سازی ( $min$ ) و وزن‌دهی ( $prod$ ) و عمل‌گر  $or$  نیز به صورت بیشینه‌سازی ( $max$ ) عمل می‌کند (ندیری و همکاران، ۱۳۹۲). شکل ۵ ساختار کلی سیستم فازی را نشان می‌دهد. مدل فازی به روش‌های ممدانی (MFL) (Mamdani & Assilian, 1975)؛ و لارسن (LFL) (Mamdani, 1976)؛ ساجنو (SFL) (Sugeno, 1985) و لارسن (Larsen, 1980) قابل اجراست. تفاوت روش ساجنو با دو روش دیگر در خروجی آنهاست که در روش ساجنو بر خلاف روش ممدانی تابع عضویت خروجی سیستم فازی به صورت ثابت یا رابطه خطی است که توسط روش دسته‌بندی به دست می‌آید (Nadiri et al., 2013). اولین مرحله در ایجاد مدل فازی دسته‌بندی داده‌ها است. روش‌های زیادی برای دسته‌بندی وجود دارند (Hongixing et al., 2001). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش Clustering Subtractive (SC) برای روش ساجنو و روش Fuzzy C-Means (FCM) برای روش‌های ممدانی و لارسن اشاره کرد (ندیری و همکاران، ۱۳۹۲). در منطق فازی، میزان عضویت یک عنصر در یک مجموعه، با مقداری در بازه یک (عضویت کامل) تا صفر (عدم عضویت کامل) تعریف می‌شود. در این پژوهش ابتدا مدل دراستیک اولیه برای منطقه تهیه شد، سپس بهینه‌سازی مدل دراستیک اولیه با توجه به غلظت‌های نترات آب زیرزمینی دشت تبریز بر مبنای منطق فازی و به روش‌های مختلف صورت گرفته است. در واقع هدف اصلی این است که با ارائه روش‌های تلفیقی بتوان آسیب‌پذیری یا خطر آلودگی آب زیرزمینی را دقیق‌تر نشان داد.

### ۳-۳. بررسی داده‌ها

در این مطالعه به منظور مقایسه پیش‌بینی مدل‌های مختلف از غلظت نترات استفاده شد. نمونه‌برداری از ۵۶ حلقه چاه نیمه‌ژرف و ژرف از دو آبخوان مختلف با پراکندگی مناسب در دشت، در مهر ماه سال ۱۳۹۱ صورت گرفت و در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفت. افزون بر آن، ۱۰۴ نمونه نترات نیز از آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی گرفته شد. محل‌های نمونه‌برداری به صورت تصادفی در سطح دشت پراکنده است و محل‌هایی مانند مناطق مسکونی، زمین‌های کشاورزی و کارگاه‌ها را در بر می‌گیرد که بیشتر این چاه‌ها برای کشاورزی استفاده می‌شود. شکل ۶ توزیع مکانی غلظت نترات را در آب زیرزمینی محدوده نشان می‌دهد که با استفاده از روش IDW پهنه‌بندی شده است. این شکل نشان می‌دهد که بیشترین غلظت نترات در آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی در بخش خاوری (محدوده شهر تبریز) و کمترین مقدار در بخش باختری می‌باشد.

برای تهیه لایه‌های مختلف مدل دراستیک از نتایج مربوط به گزارش ژرفا و سطح آب زیرزمینی پی‌زومترها و چاه‌های مشاهده‌ای مربوط به سال‌های ۹۱-۹۰، گزارش آزمایش پمپاژ آبخوان، لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی موجود در

سطحی گسترده شده و در مناطق تغذیه دشت از بالا دست دارای کیفیت آب خوب ولی در طول مسیر جریان رودخانه آجی‌چای و قسمت‌های انتهایی دشت کاملاً شور می‌باشد. آبخوان‌های تحت فشار در مرکز و قسمت‌های انتهایی دشت قرار گرفته‌اند و از کیفیت آب نسبتاً خوبی برخوردارند (بزرگر، ۱۳۹۲).

با توجه به اینکه آبخوان آزاد بالایی قرار گرفته بر روی آبخوان تحت فشار از کیفیت خوبی برخوردار نیست و حتی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی موجود در این آبخوان در بعضی مناطق تا  $30000 \mu mho/cm$  نیز می‌رسد (بزرگر و اصغری مقدم، ۱۳۹۲)، بنابراین از آب این آبخوان هیچ‌گونه بهره‌برداری صورت نمی‌گیرد و بیشتر از آب زیرزمینی آبخوان تحت فشار برای مصارف مختلف استفاده می‌شود. از این رو، در این پژوهش نیز آسیب‌پذیری برای آبخوان آزاد موجود در مناطق تغذیه دشت از بالادست و آبخوان تحت فشار در نظر گرفته شده است.

از منابع تغذیه‌کننده این آبخوان‌ها می‌توان به بارش‌های جوی، رودخانه‌های موجود در منطقه، جریان‌های زیرزمینی ورودی از ارتفاعات منتهی به دشت، آب برگشتی از آبیاری و مصارف شهری و پساب صنعتی اشاره کرد. از این آب‌های برگشتی بیشتر آن آبی می‌تواند به آبخوان‌های تحت فشار وارد شود که به آبخوان آزاد قرار گرفته بر روی سنگ کف تغذیه شده‌اند. بیشترین آب زیرزمینی ورودی از بالا دست از توف‌های آبرفتی دامنه‌های شمالی سهند صورت می‌گیرد که منابع آب زیرزمینی آبخوان آزاد در قسمت‌های خاوری و جنوبی دشت و بیشتر منابع آب زیرزمینی آبخوان‌های تحت فشار را تأمین می‌کند (Asghari Moghaddam & Allaf Najib, 2006).

## ۳- روش‌شناسی

### ۳-۱-۳. مدل دراستیک

در سالیان اخیر برآورد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی توسط پژوهشگران مختلف و به روش‌های گوناگون انجام شده است. ساده‌ترین و رایج‌ترین روش برای برآورد آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی، استفاده از مدل‌های وزن‌دهی است. در این روش‌ها پارامترها بر اساس تأثیری که بر آلودگی آب زیرزمینی دارند، امتیازدهی می‌شوند (Gogu & Dassargues, 2000). شاخص آسیب‌پذیری دراستیک یک روش شاخص و همپوشان بر اساس وزن‌دهی است (Vrba & Zaporotec, 1994) که در آن اطلاعات حاصل از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی و به طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پردازش می‌گردند (Dixon, 2005a,b).

مدل دراستیک یک مدل کمی است که برای نخستین بار در آمریکا در سال ۱۹۷۸ برای برآورد پتانسیل آلودگی سیستم آب زیرزمینی در یک مقیاس ناحیه‌ای طراحی شده است. این مدل براساس هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی است که شامل ژرفای آب زیرزمینی (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر ناحیه غیراشباع (I) و ضریب هدایت هیدرولیکی (C) می‌باشد (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸). به هر کدام از این پارامترها با توجه به پتانسیل آلودگی آن، نرخی از ۱ تا ۱۰ اختصاص داده می‌شود (۱ به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر برای آلودگی آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود). هر یک از این پارامترها با توجه به اهمیت نسبی آن در توانایی انتقال آلودگی به سیستم آب زیرزمینی در ضریب وزنی (وزن ۱ تا ۵) ضرب می‌شود (Panagopoulos et al., 2006). از این رو شاخص دراستیک براساس وزن‌دهی به مجموع هفت پارامتر به صورت رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Aller et al., 1987; Al-Adamat et al., 2003). شکل ۴ روش مدل‌سازی دراستیک بر اساس GIS را به صورت نمادین نشان می‌دهد.

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

در رابطه بالا DI شاخص آسیب‌پذیری دراستیک و حروف بزرگ نشان‌دهنده

اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی از محاسبات آزمایش پمپاژ حاصل می‌شود. برای تعیین مقادیر هدایت هیدرولیکی در نقاط مختلف دشت، مقادیر قابلیت انتقال بر ستبرای اشباع آبخوان تقسیم گردید. سپس این مقادیر به فرمت قابل قبول برای ArcGIS تبدیل و درون‌یابی شد.

تمامی لایه‌های مورد نظر پس از تهیه بر اساس رتبه‌بندی مدل دراستیک، نرخ‌بندی شدند (شکل ۷). پس از رتبه‌بندی هر یک از پارامترهای مورد نیاز برای ارزیابی آسیب‌پذیری، وزن مربوط به هر پارامتر اعمال و تلفیق آنها با استفاده از تابع همپوشانی صورت گرفت و نقشه نهایی آسیب‌پذیری دراستیک برای منطقه تهیه گردید که میزان شاخص آسیب‌پذیری دراستیک در دشت از ۴۰ تا ۱۲۶ برآورد شد (شکل ۹- الف) که بر طبق (Aller et al., 1987) میزان آسیب‌پذیری آبخوان در رده آسیب‌پذیری قابل چشم‌پوشی تا آسیب‌پذیری متوسط قرار می‌گیرد.

عمده‌ترین قسمت دشت که دارای پتانسیل آلودگی بیشتری است در قسمت‌های خاوری و جنوبی دشت قرار دارد. باید توجه داشت که نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان، میزان آلودگی آبخوان را نشان نمی‌دهد بلکه پتانسیل آبخوان نسبت به آلودگی را نشان می‌دهد. بنابراین ممکن است در یک منطقه پتانسیل آسیب‌پذیری کم یا متوسط باشد ولی به دلیل حضور گسترده منابع آلاینده، آب‌های زیرزمینی آلوده شده باشد و یا برعکس.

تطابق نقشه نهایی آسیب‌پذیری دراستیک با غلظت نترات آب زیرزمینی نشان می‌دهد که همبستگی نسبی بین شاخص آسیب‌پذیری و غلظت نترات وجود دارد. در ادامه، به منظور بهینه‌سازی مدل، تلفیق مدل دراستیک و روش‌های فازی به منظور اصلاح نرخ‌ها و وزن‌های اولیه مدل صورت گرفت و نقشه آسیب‌پذیری بهینه‌شده با استفاده از روش‌های مختلف فازی تهیه گردید که در ادامه به توضیح هر یک پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱. مدل‌سازی با روش‌های فازی

در این تحقیق از سه روش فازی مختلف ساجنو (SFL)، ممدانی (MFL) و لارسن (LFL) برای بهینه‌سازی مدل دراستیک اولیه استفاده شد. به طوری که ابتدا در مرحله آموزش اقدام به تصحیح مقادیر آسیب‌پذیری شد و سپس با آموزش سه مدل یاد شده، صحت‌سنجی مدل با استفاده از مقادیر آسیب‌پذیری و مقادیر نترات انجام شد. اولین مرحله در روش‌های فازی، دسته‌بندی داده‌ها و تعیین توابع عضویت است. در این تحقیق به منظور دسته‌بندی داده‌ها در مدل ساجنو از روش کاهشی و در مدل‌های ممدانی و لارسن از روش FCM استفاده شد. پارامتر اصلی در روش دسته‌بندی کاهشی در مدل SFL برای تعیین دسته‌ها و قوانین اگر-آنگاه، شعاع دسته‌بندی می‌باشد. مقادیر این پارامتر بین یک و صفر است (Hongxing et al., 2001). کاهش شعاع دسته‌بندی سبب افزایش دسته‌ها و قوانین و افزایش آن سبب کاهش دسته‌ها و قوانین خواهد بود (Chiu, 1994). در مدل SFL براساس کمترین مقدار RMSE که برابر ۶/۰۵ می‌باشد، شعاع دسته‌بندی ۰/۶ انتخاب شد. بر این اساس داده‌های ورودی که شامل ژرفای آب زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، شیب توپوگرافی، ناحیه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی، غلظت نترات و شاخص دراستیک بودند، به ۶ دسته تقسیم شد و ۶ قانون نیز تولید شد. تابع عضویت خروجی مدل ساجنو، تابعی است خطی که بر اساس ورودی‌ها ساخته می‌شود. بنابراین، مدل SFL با ۴۲ تابع عضویت گوسی برای داده‌های ورودی و ۶ تابع عضویت خطی برای خروجی تهیه شد. در این مدل برای مرحله آموزش، مقادیر RMSE و  $R^2$  به ترتیب ۶/۰۵ و ۰/۹۶ به دست آمد و سپس مدل برای مرحله آزمایش اجرا شد.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، برای تهیه مدل MFL و LFL از روش دسته‌بندی FCM استفاده شد. بر اساس این روش، تعداد دسته‌های مطلوب برای مدل‌های MFL و LFL با توجه به کمترین مقدار RMSE برای این مدل‌ها که به ترتیب برابر با ۴/۸۱ و

دشت که از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و نیز نقشه خاک منطقه که از سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی تهیه گردید، استفاده شده است.

#### ۴- نتایج و بحث

به منظور اجرای مدل دراستیک در محیط GIS، مراحل آماده‌سازی نقشه‌های معیار مدل، وزن‌دهی و تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی اعمال شدند. تمامی داده‌های مورد نیاز برای تهیه مدل به سیستم تصویر در آمدند که در این راستا از توابع تحلیلی مکانی و سطوحی مختلف و تبدیل بردار به رستر استفاده گردید.

در مدل دراستیک، برای تهیه لایه ژرفای آب زیرزمینی، در سفره آزاد از داده‌های ژرفای سطح ایستابی استفاده می‌شود اما برای آبخوان تحت فشار، ژرفای کف لایه محبوس‌کننده به عنوان ژرفای سطح ایستابی در نظر گرفته می‌شود (Baalousha, 2010). برای تهیه لایه ژرفای سطح ایستابی آبخوان آزاد، موقعیت و ژرفای سطح ایستابی پیزومترها و چاه‌های مشاهده‌ای موجود در آبخوان آزاد به محیط Excel وارد و سپس به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزار ArcGIS تبدیل و از روش IDW به منظور درون‌یابی استفاده گردید و پس از درون‌یابی به حالت رستری تبدیل شد. برای آبخوان تحت فشار نیز عمق کف لایه محبوس‌کننده به حالت رستری تبدیل گردید.

منابع اصلی تغذیه برای آبخوان آزاد، بارش، رودخانه‌ها و آب برگشتی کشاورزی هستند، در حالی که این منابع برای تغذیه آبخوان تحت فشار کم‌اهمیت می‌باشند و تغذیه آبخوان تحت فشار به صورت نشت از لایه بالایی است. برای مشخص نمودن توزیع مکانی تغذیه خالص در آبخوان آزاد، پهنه‌بندی تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی آبخوان صورت گرفت. برای این منظور هیدروگراف واحد دشت تبریز به منظور مشخص کردن فصل تر (بیشینه تراز سطح آب زیرزمینی) و فصل خشک (کمینه تراز سطح آب زیرزمینی) رسم شد و نقشه هم‌تراز سطح ایستابی بیشینه و کمینه تهیه گردید. سپس نقشه تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی آبخوان و نقشه توزیع قابلیت ذخیره همپوشانی گردیدند و میزان تغذیه با استفاده از رابطه  $R=S_p \cdot dh/dt$  محاسبه شد که در این رابطه R میزان تغذیه خالص،  $S_p$  آبدهی ویژه، dh تغییرات سطح ایستابی و dt زمان است (Scanlon et al., 2002). برای محاسبه نشت از لایه آزاد بالایی به آبخوان تحت فشار نیز، از رابطه  $q=(K/b') \cdot \Delta h$  استفاده شد که در این رابطه q مقدار نشت (mm/year)،  $K'$  نفوذپذیری لایه محبوس‌کننده (mm/year)،  $b'$  ستبرای لایه محبوس‌کننده (mm)،  $\Delta h$  اختلاف سطح آب دو آبخوان آزاد و تحت فشار (mm) می‌باشد.

اطلاعات مربوط به محیط آبخوان دشت تبریز از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک به دست آمد و بر حسب جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان به هر کدام نرخ بین ۱ تا ۱۰ اختصاص داده شد. سپس با اعمال درون‌یابی لایه رستری مربوط به محیط آبخوان تهیه شد.

برای تهیه لایه محیط خاک از نقشه خاک منطقه استفاده گردید. این نقشه پس از رقومی‌سازی در GIS به حالت رستری تبدیل شد.

برای تهیه نقشه شیب، ابتدا مدل ارتفاعی رقومی (DEM) منطقه تهیه شد و پس از ویرایش در محیط ArcGIS، نقشه شیب منطقه به دست آمد. برای تهیه لایه محیط غیراشباع، از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی استفاده گردید و روشی مشابه با لایه محیط آبخوان به کار گرفته شد با این تفاوت که جنس لایه‌های بالایی سطح ایستابی در لاگ‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. محیط غیراشباع برای آبخوان آزاد موجود در منطقه، شامل گراول، ماسه، سیلت و رس است. برای آبخوان تحت فشار نیز به صورت لایه محبوس‌کننده در نظر گرفته می‌شود که شامل سیلت و رس غیرقابل نفوذ است که در رتبه‌بندی دراستیک به صورت لایه محبوس‌کننده امتیاز ۱ را می‌گیرد (Aller et al., 1987; Saidi et al., 2011).

مراتب ضعیف‌تری نسبت به دو مدل یاد شده داشتند. از این رو، با بررسی نتایج این سه مدل برای بهینه‌سازی مدل دراستیک با وجود برتری هر سه مدل نسبت به مدل دراستیک، مدل ساجنو بهترین مدل برای ارزیابی پتانسیل آلودگی ذاتی آبخوان دشت تبریز تشخیص داده شد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق ابتدا تهیه مدل دراستیک اصلی برای دشت تبریز و سپس بهینه‌سازی مدل دراستیک اولیه با توجه به غلظت‌های نیترا ت آب زیرزمینی این منطقه بر مبنای روش‌های مختلف منطق فازی می‌باشد. در واقع هدف اصلی این بود که با ارائه روش‌های تلفیقی بتوان آسیب‌پذیری یا خطر آلودگی آب زیرزمینی را دقیق‌تر نشان داد. برای این منظور هفت پارامتر مدل دراستیک در نرم افزار ArcGIS به صورت هفت لایه تهیه شد و نقشه‌نهایی از تلفیق لایه‌ها به دست آمد و شاخص دراستیک برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش اصلی دراستیک برابر ۴۰ تا ۱۲۶ محاسبه شد. مقایسه بین غلظت نیترا ت آب زیرزمینی و مدل دراستیک نشان داد که بین غلظت نیترا ت آب زیرزمینی و شاخص دراستیک محاسبه شده همبستگی نسبی وجود دارد. سپس، بهینه‌سازی مدل دراستیک با اجرای سه روش فازی ساجنو، ممدانی و لارسن انجام شد. با وجود اینکه نتایج هر سه مدل فازی بهتر از مدل دراستیک بود با این وجود توانایی هر یک از این روش‌های فازی با هم مقایسه شد تا بهترین روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری در این منطقه انتخاب شود. ضریب تعیین به دست آمده بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی مرحله آزمایش و بین مقادیر محاسباتی و مقادیر نیترا ت نشان داد که بهترین مدل بین چهار مدل ارائه شده مدل فازی ساجنو می‌باشد. بر اساس مدل نهایی، نواحی خاوری منطقه در محدوده شهر تبریز دارای بیشترین میزان پتانسیل آلودگی می‌باشند.

#### سیاسازی

نگارندگان لازم می‌دانند از آقای مهندس نجیب از امور مطالعات سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی و خانم مهندس نعیمه کاظمیان از آزمایشگاه کنترل کیفی آب استان آذربایجان شرقی به جهت کمک‌های بی‌دریغ آنها صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

۵/۶ هستند، ۱۲ دسته تعیین شد. در این روش‌ها نیز توابع عضویت ورودی و خروجی تابع گوسی بود. مقادیر ضریب تعیینی آسیب‌پذیری مشاهداتی و محاسباتی در شکل ۸ برای مدل‌های MFL و LFL در مرحله آموزش ارائه شده است. ضریب تعیینی نتایج این مدل‌ها به ترتیب ۰/۹۷ و ۰/۹۶ با مقادیر نیترا ت به دست آمد. جدول ۱ نتایج سه مدل فازی را در مرحله آموزش و آزمایش نشان می‌دهد. مقادیر RMSE و  $R^2$  با استفاده از روابط (۲) و (۳) محاسبه شدند.

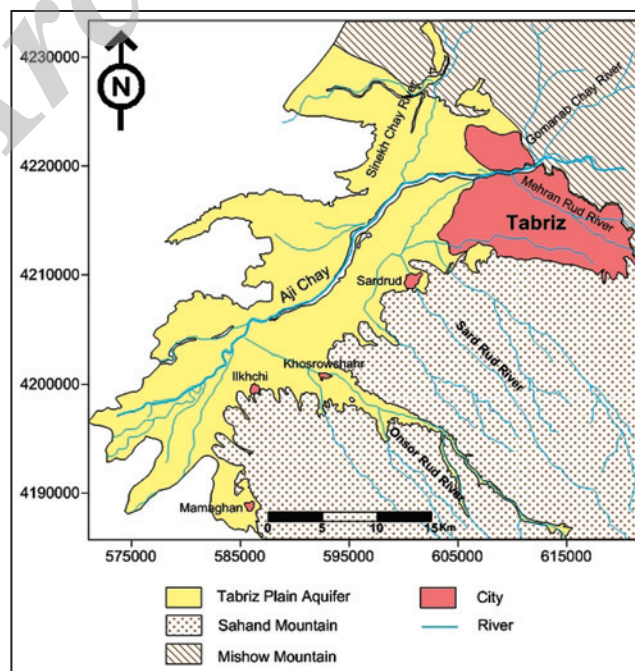
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \widehat{Vul}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \widehat{Vul}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \overline{Vul})^2} \quad (3)$$

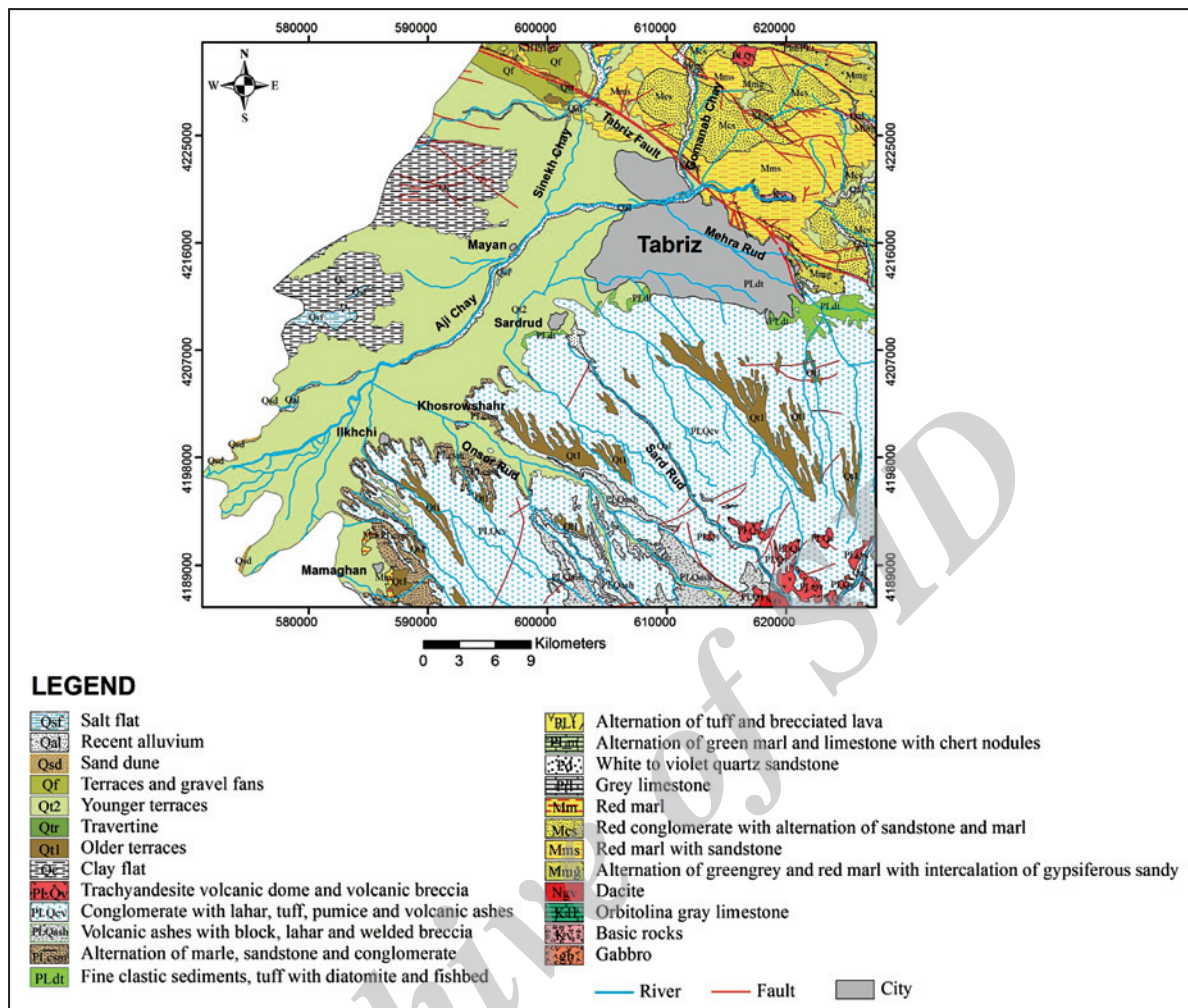
در روابط بالا RMSE مجذور میانگین مربعات خطا،  $R^2$  ضریب تعیینی،  $Vul_i$  شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده،  $\widehat{Vul}_i$  شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده محاسباتی،  $\overline{Vul}_i$  میانگین شاخص آسیب‌پذیری تصحیح شده و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشند.

#### ۴-۲. صحت‌سنجی مدل‌های فازی با استفاده از مقادیر غلظت نیترا ت

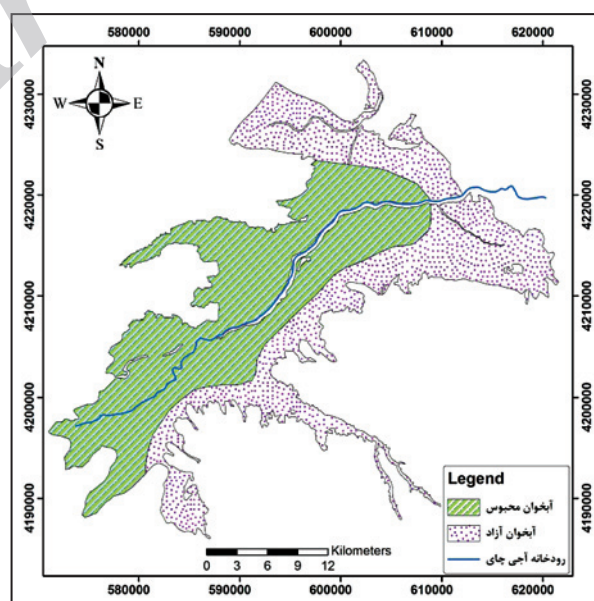
برای صحت‌سنجی مدل‌های تهیه شده از غلظت نیترا ت آب زیرزمینی استفاده گردید. غلظت نیترا ت موجود در آب زیرزمینی منطقه در ۵۷ نقطه اندازه‌گیری و بر این اساس به دو دسته تقسیم شد که به ترتیب ۶۵ درصد برای تصحیح داده‌های آسیب‌پذیری در مرحله آموزش و ۳۵ درصد برای صحت‌سنجی در مرحله آزمایش بودند. با توجه به اینکه از مقادیر نیترا ت جدا شده برای مرحله آزمایش برای تصحیح داده‌ها استفاده نشده است، از این رو از ضریب تعیینی بین مقادیر آسیب‌پذیری و غلظت نیترا ت جدا شده برای مرحله آزمایش که توزیع مناسبی در منطقه دارد استفاده شد و نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر  $R^2$  بین نیترا ت مرحله آزمایش و آسیب‌پذیری مدل دراستیک اولیه و مدل‌های فازی SFL، MFL و LFL به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۹۲، ۰/۹ و ۰/۸۸ برآورد گردید. همان‌طوری که در شکل ۹-ب مشاهده می‌شود آسیب‌پذیری محاسبه شده در مدل SFL بیشترین همبستگی را با غلظت نیترا ت دارد. بر این اساس با وجود اینکه مدل‌های ممدانی و لارسن در مرحله آموزش نتایج بهتری از مدل ساجنو ارائه کردند ولی در مرحله آزمایش نتایج به



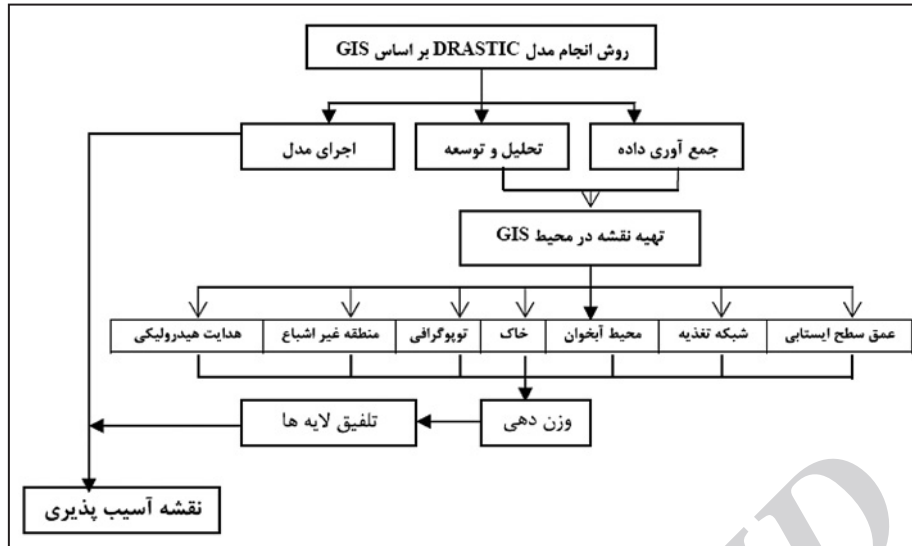
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.



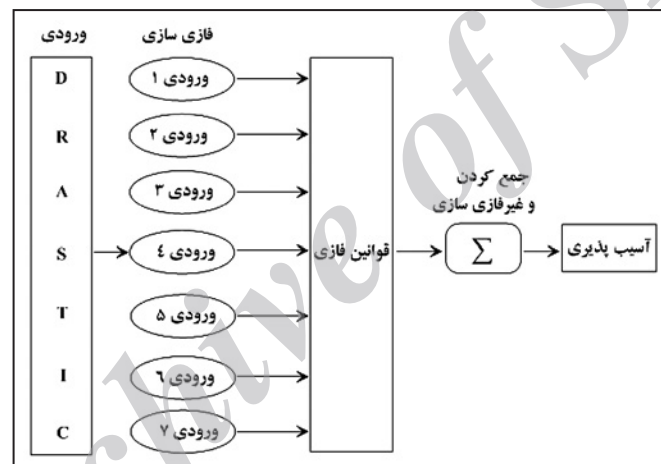
شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی (اسدیان و افتخارزاد، ۱۳۷۲).



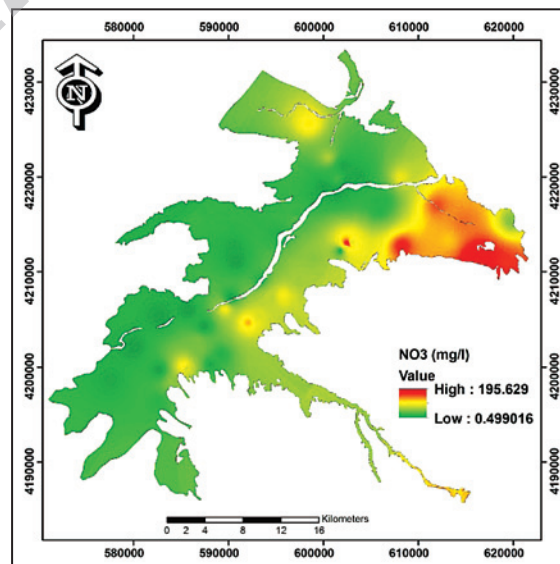
شکل ۳- محدوده آبخوان‌های موجود در دشت تبریز.



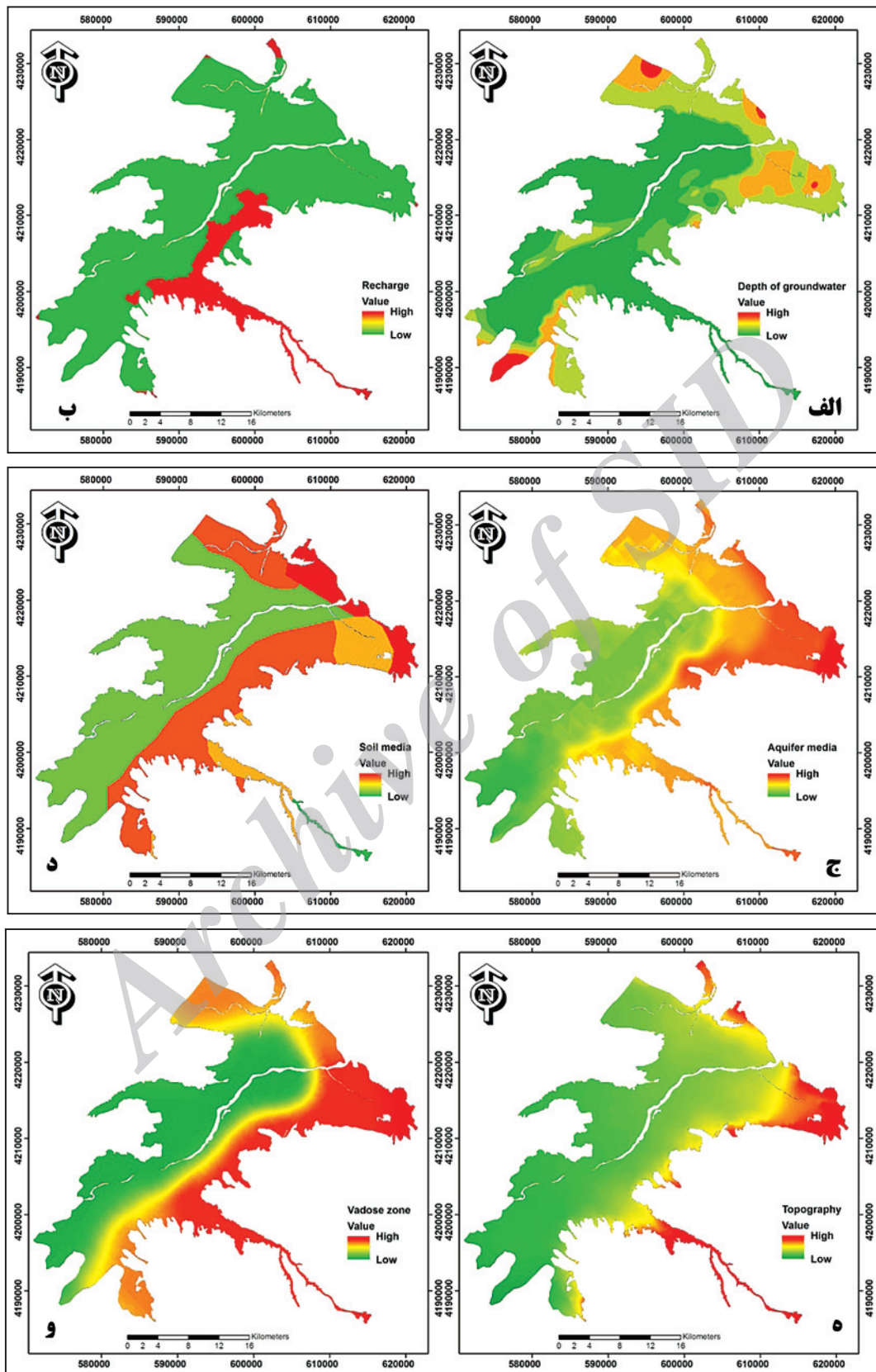
شکل ۴- روش مدل سازی دراستیک بر اساس GIS.



شکل ۵- ساختار کلی سیستم فازی.

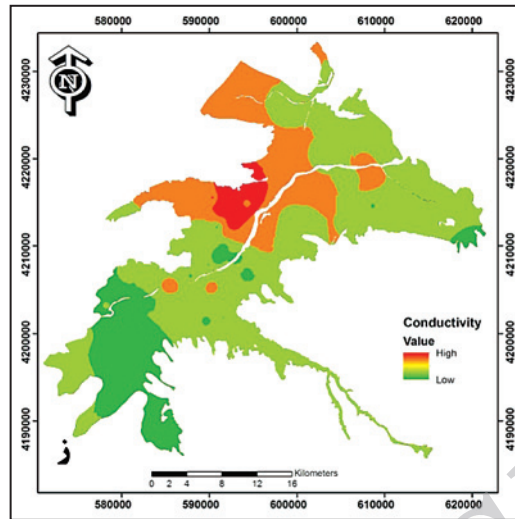


شکل ۶- توزیع مکانی غلظت نیترات در آب زیرزمینی دشت تبریز.

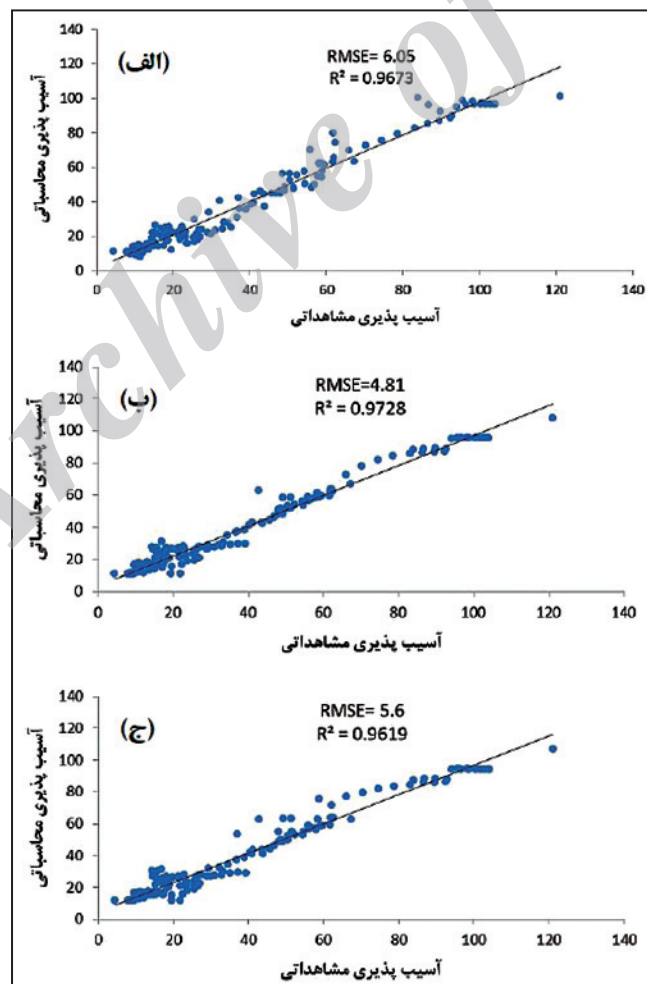


شکل ۷- نقشه بهینه‌بندی پارامترهای الف) ژرفای آب زیرزمینی؛ ب) تغذیه؛ ج) محیط آبخوان؛ د) محیط خاک؛ ه) شیب سطح زمین؛ و) زون غیراشباع.

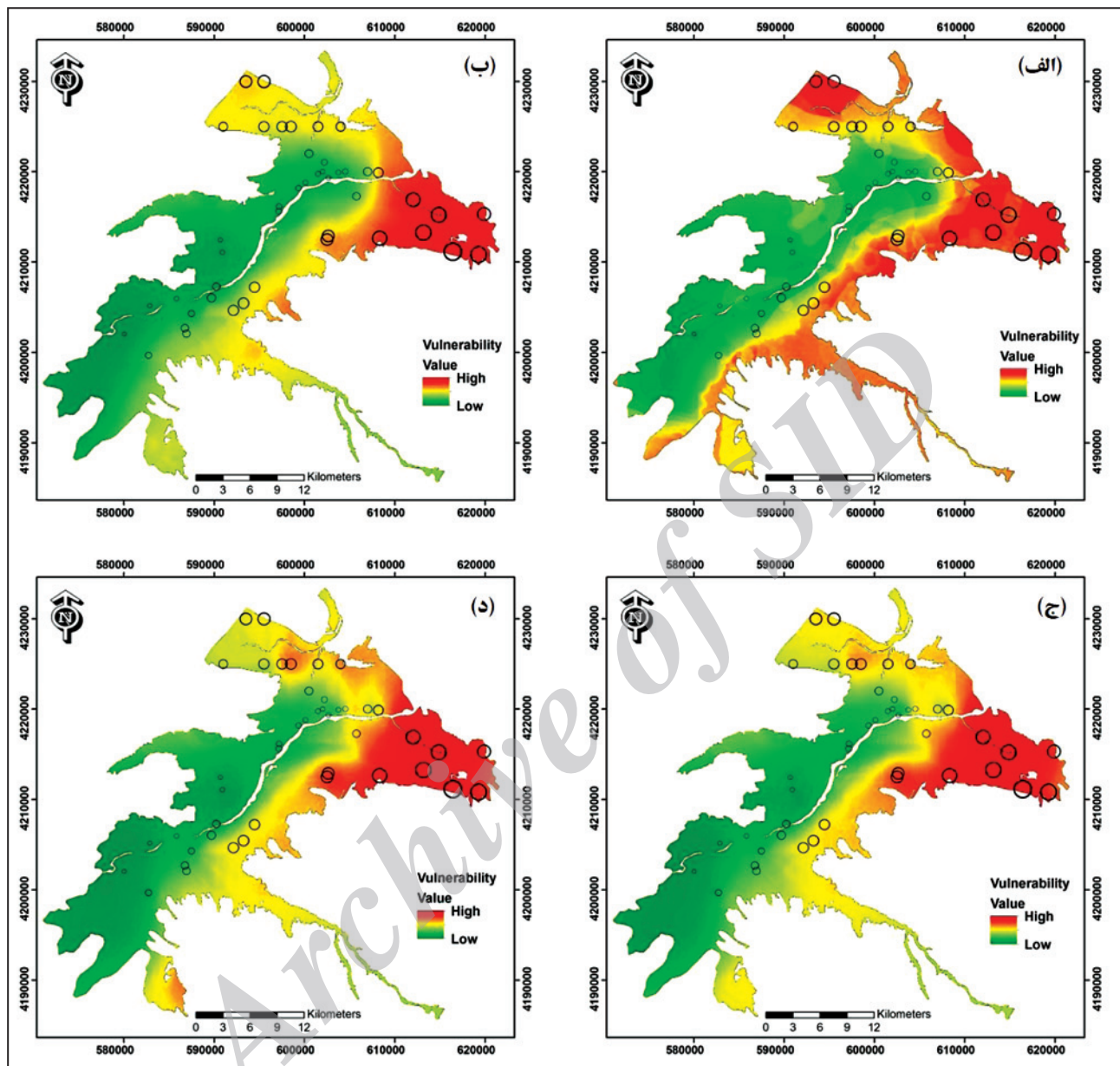




شکل ۷- ز) هدایت هیدرولیکی مدل دراستیک.



شکل ۸- نمودار ضریب تعیینی آسیب پذیری مشاهده‌ای و محاسباتی مدل‌های فازی (الف) ساجنو، (ب) ممدانی و (ج) لارسن.



شکل ۹- نقشه آسیب پذیری آب زیرزمینی آبخوان دشت تبریز با استفاده از روش‌های مختلف الف) دراستیک اولیه؛ ب) مدل ساجنو؛ ج) مدل ممدانی و د) مدل لارسن.

جدول ۱- نتایج روش‌های فازی در مراحل آموزش و آزمایش

مدل			معیار ارزیابی	مراحل
LFL	MFL	SFL		
5.6	4.81	6.05	RMSE	آموزش
0.9619	0.9728	0.9673	R <sup>2</sup>	
14.69	14.14	7.18	RMSE	آزمایش
0.7011	0.7359	0.8522	R <sup>2</sup>	

## کتابنگاری

- اسدیان، ع. و افتخارنژاد، ج.، ۱۳۷۲- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تبریز، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- اصغری مقدم، الف.، برزگر، ر.، ۱۳۹۲- ارزیابی آنومالی غلظت آرسنیک در آب زیرزمینی آبخوان دشت تبریز، هفدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- اصغری مقدم، الف.، فیجانی، الف.، ندیری، ع.، ۱۳۹۲- بهینه‌سازی مدل دراستیک با استفاده از هوش مصنوعی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در دشت مراغه- بناب، فصلنامه علوم زمین، سال بیست و چهارم، شماره ۹۴ زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۳۳۱ تا ۳۳۸.
- اصغری مقدم، الف.، فیجانی، الف.، ندیری، ع.، ۱۳۸۸- ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت‌های بازرگان و پلدشت با استفاده از مدل دراستیک بر اساس GIS، مجله محیط‌شناسی، سال سی و پنجم، شماره ۵۲، صفحه ۵۵-۶۴.
- برزگر، ر.، اصغری مقدم، الف.، ۱۳۹۲- بررسی منشأ آنومالی غلظت نترات منابع آب زیرزمینی دشت تبریز، اولین همایش زمین‌شیمی کاربردی ایران، دانشگاه دامغان.
- ندیری، ع.، اصغری مقدم، الف.، عبقری، ه.، فیجانی، الف.، ۱۳۹۲- توسعه مدل‌های هوش مصنوعی مرکب در برآورد قابلیت انتقال آبخوان، مطالعه موردی: دشت تسوج، سال نهم، شماره ۱، ۱۴-۱.
- برزگر، ر.، ۱۳۹۲- بررسی کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت تبریز، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۷۵ صفحه.

## References

- Abkav Consulting Engineers, 1976- Geoelectrical and seismic refraction survey in Azarshahr, Mamaghan, Khosroshahr, Sardrud, Basmenj and Bostanabad areas.
- Al-Adamat, R. A. N., Foster, I. D. L. & Baban, S. M. J., 2003- Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography* 23: 303-324.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J. & Hackett, G., 1987- DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings, EPA 600/2-87-035. Ada, Oklahoma: U.S. Environmental Protection Agency.
- Almasri, M. N., 2008- Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management* 88: 577-593.
- Antonakos, A. K. & Lambrakis, N. J., 2007- Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology* 333: 288-304.
- Asghri Moghaddam, A. & Allaf Najib, M., 2006- Hydrogeologic characteristics of the alluvial tuff aquifer of northern Sahand Mountain slopes, Tabriz, Iran. *Hydrogeology Journal* 14: 1319-1329.
- Asghri Moghaddam, A., 1991- The hydrogeology of the Tabriz area, Iran. Ph.D. thesis, Depat.Of geological Sciences, University College London.
- Baalousha, H., 2010- Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: A case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural Water Management* 97: 240-246.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. M. A., Hiyama, T. & Kato, K., 2005- A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara, Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*. 345: 127-140.
- Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A. & Kazemian, N., 2015- Assessment of heavy metals concentrations with emphasis on arsenic in the Tabriz plain aquifers, Iran. *Environmental Earth Sciences* (In Press).
- Berberian, M., 1976- Contribution to the Seismotectonics of Iran (Part II). Geological survey of Iran, Reo.No. 39, 518 P.5 Maps.259 Figures.
- Chae, G., Kim, K., Yun, S., Kim, K., Kim, S., Choi, B., Kim, H. & Rhee, C.W., 2004- Hydrogeochemistry of alluvial groundwaters in an agricultural area: an implication for groundwater contamination susceptibility. *Chemosphere* 55: 369-378.
- Chiu, S., 1994- Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 2: 267-278.
- Dixon, B., 2005a- Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis. *Journal of Hydrology* 309: 17-38.
- Dixon, B., 2005b- Groundwater vulnerability mapping: a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Journal of Applied Geography* 25: 327-347.
- Dixon, B., 2009- A Case Study Using SVM, NN and Logistic Regression in a GIS to Predict Wells Contaminated with Nitrate-N. *Hydrogeology Journal* 17: 1507-1520.
- Fijani, E., Nadiri, A. A., Asghari Moghaddam, A., Tsai, F. & Dixon, B., 2013- Optimization of DRASTIC Method by Supervised Committee Machine Artificial Intelligence to Assess Groundwater Vulnerability for Maragheh-Bonab Plain Aquifer, Iran. *Journal of hydrology*, 530: 89-100.
- Gogu, R.C. & Dassargues, A., 2000- Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* 39: 549-559.

- Hamza, M. H., Added, A., Rodriguez, R., Abdeljaoued, S. & Ben Mammou, A., 2007- GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-RafRaf aquifer, Northern Tunisia). *Journal of Environmental Management* 84: 12-19.
- Hongxing, L., Chen, P. C. P. & Huang, H. P., 2001- Fuzzy Neural Intelligent System, Mathematical Foundation and the Application in Engineering, CRC Press LLC.
- IRAB Engineering Company, 1977- Final report on drilling and testing of deep wells for water supply to Tabriz Power station.
- Lake, I. R., Lovett, A. A., Hiscock, K. M., Betson, M., Foley, A., Sunnenberg, G., Evers, S. & Fletcher, S., 2003- Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. *Journal of Environmental Management* 68: 315-328.
- Larsen, P. M., 1980- Industrial applications of fuzzy logic control. *International Journal of Man-Machine Studies* 12: 3-10.
- Mamdani, E. H. & Assilian, S., 1975- An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies* 7: 1-13.
- Mamdani, E. H., 1976- Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies* 8: 669-678.
- McLay, C. D. A., Dragten, R., Sparling, G. & Selvarajah, N., 2001- Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollutants*, 115: 191-204.
- Nadiri, A. A., Chitsazan, N., Tsai, F. T. C. & Moghaddam, A. A., 2014- Bayesian Artificial Intelligence Model Averaging for Hydraulic Conductivity Estimation. *Journal of Hydrologic Engineering* 19: 520-532.
- Nadiri, A. A., Fijani, E., Tsai, F. T. C. & Moghaddam, A. A., 2013- Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. *Journal of Hydroinformatics* 15: 1474-1490.
- Panagopoulos, G., Antonakos, A. & Lambrakis, N., 2006- Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal* 14: 894-911.
- Pulido-Calvo, I. & Gutiérrez-Estrada, J. C., 2009- Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. *Biosystems Engineering*, 102: 202-218.
- Saidi, S., Bouria, S., Ben Dhiaa, H. & Anselmeb, B., 2011- Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agricultural Water Management* 98: 1671-1682.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W. & Cook, P. G., 2002- Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- Secunda, S., Collin, M.L. & Melloul, A. J., 1998- Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management* 54: 39-57.
- Shukla, S., Mostaghimi, S., Shanholt, V. O., Collins, M.C. & Ross, B. B., 2000- A county-level assessment of ground water contamination by pesticides. *Ground Water Monitoring & Remediation* 20: 104-119.
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L. & Carvalho Dill, A. M. M., 2006- Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal, *Hydrogeology Journal* 14: 79-99.
- Sugeno, M., 1985- Industrial Application of Fuzzy Control. North-Holland. New York 269 pp.
- Villeneuve, J. P., Banton, O. & Lafrance, P., 1990- A probabilistic approach for the groundwater vulnerability to contamination by pesticides: the VULPEST model. *Ecological Modelling* 51: 47-58.
- Vrba, J. & Zoprotec, A., 1994- Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology*. Verlag Heinz Heise GmbH and Co. KG.
- Zadeh, L. A., 1965- Fuzzy sets. *Journal of Information and Control* 8: 338-353.