

استفاده از مدل منطق فازی مرکب در برآورد آرسنیک منابع آبی در حوضه آبریز سد سهند

عطاله ندیری^{۱*}، فریبا صادقی اقدم^۲ و اصغر اصغری مقدم^۳

^۱ استادیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲ دانشجوی دکترا، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳ استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۲۰

چکیده

در این مطالعه از مدل منطق فازی مرکب (ICFL) برای برآورد غلظت آرسنیک کل (III, V) در محدوده مطالعاتی سد سهند استفاده شده است. با توجه به بالا بودن مقادیر آرسنیک نسبت به مقادیر استاندارد جهانی (۰/۰۱ mg/L)، گروه زمین شناسی دانشگاه تبریز و سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی منطقه نمونه برداری و متغیرهای هیدروشیمیایی آن را تجزیه کرده‌اند. برای برآورد غلظت‌های آرسنیک کل، از میان پارامترهای تجزیه‌ای نمونه‌ها از متغیرهای pH، سولفات، نترات، فلوئورید و آهن کل (II, III) به عنوان ورودی مدل‌های فازی ممدانی (MFL)، لارسن (LFL) و ساگنو (SFL) استفاده شد. با وجود نتایج مناسب این مدل‌ها در دو مرحله آموزش و آزمایش و به دلیل همانندی نتایج این سه مدل، به جای انتخاب مدل برتر، مدل ICFL برای ترکیب نتایج سه مدل منفرد فازی به کار برده شد. به منظور استفاده همزمان از مزایای هر سه مدل یاد شده، ترکیب وزنی از خروجی مدل‌های فازی برای ایجاد یک مدل منطق فازی مرکب به کار گرفته شد. همچنین در این مدل برآورد غلظت آرسنیک کل با به کارگیری الگوریتم جامعه ذرات برای به دست آوردن وزن بر پایه خروجی سه مدل فازی استفاده شد. نتایج نشان داد مدل ICFL ارائه شده، توانست نسبت به روش‌های مدل منطق فازی منفرد، بهتر عمل کند.

کلیدواژه‌ها: آرسنیک، سد سهند، منطق فازی ساگنو (SFL)، منطق فازی لارسن (LFL)، منطق فازی ممدانی (MFL)، منطق فازی مرکب (ICFL).

E-mail: Nadiri@tabrizu.ac.ir

* نویسنده مسئول: عطاله ندیری

۱- پیش‌نوشتار

غلظت بیش از حد استاندارد عناصر کمیاب از جمله آرسنیک که به عنوان آلودگی‌هایی با منشأ طبیعی و مصنوعی شناخته شده‌اند به علت تأثیر بد بر سلامتی انسان اهمیت بالایی دارند (Dragon, 2006; Jiang, et al., 2009). آلودگی طبیعی آب‌ها که به شدت متأثر از زمین‌شناسی است (Gurung et al. 2005) را نمی‌توان به سادگی از بین برد و یا مانع گسترش آن شد. بنابراین این نوع آلودگی‌ها باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند. اطلاع از وضعیت کیفی منابع آب این امکان را فراهم می‌سازد تا افزون بر استفاده از اطلاعات به دست آمده، در مواقع لزوم بتوان راهکارهای مدیریتی مناسبی پیش گرفت که کمترین آسیب به این منبع مهم و حیاتی وارد شود.

در طی چند سال اخیر، غلظت آرسنیک تأثیرات بدی بر سلامت مردم هشرود و روستاهای تابعه داشته است (Mosaferi et al., 2008). با توجه به این که سد سهند و منابع آبی آن، آب آشامیدنی شهرستان هشرود و روستاهای پیرامون را تأمین می‌کند از این رو مطالعه منابع آبی در ارتباط با سد سهند اهمیت و ضرورت می‌یابد. مطالعات پیشین (ندیری و همکاران، ۱۳۹۰؛ صادقی اقدم، ۱۳۹۱؛ Nadiri et al., 2013c) در منطقه شامل مطالعات هیدروشیمیایی و ژئوشیمیایی سبب شناسایی بی‌هنجاری آرسنیک و مکان‌های مرتبط با آن شد. با استفاده از روش‌های آماری و مدل‌سازی زمین‌آماری مقادیر آرسنیک در منطقه برآورد شد که نتایج بسیار دقیقی از مدل‌های خطی زمین‌آماری به دست نیامد (صادقی اقدم، ۱۳۹۱). دلیل این امر را می‌توان در آبخوان‌های تکه‌تکه سطحی و غیر مرتبط با هم دانست، که می‌توان گفت روند عمومی نامشخص و غیرخطی را دنبال می‌کنند. همچنین با توجه به برخی محدودیت‌های مدل‌های عددی و فیزیکی مانند وقت‌گیر بودن، پیچیده بودن، پرهزینه بودن و نیاز داشتن به داده‌های زیاد، روش‌های دیگری مانند روش‌های مختلف هوش مصنوعی برای پیش‌بینی متغیرهای آب‌زمین‌شناختی و هیدروژئوشیمیایی مانند آرسنیک ارائه شده است.

صورت گرفته است که می‌تواند به عنوان یک تقریب‌گر جهانی در پیش‌بینی بررسی مسائل غیرخطی مفید باشند (اصغری مقدم و همکاران، ۱۳۸۸). در پیش‌بینی متغیرها عموماً بیش از یک مدل هوش مصنوعی قابل استفاده است که می‌توانند نتایج مشابهی به دست دهند. هر کدام از مدل‌ها دارای عدم قطعیت و مزایای مربوط به خود هستند. بنابراین مدل‌های چندگانه (Multi-model) از جمله مدل‌های هوش مصنوعی مرکب (ICM: Intelligence committee machine) برای پیش‌بینی چنین متغیرهایی گسترش یافته‌اند (Nadiri et al., 2013b; Kadkhodaie-Ilkhchi et al., 2009a & b; Lim, 2005; Naftaly et al., 1997). پایه تئوری این روش استفاده ترکیبی از نتایج هر یک از روش‌ها برای رسیدن به یک نتیجه کلی و بهتر است. به این ترتیب، می‌توان از برتری انفرادی هر یک از این مدل‌ها سود جست (Labani et al., 2010). تا به حال دو روش که برای تشکیل مدل‌های هوش مصنوعی مرکب ارائه شده شامل روش‌های میانگین‌گیری ساده (Chen & Lin, 2006; Lim, 2005) و میانگین‌گیری وزنی است (Kadkhodaie-Ilkhchi et al., 2009a). مطالعات اخیر که روی این دو روش ترکیب خطی برای مدل‌های هوش مصنوعی انجام شده است، توانایی و کارایی بالاتر روش میانگین‌گیری وزنی را که وزن هر مدل را با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (Labani et al., 2010) تعیین می‌کند، نشان دادند.

در این مطالعه از روش‌های فازی ممدانی (MFL: Mamdani fuzzy logic)، لارسن (LFL: Larsen fuzzy logic) و ساگنو (SFL: Sugeno fuzzy logic) برای پیش‌بینی و بررسی مقادیر آرسنیک کل استفاده شد. در مطالعات انجام شده با استفاده از هوش مصنوعی مرکب، از دو روش میانگین‌گیری ساده و میانگین‌گیری وزنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای ترکیب آنها استفاده شده است (Nadiri et al., 2013b; Labani et al., 2010; Kadkhodaie-Ilkhchi et al., 2009b; Chen & Lin, 2006; Lim, 2005). در این پژوهش برای ترکیب مدل‌های فازی از روش میانگین‌گیری وزنی با استفاده از الگوریتم جامعه ذرات استفاده شده است. مدل جدید ارائه شده، مدل منطق فازی مرکب (ICFL) نام گرفت و توانایی و کارایی

مطالعات فراوانی روی پیش‌بینی متغیرهای آب‌زمین‌شناختی با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مانند فازی (Olatunji et al., 2011) و شبکه‌های عصبی مصنوعی

است. شرایط آب‌زمین‌شناختی محدوده مطالعاتی در ارتباط مستقیم با سازندهای زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منطقه است. آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه مرتبط با یکدیگر هستند؛ به گونه‌ای که آب‌های سطحی ناشی از بارش جوی و ذوب برف دامنه‌های سهند ضمن نفوذ در زمین به‌صورت جریان‌های زیرسطحی به آب‌های زیرزمینی می‌پیوندند و آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق به واسطه زمین‌ساخت منطقه و از راه چشمه‌ها به سطح راه می‌یابند. بیشتر این منابع آبی در ارتباط با سازند سرخ میوسن و نهشته‌های کواترنری هستند.

۲-۲. منشأ آرسنیک و چگونگی آزادسازی آن در منطقه

وجود غلظت‌های بالای آرسنیک در آب‌های زیرزمینی و سطحی می‌تواند مرتبط با زمین‌شناسی منطقه، آب‌زمین‌شناسی، ویژگی‌های ژئوشیمیایی آبخوان، تغییرات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی باشد (Wang & Mulligan, 2006). بنابراین این عوامل می‌توانند به‌عنوان شاخص خاصی برای شناسایی مناطق دارای پتانسیل آلودگی بالای آرسنیک در نظر گرفته شوند (Bundschuh et al., 2011). رایج‌ترین منشأ طبیعی آرسنیک، سنگ‌های آتشفشانی، کانی‌های سنگ‌های رسوبی، ته‌نشست‌های معدنی گرمابی و سوخت‌های فسیلی است (Wang & Mulligan, 2006). مطالعات در جهان نشان می‌دهد که آتشفشان‌ها مهم‌ترین منبع طبیعی آرسنیک هستند (Nriagu & Pacyna, 1988) و فعالیت‌های آتشفشانی می‌توانند در انتشار آرسنیک مؤثر باشند.

وجود مقادیر بالای آرسنیک در منابع آب منطقه مطالعاتی بیشتر از سازندهای زمین‌شناسی مرتبط با فعالیت ماگمایی، دگرگونی، زمین‌ساخت و تخلخل منطقه و به واسطه فرایندهای رو در روی آب-سنگ طبیعی منشأ می‌گیرد. با توجه به اینکه هیچ‌گونه فعالیت آلوده‌کننده صنعتی و شهری در منطقه دیده نمی‌شود، تنها منشأ انسان‌زاد که می‌توان برای این آلودگی فرض کرد، استفاده از کود و سموم شیمیایی دارای آرسنیک است که به دلیل استفاده محدود از این سموم در منطقه عامل اصلی آلودگی به‌شمار نمی‌آید. بر پایه شواهد موجود، آلودگی از نوع زمین‌زاد (ژئوژنیک) است (ندیری، ۱۳۹۰). در مشاهدات صحرایی و نمونه‌برداری از سازندهای موجود در مناطق دارای آرسنیک بالا (ندیری و همکاران، ۱۳۹۰) شواهدی از سولفید آرسنیک در شکستگی‌ها و درز و شکاف آهک، مارن و ماسه‌سنگ‌ها و کنگولومرای سرخ بالایی به‌صورت بافت‌های پرکننده فضاهای خالی و کلوپورم در رگه‌ها دیده شد که نشانگر وجود کانی‌سازی در دما و ژرفای کم در منطقه است. شکستگی‌ها در ایجاد مسیر حرکت محلول‌های گرمابی تحت فشار و تمرکز کانی‌های آرسنیک‌دار نقش دارند؛ به گونه‌ای که از راستا و توزیع گسل‌ها پیروی می‌کنند. گسل‌های اصلی نقش کنترل‌کننده دارند و کانی‌زایی بیشتر در گسل‌های فرعی و شکستگی‌ها روی داده است. شکل ۲ نمایشی از توزیع غلظت‌های آرسنیک دیده شده در منطقه است که محل بی‌هنجاری اصلی آن از راستای گسل‌های اصلی منطقه پیروی می‌کند. مقایسه مقادیر آرسنیک در رودخانه‌های آلمالو و قرقنو، مخزن و خروجی سد نشانگر آن بوده است که مقادیر آرسنیک در رودخانه آلمالو به مراتب بیشتر از رودخانه قرقنو است که بی‌هنجاری بالای مقادیر آرسنیک آورده شده توسط رودخانه آلمالو سبب کاهش کیفیت آب مخزن می‌شود (صادقی اقدم، ۱۳۹۱). غلظت آرسنیک نمونه‌ها میان ۰ تا ۲/۰۱ mg/L متفاوت است که بیشترین بی‌هنجاری‌ها در محل چشمه روستاهای قوپوز، زولبین و شوردرق دیده شد که موقعیت آنها در شکل ۳ دیده می‌شود.

در مطالعه حاضر از همبستگی میان عناصر برای انتخاب متغیرهای ورودی مدل استفاده شده است. با توجه به سازوکار و ژئوشیمی آرسنیک در مطالعات بسیاری ارتباط میان آرسنیک و عناصر دیگر از جمله سولفات، نترات، فلئورید، آهن و اسیدپتت مطالعه شده است. آرسنیک معمولاً از کانی‌های سنگ‌های سولفوردار منشأ می‌گیرد (Chiban et al., 2012; Smedley & Kinniburgh, 2002) که

آن در پیش‌بینی غلظت‌های آرسنیک که عموماً با عدم قطعیت همراه است بررسی شد. همچنین برای بررسی توانایی مدل ارائه شده، این مدل با مدل منطق فازی مرکب ICFL میانگین‌گیری ساده مقایسه شد که نتایج نشان داد که مدل منطق فازی مرکب می‌تواند با دقت بالاتری مقادیر آرسنیک را در محدود مطالعاتی پیش‌بینی کند.

۲- منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی به مساحت حدود ۳۸۴ کیلومترمربع در استان آذربایجان شرقی، در باختر شهرستان هشتروند و در محدوده‌ای به مختصات UTM X=644000 تا X=677000 طول‌خاوری و Y=4134000 تا Y=4155000 عرض شمالی قرار گرفته است. محدوده مطالعاتی در حد فاصل رشته‌کوه بزقوش در شمال خاور، توده آتشفشانی سهند در شمال باختر و رشته‌کوه‌های تخت سلیمان (در شهرستان چاروایماق) در جنوب قرار گرفته است. موقعیت مکانی حاصل از پیوند عناصر واحدهای توپوگرافی یادشده سبب شکل‌گیری منطقه به‌صورت یک چاله بسته شده است که تنها به سوی خاور و دره قزل‌اوزن باز می‌شود. محدوده مطالعاتی از دید آب‌شناختی جزوی از حوضه آبریز سفیدرود دریای خزر است. با توجه به داده‌های آب‌وهوایی برای دوره ده ساله (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹) مطابق جدول ۱ میانگین میزان بارش در ایستگاه‌های ساریقمیش، چپینی و سراسکند حدود ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۱+ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه با استفاده از تقسیم‌بندی اقلیم‌نمای آمبرژه (Emberger, 1930) جزو مناطق نیمه‌خشک سرد است. این منطقه از دید زمین‌شناسی همانند پهنه البرز-آذربایجان (آق‌آبانی، ۱۳۸۳) و جزو مناطق آتشفشانی-رسوبی جوان است. سد سهند در پایین‌دست محل برخورد دو رودخانه آلمالو و قرقنو ساخته شده است. این سد با حجم مخزنی ۱۶۵ میلیون مترمکعب، تأمین‌کننده منابع آب کشاورزی، صنعت و آشامیدنی منطقه است (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۸۶).

۲-۱. زمین‌شناسی و آب‌زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی

در محدوده مطالعاتی سازندهای به سن میوسن تا کواترنری وجود دارد. نقشه زمین‌شناسی منطقه در شکل ۱ دیده می‌شود. سازندهای زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه به دو بخش مهم نهشته‌های سرخ زیرین و بالایی و نهشته‌های آذرآواری و گدازه‌های توده آتشفشانی سهند تقسیم می‌شوند که کیفیت آب‌های منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. سازند سرخ زیرین شامل کنگلومرا و ماسه‌سنگ و بخش بالایی آن شامل مارل و سیلستون است. لایه‌های دارای ژئوپیس، انیدریت و هالیت در مکان‌های شمالی و جنوبی حاشیه سد و رود آلمالو قرار گرفته‌اند. پدیده‌هایی همچون گسلش، چین‌خوردگی، بالاآمدگی و زمین‌لغزش از جمله پدیده‌های زمین‌شناسی هستند که در سازندهای منطقه دیده می‌شود. سازندهای آتشفشانی به سن میوسن و پلیوسن شامل نهشته‌های آذرآواری سهند و خاکسترهای آتشفشانی هستند که رود قرقنو در میان این تشکیلات جریان می‌یابد. سازندهای کواترنری منطقه شامل تراس‌های آبرفتی کهن و جوان، سنگ‌آهک و رسوبات آبرفتی عهد حاضر است.

مطالعات و بررسی‌های صحرایی سبب شناسایی چندین گسلش در سازندهای میوسن شد که این گسل‌ها آب‌های زیرزمینی و سطحی را به یکدیگر مرتبط می‌سازند. در مطالعه مقاطع نازک و صیقلی، سولفیدهای آرسنیک در شکستگی‌ها و درز و شکاف‌های سنگ‌آهک، مارل و کنگلومرا ماسه‌سنگ و سازند سرخ دیده شده و بیشترین غلظت‌های آرسنیک در نمونه‌های تجزیه شده از آب چشمه‌های مرتبط با گسل‌ها شناسایی گردید. تغلیظ آبی ترمال عنصر آرسنیک در شکستگی‌های سازند میوسن منشأ اصلی این بی‌هنجاری شناسایی شد (ندیری و همکاران، ۱۳۹۰؛ Nadiri et al., 2013c).

از دید آب‌زمین‌شناختی در محدوده مطالعاتی سفره آب زیرزمینی به‌صورت پهناور و یکپارچه نبوده و از تعدادی سفره‌های هتروژن پچ مانند تشکیل شده

استفاده شد. با توجه به مطالب پیشین در مورد منشأ آرسنیک و چگونگی آزادسازی آن در منطقه، کاربرد متغیرهای ورودی نیز مفهوم می‌یابد. بر این اساس ورودی مدل‌های به کار رفته عبارت است از متغیر pH و عناصر آرسنیک، سولفات، نترات، فلورید و آهن. جدول ۳ نشانگر ویژگی‌های آماری متغیرهای ورودی است. از میان ۶۴۰ نمونه در دسترس تنها ۸۰ دسته داده کامل وجود داشت. در این پژوهش داده‌های ورودی و هدف مورد استفاده برای مدل‌های MFL، LFL و SFL به دو دسته آموزش و آزمایش تقسیم شد. به گونه‌ای که ۶۰ داده برای مرحله آموزش و ۲۰ داده برای مرحله آزمایش استفاده شد.

۴- منطق فازی (FL)

روش فازی روشی مناسب برای کاهش خطای برآوردی و انسانی را نسبت به تئوری‌های دیگر ارائه کرده است (Nikraves & Aminzadeh, 2003). پایه تئوری فازی اولین بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ معرفی شد. داده‌های آب‌زمین‌شناختی عموماً دارای خطای برآوردی ذاتی است و داده‌هایی روشن و بدون خطا به شمار نمی‌آید. بنابراین این روش می‌تواند به عنوان روشی کارا در کاهش این خطا و برآورد دقیق متغیرهای آب‌زمین‌شناختی به شمار می‌آید (Nadiri et al., 2013b).

هر سامانه فازی شامل سه بخش اصلی شامل مرحله فازی کردن داده‌ها به وسیله تعریف تابع عضویت، مرحله ایجاد ارتباط میان ورودی و خروجی به وسیله سری قوانین مانند اگر-آنگاه (if-then) و در پایان مرحله تجمیع نتایج سامانه و غیرفازی‌سازی است که به وسیله عملگرهای فازی، شامل and (به صورت کمینه‌سازی و وزن‌دهی)، or (به صورت بیشینه‌سازی) و not تجمیع نتایج صورت می‌گیرد و غیرفازی‌سازی انجام می‌شود. مدل فازی به سه روش فازی مختلف ممدانی (MFL) (Mamdani & Assilian, 1975; Mamdani, 1976 & 1977)، لارسن (LFL) (Larsen, 1980)، و ساگو (SFL) (Sugeno, 1985) قابل اجراء است. تفاوت روش ساگو با دو روش دیگر در خروجی آنها است که بر خلاف دو روش دیگر تابع عضویت خروجی سامانه فازی ساگو به صورت ثابت یا رابطه خطی است که توسط روش دسته‌بندی به دست می‌آید. تفاوت مدل ممدانی و لارسن نیز در نوع عملگرهای فازی استفاده شده است. اولین مرحله در ایجاد یک مدل فازی، دسته‌بندی داده‌هاست که بستگی به نوع مدل فازی استفاده شده دارد و می‌توان از روش‌های دسته‌بندی مختلف استفاده کرد که از آن جمله می‌توان به روش Subtractiv برای روش ساگو و روش Fuzzy C-Means (FCM) برای روش ممدانی و لارسن اشاره کرد.

۵- مدل منطق فازی مرکب (ICFL: Intelligence committee fuzzy logic)

در سال‌های اخیر روش‌های هوش مصنوعی گسترش فراوانی در علوم مختلف پیدا کرده است و می‌تواند بر حسب نوع سامانه مورد بررسی در مدل‌سازی به کار گرفته شود. با توجه به اینکه هر یک از روش‌های هوش مصنوعی مانند فازی، نروفازی و یا شبکه‌های عصبی مصنوعی مزایای ویژه‌ای دارند، بنابراین در پژوهش‌های اخیر برای استفاده همزمان از مزایای روش‌های مختلف از روش‌های میانگین‌گیری مانند میانگین‌گیری ساده و میانگین‌گیری وزنی برای ایجاد هوش مصنوعی مرکب (ICM: Intelligence committee machine) و از آن جمله مدل منطق فازی مرکب (ICFL) استفاده شده است (Kadkhodaie-Ilkhchi et al., 2009b; Chen & Lin, 2006; Lim, 2005). در این پژوهش برای استفاده همزمان از کارایی مدل‌های منطق فازی مختلف، از مدل منطق فازی مرکب نظارت شده استفاده شده است. بر پایه مطالعات انجام گرفته در زمینه مدل‌های هوش مصنوعی مرکب (Bates & Granger, 1969; Haykin, 1991; Geman et al., 1992; Naftaly et al., 1997; Huang et al., 2001; Lim, 2005; Chen & Lin, 2006;

در این رابطه کانی‌های اصلی آرسنیک دیده شده در منطقه شامل رآلگار و اورپیمنت است. منشأ اصلی این کانی‌زایی‌ها فعالیت‌های اپی‌ترمال در سازندهاست (فتاحی علی‌بابا، ۱۳۸۶) و وجود کانی‌های آمفیبول و بیوتیت در توده آذرین منطقه نشانگر توانایی ماگما در تولید سیال‌های گرمایی دانسته می‌شود که افزون بر جزو جوی کانسارهای اپی‌ترمال، جزو ماگمایی در ارتباط با دم‌های سهند، سازندها را تحت تأثیر قرار داده و انواع دگرسانی‌های سیلیسی شدن، دولومیتی شدن، پیریتی شدن و دی‌کلسی‌فیکاسیون مرتبط با تمرکز آرسنیک را به وجود آورده است (آقایی، ۱۳۸۸).

آزادسازی آرسنیک به‌طور چیره به وسیله فرایندهای جذبی کنترل می‌شود (Nickson et al., 2000; Oremland & Stolz, 2003; Mahimairaja et al., 2005). در بررسی‌های صحرائی انجام شده در سازند میوسن پهنه‌های اکسید آهن در منطقه مطالعاتی دیده شده است (ندیری و همکاران، ۱۳۹۰؛ صادقی اقدم، ۱۳۹۱). واکنش‌های جذب و دفع توسط اکسید آهن در کنترل واکنش‌ها مهم است؛ زیرا اکسید آهن به‌طور گسترده در محیط‌های زمین‌شناسی روی اجسام جامد زمین را می‌پوشاند. As (III) و As (V) به شدت جذب هیدرواکسیدهای آهن موجود در خاک می‌شوند که در این میان اتصال آرسنات (As (V)) به سطوح اکسید آهن در آب با pH اسیدی و نزدیک محیط‌های طبیعی قوی‌تر است (Waychunas et al., 1993). بنابراین در سامانه‌های طبیعی As (III) متحرک‌تر از As (V) است (Oremland & Stolz, 2003). محدوده اسیدیته نمونه‌ها میان مقادیر ۶/۳۸ تا ۸/۶۸ قرار دارد؛ این محدوده pH سبب آزادسازی آرسنات به آب و افزایش جذب آرسنیت روی اکسی‌هیدروکسیدهای آهن می‌شود (Pierce & Moore, 1982). در pH بالای ۷ تمایل فلزات سنگین به تشکیل کمپلکس‌های هیدروکسیدی افزایش می‌یابد و در نتیجه حلالیت فلزات سنگین کاهش، مقدار جذب سطحی افزایش و در pHهای اسیدی تحرک فلزات سنگین افزایش می‌یابد (Sherene, 2010; Mulligan et al., 2001). در محدوده‌های اسیدیته ۳ تا ۹ غلظت پایین آرسنیک و در محدوده اسیدیته ۱۱ تا ۱۳ غلظت بالای آرسنیک در آب زیرزمینی دیده شده است (Kim et al., 2000; Ghimire et al., 2002). وجود فلوئور آب ناشی از پدیده‌های زمین‌شناختی همچون هوازگی سنگ‌ها و کانی‌ها و یا ناشی از آلودگی‌های انسانی است. مقادیر غلظت‌های بالای آرسنیک انطباق قابل توجهی با غلظت‌های بالای نترات نشان می‌دهد. در این مورد دفع نامناسب فضولات انسانی و حیوانی و همچنین باطله‌های مواد آلی و کودهای کشاورزی که به درون رودخانه‌ها زهکشی می‌شوند و یا به صورت نشتی نفوذ می‌کنند، موجب مصرف اکسیژن حل شده می‌شود. این عمل سبب انحلال کاهشی اکسی-هیدروکسیدها و در نتیجه آزاد شدن آرسنیک می‌شود.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

به دلیل اهمیت مطالعات منابع آبی این منطقه، نمونه‌برداری‌هایی از همه منابع آبی قابل دسترسی (شکل ۳) شامل رودخانه‌ها، آبراه‌های جاری، چشمه‌ها و چاه‌های حفر شده در منطقه طی سال‌های مختلف در دانشگاه تبریز (آقایی، ۱۳۸۸؛ صادقی اقدم، ۱۳۹۱) در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد و طرح تحقیقاتی (ندیری، ۱۳۹۰) انجام شد. همچنین از داده‌های سازمان آب منطقه‌ای که به صورت ادواری از نقاط مختلف محدوده مطالعاتی شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی برداشت شده بود، برای پیش‌برد این مطالعه استفاده شد. از کل ۶۴۰ نمونه برداشت شده از منطقه مطالعاتی، تنها ۸۰ نمونه دارای تجزیه یون‌های اصلی، نترات، فلورید، سیلیس، آرسنیک، مس، سرب، روی، منگنز، آلومینیم، هدایت الکتریکی و pH بودند که دسته داده کامل برای این مطالعه به شمار می‌آید. برای برآورد آرسنیک و ورودی‌های مدل‌ها از میان متغیرهای هیدروشمیایی اندازه‌گیری شده، از متغیرهایی که بیشترین همبستگی ($r < 0.3$) را مطابق جدول ۲ با عنصر آرسنیک نشان می‌دادند

به دست می آید. با این توصیف هر تابع عضویت خروجی ۷ متغیر خواهد داشت. شکل ۵ نتایج مدل فازی ساگنو را نشان می دهد. در مدل ممدانی و لارسن از روش دسته بندی FCM استفاده شد. در این روش نیز تعداد دسته های بهینه بر پایه کمترین مقدار RMSE که به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۰/۱۲ میلی گرم بر لیتر بود، ۱۲ دسته تعیین شد. در این دو روش نیز توابع عضویت ورودی و خروجی تابع گوسی بود. مقادیر ضریب تعیینی نیز برای مدل های ممدانی و لارسن در مرحله آموزش برابر با ۰/۹۴ و ۰/۹۱ بود. نتایج این دو مدل در مرحله آزمایش نیز به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ ارائه شده است. بر پایه نتایج مدل های فازی که در جدول ۴ ارائه شده است، با وجود اینکه هر سه مدل فازی نتایج قابل قبولی دارند، ولی مدل ممدانی نتایج به نسبت بهتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. بنابراین چون هر یک از این سه مدل برتری های خاص خود را دارد، بنابراین برای استفاده از مزیت های هر سه مدل در یک زمان از مدل مرکب استفاده شد.

۶-۲. برآورد آرسنیک با استفاده از مدل منطق فازی مرکب (ICFL)

مدل منطق فازی مرکب برای ترکیب نتایج سه مدل فازی ممدانی، لارسن و ساگنو به کار گرفته شد. در این مرحله از روش الگوریتم بهینه سازی جامعه ذرات برای بهینه سازی و وزن دهی برای این سه مدل استفاده شد. مبانی و مفاهیم این روش توسط Banks et al. (2007 & 2008) ارائه شده است. بدین منظور تابع برازش به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$MSE_{ICFL} = \sum_{i=1}^k 1/N (w_1 A_{S_1} + w_2 A_{S_2} + w_3 A_{S_3} - A_{S_i})^2 \quad (۸)$$

این تابع مقدار خطای (MSE: Mean Square Error) مدل مرکب را برای پیش بینی مرحله آموزش نشان می دهد؛ به گونه ای که w_3 ، w_2 ، w_1 به ترتیب وزن مدل های فازی ممدانی، لارسن و ساگنو، A_{S_i} مقادیر مشاهداتی و N شمار داده های آموزشی (۶۰ نمونه) را نشان می دهد. الگوریتم جامعه ذرات همانند روش های بهینه سازی ابتکاری و هوش مصنوعی بهینه سازی نیاز به تعیین متغیرهای مناسب مدل دارد. در اولین نسخه الگوریتم جامعه ذرات به عنوان پیش فرض، متغیرهای شتاب برابر مقادیر $C_1=C_2=2$ استفاده شد؛ ولی نتایج تجربی نشان می دهد که مقادیر $C_1=C_2=0.5$ ممکن است نتایج بهتری به دست دهد. پژوهش ها نشان می دهد که ممکن است انتخاب متغیر شناختی C_1 ، بزرگ تر از متغیر اجتماعی C_2 با این شرط که $C_1+C_2 \leq 4$ باشد، سبب نتایج بهتری شود. متغیرهای r_1 و r_2 برای حفظ گوناگونی گروه به کار می روند و اعداد تصادفی در محدوده (۰/۱) با توزیع یکنواخت هستند. پس از مشخص شدن محدودیت های مسئله و تابع پناستی به منظور انجام تجزیه حساسیت مدل الگوریتم جامعه ذرات، ترکیب های مختلف از هر متغیر در نظر گرفته شد (Banks et al., 2008). در این تجزیه با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای C_1 و C_2 (متغیرهای شناختی و اجتماعی)، W_{max} و W_{min} و پس از ۱۰ بار اجرای مدل، بهترین مقادیر این متغیرها با توجه به کمترین مقدار تابع هدف به ترتیب ۰/۵، ۰/۱، ۰/۵ و ۰/۵ به دست آمد. پس از شناخت متغیرهای مدل، بهینه سازی و به دست آوردن وزن ها پرداخته شد. بهترین جمعیت اولیه نیز ۳۰۰ انتخاب شد و در بهینه ترین حالت مقدار RMSE برای داده های آموزش برابر با ۰/۰۷ میلی گرم بر لیتر به دست آمد (جدول ۴). وزن های مدل های مختلف از این مدل به صورت رابطه زیر به دست آمد:

$$As_{ICFL} = 0.38 \times As_{MFL} + 0.28 \times As_{LFL} + 0.34 \times As_{SFL} \quad (۹)$$

با به کار گرفتن وزن های به دست آمده به صورت فرمول بالا برای داده های مرحله آزمایش، مقادیر پیش بینی شده برای مدل منطق فازی مرکب به دست آمد (شکل ۸ و جدول ۵). مرحله بعدی ایجاد مدل فازی مرکب با استفاده از میانگین گیری حسابی است تا بتوان نتایج دو مدل فازی مرکب را با هم مقایسه کرد. بنابراین با اعمال ضریب وزنی یکسان (۰/۳۳) برای هر یک از مدل های فازی خطای RMSE برابر ۰/۰۹ میلی گرم بر لیتر به دست آمد (جدول ۵). بر پایه نتایج ارائه شده در جدول ۴

می توان اصول کلی آن را به صورت زیر توضیح داد:

$$E_i = e[(\hat{k}_i - k)^2] = e[e_i^2] \quad (۱)$$

با فرض وجود i سامانه پیش بینی $i=1, \dots, N$ بردار هدف و خروجی هر سامانه خواهد بود و در رابطه بالا $e[\dots]$ امید ریاضی است و میانگین خطا برای هر یک از سامانه های هوش مصنوعی به صورت رابطه ۲ به دست می آید:

$$Eavg = 1/N \sum_{i=1}^N E_i = (1/N) \sum_{i=1}^N [e_i^2] \quad (۲)$$

بنابراین با اعمال روش میانگین گیری بردار خروجی به صورت رابطه ۳ خواهد بود:

$$\widehat{K}_{ICM} = 1/k \sum_{i=1}^N \hat{K}_i \quad (۳)$$

بنابراین برای مربع خطای مدل هوش مصنوعی مرکب خواهیم داشت:

$$E_{ICM} = e[(\widehat{K}_{ICM} - K)^2] = e[(1/N \sum_{i=1}^N \hat{K}_i - K)^2] = e[(1/N \sum_{i=1}^N e_i)^2] \quad (۴)$$

با در نظر گرفتن نامعادله کاجچی (Cauchy's inequality) در رابطه ۵ می توان نشان داد بر اساس رابطه ۶ مدل هوش مصنوعی مرکب کمترین خطا را نسبت به هر یک از مدل های استفاده شده خواهد شد.

$$(a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n)^2 \leq (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2) \times (b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2) \quad (۵)$$

$$E_{ICM} = e[(1/k \sum_{i=1}^k \hat{K}_i - K)^2] \leq (1/N) \sum_{i=1}^N [e_i^2] = Eavg \quad (۶)$$

در این پژوهش برای استفاده همزمان از کارایی مدل های منطق فازی مختلف، مدل منطق فازی مرکب استفاده شده است. به گونه ای که روش های LFL، MFL و SFL برای برآورد آرسنیک در محدوده مطالعاتی منابع آبی سد سهند استفاده شدند. برای ترکیب نتایج این مدل ها از وزن دهی توسط الگوریتم جامعه ذرات استفاده شد (شکل ۴). نتایج مدل ICFL با مدل منطق فازی منفرد برای برآورد آرسنیک مقایسه شد.

۶- بحث

۶-۱. مدل فازی

همان گونه که در بخش روش شناسی اشاره شد در این پژوهش از سه روش فازی مختلف ممدانی (MFL)، لارسن (LFL) و ساگنو (SFL)، برای پیش بینی آرسنیک استفاده شد. اولین مرحله در این روش دسته بندی داده ها و تعیین توابع عضویت است که در این پژوهش از روش کاهشی (Subtractive) برای مدل ساگنو استفاده شد که روشی کارا و مفید در دسته بندی داده ها و تعداد قوانین در پژوهش های اخیر بوده است (Chiu, 1994; Jarrah & Halawani, 2001; Nadiri et al., 2013b). متغیر اصلی در این روش دسته بندی برای تعیین دسته ها و قوانین اگر-آنگاه، شعاع دسته بندی است. مقادیر این متغیر میان صفر و یک است. کاهش این متغیر سبب افزایش دسته ها و قوانین و افزایش آن به سوی یک سبب کاهش دسته ها و قوانین خواهد شد (Chiu, 1994). بازه مدل فازی بستگی به تعیین شعاع بهینه دسته بندی دارد که مقدار بهینه آن بر پایه کمترین RMSE، ۰/۴ تعیین شد. بر این اساس داده ها به ۷ دسته تقسیم و ۷ قانون اگر-آنگاه تعیین شد. شکل ۳ نمونه ای از توابع عضویت داده های ورودی را نشان می دهد. توابع عضویت استفاده شده برای مدل سازی فازی مقادیر آرسنیک تابع گوسی بود که به داده های دسته بندی شده برازش داده شد. تابع عضویت خروجی مدل ساگنو، تابعی است خطی که بر پایه ورودی ها ساخته می شود. برای نمونه خروجی اولین تابع عضویت از ۶ ورودی ایجاد می شود:

$$Output_{MFL} = C_1 \times pH + C_2 \times SO_4^{2-} + C_3 \times (NO_3^- - N) + C_4 \times F^- + C_5 \times Fe(II, III) + C_6 \times As(III, V) + C_7 \quad (۷)$$

در رابطه بالا، به ترتیب متغیرهای C_1 ، C_2 ، C_3 ، C_4 ، C_5 ، C_6 و C_7 ضریب ورودی های pH ، SO_4^{2-} ، NO_3^- ، F^- ، $Fe(II, III)$ و $As(III, V)$ مدل های ممدانی (Mamdani, 1976 & Mamdani, 1975; Mamdani & Assilian, 1975) و لارسن هستند. C_7 نیز متغیر ثابت هر معادله است. این متغیرها با برآورد خطی کمترین مربعات

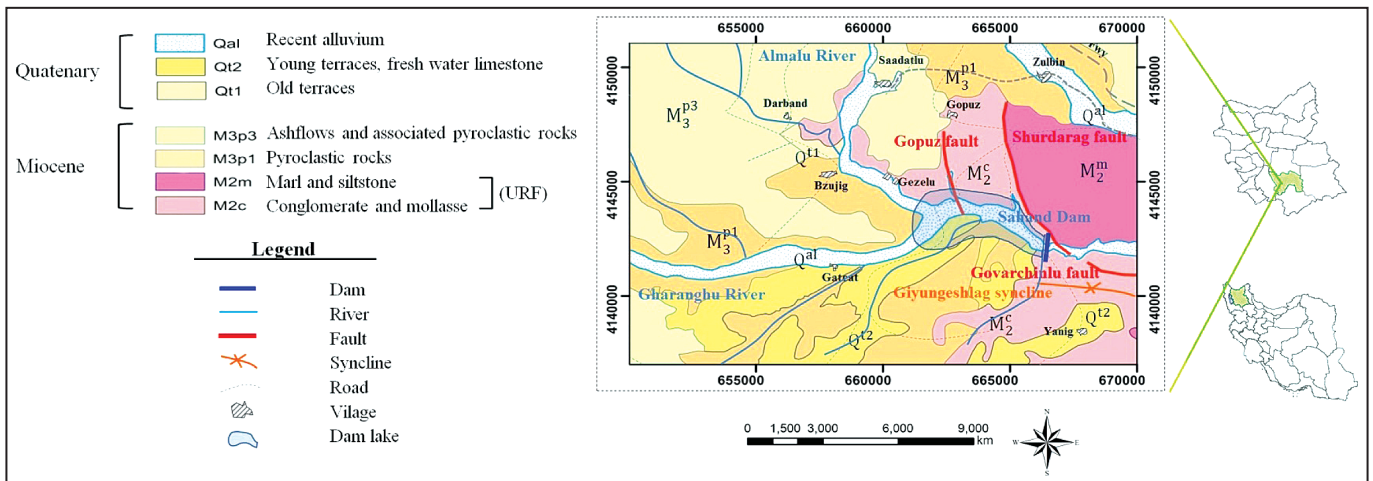
مدانی، لارسن و ساگو توسط شبکه عصبی مصنوعی حاصل شد، نشان از برتری مدل ارائه شده نسبت به نتایج به دست آمده توسط هر یک از این مدل‌ها به تنهایی دارد. افزون بر این، مقایسه نتایج به دست آمده از مدل خطی و وزنی ICFL نشان داد که مدل جدید ارائه شده توانایی و کارایی بالایی در ترکیب مدل‌های فازی دارد. دلیل این موضوع را می‌توان در تفاوت روش ترکیب کردن دانست، بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش غیرخطی شبکه‌های عصبی مصنوعی در ترکیب مدل‌های فازی کارایی بالاتری دارد و نتایج دقیق‌تری ارائه می‌دهد. به گونه‌ای که مدل ICFL وزنی نسبت به مدل ICFL خطی توانست مقدار RMSE را به اندازه ۲۵ درصد کاهش دهد. با توجه به عدم قطعیت موجود در متغیرهای آب‌زمین‌شناختی، مدل منطق فازی مرکب ارائه شده می‌تواند روشی مناسب برای پیش‌بینی و برآورد مقادیر آرسنیک باشد. با توجه به عدم وجود آبخوان یکپارچه در منطقه و عدم پاسخگویی مناسب مدل‌های آماری برای برآورد مکانی آرسنیک در منطقه مطالعاتی مدل ارائه شده می‌تواند در برآورد مقادیر آرسنیک روشی مناسب و کارا باشد. ارائه برآورد دقیقی از مقادیر آرسنیک در منطقه، راهگشای مباحث مدیریتی و بررسی چگونگی حذف این مشکل از منطقه است که به عنوان موضوعی برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود.

بهترین نتایج مربوط به مدل ICFL است و این مدل نتایج بهتری از مدل‌های فازی به تنهایی ارائه داد.

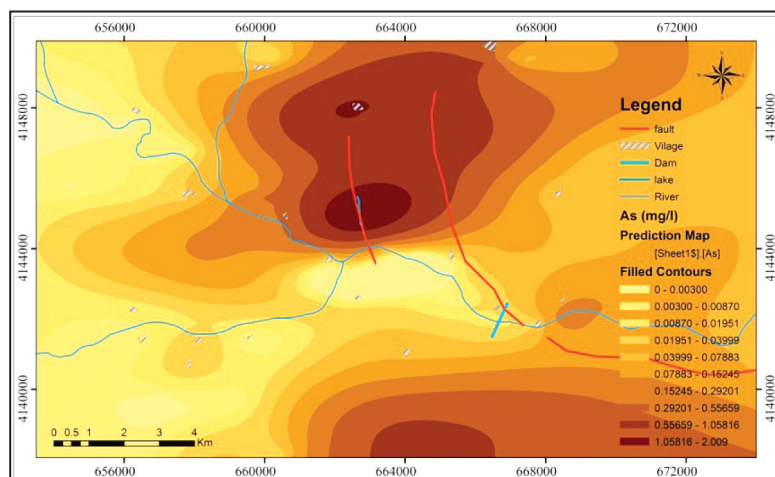
با توجه ماهیت مسئله مورد نظر و ویژگی‌های منطقه مطالعاتی، روند پخش آلودگی در منطقه پیروی بهتری از مدل‌های فازی نسبت به مدل خطی زمین‌آماري کریجینگ نشان می‌دهد. همچنین با توجه به وجود سفره‌های تکه‌تکه، توزیع آلودگی به صورت پیوسته و مشخص نیست و حالت‌های محلی آلودگی از محل شکستگی‌های اصلی منطقه پیروی می‌کند. در هر نقطه با معلوم بودن متغیرهای دیگر معرفی شده به مدل، می‌توان مقادیر غلظت آرسنیک در آن نقطه را برآورد کرد. پخش آلودگی در محیط متخلخل از محل شکستگی‌ها شروع و تا حد امکان جریان یافتن هیدرولیکی آن ادامه می‌یابد. پیش‌بینی به مقادیر بالای آرسنیک در مکان‌های در ارتباط با شکستگی‌ها تأکید دارد. تمرکز روی مکان‌هایی که بی‌هنجاری آرسنیک و شکستگی بالایی دارند سبب شناسایی مناطقی می‌شود که ممکن است در انتقال آلودگی به مخزن سد مؤثر باشند. در این راستا پیشنهاد می‌شود که در مطالعات بعدی توجه زیادی به گسل‌های موجود در منطقه شود.

۷- نتیجه‌گیری

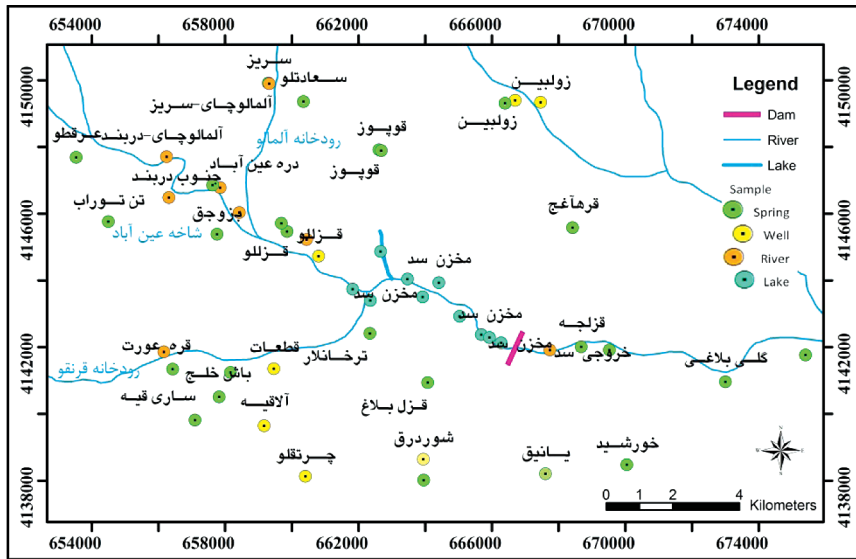
نتایج مدل منطق فازی مرکب ارائه شده، که از ترکیب نتایج مدل‌های فازی



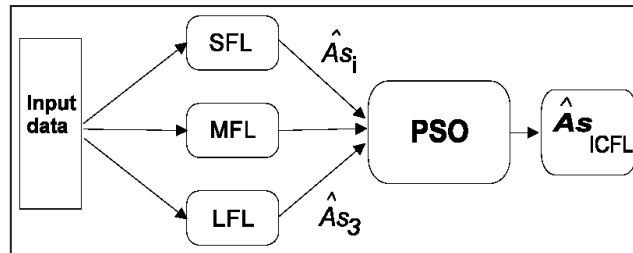
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی.



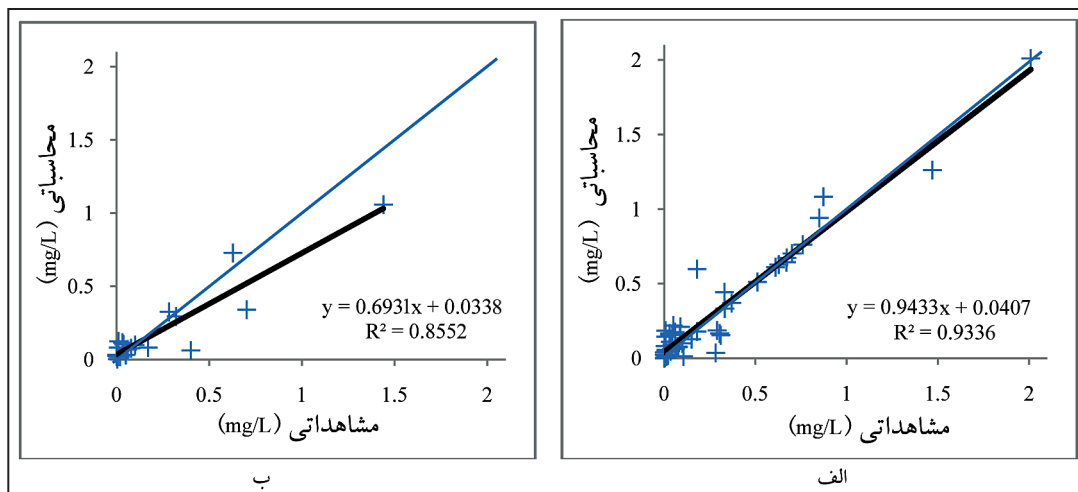
شکل ۲- نمایشی از توزیع غلظت‌های آرسنیک مشاهداتی در منطقه و پیروی محلی بی‌هنجاری اصلی آن از راستای گسل‌های اصلی.



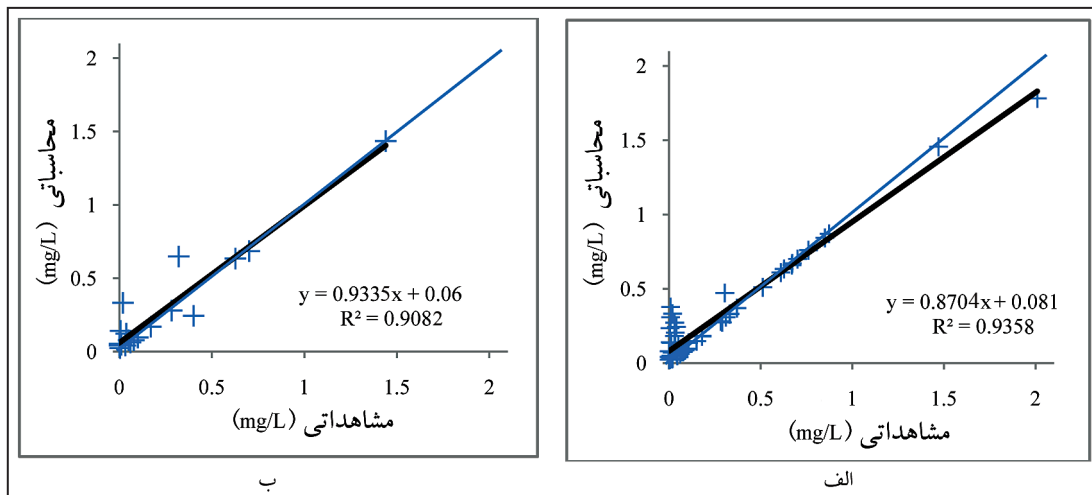
شکل ۳- موقعیت و نوع مکان‌های نمونه‌برداری قابل دسترس در منطقه مطالعاتی.



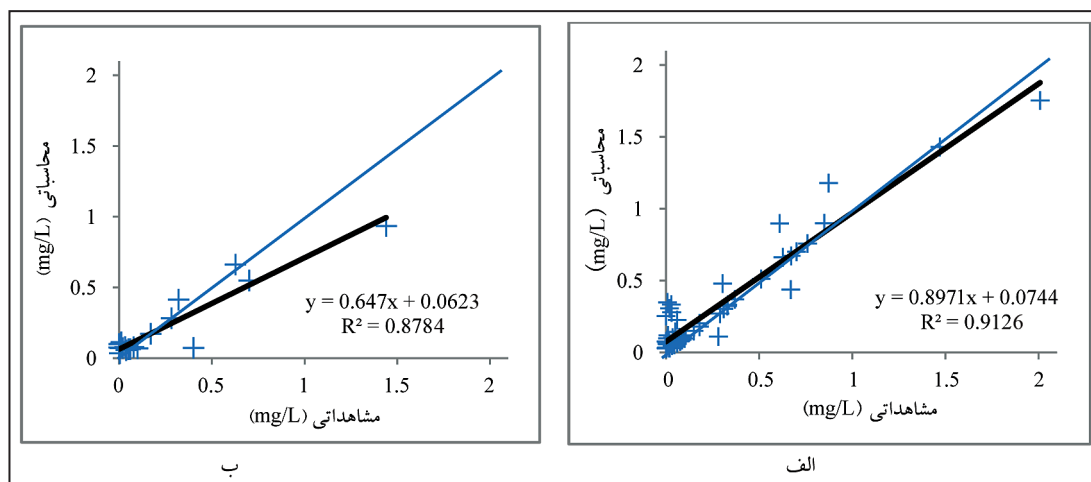
شکل ۴- ساختار نمادین از مدل ICFL.



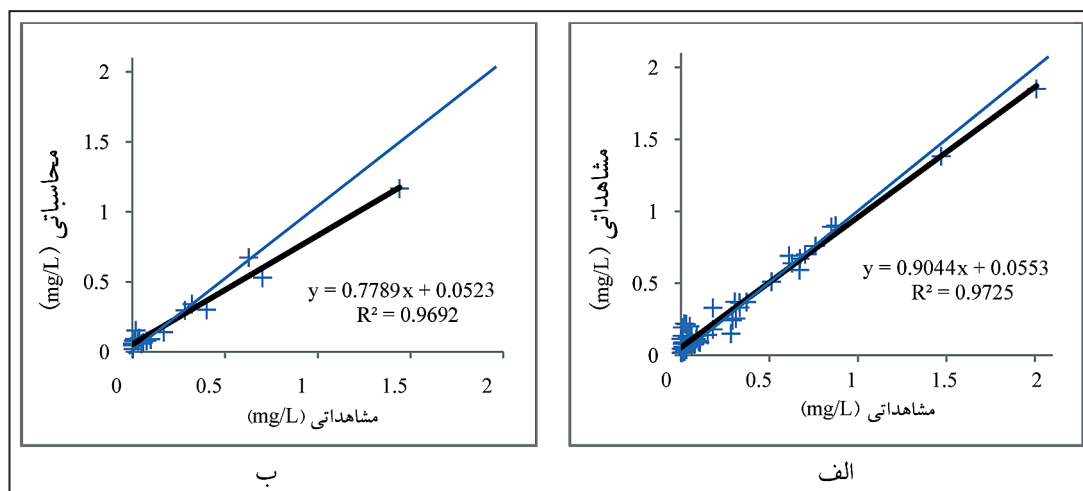
شکل ۵- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل ساگنو (SFL) برای پیش‌بینی آرسنیک (الف) مرحله آموزش؛ (ب) مرحله آزمایش.



شکل ۶- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل ممدانی (MFL) برای پیش‌بینی آرسنیک. الف) مرحله آموزش؛ ب) مرحله آزمایش.



شکل ۷- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی توسط مدل لارسن (LFL) برای پیش‌بینی آرسنیک. الف) مرحله آموزش؛ ب) مرحله آزمایش.



شکل ۸- مقایسه نتایج مشاهداتی و محاسباتی آرسنیک توسط مدل ICFL با استفاده از الگوریتم جامعه ذرات. الف) مرحله آموزش؛ ب) مرحله آزمایش.

جدول ۱- میانگین متغیرهای آب‌شناسی و هواشناسی منطقه مطالعاتی برای دوره شاخص ده ساله (۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹).

میانگین ایستگاه‌ها	ایستگاه			واحد	متغیرها
	سراسر	چینی	ساریقمیش		
۳۵۰/۱۴	۳۳۰/۰۹	۳۶۴/۵۸	۳۳۵/۷۵	میلی متر	میانگین بارش سالانه
+۱۱/۱۸	+۱۰/۷۶	+۹/۹۸	+۱۲/۸۲	سانتی گراد	میانگین دمای سالانه
۱۳۱۴	۱۰۷۳/۴۱	۱۱۸۱/۳۱	۱۶۸۷/۳۰	میلی متر	میانگین تبخیر و تعرق از تشتک
۴۷/۹۹	۴۳/۴۷	۴۳/۳۴	۵۷/۱۷	درصد	میانگین رطوبت نسبی سالانه

جدول ۲- همبستگی میان متغیرهای مختلف با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در محیط نرم‌افزار (SPSS (v.17).

متغیر	Pb	Zn	Mn	Al	Fe	As	SiO ₂	F	PO ₄ ⁻³	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ⁻²	K	Na	Mg	Ca	pH	EC
EC	-۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۶۰	-۰/۲۰	۰/۶۶	-۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۳۲	۰/۹۹	۰/۶۳	-۰/۱۳	۰/۵۴	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۴۱	۱
pH	۰/۱۲	-۰/۰۱	-۰/۴۷	-۰/۰۱	-۰/۲۹	-۰/۴۲	۰/۱۶	-۰/۳۸	-۰/۰۹	-۰/۲۱	-۰/۲۸	-۰/۴۰	-۰/۶۲	۰/۷۴	-۰/۴۲	-۰/۴۲	-۰/۴۵	-۰/۴۳	۱	
Ca	-۰/۱۷	۰/۹۵	۰/۵۰	۰/۱۹	۰/۵۹	۰/۰۰	-۰/۱۵	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۳۹	۰/۸۷	۰/۶۳	-۰/۲۴	۰/۴۰	۰/۸۸	۰/۹۲	۱		
Mg	-۰/۱۱	-۰/۰۸	۰/۵۲	-۰/۱۵	۰/۴۹	۰/۶۶	-۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۴۶	۰/۹۳	۰/۴۴	-۰/۲۳	۰/۵۰	۰/۹۶	۱			
Na	-۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۶۳	-۰/۲۰	۰/۶۹	-۰/۰۳	-۰/۲۰	۰/۱۱	-۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۳۱	۰/۹۹	۰/۷۱	-۰/۱۲	۰/۶۰	۱				
K	-۰/۱۰	-۰/۱۵	۰/۶۷	-۰/۲۰	۰/۵۵	۰/۰۷	-۰/۱۵	۰/۱۷	-۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۲۸	۰/۵۶	۰/۵۰	۰/۰۱	۱					
CO ₃ ⁻²	۰/۰۷	-۰/۱۳	-۰/۲۱	-۰/۱۱	۰/۳۵	-۰/۱۷	-۰/۲۴	-۰/۱۹	-۰/۰۹	-۰/۲۰	-۰/۱۴	-۰/۱۱	-۰/۲۸	۱						
HCO ₃ ⁻	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۳۱	-۰/۰۱	-۰/۱۹	۰/۰۷	-۰/۱۸	۰/۲۲	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۶۱	۰/۵۹	۱							
Cl	۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۶۸	-۰/۲۲	۰/۷۲	-۰/۰۴	-۰/۲۰	۰/۰۹	-۰/۰۱	۰/۱۱	-۰/۱۹	۱								
SO ₄ ⁻²	-۰/۱۱	-۰/۰۷	۰/۲۹	-۰/۱۰	۰/۳۶	-۰/۳۸	-۰/۰۳	۰/۳۱	-۰/۰۱	۰/۰۰	۱									
NO ₃ ⁻	-۰/۳۱	-۰/۰۰	-۰/۰۵	۰/۰۶	-۰/۰۴	۰/۳۲	۰/۱۸	۰/۴۳	۰/۰۲	۱										
PO ₄ ⁻³	۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۳۲	-۰/۰۹	-۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۷	-۰/۲۹	۱											
F	۰/۱	۰/۹۰	-۰/۰۵	۰/۳۹	-۰/۱۳	۰/۳۸	۰/۱۶	۱												
SiO ₂	-۰/۳۳	-۰/۳۱	۰/۳۰	۰/۰۰	-۰/۰۰	۰/۱۹	۱													
As	۰/۱۰	-۰/۱۶	۰/۲۴	۰/۲۴	-۰/۳۲	۱														
Fe	-۰/۱۷	-۰/۰۰	۰/۸۹	۰/۰۸	۱															
Al	-۰/۱۶	۰/۰۵	۰/۰۹	۱																
Mn	-۰/۲۰	-۰/۱۰	۱																	
Zn	۰/۵۴	۱																		
Pb	۱																			

Fe (II,III), As (III,V)

جدول ۳- ویژگی‌های آماری متغیرهای ورودی در مدل‌های MFL، LFL و SFL.

متغیر	کشدگی	کج شدگی	واریانس	انحراف معیار	میانگین	بیشینه	کمینه
pH	۲/۹۲	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۵۰	۷/۶۸	۹/۶۸	۶/۳۸
SO ₄ ⁻² (mg/L)	۱۱/۶۳	۳/۱۹	۵۵۳۳۲/۵۷	۷۴۴/۱۳	۳۱۷/۸۶	۳۹۰۰/۰۰	۲/۰۰
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	۱۶/۰۶	۳/۷۲	۴۷/۲۷	۶/۸۸	۴/۵۷	۴۲/۸۷	۰/۱۰
F ⁻ (mg/L)	۳/۷۱	۱/۵۱	۰/۲۲	۰/۴۷	۱/۸۲	۲/۵۷	۰/۰۶
Fe (II, III) (mg/L)	۲۷/۴۶	۵/۰۹	۱۲/۴۰	۳/۵۲	۱/۰۶	۲۱/۳۵	۰/۰۰
As(III, V) (mg/L)	۸/۰۱	۲/۶۱	۰/۱۴	۰/۳۷	۰/۲۲۹	۲/۰۰۹	ND

ND: Not Detected

جدول ۵- ارزیابی عملکرد نتایج دو مدل ICFL.

مراحل	معیار ارزیابی		
	ICFL میانگین گیری وزنی	ICFL میانگین گیری خطی	معدل
آموزش	۰/۰۵۲	۰/۰۷	RMSE (mg/L)
	۰/۹۷	۰/۹۵	R ²
آزمایش	۰/۰۷	۰/۰۹	RMSE (mg/L)
	۰/۹۷	۰/۹۲	R ²

ND: Not Detected

جدول ۴- نتایج مدل‌های فازی در مراحل آموزش و آزمایش.

مراحل	معیار ارزیابی		
	SFL	MFL	LFL
آموزش	۰/۱۰	۰/۱۱	۰/۱۲
	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۱
آزمایش	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۳۱
	۰/۸۶	۰/۹۱	۰/۸۸

کتابنگاری

- آقائباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ۵۸۶ صفحه.
- آقایی، ح.، ۱۳۸۸- بررسی هیدروژئوشیمی محدوده غرب هشتروند با تأکید بر بی هنجاری های احتمالی آرسنیک در منطقه، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه تبریز.
- اصغری مقدم، ا.، ندیری، ع. و فیجانی، ا.، ۱۳۸۸- استفاده از مدل های شبکه های عصبی مصنوعی و زمین آمار برای پیش بینی مکانی غلظت فلئوئورید، مجله دانش آب- خاک، شماره ۲، ۱۹/۱، صص ۱۲۹ تا ۱۴۵.
- سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۸۶- مطالعات هیدروژئولوژی طرح سد سهند، شرکت مشاورین آب بند، گزارش نهایی، نشریه شماره ۶۳۲.
- صادقی اقدم، ف.، ۱۳۹۱- بررسی تغییرات زمانی و مکانی کیفیت منابع آب ورودی به سد سهند هشتروند با تأکید بر بی هنجاری آرسنیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه تبریز.
- فتاحی علی باباپور، ش.، ۱۳۸۶- بررسی ژئ پتانسیل های فلزی در منطقه شوردرق- هشتروند از دیدگاه زمین شناسی اقتصادی، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشگاه تبریز.
- ندیری، ع.، ۱۳۹۰- بررسی تغییرات هیدروژئوشیمیایی آب انباشته شده در سد سهند و منابع آب مرتبط با آن در حوضه، وزارت نیرو، شرکت آب منطقه ای آذربایجان شرقی.
- ندیری، ع.، اصغری مقدم، ا.، صادقی اقدم، ف. و آقایی، ح.، ۱۳۹۰- بررسی بی هنجاری آرسنیک موجود در منابع آب سد سهند، محیط شناسی، سال سی و هشتم، شماره ۳، صص ۶۱ تا ۷۴.

References

- Banks, A., Vincent, J. & Anyakoha, C., 2007- A review of particle swarm optimization. Part I: background and development. *Natural Computing* 6: 467-484.
- Banks, A., Vincent, J. & Anyakoha, C., 2008- A review of particle swarm optimization, Part II: hybridisation, combinatorial, multicriteria and constrained optimization, and indicative applications. *Natural Computing* 7: 109-124.
- Bates, J. M. & Granger, C. W. J., 1969- The combination of forecast. *Operations Research Quarterly* 20(4): 451-468.
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J. Sh., Liu, Ch., López, D., Armienta, M. A., Guilherme, L. R. G., Cuevas, A. G., Cornejo, L., Cumbal, L. & Toujaguez, L. R., 2011- One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment* 429: 2-35.
- Chen, C. H. & Lin, Z. S., 2006- A committee machine with empirical formulas for permeability prediction. *Computers and Geosciences* 32: 485-496.
- Chiban, M., Zerbet, M., Carja, G. & Sinan, F., 2012- Application of low-cost adsorbents for Arsenic removal, A review. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology* 4(5): 91-102.
- Chiu, S., 1994- Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 2: 267-278.
- Dragon, K., 2006- Application of factor analysis to study contamination of a semi-confined aquifer (Wielkopolska Buried Valley aquifer, Poland) 331: 272-279.
- Emberger, L., 1930- La vegetation de la region mediterrannee. *Essai d'une classification des groupments vegetaux: Rev. Gen. Bot* 42: 641-662, 705-721.
- Geman, S., Bienenstock, E. & Doursat, R., 1992- Neural networks and the bias/variance dilemma. *NeuralComputation* 4(1): 1-58.
- Ghimire, K. N., Inoue, K., Makino, K. & Yan, S., 2002- Natural occurrence of Arsenic using orange juice residue. *Sep. Sci. Technol* 37: 2785-2799.
- Gurung, K., Hiroaki, I. & Khadka, M. S., 2005- Geological and geochemical examination of arsenic contamination in groundwater in the Holocene Terai Basin, Nepal. *Environ Geol* 49: 98-113.
- Haykin, S., 1991- *Neural Networks, A Comprehensive Foundation*. Englewood Cliffs, NJ 842 p.
- Huang, Y., Gedeon, T. D. & Wong, P. M., 2001- Anintegratedneural-fuzzy- genetic-algorithm using hyper-surface membership functions to predict permeability in petroleum reservoirs. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 14(1): 15-21.
- Jarrah, O. A. & Halawani, A., 2001- Recognition of gestures in Arabic sign language using neuro-fuzzy systems. *Artificial Intelligenc* 133: 117-138.
- Jiang, Y., Wu, Y., Groves, Ch., Yuan, D. & Kambesis, P., 2009- Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunan, China. *Journal of Contaminant Hydrology* 109: 49-61.
- Kadkhodaie-Ilkhchi, A. & Amini, A., 2009- A fuzzy logic approach to estimating hydraulic flow units from well log data, A case study from the Ahwaz oilfield, south Iran. *Journal of Petroleum Geology* 32(1): 67-78.
- Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Rezaee, M. R. & Rahimpour-Bonab, H., 2009a- A committee neural network for prediction of normalized oil content from well log data, An example from South Pars Gas Field, Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 65: 23-32.

- Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Rezaee, M. R., Rahimpour-Bonab, H. & Chehrazi, A., 2009b- Petrophysical data prediction from seismic attributes using committee inference system. *Computers & Geosciences* 35: 2314–2330.
- Karimpouli, S., Fathianpour, N. & Roohi, J., 2010- A new approach to improve neural networks algorithm in permeability prediction of petroleum reservoirs using supervised committee machine neural network (SCMNN). *Journal of Petroleum Science and Engineering* 73: 227-232.
- Kim, M. J., Nriagu, J. & Haack, S., 2000- Carbonate ions and Arsenic dissolution by groundwater. *Environ. Sci. Technol* 34: 3094-3100.
- Labani, M. M., Kadkhodaie-Ilkhchi, A. & Salahshoor, K., 2010- Estimation of NMR log parameters from conventional well log data using a committee machine with intelligent systems, A case study from the Iranian part of the South Pars gas field, Persian Gulf Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 72: 175-185.
- Larsen, P. M., 1980- Industrial applications of fuzzy logic control. *International Journal of Man-Machine Studies* 12: 3–10.
- Lim, J. S., 2005- Reservoir properties determination using fuzzy logic and neural networks from well data in offshore Korea. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 49: 182–192.
- Mahimairaja, S., Bolan, N. S., Adriano, D. C. & Robinson, B., 2005- Arsenic contamination and its risk management in complex environmental settings. *Advances in Agronomy, Elsevier Inc* 86: 1-82.
- 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(6): 669-678.
- Mamdani, E. H., 1977- Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis computers. *IEEE Transactions* 26(12): 1182–1191.
- Mosaferi, M., Yunesian, M., Dastgiri, S., Mesdaghinia, A. & Esmailnasab, N., 2008- Prevalence of skin lesions and exposure to Arsenic in drinking water in Iran. *Science of the Total Environment* 390: 69–76.
- Mulligan, C. N., Yong, R. N. & Gibbs, B. F., 2001- Remediation technologies for metal-contaminated soil and groundwater. an evaluation: *Engineering Geology* 60: 193-207.
- Nadiri, A. A., Asghari Moghaddam, A., Tsai, F. T. C. & Fijani, E., 2013a- Hydrogeochemical analysis for Tasuj plain aquifer, Iran. *Journal of Earth System Science: (in press)*. <http://www.ias.ac.in/jess/forthcoming/JESS-D-12-00119.pdf>.
- Nadiri, A. A., Chitsazan, N., Tsai, F. & Asghari Moghaddam, A., 2013b- Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation. *Journal Hydrological Engineering (in press)*. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29HE.1943-5584.0000824>.
- Nadiri, A. A., Sadeghi Aghdam, F., Asghari Moghaddam, A. & Asadi, S., 2013c- Arsenic Anomalies Occurrence in Water Resources of Sahand Dam of Hashtrud, Iran: ASCE Texas Section Fall Conference and Centennial Celebration.
- Naftaly, U., Intrator, N. & Horn, D., 1997- Optimal ensemble averaging of neural networks. *Computation in Neural Systems* 8: 283–296.
- Nickson, R. T., McArthur, J. M., Ravenscroft, P., Burgess, W. G. & Ahmed, K. M., 2000- Mechanism of arsenic release to groundwater, Bangladesh and West Bengal. *Applied Geochemis-try* 15(4): 403-413.
- Nikraves, M. & Aminzadeh, F., 2003- *Soft Computing and Intelligent Data Analysis in Oil Exploration. Part1: Introduction: Fundamentals of Soft Computing: Elsevier, Berkeley, USA.*
- Nriagu, J. O. & Pacyna, J. M., 1988- Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* 333: 134–1.
- Olatunji, S. O., Selamat, A. & Abdulaheem, A., 2011- Modeling the permeability of carbonate reservoir using type-2 fuzzy logic systems. *Computers in Industry* 62: 147–163.
- Oremland, R. S. & Stolz, J. F., 2003- *The ecology of Arsenic. Berlin. Heidelberg. Science* 300: 939–944.
- Pierce, M. L. & Moore, C. B., 1982- Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron oxyhydroxides. *Water Res* 16: 1247–1253.
- Sherene, T., 2010. Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment. *Biological Forum-An International Journal* 2(2): 112-121.
- Smedley, P. L. & Kinniburgh, D. G., 2002- A review of the source, behaviour and distribution of Arsenic in natural water. *Appl Geochem* 17(5): 517–568.
- Sugeno, M., 1985- *Industrial Application of Fuzzy Contro. Elsevier Science Pub. Co.,New York, USA.*
- Wang, S. & Mulligan, C., 2006- Occurrence of Arsenic contamination in Canada :Sources, behavior and distribution. *Science of the Total Environment* 366: 701-721.
- Waychunas, G. A., Rea, B. A., Fuller, C. C. & Davis, J. A., 1993- Surface chemistry of ferrihydrite, Part 1. EXAFS. *Studies of the geometry of coprecipitated and adsorbed arsenate: Geochim Cosmochim Acta* 57: 2251-2269.

Using Intelligence Committee Fuzzy Logic Model to Estimate Arsenic in Water Resources of Sahand Dam Basin

A. A. Nadiri ^{1*}, F. Sadeghi Aghdam ² & A. Asgharai Moghaddam ³

¹ Assistant Professor, Department of Geosciences, Faculty of Natural Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

² Ph. D. Student, Department of Geosciences, Faculty of Natural Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

³ Professor, Department of Geosciences, Faculty of Natural Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 2014 March 13

Accepted: 2015 June 10

Abstract

This study presents an intelligence committee fuzzy logic (ICFL) model to estimate the concentration of total arsenic (III, V) in the area of the Sahand Dam basin, Iran. Because of a high concentration of arsenic (III, V) compared to WHO standard, Geology Department of Tabriz University and East Azerbaijan Regional Water Authority have attempted to sampling and analyzing of surface water and groundwater resources in the mentioned area. Hydrochemical parameters including pH, SO_4^{2-} , NO_3^- -N, F⁻, Fe(II, III) and As used as input parameters for Mamdani fuzzy logic (MFL), Larsen fuzzy logic (LSL) and Sugeno fuzzy logic (SFL) to estimate arsenic concentrations. The results in train and test steps showed that all of these models have a similar fitting to the arsenic concentration data in the study area. The ICFL model was adopted to combine the output of the three single fuzzy models instead of the selecting superior single model. To reap advantage of all three models, the weighted combination of the output of fuzzy models used to create a committee fuzzy model. The mentioned model uses particles population algorithm, to obtain weight based on the output of the three fuzzy models to estimate the total arsenic concentration. The results of ICFL model shows, significant fitting improvement compare to individual fuzzy logic models.

Keywords: Arsenic, Sahand Dam, Sugeno fuzzy logic, Larsen fuzzy logic, Mamdani fuzzy logic, Intelligence committee fuzzy logic.

For Persian Version see pages 397 to 406

*Corresponding author: A. A. Nadiri; E-mail: Nadiri@tabrizu.ac.ir