

کاربرد روش ANFIS-FCM در اکتشاف معادن گچ شوره مطالعه موردی: معدن گچ شوره انار

حسینیه نظری^{۱*}، مژگان دهقانی^۲، فرنوش حاجی‌زاده^۳ و احمد عباس‌نژاد^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۴- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

نویسنده مسئول: nazarihosnie@yahoo.com*

دریافت: ۹۹/۶/۲

پذیرش: ۹۹/۷/۲۰

نوع مقاله: مطالعه موردی

چکیده

در نزدیکی معادن گچ در اثر انحلال املاح نمکی موجود در آب‌های زیرزمینی، مقدار EC افزایش پیدا می‌کند و نشانگر مفیدی جهت اکتشاف معادن گچ است اما به تنهایی در تشخیص این امر کافی نیست و باید عناصر دارای غلظت بالا و دخیل در افزایش EC مشخص گردند. هدف از این مطالعه بررسی کارآمدی روش $ANFIS-FCM$ در اکتشاف معادن گچ شوره با استفاده از تغییرات هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی است که به صورت موردی بر روی معدن گچ شوره انار آزموده شد. بدین منظور، ۲۱ نمونه آب از چاه‌های دشت برداشته و آنالیز شیمیایی نمونه‌ها در آزمایشگاه صورت گرفت. سپس داده‌های حاصل مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند و آماره‌های توصیفی داده‌ها و ماتریس همبستگی پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار $SPSS$ بدست آمد. با تشکیل ماتریس همبستگی داده‌ها، مشخص گردید که در نمونه‌های نزدیک معدن گچ شوره، سدیم، منیزیم، کلسیم، منگنز، سلنیوم و سرب نسبت به سایر عناصر موجود، بیش‌ترین همبستگی را با هدایت‌الکتریکی (EC) داشته و همین‌طور بیش‌ترین همبستگی بین پارامترهای ذکر شده به چشم می‌خورد. ورودی‌های مدل شامل ۶ عنصر مزبور و خروجی با توجه به هدف تحقیق، هدایت‌الکتریکی انتخاب شد. داده‌ها پس از استانداردسازی، وارد مدل شده و هدایت‌الکتریکی با استفاده از روش $ANFIS-FCM$ پیش‌بینی گردید. هدایت‌الکتریکی اندازه‌گیری شده مستقیماً برای مقایسه با هدایت‌الکتریکی حاصل از روش هوشمند به کار رفت. بر اساس نتایج حاصل از این مدل، هدایت‌الکتریکی نمونه‌های آب زیرزمینی تخمین زده شده در محدوده مورد بررسی از دقت بسیار خوب و همبستگی بالایی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برخوردار بوده است. در نتیجه روش هوشمند $ANFIS-FCM$ روشی موثر در تشخیص معدن گچ شوره است. در صورت کاربرد این روش در آب‌های زیرزمینی اطراف معادن گچ شوره دیگر در ایران و مشاهده وضعیت مشابه، کارآمدی آن در تشخیص معادن گچ شوره تایید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: هدایت‌الکتریکی، روش $ANFIS-FCM$ ، آب زیرزمینی، دشت انار

۱- پیشگفتار

ساختمان‌سازی است. علت این امر را می‌توان علاوه بر خواص ویژه گچ، ارزان و در دسترس بودن آن دانست. گچ بر حسب روش تولید آن در صنایع مختلفی از جمله سرامیک‌سازی، شیشه‌سازی، کشاورزی، پزشکی، کاغذسازی، پتروشیمی، چرم‌سازی و غیره کاربرد دارد در حالی که ۷۵ درصد استفاده از آن در صنایع ساختمانی برای اندود گچ و خاک، سفیدکاری، تهیه ملات و گچ بری‌های تزئینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادن سنگ گچ تقریباً در تمام ایران وجود دارند. بسیاری از معادن گچ ایران از نوع گچ شوره بوده و در محیط تبخیری همزمان با نمک طعام رسوب‌گذاری کرده‌اند که اکثراً در سازندهای تبخیری الیگو-میوسن به چشم می‌خورند.

آب‌های زیرزمینی می‌توانند خود عامل کانسارسازی باشند و یا به علت مجاورت با محدوده‌های کانسارسازی، غلظت بالایی از عناصر یا ترکیبات خاصی را در خود داشته باشند. هر دو مکانیسم فوق باعث می‌شوند که شیمی آب‌های زیرزمینی در ارزیابی پتانسیل وجود معادن، نوع و موقعیت آن‌ها مورد استفاده قرار گیرند. در برخی موارد آنالیزهایی از آب‌های زیرزمینی یک منطقه در دست است که مستقیماً عنصر و ترکیب مورد نظر برای اکتشاف کانسار را در بر ندارد اما دارای عناصر و پارامترهای دیگری است که می‌توانند در تشخیص آن کانسار موثر واقع گردند. گچ یکی از مصالح پرکاربرد در

آب زیرزمینی در پایین‌دست گردد. با مطالعه‌ی تغییرات پارامترهای آب زیرزمینی از جمله *EC* در اطراف مناطق مستعد می‌توان کانسارهای گچ را اکتشاف نمود.

هدایت‌الکتریکی آب با دستگاهی به نام هدایت‌سنج اندازه‌گیری و براساس واحد میکروموس بر سانتی‌متر گزارش می‌گردد. با اندازه‌گیری هدایت‌الکتریکی می‌توان به کیفیت آب و طبقه‌بندی آن پی برد. هدایت‌الکتریکی و کل املاح محلول (*TDS*) رابطه مستقیم دارند، به طوری که با افزایش *TDS*، هدایت‌الکتریکی افزایش می‌یابد. (حجت و رنجبر، ۱۳۹۰). بنابراین در صورت عدم اندازه‌گیری مستقیم *EC* آب‌ها، امکان استفاده از رابطه‌ی آن با *TDS* وجود دارد. از آنجا که *TDS* حاصل کل کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول در آب است، با داشتن غلظت غالب‌ترین یون‌ها می‌توان به محاسبه‌ی این پارامتر و در نتیجه محاسبه‌ی هدایت‌الکتریکی پرداخت.

روش‌های سنتی در تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی، علاوه بر توانمندی محدود، هزینه و زمان زیادی را می‌طلبند. بشر در سال‌های اخیر به سمت استفاده از روش‌هایی پیشرفته‌ای رفته که با صرف هزینه و زمان کمتر بیشترین نتیجه را به دست دهند. علوم زمین جزء علوم است که فاکتورهای بسیار زیادی در شکل‌گیری نتایج آن دخیل می‌باشد. بنابراین به جای تلاش برای احاطه بر همه‌ی فاکتورهای دخیل، ایجاد یک مدل مناسب که به طور کلی بیانگر حالات و روابط بین این فاکتورها باشد، نیاز ما را در تجزیه و تحلیل و چگونگی تغییرات هیدروژئوشیمیایی برطرف می‌سازد. از این رو، مدل‌سازی در علوم زمین اهمیت ویژه‌ای پیدا نموده است. از طرفی به دلیل مشکلات و محدودیت‌های نمونه‌برداری در علوم زمین، روش‌های سنتی مدل‌سازی که نیاز به تعداد داده بالایی دارند، کارایی کمتری دارند. ذکر این نکته ضروری است که مدل‌سازی، به عنوان روش کمکی در هر علمی به کار گرفته می‌شود و لازم است در کنار مطالعه و تحقیقات دیگر به کار رود و در نهایت نظر کارشناسی است که نتیجه‌ی قطعی را مشخص می‌سازد و روش مدل‌سازی با روش‌های هوشمند نیز از این قاعده مستثنی نیست. ارتباط ورودی‌های مختلف با خروجی‌ها، تعداد و سایر پارامترهای دیگر در هر مرحله باید توسط کارشناس بررسی گردد. به طور کلی لازم است به این روش مانند سایر روش‌ها، به شکل یک ابزار نگریسته شود و میزان

اکتشاف معادن به روش‌های مختلفی از جمله روش‌های ژئوفیزیکی، حفاری سطحی، گمانه‌های زیرسطحی، سنجش از دور و روش هیدروژئوشیمیایی صورت می‌گیرد. از آنجا که گچ قیمت پایینی دارد استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری‌های سطحی و گمانه‌زنی در پی‌جویی آن مقرون به صرفه نیست. هم‌چنین به دلیل نبود سیستم جامع و به روز اطلاعات کالک معادن، گاه‌ها روش‌های دورسنجی منجر به اکتشاف معادنی می‌گردند که از قبل کشف شده‌اند و یا کار شده و به صورت متروکه باقی گذاشته شده‌اند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۴) و تنها استفاده از روش‌های سنجش از دور و هیدروژئوشیمیایی می‌تواند در این زمینه موثر باشد که این مقاله بر روی روش هیدروژئوشیمیایی متمرکز است.

حضور معادن گچ شوره باعث بالا رفتن املاح و به تبع آن افزایش *EC* در آب‌های زیرزمینی اطراف می‌شوند. بدیهی است که افزایش *EC* به تنهایی نمی‌تواند دال بر وجود معدن گچ باشد. زیرا تبخیر و حضور گچ سیمانی نیز موجب افزایش شوری و *EC* آب‌های زیرزمینی می‌گردد. لذا این سوال مطرح می‌شود که بالا بودن *EC* آب‌های زیرزمینی در همبستگی با چه عناصری می‌تواند به تعیین معادن گچ شوره پنهان کمک کند. قابلیت هدایت‌الکتریکی سنگ‌ها با افزایش کلریدها - سولفات‌ها و سایر نمک‌های محلول و نیز آب موجود در آن افزایش می‌یابد (حجت و رنجبر، ۱۳۹۰). در سال‌های اخیر، تعداد مطالعاتی که از شیمی آب زیرزمینی برای اکتشاف معادن استفاده کرده‌اند تا حد قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده است. بیش‌تر این مطالعات از آب زیرزمینی برای تشخیص موقعیت نهشته‌های پنهان در زیر آبرفت‌ها در مناطق با توپوگرافی آرام استفاده کرده‌اند. کاربرد ارزشمند دیگری که کمتر مورد توجه قرار گرفته، استفاده از شیمی‌آب زیرزمینی برای یافتن نهشته‌های پنهان در رشته‌کوه‌ها است (آندریو و جین، ۲۰۲۰). ایران دومین کشور دارای ذخایر گچ در دنیا می‌باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۰۸) و این امر بررسی‌های شیمی‌آب زیرزمینی در نزدیکی این معادن را ضروری می‌گرداند. هم‌چنین معدنکاری انحلالی که به طور معمول در استخراج معادن نمک استفاده می‌شود، می‌تواند منجر به نشت شورابه‌ها به آب زیرزمینی گردد (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۸). بارندگی نیز می‌تواند موجب انحلال کانی‌های ژپیس و نمک و تاثیر بر

شده است. براساس نتایج، با وجود مقادیر هدایت‌الکتریکی تخمینی کاملاً متفاوت از طریق دو مدل شبکه عصبی و منطق فازی، این دو مدل اهمیت یکسانی را نشان دادند. موسوی و همکاران (۲۰۱۳) کارایی چهار مدل شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج فازی و سیستم فازی تلفیقی با شبکه موجک را جهت پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی دشت خراسان رضوی با استفاده از پارامترهای بارش، تبخیر و دما در طی محدوده زمانی ۱۹۹۲-۲۰۰۷ مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده که شبکه عصبی مصنوعی از عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. امامقلی‌زاده و همکاران (۲۰۱۴) سطح آب زیرزمینی دشت بسطام (ایران) را توسط شبکه عصبی مصنوعی (ANFIS) و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) پیش‌بینی کردند. هم‌چنین، دهقانی و همکاران (۱۳۹۵) میزان سختی آب زیرزمینی دشت مازندران، را با استفاده از برنامه‌ریزی ژن مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن را با سایر روش‌های هوشمند همچون شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که مدل برنامه‌ریزی بیان ژن توانایی بالایی در تخمین برخی مقادیر بیشینه و میانی میزان سختی آب زیرزمینی دارد. سعیدی رضوی و عرب (۱۳۹۷) سطح آب زیرزمینی را با استفاده از مدل‌های منطق فازی، شبکه عصبی و سری زمانی پیش‌بینی کرده است. نتایج نشان دادند که مدل منطق فازی با بیش‌ترین ضریب همبستگی، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا به عنوان بهترین مدل برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی عمل می‌کند. هم‌چنین دولتی کردستانی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) به پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت گارو پرداخته‌اند. در این مطالعه کارایی روش همبستگی آماری و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی در یافتن نهشته‌های پنهان گچ به کمک یون‌های دارای همبستگی بالا با هدایت‌الکتریکی، در اطراف معدن گچ شوره انار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

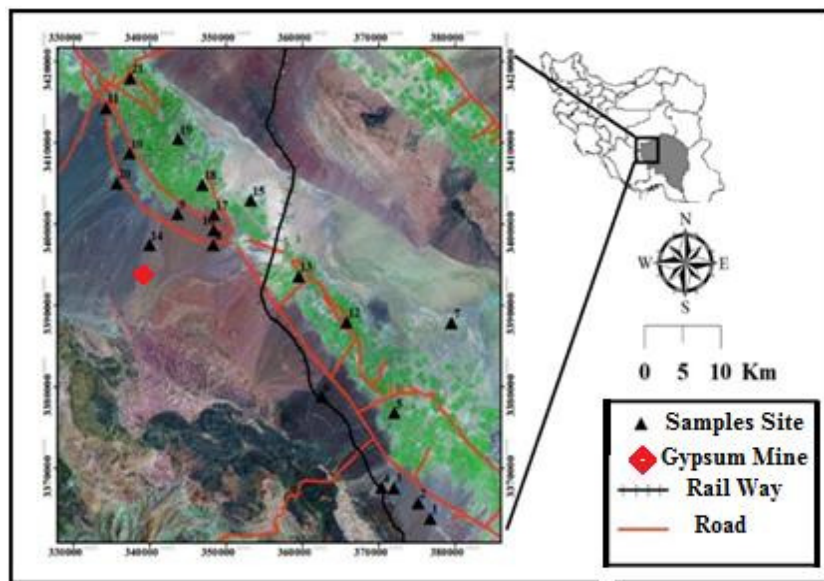
دشت انار با مساحت تقریبی ۳۵۰۰ کیلومتر مربع در حوضه آبریز کویری در انجیر قرار دارد که بخش غربی آن

کارایی آن به چگونگی به کارگیری آن بستگی دارد. به طور کلی در مسائلی که تعداد داده‌های نمونه مناسبی در دسترس می‌باشد، با انتخاب ورودی و خروجی‌های مناسب برای آموزش مدل، در محدوده‌ی نمونه‌ها، می‌توان به مدل‌سازی محدوده‌ی مورد نظر پرداخت. البته روش‌های هوشمند به طور کلی برای مسائل مختلف با یکدیگر ترکیب می‌گردند و با مقایسه‌ی نتایج آن می‌توان روش بهینه را انتخاب نمود. روش‌های هوشمند در علوم مختلف با هدف‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

پژوهش‌های متعددی در زمینه آب‌های زیرزمینی با استفاده از روش‌های هوشمند انجام شده است که از آن میان می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود: لو و لو (۲۰۰۲) کیفیت آب مخزن را با استفاده از نقشه‌های خود سازمانده و تئوری فازی بررسی کردند. در پژوهش مشابه، هاسب و ناگایاما (۲۰۰۲) بهره‌برداری از مخزن را با استفاده از سیستم‌های فازی و شبکه عصبی مورد مطالعه قرار دادند. در پژوهشی دیگر، نایاک و همکاران (۲۰۰۴) از ANFIS برای مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و نیز توتمز و همکاران (۲۰۰۶) برای مدل‌سازی هدایت الکتریکی آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. از سوی دیگر، اکبرزاده و همکاران (۲۰۰۴) هدایت‌الکتریکی را با استفاده از ANFIS پیش‌بینی کردند. نتایج حاکی از آن بود که روش ANFIS به اندازه کافی برای پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی موثر است. بیکی حسن‌آباد و رستمی (۱۳۹۶) یک ایده جدید جهت تعیین موقعیت و مقدار نشت‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب با استفاده از ANFIS معرفی شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که این روش بدون حساسیت به موقعیت، مقدار و تعداد نشت‌های موجود در شبکه واقعی در صورت آموزش صحیح و انتخاب مناسب گره‌های فشارسنجی، گره‌های نشت‌دار به همراه مقدار نشت را با دقت بالایی شناسایی می‌کند. بانرجی و همکاران (۲۰۱۱) از مدل شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک جایگزین بالقوه برای پیش‌بینی شوری آب‌های زیرزمینی استفاده کردند، تحقیقات نشان داده‌اند که این مدل از توانایی بالایی برای پیش‌بینی برخوردار است. ندیری و همکاران (۲۰۱۴) طی پژوهشی از ۳ روش هوشمند منطق فازی تاکاگی- سوگنو، شبکه‌های عصبی مصنوعی و عصبی - فازی برای تخمین هدایت‌الکتریکی آبخوان تسوج- آذربایجان شرقی استفاده

می‌باشد. ارتفاعات دهج- ساردوئیه در جنوب این دشت واقع شده و رودخانه‌ها با جهت جنوب به شمال به سمت دشت ادامه می‌یابند.

در حوضه آبریز مرکزی ایران و حوضه فرعی یزد- اردستان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه از نظر جغرافیایی در محدوده‌ای به طول $۱۰^{\circ}۵۵'$ تا ۵۶° شرقی و عرض ۳۰° تا $۳۰^{\circ}۵۸'$ شمالی واقع شده است. ارتفاع متوسط این دشت تقریباً ۱۴۰۰ متر از سطح دریا



شکل ۱. موقعیت منطقه و محل نمونه‌ها

۱-۲- منابع تغذیه و شیب آب زیرزمینی دشت انار به طور کلی از منابع تغذیه آب زیرزمینی در این منطقه موارد زیر را می‌توان ذکر نمود:

۱- راس مخروط‌افکنه‌ها: مخروط‌افکنه‌های جنوب دشت به دلیل برخورداری از دانه‌بندی درشت و گرا دیان هیدرولیکی بالا به عنوان منبع اصلی تغذیه عمل می‌کنند و بخشی از بارش صورت گرفته در کوهستان سرچشمه را به سمت این دشت هدایت می‌کنند.

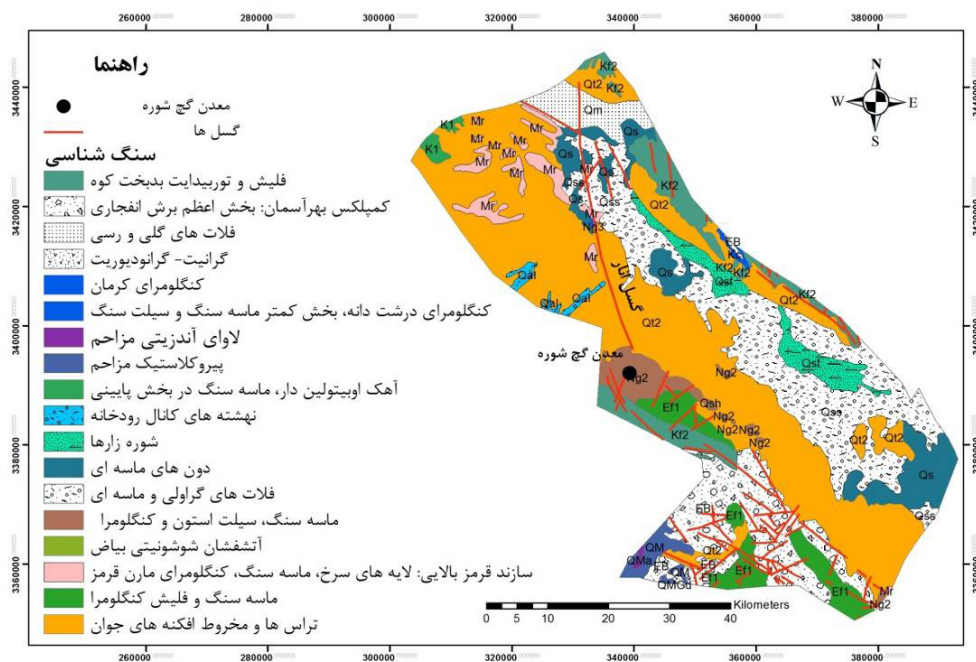
۲- جریان خروجی دشت کبوترخان- رفسنجان: با توجه به نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی متوجه می‌شویم که این جریان از منابع مهم تغذیه دشت انار می‌باشد.

۳- سیستم‌های درز و گسلی موجود در منطقه: با نگاهی به نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (شکل ۲) می‌توان دید که در کوه‌های جنوبی دشت، سیستم‌های گسلی متعددی با جهت شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و شمال‌شرقی- جنوب‌غربی، گسترش دارند و احتمال اینکه ادامه این گسل‌ها در زیر رسوبات آبرفتی مدفون باشد وجود دارد که در این صورت می‌توانند یکی از منابع

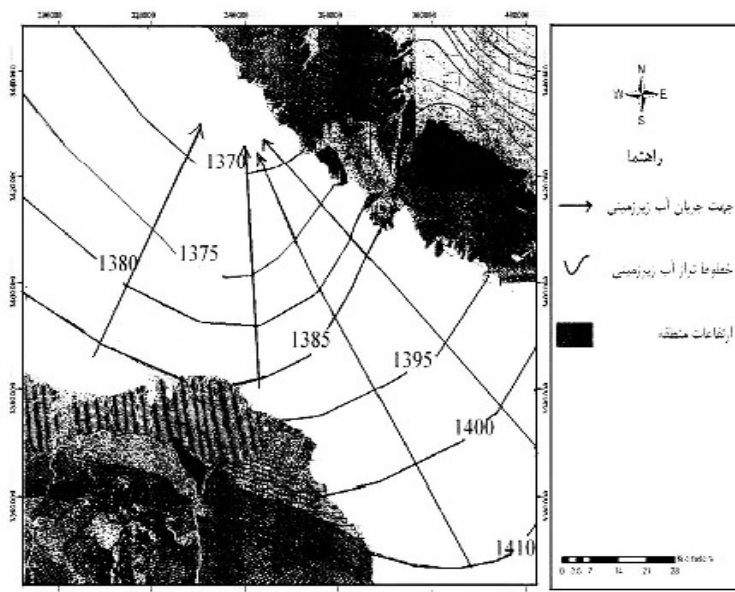
دشت انار به عنوان یکی از بخش‌های دشت رفسنجان، به ایران مرکزی تعلق دارد (نبوی، ۱۳۵۵). کوه‌های جنوب دشت که به طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی تشکیل شده‌اند، قسمتی از زون آتشفشانی معروف ایران مرکزی می‌باشند که به نام‌های زون سهند بزمان و زون ارومیه- دختر نامیده شده است. این زون کمان ماگمایی نوع آندی نامیده شده و طول آن ۱۷۰۰ کیلومتر است (شیخ الاسلامی و همکاران، ۱۳۹۲). کمر بند ولکانیکی ارومیه- دختر نتیجه فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی بوده و یک قوس فعال حاشیه قاره‌ای را می‌سازد (سنگور، ۱۹۹۰). بخشی از این کمر بند که در کرمان واقع شده به نام کمر بند دهج- ساردوئیه معروف است (بهرام‌پور، ۱۳۸۶؛ گلستانی و همکاران، ۱۳۹۴). قدیمی‌ترین سنگ‌های این کمر بند شامل فلیش‌های کرتاسه فوقانی است که در طول حاشیه شمال‌شرقی کمر بند مورد نظر (انار- کوه کله گاو) قرار دارند و جوان‌ترین سنگ‌های آن نیز شامل جریانات الیوین بازالت، لوسیت و نفلینیت مربوط به پلیوسن- کواترنری می‌باشد (صدیقیان، ۱۳۸۷).

بارش‌های سنگین می‌تواند در تغذیه منطقه مورد مطالعه نقش داشته باشند. جهت کلی جریان آب زیرزمینی در دشت انار از جنوب‌شرق به سمت شمال‌غرب می‌باشد (شکل ۳)؛ جریان ورودی دشت انار از سمت شرق وارد دشت شده و در غرب بیاض با جریان ورودی از سمت جنوب‌شرق یکی می‌گردد. در نتیجه بخش جنوب و جنوب‌شرق دشت انار منطقه تغذیه محسوب می‌شود.

تغذیه دشت به حساب آیند. مطالعات معافی (۱۳۸۵) حاکی از آن است که وجود گسل‌ها و فاصله آن‌ها نقش بسزایی در نوسانات سطح آب ایفا می‌کند. جریان‌های سطحی: جریان‌های سطحی متعددی در محدوده دشت وجود دارند که در برخی از فصول سال جاری هستند و مطمئناً دشت در فصول پرباران از تغذیه آن‌ها بهره می‌برد. هم‌چنین جریان‌های سیلابی نیز پس از



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه



شکل ۳. نقشه کلی تراز آب زیرزمینی دشت انار (مهندسین مشاور کاوآب، ۱۳۸۱)

۳- نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌برداری طی چهار روز در اوایل اردیبهشت ماه ۱۳۹۶ از ۲۱ حلقه چاه بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد ارائه شده صورت گرفت (هانسلو، ۱۹۹۵). در محل نمونه‌برداری دما و pH نمونه‌ها و هم‌چنین موقعیت جغرافیایی محل نمونه‌برداری با GPS اندازه‌گیری و ثبت گردید. نمونه‌ها توسط آزمایشگاه مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی ماهان تجزیه گردیدند. آنیون‌ها با استفاده از روش کروماتوگرافی یونی (IC) و کاتیون‌های اصلی و فلزات سنگین با روش جذب اتمی^۱ تجزیه شدند.

۴- تجزیه و تحلیل روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی ($ANFIS$)

تلفیق منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی منجر به ایجاد سامانه عصبی فازی می‌شود که دارای مزیت‌های هر دو سامانه فازی و شبکه عصبی مصنوعی است (سربینواسان و فیشر، ۱۹۹۵؛ جانگ و همکاران، ۱۹۹۷). به عبارت دیگر یک سامانه عصبی فازی یک سامانه فازی است که برای تعیین پارامترهای خود (مجموعه‌ها و قوانین فازی) از نمونه آموزشی پردازش شده از الگوریتم آموزش که به وسیله تئوری شبکه عصبی مصنوعی مشتق شده و یا الهام گرفته شده، استفاده می‌کند. عملکرد شبکه‌های عصبی، به طور مستقیم با تعداد و کمیت داده‌های آموزشی در ارتباط است (کوسکو، ۱۹۹۲)، بنابراین زمانی که تعداد داده‌های آموزشی کم باشد، نتایج شبکه‌های عصبی مصنوعی چندان قابل اعتماد نیست. در چنین مواردی ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی باعث بهبود عملکرد سامانه شبکه عصبی مصنوعی و نتایج قابل قبول می‌شود (ناوا و تایلور، ۱۹۹۶). سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی^۲ که توسط جانگ (۱۹۹۳) معرفی شد، یک سامانه استنتاج فازی است که پارامترهای تابع عضویت آن به روش پس انتشار^۳ به تنهایی و یا همراه با روش کمترین مربعات^۴ تعدیل می‌شود (راهنمای متلب، ۲۰۰۶). در این پژوهش یک مدل انفیس برای شناسایی توابع عضویت بکار رفته است که عبارت است از: روش فازی C - میانگین که در ادامه به توضیح اجمالی این مدل می‌پردازیم.

۴-۱- فازی C - میانگین^۵

روش فازی C - میانگین یک الگوریتم خوشه‌بندی داده است که توسط بزدریک ارائه شده است (بزداک، ۱۹۷۳) و در آن هر داده متعلق به یک خوشه با درجه مشخص شده توسط درجه عضویت می‌باشد. روش فازی C - میانگین، پارتیشن‌بندی مجموعه‌ای از n بردار، در گروه‌های فازی C است و مرکز خوشه در هر گروه را می‌یابد، به طوری که اندازه‌گیری متفاوت تابع هزینه به حداقل برسد. در ابتدا مراحل الگوریتم روش فازی C - میانگین مختصر شرح داده شده است. در ابتدا، مراکز خوشه به طور تصادفی از n نقطه انتخاب می‌شوند. پس از آن ماتریس عضویت U با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{d_{ij}}{d_{kj}}\right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (1)$$

که در آن $d_{ij} = \|c_i - x_j\|$ ، فاصله اقلیدسی بین مرکز خوشه i ام و j ام نقطه داده است، و m شاخص فازی است. تابع هزینه با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود که اگر زیر یک آستانه مشخصی باشد این فرایند متوقف می‌شود.

$$J(U, c_1, \dots, c_2) = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m d_{ij}^2 \quad (2)$$

در مرحله آخر، مراکز خوشه‌های فازی جدید c_i ، $i = 1, 2, \dots, C$ با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m x_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}^m} \quad (3)$$

۵- نتایج و بحث

در جدول ۱ پارامترهای آماری کاتیون و آنیون‌های اصلی، pH و فلزات سنگین ($As, Cu, Pb, Zn, Ni, Se, Zn$)، EC و فلزات سنگین (Mo, Cr, Fe, Cd, Mn) در نمونه‌های آب ارائه شده است. EC در نمونه‌های منطقه مورد مطالعه بین ۱۰۱۰ در منطقه تغذیه دشت (جنوب و جنوب شرق) (شکل ۳) و $32460 \mu s/cm$ در نزدیکی معدن گچ شوره تغییر می‌کند. از آنجا که کوه‌های جنوب و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه (به شکل ۱ رجوع شود)، بارش زیادی را دریافت

¹ Atomic Absorption Spectrometry

² Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

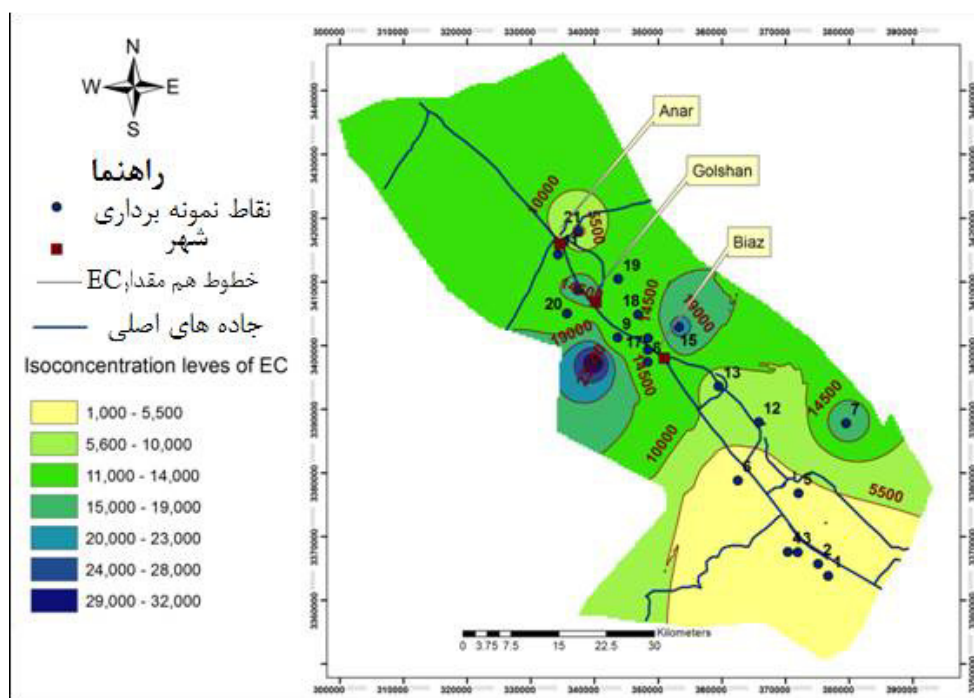
³ backpropagation

⁴ least squares

⁵ Fuzzy C-means Method (FCM)

زمین‌شناسی نیز قابل مشاهده است. EC با سدیم، کلسیم، منگنز، منیزیم، سرب و سلنیوم همبستگی مثبت نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۲، ارتباط شدید بین EC و سدیم ($p < 0/01$ ، $r = 0/957$) نشان‌دهنده نقش کلیدی سدیم در افزایش EC می‌باشد.

می‌کنند، آب حاصل از بارش چه به صورت سطحی و چه به صورت نفوذی در جهت شیب حرکت کرده و در مسیر خود به معدن گچ شوره می‌رسد که در افزایش EC در حوالی معدن نقش دارد. با توجه به نقشه هم‌مقدار هدایت الکتریکی (شکل ۴) میزان این پارامتر در نمونه ۷ و ۱۵ نیز نسبتاً بالاست که موقعیت این نمونه‌ها در نزدیکی پلایاها و شوره‌زارها واقع گردیده است که بر روی نقشه



شکل ۴. نقشه هم مقدار EC

وجود کانی‌های سولفیدی کمپلکس بحرآسمان و معادن مس و تمرکز گسل‌های واقع در این بخش مربوط می‌شود که عامل انتقال آب زیرزمینی می‌باشند. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که وجود گسل‌ها و فاصله آن‌ها نقش بسزایی در نوسانات سطح آب ایفا می‌کند. هم‌چنین وجود گسل‌ها می‌تواند سطح تماس سولفیدهای این بخش را با آب افزایش داده و موجب کاهش pH گردد (معافی، ۱۳۸۵).

pH پایین نمونه ۷، به دلیل اکسیداسیون سنگ‌های آتشفشانی حاوی کانی‌های سولفیدی بدبخت‌کوه می‌باشد. هم‌چنین pH آب‌های بخش انتهایی دشت به دلیل اشباع شدن محل‌های جذب خاک‌ها و آزادسازی H^+ کاهش یافته (سیگل، ۲۰۰۲) و این عامل باعث تحرک بعضی از فلزات سنگین در بخش انتهایی دشت گردیده است. از آنجا که بخش اعظم سنگ بستر دشت انار از مارن‌های

تغییرات pH در نمونه‌های آب بین ۶ تا ۸/۲ است. میانگین pH در منطقه ۶/۸ می‌باشد که بیانگر pH کمی اسیدی آب در منطقه است کمترین میزان pH مربوط به نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۰ است (شکل ۴). پایین بودن pH در نمونه‌های ۲۰ و ۱۴ (شکل ۴) واقع در غرب دشت احتمال دارد به شرایط هیدروترمالی حاکم بر این بخش مربوط باشد. بالا بودن دمای نمونه‌های واقع در این بخش از دشت، بالا بودن غلظت برخی از عناصر مثل آرسنیک، سرب، کادمیوم، منگنز و سلنیوم در نمونه‌های این بخش از منطقه که در ادامه به آن پرداخته می‌شود و هم‌چنین امتداد یافتن گسل انار تا حوالی این بخش از منطقه دلایلی بر وجود شرایط هیدروترمال است (شکل ۲) (دهقانی و عباس‌نژاد، ۲۰۱۰؛ عباس‌نژاد، ۲۰۱۰؛ دهقانی و عباس‌نژاد، ۲۰۱۰). pH اسیدی در نمونه‌های جنوب دشت (۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) (شکل‌های ۱ و ۴) به

گچ شوره واقع شده است. علت افزایش Na در نمونه‌های ۷ و ۱۵ مجاورت با نهشته‌های نمکی است. نسبت $Na/Na+Cl$ در همه نمونه‌ها کمتر از ۰/۵ است که نشان می‌دهد منبع سدیم نمی‌تواند هالیت - آلبیت یا تبادل یونی باشد (هانسلو، ۱۹۹۵).

گچ‌دار می‌وسن تشکیل شده‌اند که انحلال آن‌ها می‌تواند عامل pH خنثی باشد (باقرزاده، ۱۳۸۷).

غلظت Na بین ۱۶۲ تا ۵۲۷۹ mg/L متغیر است. سدیم با منگنز، سلنیوم، EC ، کلسیم ارتباط مثبت و با فلوراید رابطه منفی دارد (جدول ۲). بالاترین مقدار Na مربوط به نمونه ۱۴ است (شکل‌های ۱ و ۴) که در مجاورت معدن

جدول ۱. پارامترهای آماری داده‌های خام (۲۰۱۷)

	unit	Min	Max	Mean	Std. Deviation
Na	mg/L	۱۶۲	۵۲۷۹	۱۴۲۳/۳	۱۲۹۶/۸
K	mg/L	۵	۴۷	۲۲/۴	۱۰/۱
Ca	mg/L	۳۰/۴۰	۱۷۸۰	۶۳۶/۳	۵۰۳/۳
Mg	mg/L	۱۷/۳	۵۰۸/۸	۱۱۶/۸	۱۰۶/۲
HCO_3	mg/L	۴۸/۸	۶۱۹/۵	۱۶۹/۶	۱۱۳/۹
Cl	mg/L	۸۶	۶۷۰۳	۳۰۳۹/۵	۱۹۷۳/۹
SO_4	mg/L	۹۳	۱۳۸۳	۵۷۲/۴	۳۷۷/۸
NO_3	mg/L	۱۲	۹۷	۲۵/۲	۱۹/۹
F	mg/L	۰/۱۵	۱/۱	۰/۳۷	۰/۳
Mn	$\mu g/L$	۳/۷۵	۳۵۰	۳۶۰	۸۵/۳
As	$\mu g/L$	۷/۵	۹۶	۱۱۸/۳	۲۱/۴
Fe	$\mu g/L$	۶۰	۲۲۹۸	۲۲۶/۲	۴۸۸/۷
Cu	$\mu g/L$	۱	۱۳/۶۷	۳/۰	۳/۱
Pb	$\mu g/L$	۱	۲۰/۳۰	۱۱/۷	۵/۵
Mo	$\mu g/L$	۴/۲	۲۷/۰	۹/۴	۵/۱
Ni	$\mu g/L$	۱	۳	۱/۱	۰/۴
Se	$\mu g/L$	۱/۵۰	۴۰	۷/۵	۱۱/۱
Cr	$\mu g/L$	۳	۱۰	۴/۰	۱/۸
Cd	$\mu g/L$	۰/۰۵	۲/۶۳	۰/۳	۰/۵
Zn	$\mu g/L$	۱۱/۹۶	۹۴/۲۴	۲۵/۲	۱۸/۰
EC	$\mu s/cm$	۱۰۱۰	۳۲۴۶۰	۱۰۲۸۳/۸	۷۷۰۴/۴
pH		۶	۸/۲	۶/۸	۰/۵۶

جدول ۳. مقایسه بین نتایج حاصل از مدل $ANFIS-FCM$ برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون

مجموعه داده		R^2	$RMSE$
EC ($ANFIS-FCM$)	آموزش	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۶
	آزمون	۰/۹۹۹۱	۰/۰۱

دارد (جدول ۲). بالاترین مقدار کلسیم مربوط به نمونه ۱۴ (۱۷۸۰) با کمترین میزان pH است. از طرفی قرارگیری این نمونه در مجاورت معدن گچ شوره (شکل ۲) و تپه‌های کنگلومرای ماسه‌ای در جنوب این نقطه می‌تواند از علل افزایش کلسیم به شمار آیند.

کلسیم نیز بین $30/4 mg/L$ تا $1780 mg/L$ تغییر می‌کند که میانگین آن $636/27 mg/L$ می‌باشد. منشأ کلسیم در آب‌های زیرزمینی منطقه طبیعی است. Ca با منگنز، سرب، سلنیوم، EC ، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلراید و نیترات همبستگی مثبت و با فلوراید رابطه منفی

فسیلی نیز آزاد می‌گردد. این عنصر ممکن است از طریق کودهای فسفات و قارچ‌کش‌ها و آفت‌کش‌های محتوی سلیوم وارد محیط شود (دوریل و همکاران، ۱۹۹۴).

۵-۱- پیش‌بینی هدایت الکتریکی با استفاده از مدل *ANFIS-FCM*

بعد از پیش‌پردازش داده‌ها، همبستگی بین عناصر، با استفاده از ماتریس همبستگی که در نرم‌افزار *SPSS* و به روش پیرسن^۱، تهیه گردید، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به هدف مطالعه که پیش‌بینی هدایت الکتریکی می‌باشد، عناصری که دارای بیش‌ترین همبستگی با هدایت الکتریکی می‌باشند را به عنوان ورودی مدل مورد نظر انتخاب شد. با توجه به ماتریس همبستگی مشخص گردید که عناصر سرب، سلیوم، منگنز، منیزیم و کلسیم و سدیم نسبت به سایر عناصر موجود، بیش‌ترین همبستگی را با هدایت الکتریکی دارند. بنابراین، شش عنصر ذکر شده به عنوان ورودی و هدایت الکتریکی به عنوان خروجی مدل، انتخاب گردیدند. بخشی از ماتریس همبستگی بین عناصر در جدول ۲ آورده شده است. تعداد کل داده‌ها ۲۱ مورد بود که از این تعداد به طور تصادفی، ۷۰ درصد داده‌ها (۱۵ داده) به عنوان داده‌های آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها (۶ داده) به عنوان داده‌های آزمون انتخاب گردیدند.

۵-۱-۱- استانداردهای داده‌ها و شاخص‌های آماری جهت ارزیابی عملکرد مدل

برای مدل‌سازی و ورود داده‌ها به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، لازم است که دامنه تغییرات داده‌ها مشابه یکدیگر باشد که در اصطلاح این عمل را، استانداردهای داده‌ها می‌نامند. استانداردهای داده‌ها برای ورود به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی توسط رابطه (۴) انجام گرفت که دامنه ورودی‌ها را در بازه (۱،۱-) قرار می‌دهد.

$$p_n = 2 \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} - 1 \quad (4)$$

که در آن: p_n : پارامتر استاندارد شده؛ p : پارامتر حقیقی؛ p_{max} : بیشینه پارامتر حقیقی و p_{min} : کمینه پارامتر حقیقی می‌باشند.

Mg بین $17/3$ تا $508/8$ mg/L تغییر می‌کند. Mg با EC ، کلسیم، کلراید، سولفات، نیترات همبستگی مثبت و با فلوراید ارتباط منفی دارد. Mg از منطقه تغذیه به سمت انتهای دشت روند افزایشی نشان می‌دهد که به وجود سنگ کف گچی و مارنی میوسن مربوط است. نسبت $Mg/Ca+Mg$ در همه نمونه‌ها بیشتر از $0/5$ است که به عنوان عامل نشان‌دهنده انحلال دولومیت و رسوب‌گذاری کلسیت اعلام شده است (هانسلو، ۱۹۹۵).

نسبت Na/Cl را می‌توان برای منشأیابی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار داد. در صورتی که این نسبت کمتر از یک باشد از انحلال هالیت ناشی می‌شود. بیش از یک از تبخیر و فعالیت انسان زاد و یا بازگشت آب آبیاری است. در $90/48$ درصد از نمونه‌ها این نسبت کمتر از یک بوده و حاکی از انحلال هالیت است (قلیب، ۲۰۱۷؛ کاظمی آذر، ۲۰۰۶) در نمونه‌های ۶ و ۱۴ یعنی کمتر از ۱۰ درصد از نمونه‌ها این نسبت بیش از یک است (شکل ۵). این دو نمونه در پایین دست معدن گچ شوره (شکل ۲) و در مجاورت تشکیلات کنگلومرای و سیلتی قرار گرفته‌اند که ممکن است این نسبت ناشی از کانسار باشد.

نسبت Cl/HCO_3 نیز بین $0/503$ در نمونه ۶ با کمترین میزان کلراید تا $108/6$ در نمونه ۷ با بیش‌ترین میزان کلراید، متغیر است. اگر این نسبت بالاتر از یک باشد بیانگر انحلال سازند تبخیری است (قلیب، ۲۰۱۷؛ کاظمی آذر، ۲۰۰۶) که ناشی از سنگ کف گچی و مارنی سفره آب زیرزمینی می‌باشد (باقرزاده، ۱۳۸۷).

وجود منگنز در آب‌های طبیعی به وسیله پارامترهای کلیدی مثل دما، فشار، pH ، شوری و ترکیبات آلی محلول کنترل می‌گردد (تود و مایز، ۲۰۰۵). بیش‌ترین مقدار منگنز مربوط به نمونه ۱۴ می‌باشد. pH پایین و دمای بالا و شوری بالا این نمونه عامل بالا رفتن غلظت منگنز می‌باشد. غلظت سلیوم بین $1/5$ تا $40/L$ μg متغیر است. سلیوم با سدیم، منگنز و EC ارتباط مثبت قوی نشان می‌دهد. نمونه ۱۴ با بالاترین مقدار سلیوم به دلیل شرایط هیدروترمالی حاکم و نمونه‌های ۷ و ۱۵ برابر ۳۰ می‌باشد که ناشی از اکسیداسیون سولفیدهای موجود در سنگ‌های بدبخت‌کوه اعلام شده است (دهقانی و عباس‌نژاد، ۲۰۱۰). منبع اصلی سلیوم در محیط‌های طبیعی سولفیدهای فلزی و اکسیدهای محتوی این عنصر می‌باشد. ترکیبات سلیوم در اثر احتراق سوخت‌های

¹ Pearson

آمده از مدل، برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطوری که در این جدول مشاهده می‌کنید روش *ANFIS-FCM* برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی از اطمینان و دقت بالایی برخوردار است. شکل‌های ۵ الف و ب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده‌های آموزش و آزمون برای مدل *ANFIS-FCM* را نشان می‌دهند. علاوه بر این، مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت الکتریکی آب زیرزمینی توسط مدل *ANFIS-FCM*، در مراحل آزمون و آموزش در شکل‌های ۵ ج و د نشان داده شده است. در این مدل‌سازی مقدار R^2 ، $RMSE$ در مرحله‌ی آموزش به ترتیب ۰/۰۰۶ و ۰/۹۹۹۸ و در مرحله‌ی آزمون مقدار R^2 ، $RMSE$ به ترتیب ۰/۰۱ و ۰/۹۹۹۱ بدست آمد. نتایج حاکی از آن است که مدل *ANFIS-FCM* قابلیت بالایی در برآورد هدایت الکتریکی آب زیرزمینی با استفاده از مجموعه عناصر ورودی ذکر شده را دارد و می‌تواند برای پروژه‌های دیگر با شرایط مشابه، به طور مطلوبی مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین در این مقاله برای ارزیابی عملکرد مدل، از دو شاخص آماری استفاده گردید که روابط آن‌ها به شرح زیر است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i'^2}{n}} \quad (5)$$

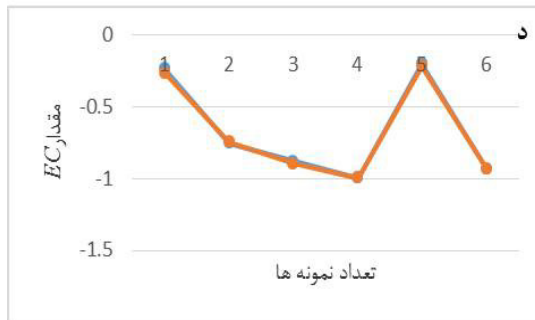
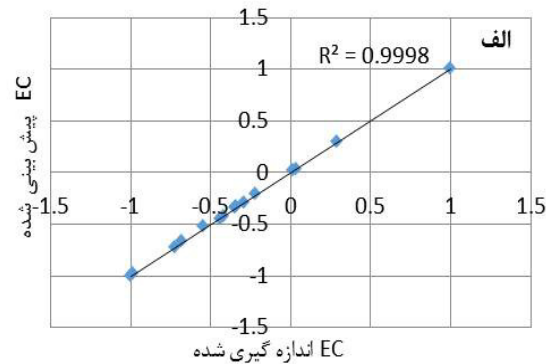
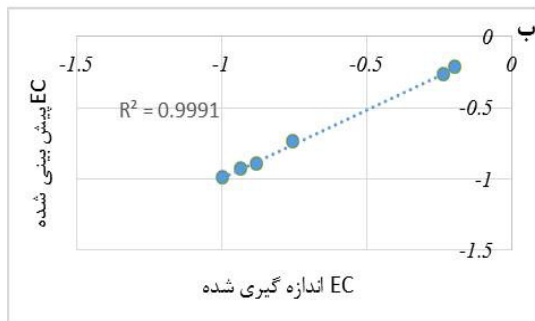
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (6)$$

که در آن: y_i : مقدار اندازه‌گیری شده و y'_i : مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد.

معیار R^2 بیانگر انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشد که در بهترین حالت مقدار آن یک است و مقدار صفر عملکرد خیلی ضعیف مدل برای پیش‌بینی را نشان می‌دهد. معیار میانگین مربعات خطا نیز بیانگر خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشد و هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل از اطمینان بیش‌تری برخوردار است.

۵-۱-۲- نتایج و بحث

در این پژوهش، داده‌های آزمون برای یافتن کارایی مدل *ANFIS-FCM* مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست



شکل ۵. الف) همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آموزش (EC ($\mu s/cm$)), ب) همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آزمون (EC ($\mu s/cm$)), ج) نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آموزش (EC ($\mu s/cm$)) و د) نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آزمون (EC ($\mu s/cm$)).

جدول ۲. ماتریس همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده

	As	Se	Fe	Cu	Pb	Mo	Ni	Mn	Cr	Zn	Cd	F	NO3	Na	K	Ca	Mg	HCO3	Cl	SO4	EC	pH	
As	۱																						
Se	-۰.۱۱	۱																					
Fe	-۰.۱۳	-۰.۱۷	۱																				
Cu	-۰.۴۲	-۰.۴۲	-۰.۱۷	۱																			
Pb	-۰.۲۳	-۰.۲۲	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱																		
Mo	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱																	
Ni	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱																
Mn	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱															
Cr	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱														
Zn	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱													
Cd	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱												
F	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱											
NO3	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱										
Na	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱									
K	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱								
Ca	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱							
Mg	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱						
HCO3	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱					
Cl	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱				
SO4	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱			
EC	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	-۰.۱۷	۱		

۶- نتیجه‌گیری

نتایج آنالیز و پیش‌پردازش داده‌ها، همبستگی بین عناصر، با استفاده از ماتریس همبستگی که در نرم‌افزار SPSS و به روش پیرسن، تهیه گردید، نشان داد که ۶ عنصر سرب، سلنیوم، منگنز، منیزیم و کلسیم و سدیم بیش‌ترین همبستگی را با هدایت‌الکتریکی نسبت به سایر عناصر موجود دارند که بیش‌ترین همبستگی بین این عناصر و هدایت‌الکتریکی در نمونه برداشته شده از نزدیکی معدن گچ دیده شد. با انتخاب عناصر یاد شده به عنوان ورودی‌های مدل *ANFIS-FCM* و انتخاب هدایت الکتریکی به عنوان خروجی با توجه به هدف تحقیق و در نظر گرفتن ۷۰ درصد داده‌ها (۱۵ نمونه) برای مجموعه داده آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها (۶ نمونه) برای مجموعه داده آزمون به طور تصادفی، برای مجموعه داده آموزش هدایت‌الکتریکی R^2 و *RMSE*، به ترتیب ۰/۹۹۹۸ و ۰/۰۰۶ و برای مجموعه داده آزمون هدایت‌الکتریکی R^2 و *RMSE*، به ترتیب ۰/۹۹۹۱ و ۰/۰۱ به دست آمد. با استفاده از نتایج به دست آمده از این مدل، مشخص شد که هدایت‌الکتریکی تخمین‌زده شده در محدوده مورد بررسی از دقت بسیار خوب و همبستگی بالایی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برخوردار بوده است. در نتیجه کاربرد همزمان روش‌های آماری و روش هوشمند *ANFIS-FCM* در تشخیص نهشته‌های پنهان گچ شوره انار موثر و دقیق بود؛ اما این مطالعه به تنهایی نمی‌تواند به سایر معادن گچ شوره تعمیم داده شود. در منطقه مورد مطالعه بالا بودن *EC* به همراه مقادیر بالای سدیم، منیزیم، کلسیم، منگنز، سلنیوم و سرب موید وجود نهشته گچ است. در صورتی که این همبستگی در مناطق دیگر نیز مورد تایید قرار گیرد، می‌توان از آن به عنوان نشانگر وجود نهشته‌های پنهان گچ استفاده نمود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از داوران محترم مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

باقرزاده، م. ر (۱۳۸۷) گزارش ادامه مطالعات دشت رفسنجان سال آبی ۸۷-۸۶، شرکت سهامی آب منطقه‌ای، معاونت پایه منابع آب، ۷۰ ص.

بهرام‌پور، آ (۱۳۸۶) بررسی ژئوشیمی، پتروگرافی، پترولوژی پلاگ‌های ساب‌ولکانیک آج‌بالا و آج‌پایین، شهر بابک-دهج، رساله کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی، ص ۳۰.

بیکی‌حسن‌آباد، ح.، رستمی، ف (۱۳۹۶) روش نوین نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از *ANFIS* اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی، ۵ مرداد ۹۶.

حجت، آ.، رنجبر، ح (۱۳۹۰) اصول ژئوالکتریک کاربردی، موسسه انتشارات ستایش.

دهقانی، ر.، پورحقی، ا.، خیرایی، م (۱۳۹۵) مقایسه روش‌های سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، شبکه‌عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی ژن در تخمین میزان سختی آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت مازندران)، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۰، شماره ۱۹، ص ۶۲-۵۱.

سعیدی‌رضوی، ب.، عرب، ع (۱۳۹۷) پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های منطق فازی، شبکه عصبی و سری زمانی، مجله هیدروژئولوژی، سال سوم، شماره ۲، ص ۸۱-۶۹.

شیخ‌الاسلامی، م. ر.، جوادی، ح. ر.، اسدی‌سرشار، م.، آقاحسینی، ا.، کوه‌پیما، م.، وحدتی دانشمند، ب (۱۳۹۲) دانشنامه گسله‌های ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

صدیقیان، س (۱۳۸۷) پترولوژی و ژئوشیمی، ساخت و منشا جریان‌های گدازه‌ای طاق‌دیس شان‌آباد، جنوب‌غرب رفسنجان، رساله کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی (پترولوژی)، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۱۰-۸.

گلستانی، م.، درگاهی، س.، آروین، م.، شفائی‌مقدم، ه (۱۳۹۴) پترولوژی و ژئوشیمی گابروهای افیولیت‌ملانژ بافت، جنوب‌غرب کرمان، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۹، شماره ۱۷، ص ۵۵-۴۳.

معافی، ح (۱۳۸۵) بررسی اثر برداشت آب‌های زیرزمینی بر نشست زمین در دشت رفسنجان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، گروه مهندسی آب، ص ۵۵ تا ۶۰.

مهندسان مشاور کاواب (۱۳۸۱) طرح مطالعاتی بیان آب محدوده‌ی رفسنجان، جلد اول و دوم، ص ۵۰ تا ۱۴۲.

نبوی، م. ح (۱۳۵۵) دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور.

نجفی، ا.، یوسفی، م. ح.، ایلپاتی، ع (۱۳۹۴) اکتشاف منابع معدنی برجا با استفاده از باندهای حرارتی لندست ۸ (مطالعه موردی: معدن گچ باغک کاشان)، پنجمین

- support. *Advances in Engineering Software*, 33: 245–260.
- Honslow, A. W (1995) *Water Quality Data Analysis and interpretation*. Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma. Lewis Publishers, 397 p.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T., Mizutani, E (1997) *Neuro-Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall, 640p.
- Kazemi Azar, F (2006) *Modelling of groundwater resources of Rafsangan Plain and evaluation of abstraction (in Persian)*. M. S. thesis, Shahid Bahonar University, pp. 75- 77.
- Kosko, B (1992) *Neural Networks and Fuzzy Systems. A Dynamical Approach to Machine Intelligence*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 449p.
- Lu, R. S., Lo, S. L (2002) *Diagnosing reservoir water quality using self-organizing maps and fuzzy theory*. *Water Research*, 36: 2265–2274.
- MATLAB user's guide (2006) Fuzzy logic Toolbox*, by the math works Inc.
- Moosavi, V., Vafakhah, M., Shirmohammadi, B., Behnia, N (2013) *A Wavelet-ANFIS Hybrid Model for Groundwater Level Forecasting for Different Prediction Periods*, *Water Resources Management journal*, 27(5): 1301-1321.
- Nadiri, A., Chitsazan, N., Tsai, F. T. C., Asghari Moghaddam, A (2014) *Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation*, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3): 520-532.
- Nava, P., Taylor, J (1996) *The Optimization of Neural Network Performance through Incorporation of Fuzzy Theory*. In: 11th Conference on Systems Engineering, 897-901.
- Nayak, P. C., Sudheer, K. P., Rangan, D. M., Ramasastri, K. S (2004) *A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series*. *Journal of Hydrology*, 291: 52–66.
- Sengor, A. M. C (1990) *A new model for the late Paleozoic- Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman . in The Geology and tectonics of the Oman region*, *Geol. Soc. Spec. Publ. London*, 4: 797-831.
- Siegle, F. R (2002) *Environmental Geochemistry of Potentially Toxic Metals*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 202- 226.
- Srinivasan, K., Fisher, D (1995) *Machine Learning Approaches to Estimating Software Development Effort*. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 21(2): 126–137.
- Todd, D., Mays, L (2005). *Groundwater Hydrogeology*. New York: John Wiley and Sons.
- Tutmez, B., Hatipoglu, Z., Kaymak, U (2006) *Modelling electrical conductivity of groundwater using an adaptive neuro-fuzzy* کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران.
- Akbarzadeh, S., Arof, A. K., Ramesh, S., Khanmirzaei, M. H., Nor, R. M (2014) *Prediction of Conductivity by Adaptive Neuro-Fuzzy Model*, *PLoS ONE*, 9(3): e92241.
- Andrew, H. M., Jean, M. M., Richard, B. W., Christopher, T. M (2020) *Using stream-side groundwater discharge for geochemical exploration inmountainous terrain*. *Journal of Geochemical Exploration*, 209, 106415.
- Banerjee, P., Singh, V. S., Chattopadhyay, K., Chandra, P. C., Singh, B (2011) *Artificial neural network model as a potential alternative for groundwater salinity forecasting*. *Journal of Hydrology*, 398(4): 212–220.
- Bezdek, J. C (1973) *Fuzzy mathematics in pattern classification*, Cornell university, Ithaca.
- Dehghani, M., Abbasnejad, A (2010) *Pollution of Anar Plain with Lead due to traffic of Kerman –Yazd – Tehran Road. The First Conference of Energy and Environment*, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- Dehghani, M., Abbasnejad, A (2010) *Variation concentration of selenium in Groundwater of Anar Plain. The First International Symposium of Medical Geology, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran*.
- Dehghani, M., Abbasnejad, A (2011) *Pollution of Anar Plain with Respect to Cadmium, Arsenic, Lead and Nitrate*. *Environmental sciences*, 56: 87-100.
- Deverel, S., Fio, J., Duborovsky, N (1994) *Distribution and mobility of selenium in groundwater in the western San Joaquin valley of California*. In: *selenium in environment (eds. W. T. Frankenberger and S. Benson)*.
- Dolati Kordestani, M., Nohegar, A., Janizadeh, S (2018) *Assessment of some Artificial Intelligence (AI)-based models for groundwater quality prediction (case study: Garoo plain)*, *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 6(17): 27-42.
- Emamgholizadeh, S., Moslemi, Kh., Karami, Gh (2014) *Prediction the Groundwater Level of Bastam Plain (Iran) by Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)*, *European Water Resources Association (EWRA)*, 28(15): 5433-5446.
- Ghalib, H. B (2017) *Groundwater chemistry evaluation for drinking and irrigation utilities in east Wasit province, Central Iraq*. *Applied Water Science*, 7(7): 3447-3467.
- Hasebe, M., Nagayama, Y (2002) *Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation*

inference system. Computers & Geosciences, 32: 421-433.

Wang, G., You, G., Xu, Y (2008) *Investigation on the Nanjing gypsum mine flooding. In Geotechnical engineering for disaster mitigation and rehabilitation (pp. 920-930). Springer, Berlin, Heidelberg.*

Zeng, B., Shi, T., Chen, Z., Liu, X., Xiang, S., Yang, M (2018) *Mechanism of groundwater inrush hazard caused by solution mining in a multilayered rock-salt-mining area: a case study in Tongbai, China. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18(1): 79.*

Application of ANFIS-FCM method to salty gypsum mine exploration case study: Anar gypsum mine

H. Nazari^{*1}, M. Dehghani², F. Hajizadeh³ and A. Abbasnejad⁴

1- Ph. D. student, Dept., of Mining Engineering, Urmia University, Urmia

2- Ph. D. student, in environmental geology,, Urmia University, Urmia

3- Assoc. Prof., Dept., of Mining Engineering, Urmia University, Urmia

4- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman

** nazarihosnie@yahoo.com*

Recieved: 2020/8/23 Accepted: 2020/11/23

Abstract

Electrical conductivity increases in groundwater around the gypsum mines because of ions dissolution. this is a useful indicator in gypsum mines exploration, but not enough to that aim, so the elements with high concentrations involved in increasing EC should be identified. This study aims to investigate the efficiency of ANFIS-FCM method to exploration of salty gypsum mines using hydrogeochemical changes of groundwater, which was tested on a case: Anar salty gypsum mine. to this aim, 21 water samples were taken from wells across the plain and chemical analysis of samples was performed in the laboratory. Then, the resulted data were statistically analyzed and descriptive statistics of the data and correlation matrix of the studied parameters were obtained using SPSS software. Forming a data correlation matrix, it was found that in samples near the salty gypsum mine, some ions had the highest correlation with electrical conductivity (EC) including sodium, magnesium, calcium, manganese, selenium and lead, while the mentioned parameters had the highest correlation. The 6 mentioned elements selected as the model inputs and the electrical conductivity was the output according to purpose of the current research. After standardization, the data were entered into MATLAB and the electrical conductivity was predicted using ANFIS-FCM method. The measured electrical conductivity was used directly to compare with the electrical conductivity of the intelligent method. Based on the model results, the estimated electrical conductivity in the study area had very good accuracy and high correlation with the measured values. As a result, ANFIS-FCM intelligent method is an effective method to diagnose the salty gypsum mine. If this method is used in groundwater around other salty gypsum mines in Iran and a similar result be observed, its efficiency in diagnosing the salty gypsum mines is confirmed.

Keywords: *Electrical conductivity, ANFIS-FCM method, Groundwater, Anar plain*