

## پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی با استفاده از روش سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) (مطالعه موردی: دشت‌های آذرشهر، عجب‌شیر و مراغه)

حسنیه نظری<sup>۱\*</sup>، بهنام تقوی<sup>۲</sup> و فروش حاجی‌زاده<sup>۳</sup>

۱ و ۲- دانشجوی دکتری مهندسی معدن (اکتشاف)، دانشگاه ارومیه، ارومیه

۳- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه، ارومیه

نویسنده مسئول: nazarihosnie@yahoo.com \*

نوع مقاله: مطالعه موردی

پذیرش: ۹۹/۱۰/۶

دریافت: ۹۹/۶/۱۲

### چکیده

هدف از این مطالعه بررسی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی ناشی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب با استفاده از روش ANFIS-FCM در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، عجب‌شیر و مراغه حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. جهت دست‌یابی به این هدف، ۸۲ نمونه آب از چاه و چشمه‌های دشت‌ها برداشت و داده‌ها در آزمایشگاه مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. آمارهای توصیفی داده‌ها و ماتریس همبستگی پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار SPSS بدست آمد. با تشکیل ماتریس همبستگی، مشخص گردید که چهار پارامتر شوری (Salinity)، اکسیژن محلول (DO)، کل مواد جامد محلول (TDS) و pH، نسبت به سایر پارامترهای موجود، بیشترین همبستگی را با هدایت الکتریکی (EC) دارند. بنابراین ورودی‌های مدل شامل چهار پارامتر نامبرده و خروجی نیز با توجه به هدف تحقیق، هدایت‌الکتریکی انتخاب شد. داده‌ها پس از استانداردسازی، وارد محیط متلب شده و با استفاده از روش ANFIS-FCM، هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی پیش‌بینی گردید. در این روش ۸۰ درصد داده‌ها (۶۶ نمونه) برای مجموعه داده آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۱۶ نمونه) برای مجموعه داده آزمون به طور تصادفی انتخاب شدند. برای مجموعه داده آموزش مدل ANFIS-FCM مقادیر  $R^2$ ، RMSE و VAF به ترتیب ۰/۰۳۲۳۹۹، ۰/۹۹۹۹ و ۰/۹۹۹۹۳ بدست آمدند و همچنین برای مجموعه داده آزمون مدل ANFIS-FCM مقادیر  $R^2$ ، RMSE و VAF به ترتیب ۰/۹۹۹۹۳، ۰/۰۲۹۹۴۹ و ۰/۹۹۹۷۲ حاصل گردید. با استفاده از نتایج به دست آمده از این مدل، مشخص شد که هدایت‌الکتریکی تخمین زده شده در محدوده‌های مورد بررسی از دقتی بسیار خوب و همبستگی بالایی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برخوردار بوده است. در نتیجه روش هوشمند ANFIS-FCM روشی موثر، کارآمد و دقیق جهت تخمین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: هدایت‌الکتریکی، ANFIS-FCM، آب زیرزمینی، حوضه‌ی دریاچه ارومیه

### ۱- پیشگفتار

افزایش شدید شوری آب زیرزمینی مواجه شده‌اند (شهرابی، ۱۹۷۲). شوری آب زیرزمینی با پارامتری نظیر هدایت‌الکتریکی (EC) قابل سنجش است. قابلیت هدایت‌الکتریکی سنگ‌ها با افزایش کلریدها - سولفات‌ها و سایر نمک‌های محلول و نیز آب موجود در آن افزایش می‌یابد (رنجبر و حجت، ۱۳۹۰). 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

تامین منابع آبی با کیفیت مناسب از مهم‌ترین نیازهای انسان امروزی است. آب زیرزمینی معمولاً به دلیل کیفیت مناسب، ترکیبات ثابت شیمیایی، دمای ثابت، آلودگی کمتر نسبت به آب سطحی و سطح اطمینان بالا در تامین آب، به عنوان یک منبع قابل اتکا محسوب می‌شود (مدن و همکاران، ۲۰۰۸). خطر آلودگی کم‌تر این منابع، باعث شده که حتی در مناطقی که کمبودی از لحاظ آب سطحی احساس نمی‌شود، نیز استفاده از آن‌ها رواج داشته باشد (شعبانی، ۱۳۸۷). یکی از مهم‌ترین معیارهای بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی، شوری آن است. افزایش دما و افزایش تبخیر باعث کاهش شدید سطح آب دریاچه ارومیه شده است و دشت‌های اطراف دریاچه ارومیه با

(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 هدایت‌الکتریکی آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. از سویی دیگر، اکبرزاده و همکاران (۲۰۱۴) 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 کردند. 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.

در سال‌های اخیر از مدل شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک جایگزین بالقوه برای پیش‌بینی شوری آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود، تحقیقات حاکی از آن است که این مدل از توانایی بالایی برای پیش‌بینی برخوردار است (بانرجی و همکاران، ۲۰۱۱). 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 کردند. براساس نتایج، با وجود مقادیر هدایت‌هیدرولیکی تخمینی کاملاً متفاوت از طریق دو مدل شبکه عصبی و منطق فازی، ولی 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 سال ۱۹۹۲-۲۰۰۷ مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند 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 (ANN) و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) پیش‌بینی

محاسبه‌ی هدایت‌الکتریکی پرداخت. روش‌های سنتی در تحلیل‌های هیدروژئوشیمیایی، علاوه بر توانمندی محدود، هزینه و زمان زیادی را مصرف می‌کنند. بشر در سال‌های اخیر به سمت استفاده از روش‌هایی پیشرفته است که با صرف هزینه و زمان کمتر بیش‌ترین نتیجه را به دست آورد. علوم زمین جزء علمی 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 روی، 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.

البته ذکر این نکته ضروری می‌باشد که روش‌های مدل‌سازی، به عنوان روش کمکی در هر علمی به کار گرفته می‌شود و در کنار مطالعه و تحقیقات دیگر می‌بایست به کار رود و در نهایت نظر کارشناسی است که نتیجه 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 می‌بایست توسط کارشناس بررسی گردد. به طور کلی می‌بایست به این روش مانند سایر روش‌ها، به شکل یک ابزار نگریسته شود و میزان کارایی آن بسته به چگونگی به کارگیری آن می‌باشد.

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 مقایسه نتایج آن می‌توان روش بهینه را انتخاب نمود. روش‌های هوشمند در علوم مختلف با هدف‌های متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پژوهش‌های متعددی در زمینه کاربرد روش‌های هوشمند در هیدروژئولوژی 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

ارتفاع متوسط ۱۸۶۸ متر از سطح دریا می‌باشد. آبخوان دشت آذرشهر از نوع آزاد می‌باشد و از لحاظ برداشت و بهره‌برداری از آبخوان، ممنوعه اعلام شده است (شرکت مدیریت منابع ایران، ۱۳۹۰). محدوده مطالعاتی عجب‌شیر نیز در قسمت شرق دریاچه ارومیه قرار گرفته و مساحت این محدوده مطالعاتی ۶۹۸ کیلومتر مربع است که ۲۵ درصد آن را دشت و ۷۵ درصد آن را ارتفاعات تشکیل داده است. ارتفاع متوسط ۱۹۰۷ متر از سطح دریا می‌باشد. آبخوان دشت عجب‌شیر از نوع آزاد می‌باشد (شرکت مدیریت منابع ایران، ۱۳۹۰؛ پیرخرابی و همکاران، ۱۳۹۹). شکل ۱ موقعیت محدوده‌های مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری آذرشهر-عجب‌شیر و مراغه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

در شکل ۲ وضعیت محدوده مطالعاتی مراغه به همراه موقعیت پیژومترهای این دشت نمایش داده شده است. در شکل ۳ نقشه تراز سطح ایستایی آبخوان مراغه با استفاده از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از سطح آب در پیژومترها ارائه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود سطح آب‌های زیرزمینی مراغه از بیش از ۱۴۵۰ متر در شمال شرق آبخوان به کمتر از حدود ۱۲۵۰ متر در غرب و جنوب غرب می‌رسد. وضعیت عمق برخورد به آب آبخوان مراغه در شکل ۴ نمایش داده شده است. عمق برخورد به آب‌های زیرزمینی در آبخوان از بیش از ۱۰ متر در شمال شرق به کمتر از ۳ متر در نواحی مرکزی و غربی آبخوان می‌رسد. شکل ۵ وضعیت شماتیک نواحی تغذیه، تخلیه و جهت جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان مراغه را نمایش می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود با توجه به شکل‌ها جهت جریان آب‌های زیرزمینی این منطقه از شمال شرق به سمت غرب، جنوب غرب می‌باشد. در شکل ۶ وضعیت محدوده مطالعاتی آذرشهر به همراه موقعیت پیژومترهای این دشت نمایش داده شده است. در شکل ۷ نقشه تراز سطح ایستایی آبخوان آذرشهر با استفاده از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از سطح آب در پیژومترها ارائه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود سطح آب‌های زیرزمینی آذرشهر از حدود ۱۴۰۰ متر در شرق آبخوان به کمتر از ۱۲۸۰ متر در غرب می‌رسد. وضعیت عمق برخورد به آب آبخوان آذرشهر در شکل ۸ نمایش داده شده است. عمق برخورد به آب‌های زیرزمینی در بخش اصلی آبخوان آذرشهر بین ۵ الی ۱۰ متر است. شکل ۹

کردند. هم‌چنین، سعیدی رضوی و عرب (۱۳۹۷) سطح آب زیرزمینی را با استفاده از مدل‌های منطق فازی، شبکه عصبی و سری زمانی پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد 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 شناخته شد. هم‌چنین دولتی‌کردستانی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) به پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت گارو پرداختند. از آنجایی که پژوهش‌های محدودی با استفاده از روش‌های هوشمند جهت بررسی پارامترهای موثر بر کیفیت آب دریاچه ارومیه انجام شده است، بر آن شدیم تا در این مطالعه، به پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی ناشی از پارامترهای دارای همبستگی بالا با هدایت‌الکتریکی، در دشت‌های آذرشهر، عجب‌شیر و مراغه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی بپردازیم.

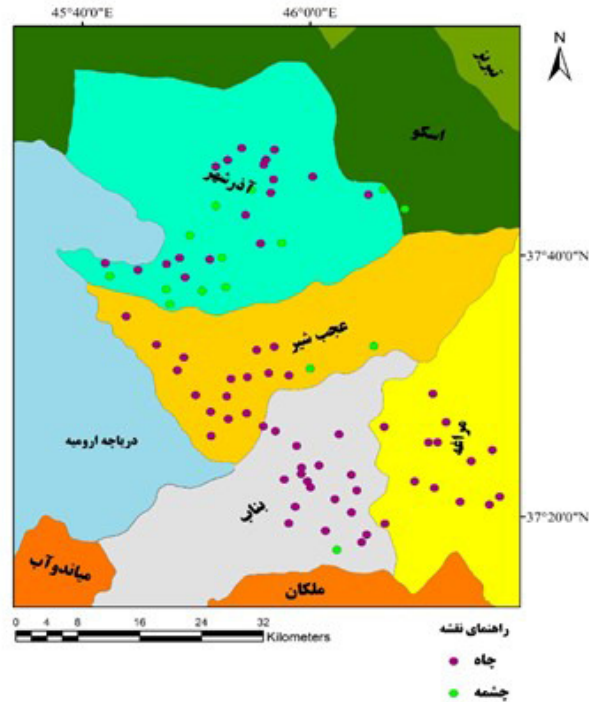
## ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر-عجب‌شیر و مراغه در استان آذربایجان شرقی و در پهنه ۳۸ در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۷ تا ۳۷ شمالی قرار گرفته است. ساده‌ترین راه دسترسی به این منطقه مسیر تبریز به آذرشهر می‌باشد (آقاناتی، ۱۳۸۳). محدوده مطالعاتی مراغه تقریباً در قسمت شرق دریاچه ارومیه قرار گرفته است و مساحت این محدوده ۱۱۵۹ کیلومتر مربع است که ۲۵ درصد آن را دشت و ۷۵ درصد آن را ارتفاعات تشکیل داده است. ارتفاع متوسط آن ۱۷۶۷ متر از سطح دریا می‌باشد. آبخوان دشت مراغه از نوع آزاد می‌باشد و از لحاظ برداشت و بهره‌برداری از آبخوان، آزاد اعلام شده است. وسعت آبخوان مراغه برابر ۲۶۰ کیلومتر مربع است. حداکثر ضخامت آبرفت در دشت مراغه برابر با ۲۰۰ متر می‌باشد (شرکت مدیریت منابع ایران، ۱۳۹۰؛ عباس نوین‌پور و همکاران، ۱۳۹۷).

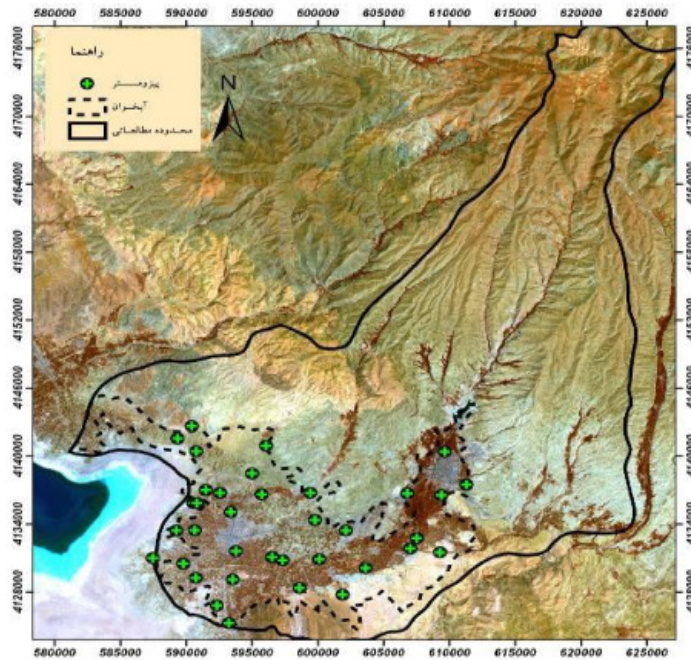
محدوده مطالعاتی آذرشهر تقریباً در قسمت شمال شرق دریاچه ارومیه قرار گرفته است و مساحت این محدوده مطالعاتی ۷۰۱ کیلومتر مربع است که ۲۴ درصد آن را دشت و ۷۶ درصد آن را ارتفاعات تشکیل داده است.

شمال غرب است (فلش‌های آبی = جهت تغذیه آب‌های زیرزمینی، فلش‌های قرمز = جهت تخلیه آب‌های زیرزمینی، فلش‌های سبز = جهت حرکت آب‌های زیرزمینی).

وضعیت شماتیک نواحی تغذیه، تخلیه و جهت جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان آذرشهر را نمایش می‌دهد. چنانچه ملاحظه می‌شود با توجه به شکل‌ها جهت جریان آب‌های زیرزمینی این منطقه از جنوب شرق به سمت

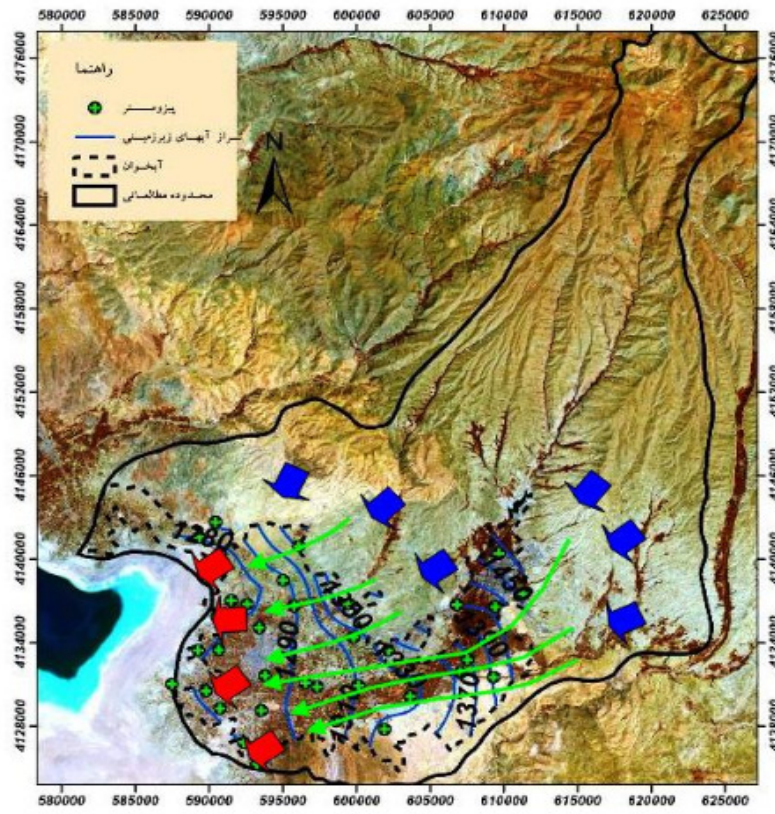


شکل ۱. موقعیت محدوده‌های مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری آذرشهر-عجب‌شیر و مراغه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

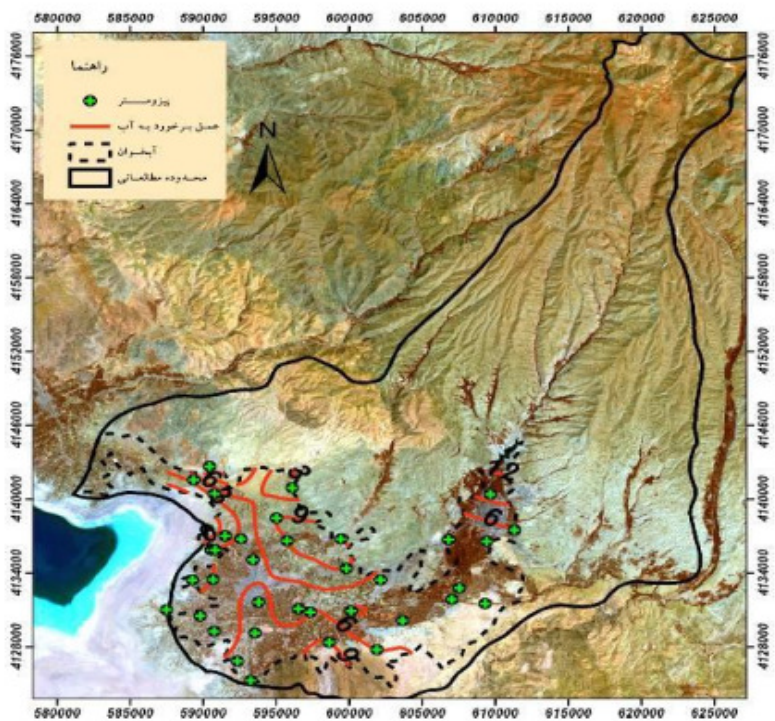


شکل ۲. موقعیت دشت به همراه بیزومترهای دشت مراغه



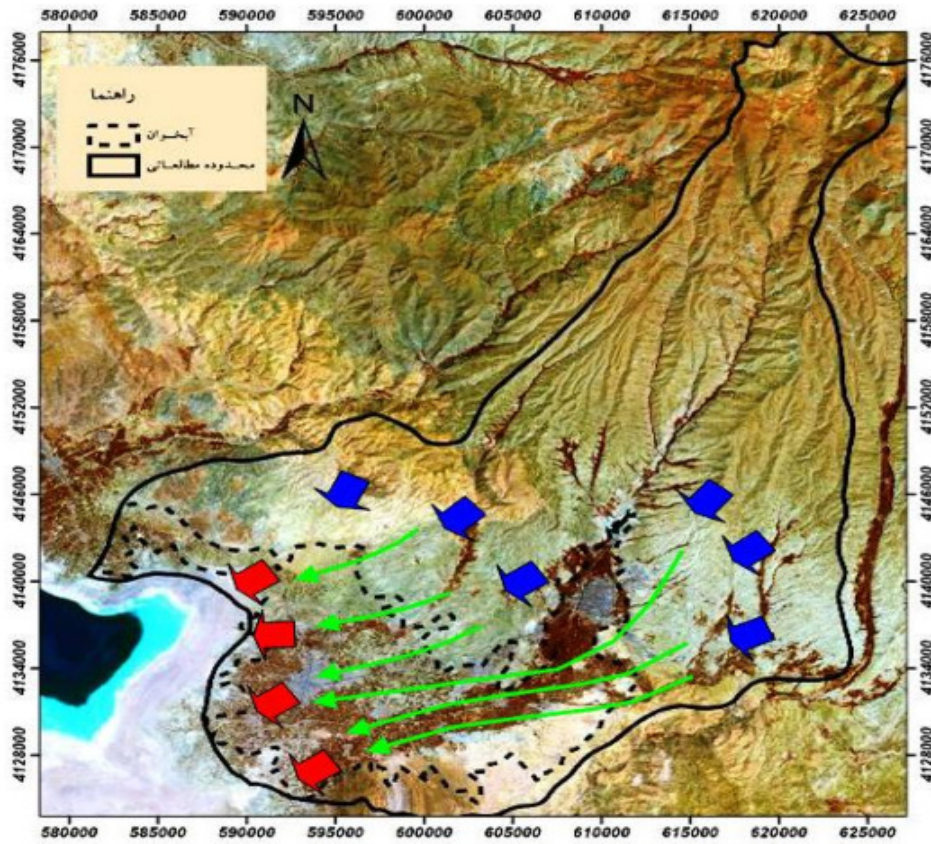


شکل ۳. وضعیت تراز آب‌های زیرزمینی دشت مراغه

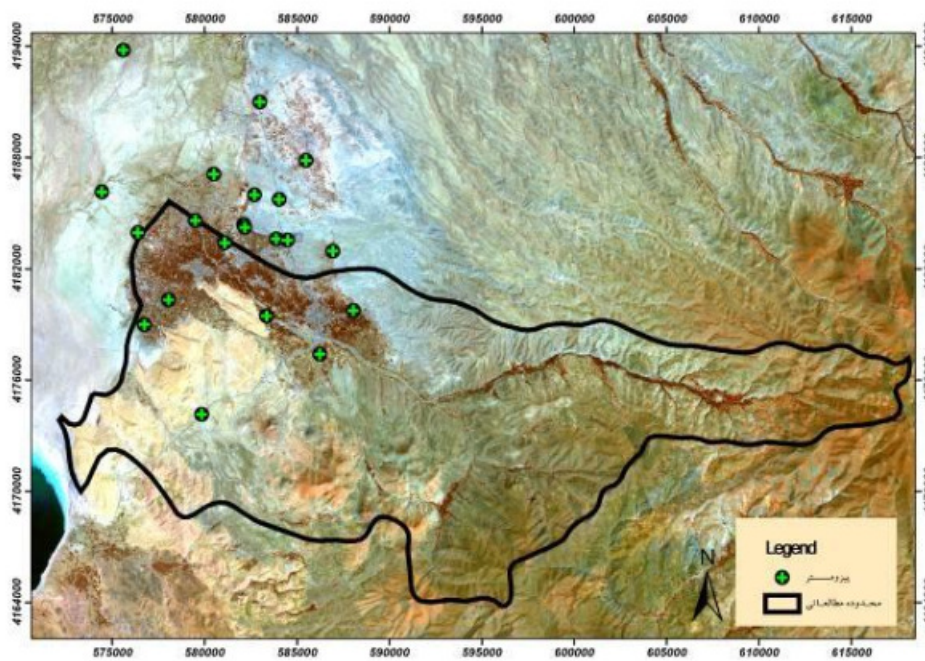


شکل ۴. وضعیت عمق برخورد آب دشت مراغه



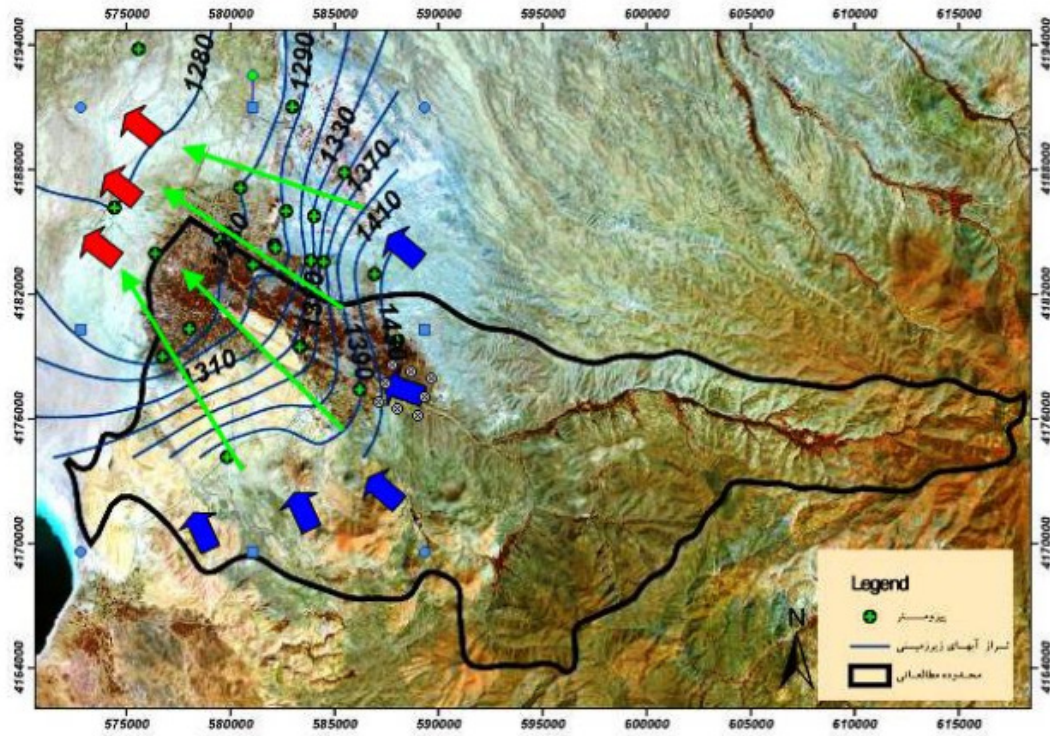


شکل ۵. وضعیت شماتیک نواحی تغذیه، تخلیه و جهت جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان مراغه

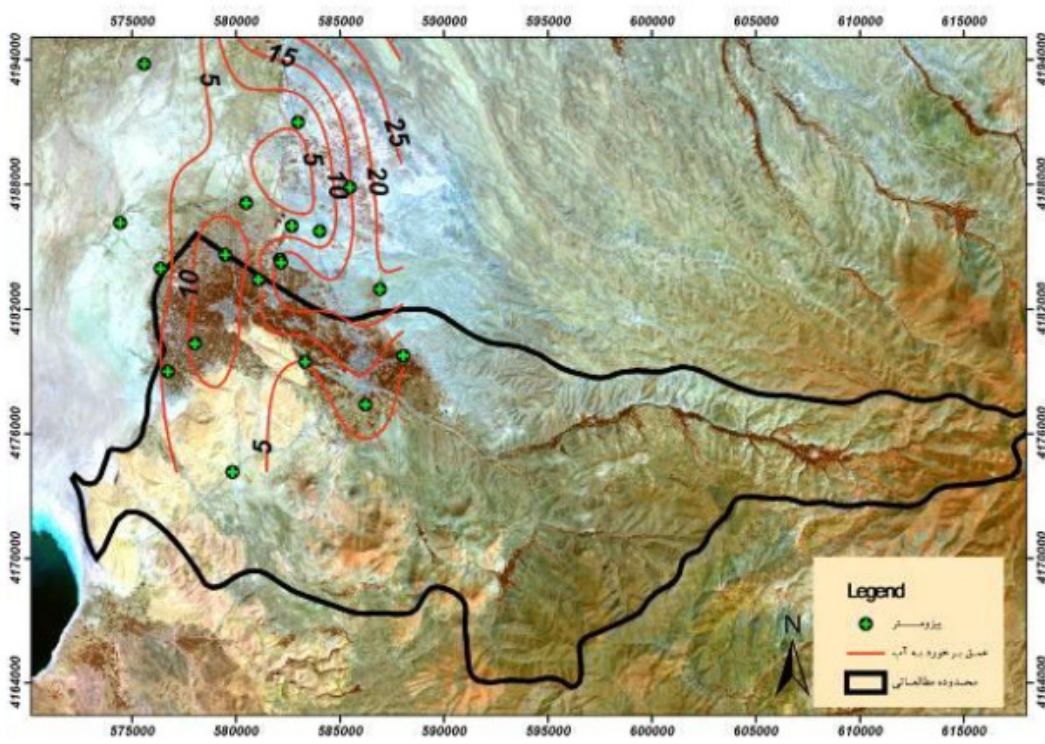


شکل ۶. موقعیت دشت به همراه پیزومترهای دشت آذرشهر

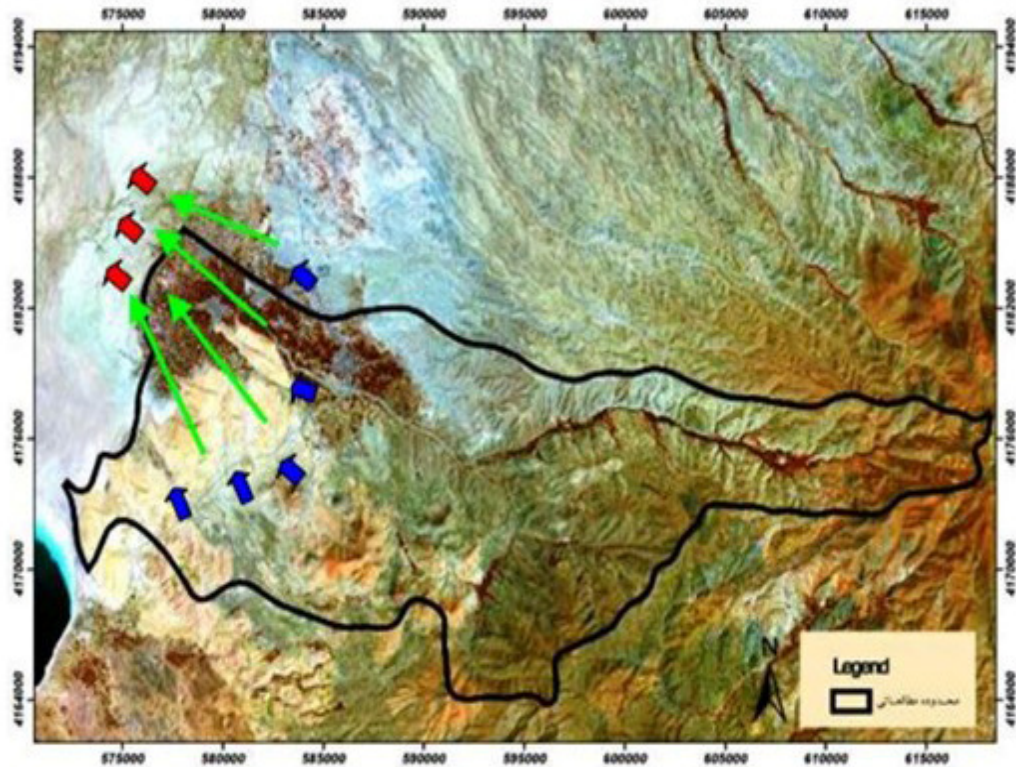




شکل ۷. وضعیت تراز آب‌های زیرزمینی دشت آذرشهر



شکل ۸. وضعیت عمق برخورد آب دشت آذرشهر



شکل ۹. وضعیت شمایک نواحی تغذیه، تخلیه و جهت جریان آب‌های زیرزمینی آبخوان آذرشهر (فلش‌های آبی= جهت تغذیه آب‌های زیرزمینی، فلش‌های قرمز= جهت تخلیه آب‌های زیرزمینی، فلش‌های سبز= جهت حرکت آب‌های زیرزمینی)

نگهداری شدند. مدل رقومی ارتفاع و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

#### 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 (سرینواسان 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

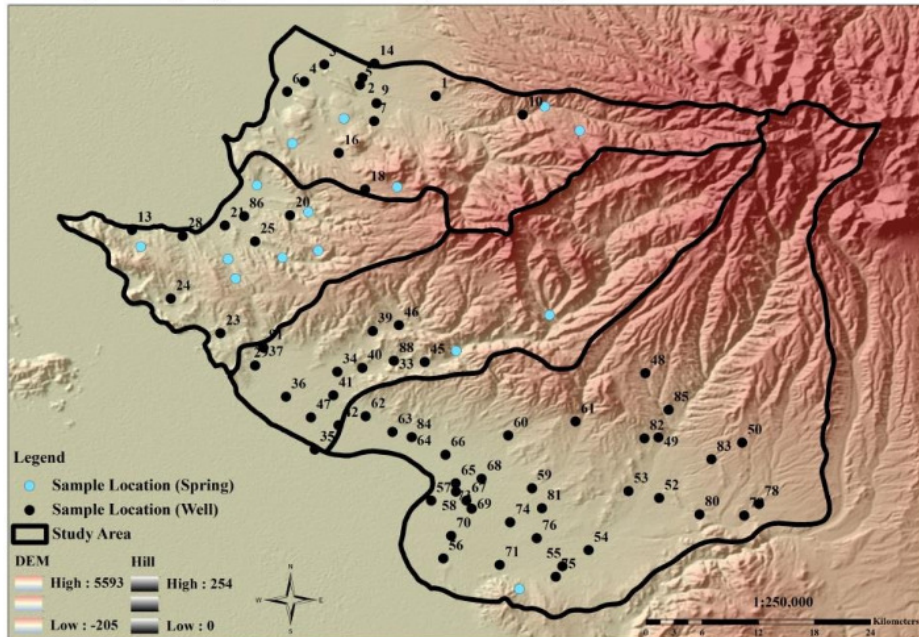
#### ۳- نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش براساس موجودیت منابع آبی در منطقه، وسعت محدوده مورد مطالعه، جهت جریان آب در آبخوان‌ها و فاصله نقاط تا دریاچه ارومیه؛ تعداد ۸۲ منبع شامل چاه و چشمه جهت نمونه‌برداری توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی مشخص گردید. نمونه‌برداری از منابع مورد نظر در ۳ محدوده مطالعاتی آذرشهر، عجب‌شیر و مراغه در تیرماه (فصل خشک) در سال ۱۳۹۳ انجام شده است. در هر نقطه نمونه‌برداری؛ ۲ نمونه ۲۵۰ میلی‌لیتری برداشت گردیده و از طرفی pH نمونه آبی که جهت آنالیز کاتیون‌ها برداشت شده توسط اسید نیتریک با خلوص ۶۵ درصد به زیر ۱/۶ رسید. از دو نمونه برداشت شده، یک نمونه برای آنالیز کاتیون‌ها (طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی و نشر نور پلاسمای جفت شده القایی) و نمونه دیگر، جهت آنالیز آنیون‌ها (کروماتوگرافی یونی و تیتراسیون) به آزمایشگاه ارسال شد. نمونه‌ها از محل نمونه‌برداری تا رسیدن به آزمایشگاه در شرایط استاندارد، ۴-۰ درجه سانتی‌گراد



با روش کمترین مربعات<sup>۳</sup> تعدیل می‌شود (راهنمای کاربر متلب، ۲۰۰۶). در این پژوهش یک مدل انفیس برای شناسایی توابع عضویت بکار رفته است که عبارت است از: روش فازی C- میانگین<sup>۴</sup> که در ادامه به توضیح اجمالی این مدل می‌پردازیم.

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<sup>۱</sup>، یک سامانه استنتاج فازی است که پارامترهای تابع عضویت آن به روش پس انتشار<sup>۲</sup> به تنهایی و یا همراه



شکل ۱۰. مدل رقمی ارتفاع و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، عجب‌شیر و مراغه

#### ۴-۱- فازی C- میانگین

روش فازی C- میانگین یک الگوریتم خوشه‌بندی داده توسط بزدیک ارائه شده است (بزدک، ۱۹۷۳). که در آن هر داده متعلق به یک خوشه با درجه مشخص شده توسط درجه عضویت می‌باشد. روش فازی C- میانگین، پارتیشن-بندی 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 شده است. پس از آن ماتریس عضویت U با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

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

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

3. least squares

5. Fuzzy C-means Method (FCM)

1. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

2. backpropogation

## ۵- نتایج و بحث

pH بین ۸/۲۳ - ۶/۰۶، میزان تغییر هدایت الکتریکی بین  $18130 \mu\text{S}$  -  $290/2$  و میزان تغییر کل مواد جامد محلول بین  $264/8$  -  $16660$  ppm می‌باشد. در مورد فاکتور شوری مشاهده می‌شود که تغییر شوری بین  $20740$  ppm -  $254/1$  است و تغییر اکسیژن محلول بین  $7/50$  mg/L -  $1/81$  است. دما بین  $41^\circ\text{C}$  -  $14/6$  و Eh بین  $260/6$  Mv -  $92/6$  متغییر است. دلیل عمده دمای بالای بعضی از چاه‌ها، گازدار بودن آن‌ها ناشی از فرآیندهای ژئوترمال در منطقه می‌باشد و شواهد آن‌ها بصورت چشمه‌های آبگرم و تراورتن‌ساز قابل مشاهده است (امیری و زارعی سهامیه، ۱۳۹۲).

برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب از قبیل، درجه حرارت (درجه سانتی‌گراد)، میزان اکسیژن محلول (میلی گرم بر لیتر)، pH، Eh (میلی‌ولت)، میزان هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر)، کل مواد جامد محلول (ppm) و شوری (ppm) به صورت درجا توسط دستگاه مولتی پارامتر پرتابل مدل Eutech-PCD650 اندازه‌گیری گردید. مقادیر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده و شاخص‌های آماری این پارامترها در چاه‌ها و چشمه‌ها به ترتیب در جداول ۲، ۱ و ۳ نشان داده شده است. نتایج آنالیز آب نشان می‌دهد که میزان تغییر فاکتور

جدول ۱. نتایج برخی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده به صورت درجا در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، عجب‌شیر و مراغه

Sample	T (°C)	DO (mg/L)	pH	Eh (Mv)	EC ( $\mu\text{S}$ )	TDS (ppm)	Salinity (ppm)
U-WFA-1	۲۴/۸	۴/۴۱	۶/۹۷	۲۳۱/۳	۱۰۰۲	۹۱۶/۲	۹۲۹/۶
U-WFA-2	۱۸/۶	۶/۶۸	۶/۸۰	۲۳۶/۳	۱۴۴۸	۱۳۲۶	۱۳۴۷
U-WFA-3	۱۸/۵	۶/۲۰	۷/۱۴	۲۱۲/۹	۱۹۹۵	۱۷۹۶	۱۸۵۵
U-WFA-4	۱۴/۶	۲/۵۷	۶/۱۳	۲۳۸/۴	۱۵۴۸۰	۱۴۱۸۰	۱۷۱۷۰
U-WFA-5	۱۵	۳/۱۹	۶/۴۸	۲۶۰/۶	۱۸۲۸	۱۶۷۳	۱۷۴۵
U-WFA-6	۱۵/۵	۲/۵۹	۶/۵۹	۲۲۳/۷	۶۵۵۰	۶۰۱۲	۶۱۷۰
U-WFA-7	۲۰/۴	۲/۲۴	۷/۵۲	۱۶۴/۴	۱۵۵۷	۱۴۲۷	۱۴۹۰
U-SFA-8	۲۱	۳	۶/۵۸	۱۶۷/۳	۴۵۲۲	۴۱۳۶	۴۲۹۳
U-WFA-9	۱۹/۲	۷/۰۶	۷/۶۸	۹۴/۵	۱۶۳۰	۱۱۴۹۱	۱۵۵۴
U-WFA-10	۲۰/۶	۶/۹۷	۷/۵۵	۱۱۳/۶	۵۶۹/۶	۵۲۱/۴	۵۱۴/۴
U-SFA-11	۱۳/۵	۷/۴۹	۸/۴۳	۹۰/۶	۱۵۴	۱۴۱/۴	۱۲۸/۸
U-SFA-12	۱۷/۹	۶/۷۶	۸/۱۶	۱۴۵	۸۴۳/۷	۷۷۱/۸	۷۷۳/۸
U-WFA-13	۱۹/۳	۴/۷۵	۶/۹۷	۱۴۴/۶	۱۸۱۳۰	۱۶۶۶۰	۲۰۷۴۰

جدول ۲. محاسبه شاخص آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده به صورت درجا در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر،

شیرامین، عجب‌شیر و مراغه - چاه

پارامتر / شاخص آماری	T (°C)	DO (mg/L)	pH	Eh (Mv)	EC ( $\mu\text{S}$ )	TDS (mg/L)	Salinity (mg/L)
تعداد نمونه	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶	۶۶
حداکثر	۴۱	۷/۵۰	۸/۲۳	۲۶۰/۶	۱۸۱۳۰	۱۶۶۶۰	۲۰۷۴۰
حداقل	۱۴/۶	۱/۸۱	۶/۰۶	۹۲/۶	۲۹۰/۲	۲۶۴/۸	۲۵۴/۱
میانگین حسابی	۲۰/۴	۴/۵۵	۷/۳۱	۱۷۴/۵	۳۰۹۴/۲	۲۸۲۵/۲	۳۱۲۹/۲
میانه	۱۹/۷	۴/۴۵	۷/۲۹	۱۷۴/۳	۱۴۹۴/۵	۱۳۵۶	۱۳۹۸
واریانس	۱۳/۵	۲/۶۸	-۰/۲۳	۱۷۱۰/۵	۱۳۷۴۷۴۵۶/۰	۱۱۴۵۰۹۸۹/۰	۱۶۲۶۲۷۴۴/۸
انحراف معیار	۳/۷	۱/۶۴	-۰/۴۸	۴۱/۴	۳۷۰۷/۸	۳۳۸۳/۹	۴۰۳۲/۷
چولگی	۲/۹	۰/۱۸	-۰/۳۸	-۰/۲	۲/۳	۲/۳	۲/۵
کشیدگی	۱۴/۷	-۱/۱۷	-۰/۰۵	-۰/۰۶	۵/۲	۵/۴	۶/۸
ضریب تغییرات	۰/۲	۰/۳۶	-۰/۰۷	۰/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۳

جدول ۳. محاسبه شاخص آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده به صورت درجا در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، شیرامین، عجب‌شیر و مراغه- چشمه

پارامتر / شاخص آماری	T (°C)	DO (mg/L)	pH	Eh (Mv)	EC (µS)	TDS (mg/L)	Salinity (mg/L)
تعداد نمونه	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
حداکثر	۲۴/۵۰	۷/۴۹	۸/۵۸	۴۰۷/۲۰	۱۱۳۹۰/۰۰	۱۰۴۶۰/۰۰	۱۲۳۹۰/۰۰
حداقل	۱۳/۵۰	۱/۸۱	۶/۰۶	۹۰/۶۰	۱۵۴/۰۰	۱۴۱/۴۰	۱۲۸/۸۰
میانگین حسابی	۲۰/۳۴	۴/۸۵	۷/۴۰	۱۷۶/۳۵	۲۳۱۲/۶۶	۲۱۱۸/۰۱	۲۳۳۳/۶۰
میانه	۲۰/۵۵	۴/۹۹	۷/۳۲	۱۶۴/۷۵	۱۳۳۶/۵۰	۱۲۲۲/۵۰	۱۲۷۰/۰۰
واریانس	۷/۷۹	۴/۵۴	۰/۵۲	۵۶۲۷/۷۴۵	۸۱۹۷۳۹۱/۶۵۸	۶۹۱۱۴۲۷/۴۷۲	۹۷۲۰۲۶۸/۳۲۷
انحراف معیار	۲/۷۹	۲/۱۳	۰/۷۲	۷۵/۰۱	۲۸۶۳/۱۰	۲۶۲۸/۹۵	۳۱۱۷/۷۳
چولگی	-۰/۶۸۹	-۰/۲۷۲	۰/۱۶۳	۲/۰۸۲	۲/۴۹	۲/۴۹	۲/۶۱
کشیدگی	۱/۱۶	-۱/۶۰	-۰/۵۸	۵/۷۱۹	۶/۷۳۴	۶/۷۶۳	۷/۴۰۷
ضریب تغییرات	۰/۱۳	۰/۴۲	۰/۰۹	۰/۴۲	۱/۲۳	۱/۲۴	۱/۳۳

باشد که در اصطلاح این عمل را، استانداردسازی داده‌ها می‌نامند. استانداردسازی داده‌ها برای ورود به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی نیز توسط رابطه (۴) انجام گرفت که دامنه ورودی‌ها را در بازه (۰-۱) قرار می‌دهد.

$$p_n = 2 \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} - 1 \quad (۴)$$

که در آن:  $p_n$ : پارامتر استاندارد شده؛  $p$ : پارامتر حقیقی؛  $p_{max}$ : بیشینه پارامتر حقیقی و  $p_{min}$ : کمینه پارامتر حقیقی می‌باشند (غلامی و همکاران، ۲۰۱۴؛ جایالاکشمی و سنتاکوماران، ۲۰۱۱).

#### ۵-۱-۲- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل، از سه شاخص استفاده گردید که روابط آن‌ها به شرح زیر است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i'^2}{n}} \quad (۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (۶)$$

$$VAF = \left( 1 - \frac{var(y_i - y'_i)}{var(y_i)} \right) \quad (۷)$$

که در آن‌ها:  $y_i$ : مقدار اندازه‌گیری شده  $y'_i$ : مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد.

#### ۵-۱-۱- پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی با

##### استفاده از مدل ANFIS

بعد از پیش‌پردازش داده‌ها؛ همبستگی بین پارامترها، با استفاده از ماتریس همبستگی که در نرم‌افزار SPSS و به روش پیرسن<sup>۱</sup> تهیه گردید، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به هدف مطالعه که پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی می‌باشد، پارامترهایی که دارای بیشترین همبستگی با هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی می‌باشند را به عنوان ورودی مدل مورد نظر انتخاب می‌نماییم. با توجه به ماتریس همبستگی مشخص گردید که پارامترهای شوری (Salinity)، اکسیژن محلول (DO)، کل مواد جامد محلول (TDS) و pH، نسبت به سایر پارامترهای موجود، بیشترین همبستگی را با هدایت‌الکتریکی (EC) دارند. بنابراین، چهار پارامتر ذکر شده به عنوان ورودی و هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی به عنوان خروجی مدل، انتخاب گردیدند. ماتریس همبستگی بین پارامترها در جدول ۴ آورده شده است. تعداد کل داده‌ها ۸۲ داده بود که از این تعداد به طور تصادفی، ۸۰ درصد داده‌ها (۶۶ داده) به عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۱۶ داده) به عنوان داده‌های آزمون انتخاب گردیدند.

#### ۵-۱-۱- استانداردسازی داده‌ها

برای ورود داده‌ها به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، لازم است که دامنه تغییرات داده‌ها مشابه یکدیگر



## ۵-۱-۳- نتایج به دست آمده از مدل ANFIS-FCM

در این پژوهش، آموزش و آزمون مدل ANFIS-FCM برای مجموعه داده‌ها انجام شد. نتایج بدست آمده از مدل در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطوری که در این جدول مشاهده می‌کنید روش ANFIS-FCM برای پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی از اطمینان و دقت بالایی برخوردار است.

معیار  $R^2$  بیانگر انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشد که در بهترین حالت مقدار آن ۱ و در بدترین حالت مقدار آن برابر ۰ خواهد بود. معیارهای  $RMSE^2$ ،  $RMSE$ ،  $RMSE^2$  نیز بیانگر خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشند و هر چه مقدار  $RMSE$  کمتر و  $VAF$  بیشتر باشد عملکرد مدل از اطمینان بیشتری برخوردار است.

جدول ۴. ماتریس همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده

						۱	DO
						۰/۶۰۵ <sup>**</sup>	pH
				۱	۰/۳۲۵ <sup>*</sup>	-۰/۰۷۱	T
			۱	۰/۰۴۹	-۰/۴۰۴ <sup>**</sup>	-۰/۳۳۶ <sup>**</sup>	EC
		۱	۰/۰۲۸	۰/۰۷۷	-۰/۱۶۹	-۰/۱۷۸	Eh
	۱	۰/۰۲۷	۱/۰۰۰ <sup>**</sup>	۰/۰۴۳	-۰/۴۰۵ <sup>**</sup>	-۰/۳۳۸ <sup>**</sup>	TDS
۱	۰/۹۹۷ <sup>**</sup>	۰/۰۲۴	۰/۹۹۷ <sup>**</sup>	۰/۰۴۳	-۰/۳۹۷ <sup>**</sup>	-۰/۳۲۷ <sup>**</sup>	Salinity
Salinity	TDS	Eh	EC	T	pH	DO	

\* = همبستگی معنی‌دار آماری در سطح اطمینان ۵ درصد؛ \*\* = همبستگی معنی‌دار آماری در سطح اطمینان ۱ درصد

جدول ۵. مقایسه بین نتایج حاصل از مدل ANFIS-FCM برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون

مجموعه داده		$R^2$	$RMSE$	$VAF$
هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی (ANFIS-FCM)	آموزش	۰/۹۹۹۹	۰/۰۰۳۲۳۹۹	۰/۹۹۹۹۳
	آزمون	۰/۹۹۹۸	۰/۰۰۲۹۹۴۹	۰/۹۹۹۷۲

SPSS و به روش پیرسن تهیه گردید، نشان داد که چهار پارامتر شوری (Salinity)، اکسیژن محلول (DO)، کل مواد جامد محلول (TDS) و pH نسبت به سایر پارامترهای موجود، بیشترین همبستگی را با هدایت‌الکتریکی (EC) دارند. با انتخاب پارامترهای یاد شده به عنوان ورودی‌های مدل ANFIS-FCM و انتخاب هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی به عنوان خروجی، با توجه به هدف تحقیق و در نظر گرفتن ۸۰ درصد داده‌ها (۶۶ نمونه) برای مجموعه داده آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۱۶ نمونه) برای مجموعه داده آزمون به طور تصادفی، برای مجموعه داده آموزش مدل ANFIS-FCM مقادیر  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $VAF$  به ترتیب ۰/۹۹۹۹، ۰/۰۰۳۲۳۹۹ و ۰/۹۹۹۹۳ بدست آمدند و همچنین برای مجموعه داده آزمون مدل ANFIS-FCM مقادیر  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $VAF$  به ترتیب ۰/۹۹۹۸، ۰/۰۰۲۹۹۴۹ و ۰/۹۹۹۷۲ حاصل گردید.

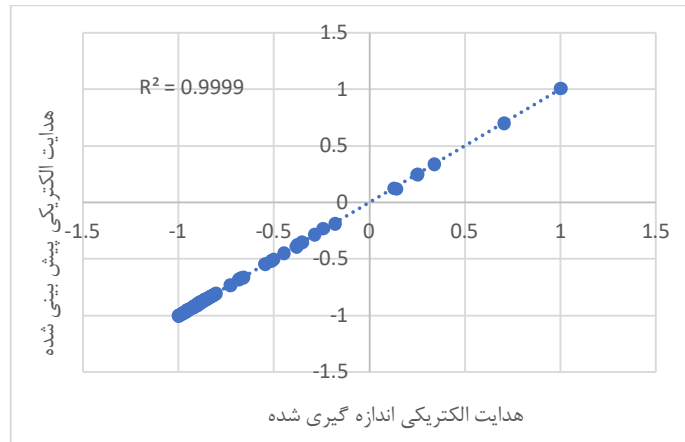
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده‌های آموزش و آزمون برای مدل ANFIS-FCM را نشان می‌دهند. علاوه بر این، مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی توسط مدل ANFIS-FCM در مراحل آزمون و آموزش در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است، که به دلیل همبستگی بالا بر روی هم منطبق شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که مدل ANFIS-FCM قابلیت بالایی در برآورد هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی با استفاده از مجموعه پارامترهای ورودی ذکر شده را دارد و می‌تواند برای پروژه‌های دیگر با شرایط مشابه، به طور مطلوبی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۶- نتیجه‌گیری

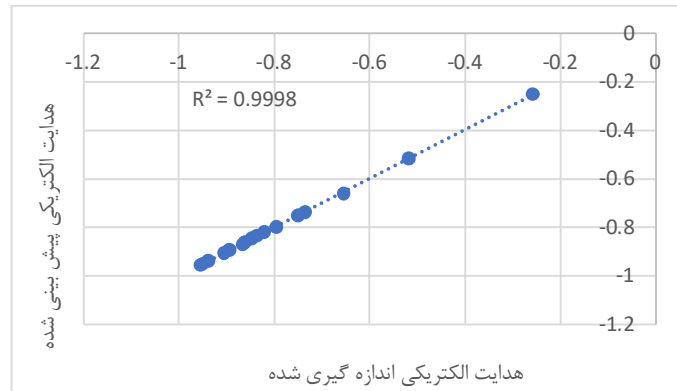
نتایج آنالیز و پیش پردازش داده‌ها، همبستگی بین پارامترها، با استفاده از ماتریس همبستگی که در نرم‌افزار

اندازه‌گیری شده برخوردار بوده است. در نتیجه روش هوشمند ANFIS-FCM روشی موثر، کارآمد و دقیق جهت تخمین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب بویژه هدایت الکتریکی آب زیرزمینی می‌باشد.

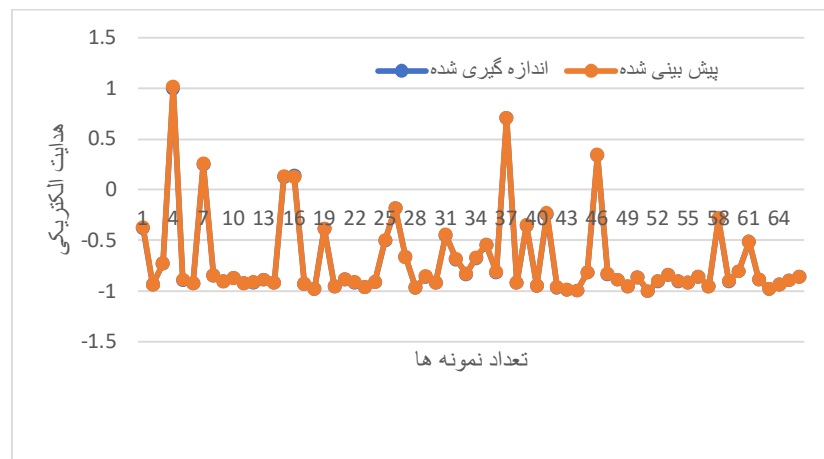
با استفاده از نتایج به دست آمده از این مدل، مشخص شد که هدایت الکتریکی آب زیرزمینی تخمین زده شده برای مدل ANFIS-FCM در محدوده مورد بررسی از دقت بسیار خوب و همبستگی بالایی نسبت به مقادیر



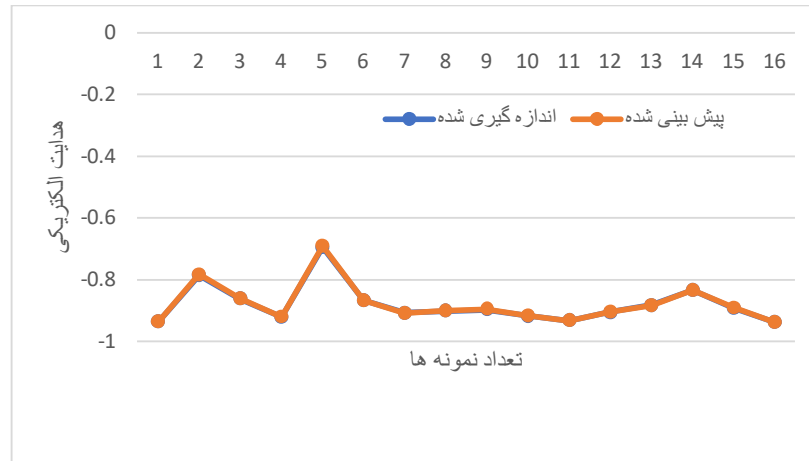
شکل ۱۱. همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آموزش (ANFIS-FCM)



شکل ۱۲. همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آزمون (ANFIS-FCM)



شکل ۱۳. نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آموزش (ANFIS-FCM)



شکل ۱۴. نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آزمون (ANFIS-FCM)

## ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری‌های صمیمانه سازمان زمین‌شناسی کشور جهت در اختیار گذاشتن برخی از اطلاعات مورد نیاز تشکر نمایند.

## منابع

- امیری، م.، زارعی‌سهمیه، ر (۱۳۹۲) بررسی تغییرات زمانی دمای آب چاه‌های گازدار منطقه لاله‌جین جهت دستیابی به انرژی زمین گرمایی، اولین همایش سراسری محیط زیست، انرژی و پدافند زیستی.
- آقائاتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۰۰ ص.
- بیکی حسن‌آباد، ح.، رستمی، ف (۱۳۹۶) روش نوین نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از ANFIS، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی.
- پیرخراطی، ح.، بهرامی‌نصب، ر.، عباس‌فام، ع. ر.، شیخی‌آلمان آباد، ز (۱۳۹۹) ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت کهریز و مقایسه روند تغییرات آن در طی سال‌های اخیر، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۸، ص ۱۷-۱.
- حجت، آ.، رنجبر، ح (۱۳۹۰) اصول ژئوالکترونیک کاربردی، موسسه انتشارات ستایش.
- سعیدی رضوی، 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.
- شرکت مدیریت منابع ایران، معاونت مطالعات پایه و مدیریت حوضه‌های آبریز دفتر مطالعات پایه منابع آب (۱۳۹۰)، اطلاعات آبخوان‌های کشور.
- شعبانی، م (۱۳۸۷) تعیین مناسب‌ترین روش زمین‌آمار در تهیه نقشه‌ی تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان، مجله‌ی مهندسی آب، سال اول، ص ۵۸-۴۷.
- عباس نوین‌پور، ا.، مسعودی، س.، اصغری‌مقدم، ا (۱۳۹۷) ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت نازلوچای ارومیه با استفاده از مدل DRASTIC و صحت‌سنجی آن با غلظت نترات در محیط GIS، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۲، شماره ۲۳، ص ۱۰۳-۹۲.
- Akbarzadeh, S., Arof, AK., Ramesh, S., Khanmirzaei, MH., Nor, RM (2014) Prediction of Conductivity by Adaptive Neuro-Fuzzy Model. PLoS ONE, 9(3): e92241.
- Banerjee, P., Singh, VS., Chattopadhyay, K., Chandra, PC., Singh, B (2011) Artificial neural network model as a potential alternative for groundwater salinity forecasting. Journal of Hydrology, 398(4): 212-220.
- Bezdek, JC (1973) Fuzzy mathematics in pattern classification. Cornell university, Ithaca.
- 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



- Srinivasan, K., Fisher, D (1995) Machine Learning Approaches to Estimating Software Development Effort. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 21(2): 126–137.
- Tutmez, B., Hatipoglu, Z., Kaymak, U (2006) Modelling electrical conductivity of groundwater using an adaptive neuro-fuzzy inference system. *Computers & Geosciences*, 32: 421–433.
- Resources Association (EWRA), 28(15): 5433-5446.
- Gholami, R., Moradzadeh, A., Maleki, S., Amiri, S., Hanachi, J (2014) Applications of artificial intelligence methods in prediction of permeability in hydrocarbon reservoirs. *J Pet Sci Eng*, 122: 643-56.
- Hasebe, M., Nagayama, Y (2002) Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support. *Advances in Engineering Software*, 33: 245–260.
- Honslow, AW (1995) *Water Quality Data Analysis and interpretation*, Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma. Lewis Publishers, 397 p.
- Jang, JSR., Sun, CT., Mizutani, E (1997) *Neuro-Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall, 640p.
- Jayalakshmi, T., Santhakumaran, A (2011) Statistical normalization and back propagation for classification. *Int J Comput Theory Eng*, 3(1): 1793-8201.
- Kosko, B (1992) *Neural Networks and Fuzzy Systems. A Dynamical Approach to Machine Intelligence*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 449p.
- Lu, RS., Lo, SL (2002) Diagnosing reservoir water quality using self-organizing maps and fuzzy theory. *Water Research*, 36, 2265–2274.
- Madan, KJ., Kamii, Y., Chikamori, K (2008) Cost-effective approaches for sustainable groundwater management in alluvial aquifer system. *Water Resources Management*, 23(2): 219-233.
- 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, FTC., 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, PC., Sudheer, KP., Rangan, DM., Ramasastri, KS (2004) A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 291: 52–66.
- Shahrabi, M (1972) *Description of Geological Map of Urmia*, Geological Survey of Iran, 81p.

## Predicting the electrical conductivity of groundwater using the adaptive neuro-fuzzy inference system method (ANFIS) Case Study: Azarshahr, Ajabshir and Maragheh Plains

H. Nazari<sup>\*1</sup>, B. Taghavi<sup>2</sup> and F. Hajizadeh<sup>3</sup>

1, 2- Ph. D. student, Dept., of Mining Engineering, Urmia University, Urmia

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

\* nazarihosnie@yahoo.com

Received: 2020/9/2 Accepted: 2020/12/26

### Abstract

The aim of this study was to investigate the electrical conductivity of groundwater due to physical and chemical parameters of water using ANFIS-FCM method in Azarshahr, Ajabshir and Maragheh study areas of Urmia Lake catchment area. To achieve this goal, 82 water samples were taken from wells and springs in the plains and the data were chemically analyzed in the laboratory. Descriptive statistical data and correlation matrix of the studied parameters were obtained using SPSS software. By forming the correlation matrix, it was found that the four salinity parameters, soluble oxygen (DO), total soluble solids (TDS) and pH, have the highest correlation with electrical conductivity (EC) compared to other existing parameters. Therefore, the inputs of the model included the four mentioned parameters and the output was selected according to the purpose of the research, electrical conductivity. After standardization, the data entered the MATLAB environment and using ANFIS-FCM method, the electrical conductivity of groundwater was predicted. In this method, 80% of the data (66 samples) were randomly selected for the training data set and 20% of the data (16 samples) were randomly selected for the test data set. For ANFIS-FCM training data set,  $R^2$ , RMSE and VAF values were 0.9999, 0.0032399 and 0.99993, respectively, and also for ANFIS-FCM test data set,  $R^2$ , RMSE and VAF values were 0.9998, respectively, 0.0029949 and 0.99972 were obtained. Using the results of this model, it was found that the estimated electrical conductivity in the studied areas had a very good accuracy and high correlation with the measured values. As a result, the ANFIS-FCM intelligent method is an effective, efficient and accurate way to estimate the physical and chemical parameters of water.

**Keywords:** Electrical conductivity, ANFIS-FCM, Groundwater, Urmia Lake basin