

بررسی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی با استفاده از روش هوشمند در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

حسنیه نظری^۱، بهنام تقوی^۲، دکتر فرنوش حاجی زاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی معدن (اکتشاف)، دانشگاه ارومیه ؛ nazarihosnie@yahoo.com

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی معدن (اکتشاف)، دانشگاه ارومیه ؛ b.taghavi69@gmail.com

^۳ عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه ارومیه ؛ f.hajizadeh@urmia.ac.ir

هدف از این مطالعه بررسی هدایت‌الکتریکی آب زیرزمینی ناشی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب با استفاده از روش ANFIS-FCM در محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. جهت دستیابی به این هدف، ۵۰ نمونه آب از چاه و چشمه‌های دشت‌ها برداشت و داده‌ها در آزمایشگاه مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. آماره‌های توصیفی داده‌ها و ماتریس همبستگی پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار 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 هدایت‌الکتریکی (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 (۴۰ نمونه) برای مجموعه داده آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۱۰ نمونه) برای مجموعه داده آزمون به طور تصادفی انتخاب شدند. برای مجموعه داده آموزش مدل ANFIS-FCM مقادیر R^2 ، RMSE به ترتیب ۰/۹۹۱۵، ۰/۰۰۱۱ بدست آمدند و همچنین برای مجموعه داده آزمون مقادیر R^2 ، RMSE به ترتیب ۰/۹۹۲۱، ۰/۰۰۱۰ 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، دقیق جهت تخمین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب می‌باشد.

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

^۱ nazarihosnie@yahoo.com

^۲ b.taghavi69@gmail.com

^۳ f.hajizadeh@urmia.ac.ir

۱- مقدمه

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 [۱]. 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 [۲]. 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 افزایش شدید شوری آب زیرزمینی مواجه شده‌اند [۳].

شوری آب زیرزمینی با پارامتری نظیر هدایت‌الکتریکی (EC) قابل سنجش است. هدایت‌الکتریکی عکس مقاومت بر حسب اهم بین وجوه روبرو در یک مکعب ۱ سانتی‌متری از محلول آبی در یک دمای مشخص (معمولاً ۲۵ درجه سانتی‌گراد) است [۴]. با افزایش مقدار مقاومت‌الکتریکی، میزان رسانایی یا قابلیت هدایت‌الکتریکی کمتر می‌شود. قابلیت هدایت‌الکتریکی سنگ‌ها با افزایش کلریدها - سولفات‌ها و سایر نمک‌های محلول و نیز آب در آن افزایش می‌یابد [۵].

هدایت‌الکتریکی آب با دستگاہی به نام کنداکتیویتمتر اندازه‌گیری و براساس واحد میکرو موس بر سانتی‌متر گزارش می‌گردد. با اندازه‌گیری هدایت‌الکتریکی می‌توان به کیفیت آب و طبقه‌بندی آن پی برد. هدایت‌الکتریکی و TDS رابطه مستقیم دارند، به طوری که با افزایش TDS، هدایت‌الکتریکی افزایش می‌یابد. به ازاء هریک درجه افزایش درجه حرارت دو درصد از TDS کاسته شده و یک درجه کاهش درجه حرارت دو درصد به TDS اضافه می‌کند [۵]. 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 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: کیفیت آب مخزن را با استفاده از نقشه‌های خود سازمانده و تئوری فازی بررسی کردند [۶]. در پژوهش مشابه، بهره‌برداری از مخزن را با استفاده از سیستم‌های فازی و شبکه عصبی مورد مطالعه قرار دادند [۷]. در پژوهشی دیگر، از ANFIS برای مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی [۸] و نیز برای مدل‌سازی هدایت‌الکتریکی آب‌های زیرزمینی استفاده کردند [۹]. از سویی دیگر، هدایت‌الکتریکی را با استفاده از ANFIS پیش‌بینی کردند. نتایج حاکی از آن بود که روش ANFIS به اندازه کافی برای پیش‌بینی هدایت‌الکتریکی موثر است [۱۰]. یک ایده جدید جهت تعیین موقعیت و مقدار نشست‌های 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 نشست‌های موجود در شبکه واقعی در صورت آموزش صحیح و انتخاب مناسب گره‌های فشارسنجی، گره‌های نشست‌دار به همراه مقدار نشست را با دقت بالایی شناسایی می‌کند [۱۱].

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 [۱۲]. طی پژوهشی از ۳ روش هوشمند منطق فازی تاکاگی - سوگنو،

شبکه‌های عصبی مصنوعی و عصبی - فازی برای تخمین هدایت الکتریکی آبخوان تسوج- آذربایجان شرقی استفاده کردند. براساس نتایج، با وجود مقادیر هدایت هیدرولیکی تخمینی کاملاً متفاوت از طریق دو مدل شبکه عصبی و منطق فازی، ولی این دو مدل اهمیت یکسانی را نشان دادند [۱۳]. 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 [۱۴]. سطح آب زیرزمینی دشت بسطام (ایران) را توسط شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) پیش‌بینی کردند [۱۵]. هم‌چنین، 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 [۱۶]. هم‌چنین با استفاده از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) به پیش‌بینی کیفیت آب زیرزمینی دشت گارو پرداختند [۱۷].

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 به پیش‌بینی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی ناشی از پارامترهای دارای همبستگی بالا با هدایت الکتریکی، در دشت‌های آذرشهر، عجب شیر و مراغه از حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی بپردازیم.

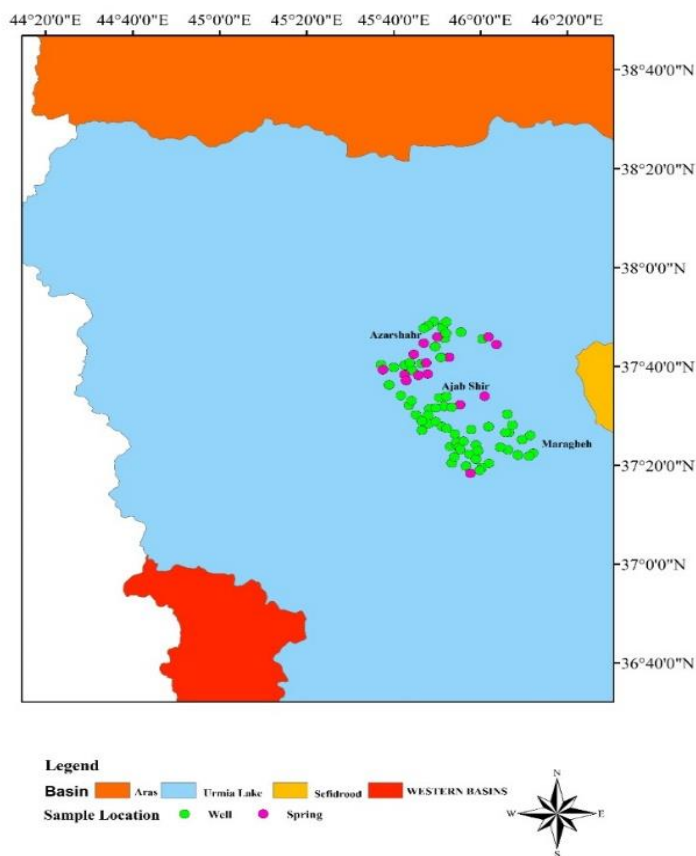
۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر- عجب شیر 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 [۱۸]. 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 بهره برداری 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 [۱۹].

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. ارتفاع متوسط ۱۸۶۸ متر از سطح دریا می‌باشد. آبخوان دشت آذر شهر از نوع آزاد می‌باشد و از لحاظ برداشت و بهره برداری از آبخوان، ممنوعه اعلام شده است [۱۹].

محدوده مطالعاتی عجب شیر 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 عجب شیر از نوع آزاد

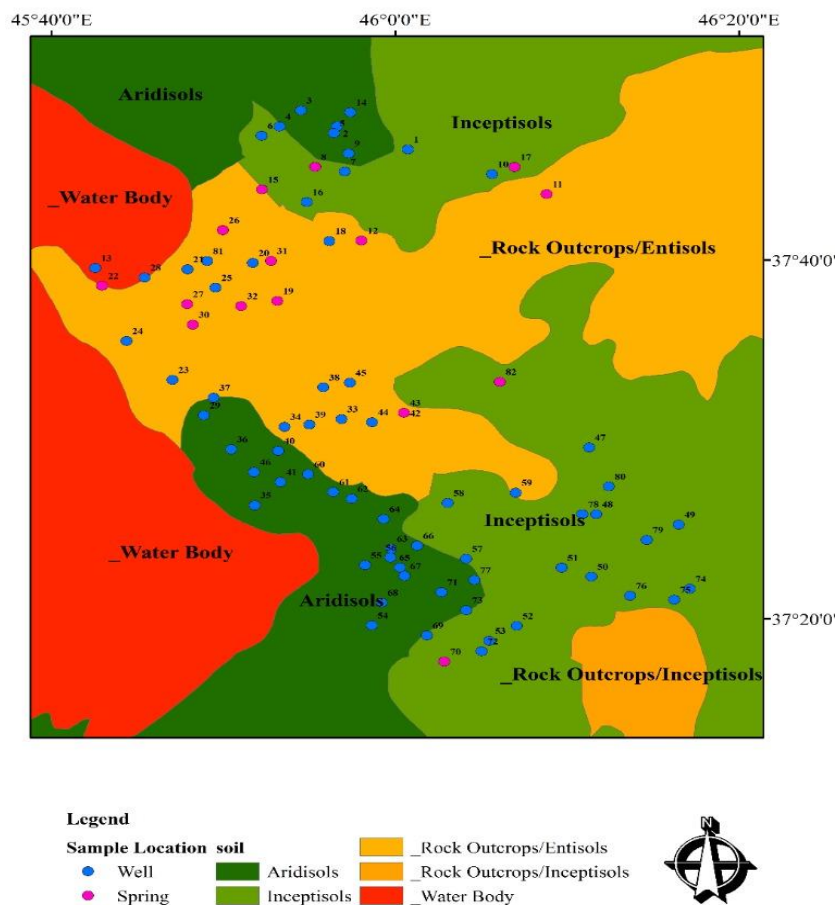
می باشد [۱۹].



شکل ۱- موقعیت محدوده های مطالعاتی آذرشهر - عجب شیر و مراغه در حوضه ی آبریز دریاچه ارومیه

۳- نمونه برداری و آماده سازی نمونه ها

در این پژوهش براساس موجودیت منابع آبی در منطقه، وسعت محدوده مورد مطالعه، جهت جریان آب در آبخوان ها و فاصله نقاط تا دریاچه؛ تعداد ۸۲ منبع شامل چاه و چشمه جهت نمونه برداری توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور مشخص گردید. نمونه برداری از منابع مورد نظر در ۳ محدوده مطالعاتی آذر شهر، عجب شیر و مراغه در استان آذربایجان شرقی در ماه تیر (فصل خشک) در سال ۱۳۹۳ انجام شده است. در هر نقطه نمونه برداری؛ ۲ نمونه ۲۵۰ میلی لیتری برداشت گردیده و از طرفی pH نمونه آبی که جهت آنالیز کاتیون ها برداشت شده توسط اسید نیتریک با خلوص ۶۵ درصد به زیر ۱/۶ رسید. از دونمونه برداشت شده، یک نمونه برای آنالیز کاتیون ها (طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی و نشر نور پلاسمای جفت شده القایی) و نمونه دیگر، جهت آنالیز آنیون ها (کروماتوگرافی یونی و تیتراسیون) به آزمایشگاه ارسال شد. نمونه ها از محل نمونه برداری تا رسیدن به آزمایشگاه در شرایط استاندارد، ۴-۰ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. موقعیت نقاط نمونه برداری در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه برداری در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، عجب شیر و مراغه

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 [۲۰ و ۲۱]. 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 [۲۲]، 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 [۲۳].

سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی^۴ که توسط جانگ^۵ (۱۹۹۳) معرفی شد، یک سامانه استنتاج فازی است که پارامترهای تابع عضویت آن به روش پس انتشار^۶ به تنهایی و یا همراه با روش کمترین مربعات^۷ تعدیل می‌شود [۲۴]. در این پژوهش یک مدل انفیس برای شناسایی توابع عضویت بکار رفته است که عبارت است از: روش فازی C- میانگین^۸ که در ادامه به توضیح اجمالی این مدل می‌پردازیم.

4. Adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)

5. Jang

6. backpropagation

7. least squares

5. Fuzzy C-means Method (FCM)

۴-۱- فازی C- میانگین

روش فازی C- میانگین یک الگوریتم خوشه‌بندی داده توسط بزیدیک ارائه شده است [۲۵]. که در آن هر داده متعلق به یک خوشه با درجه مشخص شده توسط درجه عضویت می‌باشد. روش فازی C- میانگین، پاریشن‌بندی 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 C ، $i = 1, 2, \dots, C$ ، c_i 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

برخی پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب از قبیل، درجه حرارت (T) (درجه سانتی‌گراد)، میزان اکسیژن محلول (DO) (میلی گرم بر لیتر) شاخصی که برای تعیین کیفیت آب استفاده می‌شود. DO معمولاً در بررسی‌های کیفی آب و فاضلاب و همچنین تصفیه آب کاربرد فراوانی دارد، pH یک واحد اندازه‌گیری است که میزان اسیدی یا قلیایی بودن یک نمونه (آب یا سایر مواد) را با اندازه‌گیری میزان یون هیدروژن در محیط نشان می‌دهد، پتانسیل اکسایش - کاهش (Eh) (میلی ولت) عبارت از اندازه‌گیری نسبی شدت اکسیداسیون و احیا در محلول و یا غلظت الکترون‌ها در محلول می‌باشد، میزان هدایت الکتریکی EC (میکروزیمنس بر سانتی متر) توانایی آب در انتقال جریان الکتریکی، کل مواد جامد محلول TDS (ppm) حاصل کل کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول در آب 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 ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج آنالیز آب نشان می‌دهد که میزان تغییر فاکتور pH بین ۸/۷۷ - ۵/۹۸، میزان تغییر هدایت الکتریکی بین ۱۸۱۳۰ - ۱۵۴/۰ μS و میزان تغییر کل مواد جامد محلول بین ۱۶۶۶۰ - ۱۴۱/۴ ppm می‌باشد. در مورد فاکتور شوری مشاهده می‌شود که تغییر شوری بین ۲۰۷۴۰ - ۱۲۸/۸ ppm است و تغییر اکسیژن محلول بین ۷/۹۱ mg/L - ۱/۸۹ است. دما بین ۲۹/۴۰°C - ۱۳/۵ و Eh بین ۱۳/۵ - ۴۰۷/۲۰ مv متغیر است.

جدول ۱- نتایج پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه گیری شده به صورت درجا در محدوده‌های مطالعاتی آذرشهر، عجب شیر و مراغه

Sample	T (°C)	DO (mg/L)	pH	Eh (Mv)	EC (μS)	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	۱۴۹۱	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
U-WFA-14	۲۰/۵	۴/۱۹	۷/۱۳	۲۰۳/۹	۱۳۱۳	۱۲۰۲	۱۲۴۸
U-SFA-15	۱۹	۲/۶۰	۵/۹۸	۲۱۰/۲	۲۵۸۶	۲۳۶۶	۲۴۳۷
U-WFA-16	۲۱/۶	۶/۵۵	۷/۹۷	۱۶۵/۱	۷۹۷/۷	۷۲۸	۷۳۳
U-SFA-17	۱۹/۵	۶/۶۵	۸/۱۱	۹۴/۲	۵۸۱/۸	۵۳۱/۲	۵۳۰/۷
U-WFA-18	۱۷/۴	۴/۷۴	۶/۸۰	۱۶۱/۵	۱۱۶۹	۱۰۶۹	۱۰۷۸
U-SFA-19	۲۰/۶	۶/۷۴	۸/۳۱	۲۰۸/۳	۴۶۰/۶	۴۲۰/۳	۴۱۶/۱
U-WFA-20	۱۸/۷	۳/۰۷	۶/۴۷	۲۰۷/۱	۱۶۷۵	۱۵۴۱	۱۶۱۹
U-WFA-21	۱۹/۲	۱/۸۱	۶/۹۴	۱۷۳/۸	۳۲۰۹	۲۹۳۸	۳۰۱۶
U-SFA-22	۲۹/۴	۴/۵۲	۷/۶۴	۱۸۱/۷	۶۴۸	۵۹۵/۵	۵۹۸/۳
U-WFA-23	۲۱/۷	۴/۵۶	۷/۱۰	۱۴۶/۸	۳۱۱۷	۲۸۶۳	۳۱۰۰
U-WFA-24	۲۳/۱	۴/۶۹	۷/۲۷	۱۵۳/۴	۱۷۶۳	۱۶۲۶	۱۷۰۴
U-WFA-25	۲۱/۲	۵/۲۴	۷/۰۴	۲۱۸/۴	۱۳۶۰	۱۲۴۳	۱۲۹۲
U-SFA-26	۲۴/۳	۲/۱۶	۶/۸	۱۵۰/۴	۵۹۴۹	۵۴۴۳	۶۲۰۰
U-SFA-27	۲۰/۶	۷/۷۴	۸/۷۷	۱۵۶/۳	۹۳۰	۸۹۴/۴	۸۵۵/۸
U-WFA-28	۱۸/۴	۲/۹۰	۶/۶۴	۱۷۶/۵	۵۷۵۴	۵۲۷۸	۵۹۵۲
U-WFA-29	۱۸/۱	۲/۸۳	۶/۶۸	۱۷۴	۴۲۴۵	۳۸۹۸	۴۳۰۱
U-SFA-30	۲۴/۵	۶/۷۵	۸/۵۸	۴۰۷/۲	۳۵۸/۲	۳۲۷/۱	۳۲۳/۱
U-SFA-31	۲۱/۵	۷/۳۵	۸/۵۲	۱۵۴/۴	۸۵۱/۷	۷۷۷	۷۹۰/۱
U-SFA-32	۱۸/۹	۷/۹۱	۸/۵۳	۱۸۲	۱۱۸۶	۱۰۸۷	۱۰۹۶
U-WFA-33	۲۰/۴	۳/۴۸	۷/۲۹	۲۰۸/۱	۸۹۸	۸۲۴/۴	۸۳۵/۴
U-WFA-34	۱۷/۶	۳/۵۲	۷/۰۴	۲۱۳/۲	۱۱۴۷	۱۰۵۳	۱۰۶۴
U-WFA-35	۲۰/۸	۳/۱۸	۷/۸۴	۹۲/۶	۵۱۲۸	۴۶۹۱	۵۲۰۵
U-WFA-36	۱۸/۶	۶/۰۹	۸/۱۷	۱۱۶/۳	۱۰۳۵	۹۴۴/۲	۹۶۴/۶
U-WFA-37	۲۱/۳	۵/۶۰	۶/۶۲	۱۶۵/۸	۱۴۰۵	۱۲۸۲	۱۳۱۷
U-WFA-39	۱۷/۴	۴/۴۷	۷/۶۱	۱۹۷/۳	۷۳۷	۶۷۷/۷	۶۸۳/۷
U-WFA-40	۱۸	۳/۹۶	۷/۴۲	۲۰۸	۱۰۳۱	۹۵۰/۱	۹۷۴/۷
U-WFA-41	۱۹/۷	۴/۹۲	۷/۷۳	۱۳۳/۹	۱۳۵۸	۱۲۳۹	۱۲۴۰

U-WFA-42	۱۹	۴/۲۱	۷/۷۴	۱۱۷/۷	۱۶۶۵	۱۵۱۹	۱۵۷۸
U-SFA-43	۲۱/۹	۶/۳۸	۷/۰۶	۱۰۸/۴	۸۸۶/۵	۸۰۸/۴	۸۱۲/۲
U-SFA-44	۲۱/۱	۶/۸۴	۷/۵۵	۱۷۰/۳	۶۱۵/۸	۵۶۲/۱	۵۶۳/۶
U-WFA-45	۲۰/۷	۶/۱۶	۷/۷۹	۱۵۲	۸۸۰	۸۰۴	۸۱۱/۲
U-WFA-46	۱۸/۲	۴/۰۲	۷/۴۳	۱۹۲/۶	۹۱۵	۸۳۹/۵	۸۳۸/۴
U-WFA-47	۲۱/۳	۳/۵۱	۸/۰۸	۱۰۹/۴	۱۰۹۹	۱۰۸۸	۱۰۱۴
U-WFA-48	۱۶/۳	۳/۷۳	۷/۱۲	۱۹۴/۴	۷۲۱	۶۶۲/۷	۶۶۴
U-WFA-49	۱۷/۵	۲/۲۹	۶/۸۲	۲۱۵/۹	۱۰۰۸	۹۲۵/۱	۹۵۰/۱
U-WFA-50	۲۱/۵	۷/۲۵	۸/۲۳	۱۳۴/۱	۲۹۰/۲	۲۶۴/۸	۲۵۴/۱

جدول ۲- محاسبه شاخص آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه گیری شده به صورت درجا در محدوده های مطالعاتی آذرشهر، شیرامین، عجب شیر و مراغه - چاه

پارامتر / شاخص آماری	T(°C)	DO(mg/L)	pH	Eh(Mv)	EC(μS)	TDS(mg/L)	Salinity(mg/L)
تعداد نمونه	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
حداکثر	۲۴/۸	۷/۹۱	۸/۵۳	۲۶۰/۶	۱۸۱۳۰	۱۶۶۶۰	۲۰۷۴۰
حداقل	۱۴/۶	۱/۸۱	۶/۱۳	۹۲/۶	۲۹۰/۲	۲۶۴/۸	۲۵۴/۱
میانگین حسابی	۱۹/۴۵	۴/۷۵	۷/۲۳	۱۷۴/۲۰	۲۵۶۳/۸۸	۲۳۵۱/۶۳	۲۶۰۷/۷
میانه	۱۹/۷	۷/۵۰	۶/۹۵	۱۲۱/۴	۱۲۱۱	۱۱۰۸	۱۱۳۷
واریانس	۴/۸۹	۲/۷۹	۰/۳۱	۱۹۷۱/۷	۱۴۱۶۲۹۳۷/۸۵	۱۱۹۲۳۶۱۷/۴۲	۱۸۰۰۲۴۸۱/۱۱
انحراف معیار	۲/۲۱	۱/۶۷	۰/۵۶۰	۴۴/۴	۳۷۶۳/۳۶	۳۴۵۳/۰۵۹	۴۲۴۲/۹۳۰
چولگی	-۰/۱۵۳	۰/۲۰۱	۰/۳۸۲	-۰/۱۵۸	۳/۲۷۵	۳/۲۷۹	۳/۴۷۱
کشیدگی	۰/۱۷۱	-۱/۰۹۹	-۰/۳۷۵	-۰/۸۹۲	۱۰/۹۸۹	۱۱/۰۲۳	۱۲/۲۹۱
ضریب تغییرات	۰/۱۱۳	۰/۳۵۱	۰/۰۷۷۴	۰/۲۵۴۸	۱/۴۶۷	۱/۴۶۸	۱/۶۲۷

جدول ۳- محاسبه شاخص آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه گیری شده به صورت درجا در محدوده های مطالعاتی آذرشهر، شیرامین، عجب شیر و مراغه - چشمه

پارامتر / شاخص آماری	T(°C)	DO (mg/L)	pH	Eh(Mv)	EC(μS)	TDS(mg/L)	Salinity (mg/L)
تعداد نمونه	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳
حداکثر	۲۹/۴۰	۷/۷۴	۸/۷۷	۴۰۷/۲۰	۵۹۴۹/۰۰	۵۴۴۳/۰۰	۶۲۰۰/۰۰
حداقل	۱۳/۵۰	۲/۱۶	۵/۹۸	۹۰/۶۰	۱۵۴/۰۰	۱۴۱/۴۰	۱۲۸/۸۰
میانگین حسابی	۲۰/۶۳	۵/۲۳	۷/۷۸	۱۷۲/۷۲	۱۶۰۲/۳۰	۱۴۷۰/۱۳	۱۵۷۰/۹۷
میانه	۲۹/۴	۴/۵۲	۷/۶۴	۱۸۱/۷	۶۴۸	۵۹۵/۵	۵۹۸/۳
واریانس	۱۴/۷۸	۴/۷۸	۰/۷۱	۶۳۳۵/۱۶۰	۲۹۴۵۲۶۰/۰۱۶	۲۴۶۷۱۱۵/۸۷۷	۳۱۹۹۴۴۲/۴۴۴
انحراف معیار	۳/۸۴	۲/۱۸	۰/۸۴۷	۷۹/۵۹	۱۷۱۶/۱۷	۱۵۷۰/۷۰	۱۷۸۸/۶۹

چولگی	۰/۶۳۹	-۰/۳۷۱	-۰/۹۵۷	۲/۲۹	۱/۷۹	۱/۷۸	۱/۸۹
کشیدگی	۱/۷۵	-۱/۷۷	۰/۰۸۶	۶/۷۹	۲/۷۱	۲/۶۹	۳/۱۷
ضریب تغییرات	۰/۱۸	۰/۴۱	۰/۱۰	۰/۴۶	۱/۰۷	۱/۰۶	۱/۱۳

۵-۱- 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^۹ 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 ۵۰ داده بود که از این تعداد به طور تصادفی، ۸۰ درصد داده‌ها (۵۰ داده) به عنوان داده‌های آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۱۰ داده) به عنوان داده‌های آزمون انتخاب گردیدند.

جدول ۴- ماتریس همبستگی بین پارامترهای اندازه گیری شده

						۱	DO
						۱	pH
				۱	۰/۲۲۵*	۰/۰۷۱	T
			۱	۰/۰۴۹	-۰/۴۰۴**	-۰/۳۳۶**	EC
		۱	۰/۰۲۸	۰/۰۷۷	-۰/۱۶۹	-۰/۱۷۸	Eh
	۱	۰/۰۲۷	۱/۰۰۰**	۰/۰۴۳	-۰/۴۰۵**	-۰/۳۳۸**	TDS
۱	۰/۹۹۷**	۰/۰۲۴	۰/۹۹۷**	۰/۰۴۳	-۰/۳۹۷**	-۰/۳۲۷**	Salinity
Salinity	TDS	Eh	EC	T	pH	DO	

* = همبستگی معنی‌دار آماری در سطح اطمینان ۵ درصد

** = همبستگی معنی‌دار آماری در سطح اطمینان ۱ درصد

۵-۱-۱- استانداردسازی داده‌ها

برای ورود داده‌ها به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی، لازم است که دامنه تغییرات داده‌ها مشابه یکدیگر باشد که در اصطلاح این عمل را، استانداردسازی داده‌ها می‌نامند. استاندارد سازی داده‌ها برای ورود به سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی نیز 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 [۲۶ و ۲۷].

^۹ . Pearson

۵-۱-۲- معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

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

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

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

که در آنها:

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 ۱ و در بدترین حالت مقدار آن برابر ۰ خواهد بود.

معیار $RMSE^{10}$ ، نیز بیانگر خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشد و هر چه مقدار $RMSE$ کمتر باشد عملکرد مدل از اطمینان بیشتری برخوردار است.

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

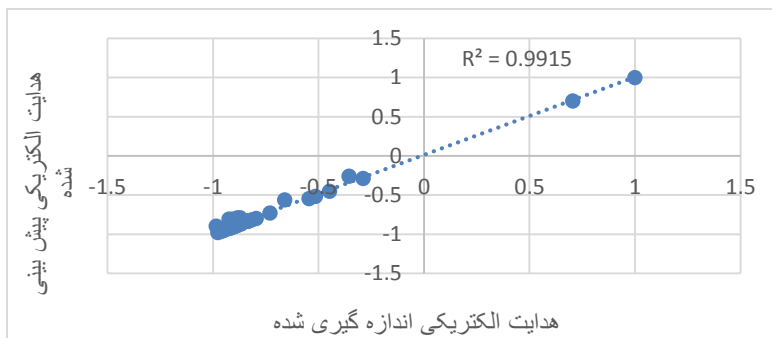
در این پژوهش، آموزش و آزمون مدل ANFIS-FCM برای مجموعه داده‌ها انجام شد. نتایج بدست آمده از مدل در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطوری که در این جدول مشاهده می‌کنید روش ANFIS-FCM برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی آب زیرزمینی از اطمینان و دقت بالایی برخوردار است.

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

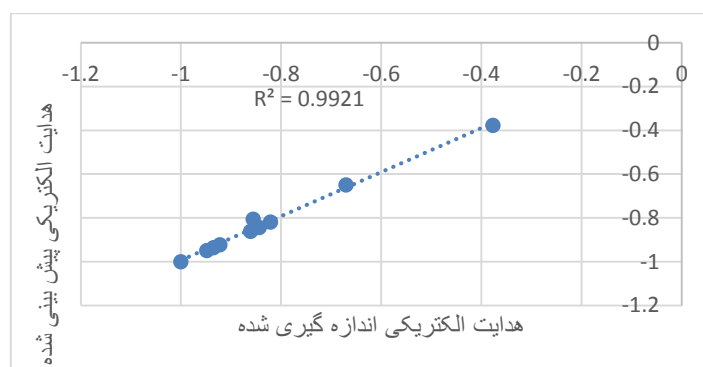
مجموعه داده		R^2	RMSE
هدایت الکتریکی آب زیرزمینی (ANFIS-FCM)	آموزش	۰/۹۹۱۵	۰/۰۰۱۱
	آزمون	۰/۹۹۲۱	۰/۰۰۱۰

شکل‌های ۳ و ۴ 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 و ۶ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که مدل ANFIS-FCM قابلیت بالایی در برآورد هدایت الکتریکی 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.

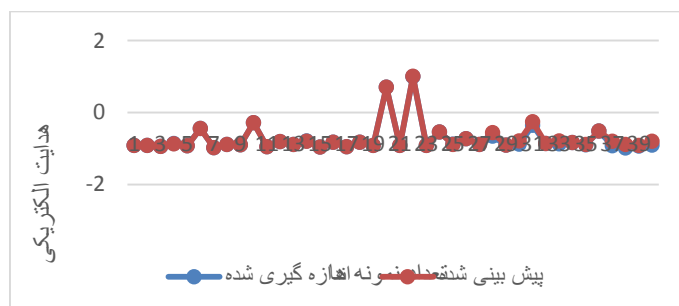
¹⁰. Root Mean Squared Error(RMSE)



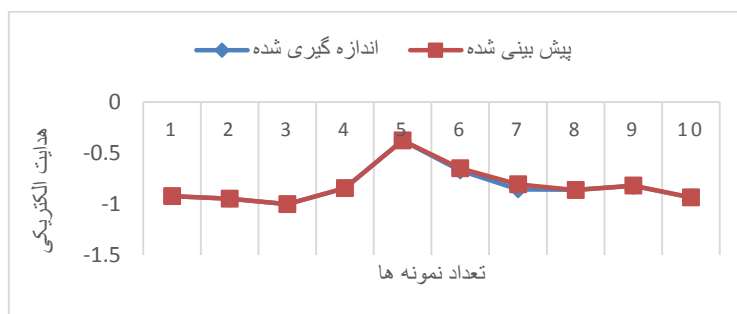
شکل ۳- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آموزش (ANFIS-FCM)



شکل ۴- همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آزمون (ANFIS-FCM)



شکل ۵- نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آموزش (ANFIS-FCM)



شکل ۶- نمودار مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده آزمون (ANFIS-FCM)

۶- نتیجه گیری

نتایج آنالیز و پیش‌پردازش داده‌ها، همبستگی بین پارامترها، با استفاده از ماتریس همبستگی که در نرم افزار 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 هدایت الکتریکی (EC) دارند. با انتخاب پارامترهای یاد شده به عنوان ورودی‌های مدل ANFIS-FCM و انتخاب هدایت الکتریکی آب زیرزمینی به عنوان خروجی، با توجه به هدف تحقیق و در نظر گرفتن ۸۰ درصد داده‌ها (۴۰ نمونه) برای مجموعه داده آموزش و ۲۰ درصد داده‌ها (۱۰ نمونه) برای مجموعه داده آزمون به طور تصادفی، برای مجموعه داده آموزش مدل ANFIS-FCM مقادیر R^2 ، RMSE به ترتیب ۰/۰۰۱۱، ۰/۹۹۱۵، ۰/۰۰۱۱ بدست آمدند و همچنین برای مجموعه داده آزمون مدل ANFIS-FCM مقادیر R^2 ، RMSE به ترتیب ۰/۹۹۲۱، ۰/۰۰۱۰ حاصل گردید.

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

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.

مراجع

- [۱] Madan, K.J., Kamii, Y., Chikamori, K., Cost-effective approaches for sustainable groundwater management in alluvial aquifer system, *Water Resources Management*, 23(2), 219-233, 2008.
- [۲] شعبانی، م؛ تعیین مناسب‌ترین روش زمین آمار در تهیه نقشه تغییرات pH و TDS آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان، مجله مهندسی آب، سال اول، ۱۳۸۷، ۴۷-۵۸.
- [۳] Shahrabi, M., Description of Geological Map of Urmia, Geological Survey of Iran, 81p, 1972.
- [۴] Honslow, A.W., *Water Quality Data Analysis and interpretation*, Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma. Lewis Publishers, 397 p, 1995.
- [۵] حجت، آ؛ رنجبر، ح؛ اصول ژئوالکترونیک کاربردی، موسسه انتشارات ستایش، ۱۳۹۰.
- [۶] Lu, R.S., Lo, S.L., Diagnosing reservoir water quality using self-organizing maps and fuzzy theory, *Water Research*, 36, 2265-2274, 2002.
- [۷] Hasebe, M., Nagayama, Y., Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support, *Advances in Engineering Software*, 33, 245-260, 2002.
- [۸] Nayak, P.C., Sudheer, K.P., Rangan, D.M., Ramasastri, K.S., A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series, *Journal of Hydrology*, 291, 52-66, 2004.
- [۹] Tutmez, B., Hatipoglu, Z., Kaymak, U., Modelling electrical conductivity of groundwater using an adaptive neuro-fuzzy inference system, *Computers & Geosciences*, 32, 421-433, 2006.
- [۱۰] Akbarzadeh, S., Arof, A.K., Ramesh, S., Khanmirzaei, M.H., Nor, R.M, Prediction of Conductivity by Adaptive Neuro-Fuzzy Model, *PLoS ONE*, 9(3): e92241, 2014.
- [۱۱] بیکی حسن آباد، حامد؛ رستمی، فاطمه؛ روش نوین نشت‌یابی در شبکه‌های آبرسانی با استفاده از ANFIS، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی، ۱۳۹۶.
- [۱۲] Banerjee, P., Singh, V.S., Chattopadhyay, K., Chandra, P.C., Singh, B., Artificial neural network model as a potential alternative for groundwater salinity forecasting, *Journal of Hydrology*, 398(4), 212-220, 2011.
- [۱۳] Nadiri, A., Chitsazan, N., Tsai, F.T.C., Asghari Moghaddam, A., Bayesian artificial intelligence model averaging for hydraulic conductivity estimation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(3), 520-532, 2014.
- [۱۴] Moosavi, V., Vafakhah, M., Shirmohammadi, B., Behnia, N., A Wavelet-ANFIS Hybrid Model for Groundwater Level Forecasting for Different Prediction Periods, *Water Resources Management journal*, 27(5), 1301-1321, 2013.
- [۱۵] Emamgholizadeh, S., Moslemi, Kh., Karami, Gh., 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, 2014.
- [۱۶] سعیدی رضوی، ب؛ عرب، ع؛ پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های منطق فازی، شبکه عصبی و سری زمانی، مجله هیدروژئولوژی، سال سوم، شماره ۲، ۸۱-۶۹، ۱۳۹۷.
- [۱۷] Dolati Kordestani, M., Nohegar, A., Janizadeh, S., Assessment of some Artificial Intelligence (AI)-based models for groundwater quality prediction (case study: Garoo plain), *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 6(17), 27-42, 2018.
- [۱۸] آقاباتی، ع؛ زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۰۰ صفحه، ۱۳۸۳.
- [۱۹] شرکت مدیریت منابع ایران، معاونت مطالعات پایه و مدیریت حوضه‌های آبریز دفتر مطالعات پایه منابع آب؛ "اطلاعات آبخوان‌های کشور"، ۱۳۹۰.
- [۲۰] Srinivasan, K., Fisher, D., Machine Learning Approaches to Estimating Software Development Effort, *IEEE Transactions on*

Software Engineering, 21(2), 126–137, 1995.

[۲۱] Jang, J.S.R., Sun, C.T., Mizutani, E., Neuro-Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Prentice Hall, 640p, 1997.

[۲۲] Kosko, B., Neural Networks and Fuzzy Systems". A Dynamical Approach to Machine Intelligence, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 449p, 1992.

[۲۳] Nava, P., Taylor, J., The Optimization of Neural Network Performance through Incorporation of Fuzzy Theory, In: 11th Conference on Systems Engineering, 897-901, 1996.

[۲۴] MATLAB user's guide, Fuzzy logic Toolbox, by the math works Inc, 2006.

[۲۵] Bezdek, J.C., Fuzzy mathematics in pattern classification, Cornell university, Ithaca, 1973.

[۲۶] Gholami, R., Moradzadeh, A., Maleki, S., Amiri, S., Hanachi, J., Applications of artificial intelligence methods in prediction of permeability in hydrocarbon reservoirs, J Pet Sci Eng, 122, 643-56, 2014.

[۲۷] Jayalakshmi, T., Santhakumaran, A., Statistical normalization and back propagation for classification, Int J Comput Theory Eng, 3(1), 1793-8201, 2011.