

مقایسه روش‌های سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)، وزن‌دهی معکوس فاصله و زمین‌آمار در تخمین سطح ایستابی (مطالعه موردی: دشت دهگلان، استان کردستان)

مهدی کرد^{۱*}، نسرین یوسفی^۲، اسفندیار عباس نوین‌پور^۳

۱. استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد رشته هیدروژئولوژی، دانشگاه ارومیه

۳. استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۷/۱۳)

چکیده

افت سطح ایستابی از نظر مدیریتی بسیار اهمیت دارد و می‌تواند تأثیرات منفی مانند نشست زمین، افزایش هزینه برداشت و کاهش کیفیت آب زیرزمینی را در پی داشته باشد. آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب در دشت دهگلان بوده و برداشت زیاد، سبب کاهش سطح ایستابی در این دشت شده است. این دشت با وسعتی حدود ۷۸۰ کیلومتر مربع، یکی از دشت‌های ممنوعه استان است و با افت سطح آبخوان نزدیک به ۳۷ متر، بین دشت‌های استان بیشترین افت را داشته است. هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی و مقایسه عملکرد روش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با روش‌های وزن‌دهی معکوس فاصله، کریجینگ و کوکریجینگ است. به این منظور، از داده‌های سطح ایستابی ۴۴ حلقه پیزومتر دشت دهگلان مربوط به شهریور ۱۳۹۵ استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیان می‌کند که رفتار بار هیدرولیکی در قسمت‌های مختلف آبخوان، متفاوت است و در نتیجه به‌کارگیری صرف داده‌های مکانی بار هیدرولیکی برای مدل‌سازی، نتایج رضایت‌بخشی ندارد. سطح ایستابی در دشت دهگلان، با توپوگرافی بیشترین همبستگی را دارد و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با به‌کارگیری پارامتر کمکی توپوگرافی دارای $RMSE=0/07$ ، $MSE=0/005$ ، $MAE=0/06$ ، $MBE=0/04$ و $R^2=0/88$ بوده و نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری داشته است.

کلیدواژگان: آب زیرزمینی، استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)، دشت دهگلان، زمین‌آمار.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین نیازهای آبی در بیشتر نقاط دنیا به شمار می‌روند. افزایش نیازهای آبی در بخش‌های متفاوت و برداشت بیش از ظرفیت آبخوان‌ها سبب تخریب این منابع با ارزش و افت تراز سطح آب زیرزمینی شده است [۱]. افت سطح ایستابی از نظر مدیریتی بسیار اهمیت دارد و می‌تواند تأثیرات منفی مانند نشست زمین، افزایش هزینه برداشت و کاهش کیفیت آب زیرزمینی را در پی داشته باشد. آب زیرزمینی مهم‌ترین منبع تأمین آب در دشت دهگلان بوده و برداشت زیاد، سبب کاهش سطح ایستابی در این دشت شده است. به دلیل اهمیت این موضوع، تا کنون مطالعات متعددی برای مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت دهگلان انجام شده است. در یکی از این مطالعات، مدل‌سازی آب زیرزمینی دشت دهگلان با استفاده از کد کامپیوتری MODFLOW انجام شد. نتایج تحقیق یادشده نشان داد پارامترهای عمق سنگ کف، پارامترهای هیدرولیکی و تغذیه از بارش، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر سطح ایستابی دارند [۲]. دو مطالعه دیگر نیز با استفاده از MODFLOW و به‌کارگیری داده‌های مربوط به سال‌های آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲ و ۱۳۸۲-۱۳۸۳ مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دهگلان را انجام دادند. نتایج مطالعات یادشده نشان داد آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی عمودی به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر دقت پیش‌بینی مدل کامپیوتری دارند [۳ و ۴]. در تحقیقی دیگر، از شبکه عصبی و سیستم استنتاج عصبی-فازی برای پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی سیستم منابع آب زیرزمینی دشت دهگلان استفاده شد. در پژوهش یادشده از مقادیر زمانی عمق سطح آب زیرزمینی، بارندگی، تبخیر و دما برای گسترش مدل‌های پیشنهادی استفاده شد [۵].

طی سال‌های گذشته، مطالعات وسیعی به منظور کاربرد مدل‌های زمین‌آمار و هوش مصنوعی در زمینه‌های مختلفی مانند مدل‌سازی سطح ایستابی انجام شده است. دانش زمین‌آمار به خلاف آمار کلاسیک علاوه بر مقادیر متغیرها، مکان و موقعیت نسبی آنها را نیز در نظر می‌گیرد. نخستین بار علم زمین‌آمار توسط جرج ماترون در دهه ۱۹۶۰ پایه‌گذاری شد. بعدها این روش در تخمین علوم محیطی و به طور مشخص در تخمین سطح ایستابی به کار گرفته شد که نتایج بهتری نسبت به روش آمار کلاسیک داشت [۶]. یکی از مزایای دانش زمین‌آمار این است که می‌تواند تغییرات یک

پدیده را به‌صورت زمانی و مکانی و محاسبه عدم قطعیت آن مدل‌سازی کند [۷]. منطق فازی نیز نظریه‌ای نسبتاً جدید در علوم ریاضی است که به‌جای فرمول‌های ریاضی، از متغیرهای زبانی استفاده می‌کند. این علم، بیان ریاضی بسیاری از مفاهیم، متغیرها و سیستم‌های کم‌دقت و مبهم را ممکن ساخت و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان، فراهم آورد. منطق فازی نخستین‌بار در دهه ۱۹۶۰ میلادی توسط پروفیسور عسکرزاده مطرح شد [۸ و ۹]. کارایی این روش‌ها در مطالعات متعددی ارزیابی شده است. در یک بررسی عملکرد دو روش مدل‌سازی زمین‌آمار (کریجینگ) و منطق فازی در درون‌یابی مکانی غلظت نترات در آب‌های زیرزمینی نشان داد منطق فازی نسبت به زمین‌آمار دقت بیشتری دارد [۱۰]. کارایی روش ترکیبی زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک در تخمین سطح آب زیرزمینی دشت رامهرمز در مطالعه‌ای دیگر بررسی شد و نتایج به‌دست‌آمده از بررسی نشان داد روش کوکریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای گوسین، بهترین روش زمین‌آمار برای تخمین سطح ایستابی و ترکیب با شبکه‌های عصبی است [۱۱]. مطالعه تکنیک‌های هوشمند مانند سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) به عنوان ابزاری کاملاً انعطاف‌پذیر در شبیه‌سازی تغییرات غلظت نترات در آب چاه و چشمه نشان داد شبیه‌سازی نترات در سیستم ANFIS بهتر از SVM بوده و همچنین این شبیه‌سازی برای آب چشمه نسبت به آب چاه بهتر بوده است [۱۲]. بررسی عملکرد کریجینگ معمولی به‌عنوان یک تخمینگر زمین‌آمار خطی و دو روش هوشمند از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی تطبیقی نیز موضوع مطالعه دیگری بود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مدل ANFIS بیشترین دقت را در بین مدل‌ها دارد [۱۳]. در پژوهشی دیگر، کارایی شبکه عصبی مصنوعی ANN و سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی در تخمین هدایت هیدرولیکی آبخوان مراغه - بناب با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی مقایسه شد و این نتیجه به دست آمد که علاوه بر کارایی زیاد هر دو مدل، مدل ANFIS که ترکیبی از شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی است، دقت و قدرت تخمین

ایستایی، می‌تواند در فهم رفتار سطح ایستایی در مکان‌های مختلف آبخوان مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

دشت دهگلان با وسعت ۷۸۰ کیلومتر مربع در شرق استان کردستان قرار دارد. متوسط بارندگی دشت دهگلان ۳۵۰ میلی‌متر در سال و اقلیم آن براساس روش آمبرژه، نیمه‌خشک سرد است. پتانسیل آب‌های سطحی دهگلان ضعیف است [۱۸]. حوضه دهگلان جزء پهنه سنندج - سیرجان است. محدوده مطالعه شده بین طول‌های ۶۹۹۸۰۰ و ۷۵۲۴۰۰ متر شرقی و عرض‌های ۳۸۹۵۴۰۰ تا ۳۹۱۹۴۰۰ متر شمالی از زون ۳۸ شمالی، گسترده شده است (شکل ۱). این دشت به دلیل وسعت، شرایط مناسب کشاورزی، زمین‌شناسی و آب و هوایی، اهمیت زیادی دارد. در این دشت جنس مناسب سازندهای زمین‌شناسی و میزان تغذیه کافی ناشی از نزولات جوی سبب تشکیل منابع آب زیرزمینی با ویژگی‌های کمی و کیفی مناسب از نظر شرب و کشاورزی شده است. محل تغذیه آب‌های سطحی (رود تلوار) و زیرزمینی دشت، ارتفاعات اطراف آن است که از بارش برف و باران بهره‌مند شده‌اند [۱۹]. نوع آبخوان دشت دهگلان از نوع آزاد است و بیشترین بار هیدرولیک در قسمت غرب و جنوب غربی آبخوان قرار دارد. جهت جریان آب زیرزمینی در این دشت از سمت غرب و جنوب غربی به سمت شرق و شمال شرقی است که با جهت حرکت آب‌های سطحی هم‌خوانی دارد. دشت دهگلان یکی از دشت‌های ممنوعه استان بوده و با افت سطح آبخوان نزدیک به ۳۷ متر در بین دشت‌های استان بیشترین افت را داشته است. ۴۴ پیژومتر در این دشت قرار دارد که با استفاده از آنها تغییرات سطح ایستایی اندازه‌گیری می‌شود.

روش‌های درون‌یابی

کریجینگ

مهم‌ترین روش درون‌یابی در زمین‌آمار است که بر اساس مدل خطی زیر انجام می‌شود (رابطه ۱):

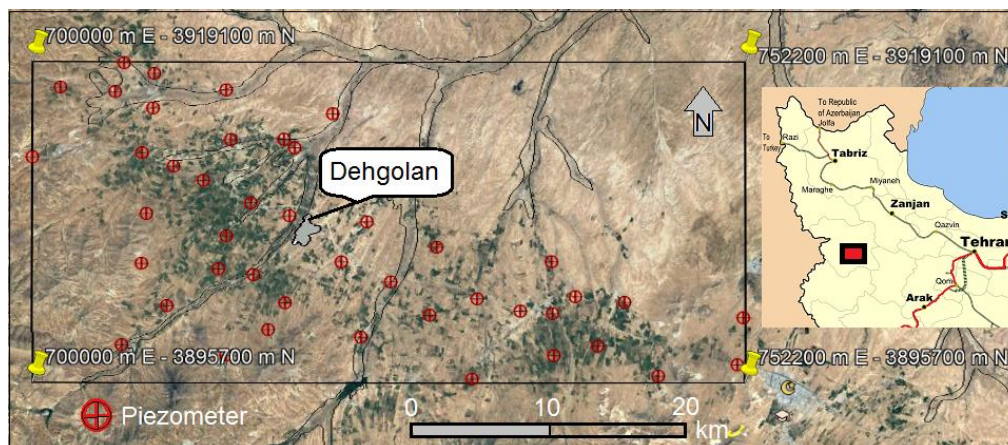
$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

در رابطه یادشده $Z^*(x)$ مقدار مشاهداتی در موقعیت

ام است، λ_i مقدار وزن مقدار مشاهداتی در موقعیت i ام،

زیادی دارد [۱۴]. در مقایسه‌ای که بین روش‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی - مصنوعی برای تخمین سطح آب زیرزمینی دشت نورآباد استان لرستان انجام شد، نتایج نشان داد روش کوکریجینگ توانایی زیادی در درون‌یابی و تخمین مقادیر کمینه و بیشینه سطح آب‌های زیرزمینی دارد [۶]. در پژوهش دیگری از داده‌های ۳۰ حلقه چاه مشاهده‌ای و بر اساس تئوری زمین‌آمار و مدل زمین‌آمار Arc Gis، برای تخمین میزان کاهش سطح آب زیرزمینی در پکن استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده نشان داد روش کریجینگ ساده نسبت به سایر روش‌ها مناسب‌تر است [۱۵]. در مطالعه‌ای دیگر، روش‌های زمین‌آمار و قطعی^۱ در مطالعه تغییرات مکانی عمق آب زیرزمینی در بخش شمال غربی بنگلادش بررسی شد. پژوهشگران مطالعه یادشده نتیجه گرفتند که ورودی‌های مدل به‌شدت در سطح آب زیرزمینی تأثیر گذارند [۱۶]. توابع عضویت در عملکرد ANFIS برای حل مشکلات طبقه‌بندی در مطالعه‌ای دیگر بررسی شد و نتایج به‌دست‌آمده از آن نشان داد تابع عضویت گوسی دقت بیشتر و پیچیدگی کمتری نسبت به سایر روش‌ها دارد [۱۷].

همان‌طور که گفته شد، تا کنون تلاش‌های زیادی برای شبیه‌سازی سطح ایستایی دشت دهگلان انجام شده است [۲-۵]. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعات متفاوت است و گاه با یکدیگر هم‌خوانی ندارد. بزرگ‌ترین ایرادهای واردشده بر مطالعات یادشده این است که پارامترهای هیدرولیکی محاسبه‌شده بعد از واسنجی بسیار کوچک هستند و بر اساس آنها جنس آبخوان در محدوده رس قرار می‌گیرد که صحیح نیست. این موضوع نه‌تنها با داده‌های لاگ حفاری مطابقت ندارد، بلکه با تعریف آبخوان یعنی توانایی محیط زمین‌شناسی در ذخیره و انتقال آب در تناقض است. از طرفی، با توجه به وسعت دشت و لزوم مدیریت بهره‌برداری آب زیرزمینی، درک تغییرات سطح ایستایی آبخوان دشت دهگلان بر اساس یک روش علمی ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی سطح ایستایی دشت دهگلان با استفاده از روش‌های سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)، زمین‌آمار و وزن دهی معکوس فاصله (IDW) و مقایسه نتایج آنهاست. استفاده از این روش‌ها علاوه بر شبیه‌سازی سطح



شکل ۱. محدوده مطالعه شده و موقعیت قرارگیری پیزومترها

در این معادله: $Z^*(x_i)$: مقدار تخمین زده شده برای نقطه‌ی x_i ، λ_1 وزن مربوط به متغیر Z ، λ_k وزن مربوط به متغیر کمکی Y ، $Z(x_i)$: مقدار مشاهداتی متغیر اصلی و $Y(x_k)$: مقدار مشاهداتی متغیر کمکی، m و n : تعداد جفت‌های مقایسه برای متغیرهای کمکی و اصلی است. برای محاسبه اوزان مربوطه، نیاز به تغییرنمای متقابل^۲ به صورت زیر می‌باشد که در این معادله $\gamma_{zy}(h)$: تغییرنمای متقابل بین متغیر Z و Y ، $Z(x_i)$: متغیر مشاهده شده و $Y(x_k)$: متغیر کمکی است [۲۵].

$$\gamma_{zy}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)] \times [Y(x_i + h) - Y(x_i)] \quad (4)$$

روش وزن دهی معکوس فاصله^۳

IDW یک روش تخمینگر ریاضی است که رابطه آن همان رابطه کریجینگ است با این تفاوت که در روش وزن دهی معکوس فاصله، وزن‌ها با توجه به فاصله هر نقطه معلوم نسبت به نقطه مجهول تعیین می‌شوند. نقاط نزدیک‌تر وزن بیشتر و نقاط دورتر، وزن کمتری دارند [۲۶].

سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS)
سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی یکی از مدل‌های نروفازی است که بر پایه هوش مصنوعی استوار است [۲۷]. این سیستم ابزاری برای تخمین توابع پیوسته - حقیقی در دامنه‌ای مشخص است که نخستین بار توسط جانگ در

x موقعیت مجهول و n نیز تعداد نقاط معلوم است [۲۰]. در این مدل، وزن مقادیر مشاهداتی از روی نیم‌تغییرنمای تعیین می‌شود. نیم‌تغییرنما که براساس فاصله نسبی متغیرها محاسبه می‌شود، با استفاده از معادله ۲ قابل محاسبه است.

$$\gamma_z(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

یکی از ویژگی‌های کریجینگ این است که موجب نرم شدن تغییرات (کاهش نوسانات) می‌شود، بنابراین در مواردی که نباید تغییرات نرم شوند، بهتر است از روش‌های دیگر استفاده شود [۲۱ و ۲۲]. در پژوهش حاضر از روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ ساده، کریجینگ عام با مدل‌های دایره‌ای، کروی، نمایی، گوسی و... استفاده شده است.

کوکریجینگ

در روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری، روش کوکریجینگ یک حالت چندمتغیره از کریجینگ است. در این روش براساس همبستگی موجود بین متغیر اصلی و متغیر کمکی به تخمین متغیر مد نظر می‌پردازد که این ویژگی می‌تواند سبب دقت بیشتر تخمین و صرفه‌جویی در هزینه‌ها شود [۲۳]. کوکریجینگ با استفاده از متغیرهای کمکی می‌تواند به کاهش واریانس، تخمین و بهبود مقادیر تخمینی کمک کند [۲۴]. معادله کوکریجینگ به شرح زیر است (رابطه ۳):

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_1 \cdot Z(x_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_k \cdot Y(x_k) \quad (3)$$

1. Semivariogram

2- Cross variogram

3. Inverse Distance Weighting (IDW)

گیری ANFIS در مدل‌سازی، تعیین تعداد توابع عضویت اهمیت بسیار زیادی دارد. زیرا توابع عضویت، درصد تعلق داده‌هایی که در یک مجموعه ریاضی قرار دارند را نشان می‌دهند. معمولاً تعیین تعداد توابع عضویت، به وسیله خوشه‌بندی انجام می‌شود. در خوشه‌بندی، داده‌هایی که ویژگی‌های نزدیک به هم دارند در یک دسته قرار می‌گیرند. در واقع این ابزار برای دسته‌بندی داده‌ها به کار می‌رود. روش خوشه‌بندی فازی (FCM) یکی از معروف‌ترین روش‌های دسته‌بندی است که در آن هر داده با درجه‌ای از تعلق به یک خوشه قرار می‌گیرد. این مقدار تعلق با درجه عضویت مشخص می‌شود [۳۲]. این روش خوشه‌بندی کاربرد زیادی در مسایل مختلف خوشه‌بندی دارد. هدف این الگوریتم، تفکیک داده‌ها، براساس مینیمم‌سازی تابع حداقل فاصله به صورت رابطه ۷ است.

$$J_m(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{i,k}^m x_k - c_i^p \quad (7)$$

در این رابطه c: تعداد خوشه، n: تعداد داده‌ها، m: پارامتر فازی‌سازی، c_i : مرکز i امین خوشه، $\mu_{i,k}$: درجه عضویت داده‌ها و p: درجه توان فاصله اقلیدسی است [۳۳]. خوشه‌بندی را می‌توان برای تعداد خوشه‌های مختلف انجام داد. بنابراین، می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی برای به دست آوردن تعداد خوشه‌ها استفاده کرد و یا اینکه تمامی حالت‌های ممکن را در نظر گرفت که می‌تواند بسیار وقت‌گیر باشد.

معیارهای ارزیابی دقت مدل

در پژوهش حاضر برای بررسی میزان دقت روش‌های استفاده‌شده در تخمین تراز سطح ایستابی از تکنیک اعتبارسنجی متقابل و محاسبه پارامترهای آماری ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین خطای انحراف (MBE)، میانگین مجذور خطا (MSE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شده است. هرچه مقدار واقعی به مقدار برآورد شده نزدیک‌تر باشد، میزان خطا هم کمتر است و در نهایت مدلی به عنوان بهترین مدل انتخاب می‌شود که میزان R^2 به یک نزدیک و RMSE، MBE، MAE و MSE کمترین مقدار را داشته باشند. روش محاسبه این شاخص‌ها به صورت روابط ۸-۱۲ است:

سال ۱۹۹۳ میلادی معرفی شد [۲۸]. بخش فازی مدل ANFIS، با استفاده از توابع عضویت و قوانین اگر-آن‌گاه رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار می‌کند. یک مجموعه فازی به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)), x \in X \} \quad (5)$$

که در آن، x: عضوی از X بوده و μ_A : درجه عضویت x است که می‌تواند بین صفر تا یک متغیر باشد. برای در نظر گرفتن درجه عضویت از توابع عضویت استفاده می‌شود که توابع عضویت مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، گوسی دوطرفه و سیگموئیدی را شامل می‌شوند [۲۹].

پارامترهای توابع عضویت با استفاده از الگوریتم آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی و براساس روش پس‌انتشار خطا برای همه پارامترهای توابع عضویت، روش ترکیبی شامل پس‌انتشار خطا برای پارامترهای توابع عضویت و روش کمترین مربعات برای پارامترهای توابع عضویت خروجی تعیین می‌شود [۲۹، ۳۰]. در مدل ANFIS، از سیستم سوگنو برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. برای یک مدل فازی مرتبه اول سوگنو با دو ورودی (x, y)، یک خروجی (f) و دو تابع عضویت برای هر یک از ورودی‌ها، یک مدل ANFIS معمولی تشکیل می‌شود. برای چنین مدلی قوانین معمولی با در نظر گرفتن دو قانون فازی اگر-آن‌گاه (If-then rules) به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Rule 1: } & \text{If } \mu(x) \text{ is } A_1 \text{ and } \mu(y) \text{ is } B_1; \\ \text{then } & f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Rule 2: } & \text{If } \mu(x) \text{ is } A_2 \text{ and } \mu(y) \text{ is } B_2; \\ \text{then } & f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \end{aligned}$$

که متغیرهای A_1, A_2, B_1, B_2 به ترتیب توابع عضویت برای ورودی‌های x و y هستند و $p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2$ پارامترهای تابع خروجی‌اند. بنابراین، در این حالت فرمول‌بندی در شبکه عصبی-فازی تطبیقی از یک آرایش شبکه عصبی پنج‌لایه پیشرو پیروی می‌کند [۳۱].

خوشه‌بندی

هنگام به کارگیری ANFIS در مدل‌سازی، تعیین تعداد توابع عضویت اهمیت بسیار زیادی دارد، زیرا توابع عضویت، درصد تعلق داده‌هایی که در یک مجموعه ریاضی قرار دارند را نشان می‌دهند. معمولاً، تعیین تعداد توابع عضویت، به در به کار-

تحلیل همبستگی پیرسون، سنجیده شد (جدول ۱). ضریب همبستگی پیرسون در محدوده ۱- تا ۱ قرار می‌گیرد. هرچه ضریب همبستگی به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی قوی مثبت و هرچه این مقدار به ۱- نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده همبستگی قوی اما منفی دو پارامتر نسبت به یکدیگر است. هرگاه همبستگی ضعیفی بین پارامترها وجود داشته باشد، این مقدار به صفر نزدیک می‌شود. براساس مقدار ضریب همبستگی، پارامترهایی که بیشترین همبستگی را با سطح آب زیرزمینی داشتند به عنوان داده‌های ورودی مدل انتخاب شدند. این پارامترها به ترتیب شامل توپوگرافی، ارتفاع سنگ کف و سدیم بودند. ملاک انتخاب، همبستگی بیشتر از ۰/۵ بین سطح ایستابی و دیگر پارامترها بوده است. شایان یادآوری است به دلیل اینکه یون سدیم در فرمول نسبت جذب سدیم (SAR) استفاده می‌شود، فقط از یون سدیم در محاسبات استفاده شده است. بنابراین، استفاده هم‌زمان از یون سدیم و نسبت جذب سدیم، می‌تواند سبب تأثیر مضاعف یون سدیم در محاسبات شود. علاوه بر آن، در محاسبه SAR یون‌های کلسیم و منیزیم نیز به کار می‌روند. این در حالی است که کلسیم و منیزیم همبستگی خوبی با سطح ایستابی ندارند.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{e,i} - h_{o,i})}{n} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_{o,i} - h_{e,i}| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{e,i} - h_{o,i})^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (h_{o,i} - h_{m,o})(h_{e,i} - h_{m,e})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{o,i} - h_{m,o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{e,i} - h_{m,e})^2}} \right)^2 \quad (11)$$

$$MSE = \frac{1}{n} (h_{o,i} - h_{e,i})^2 \quad (12)$$

در روابط یادشده n تعداد پیزومترها، $h_{o,i}$ مقادیر اندازه‌گیری شده بار هیدرولیکی برای نمونه i ام، $h_{e,i}$ مقادیر تخمین زده شده بار هیدرولیکی برای نمونه i ام، $h_{m,o}$ میانگین بار هیدرولیکی مشاهداتی و $h_{m,e}$ میانگین بار هیدرولیکی محاسباتی است [۳۴ و ۳۵].

نتایج و بحث

برای شبیه‌سازی سطح ایستابی آبخوان دشت دهگلان از داده‌های ۴۴ پیزومتر حفر شده در این دشت مربوط به شهریور ۱۳۹۵ استفاده شده است. قبل از هرگونه مدل‌سازی، همبستگی داده‌های موجود با استفاده از

جدول ۱. نتایج تحلیل همبستگی پیرسون نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مطالعه شده، دشت دهگلان

Parameter	UTMX	UTMY	Topography	h	a*	b**	c***	S _γ	SAR	Mg	Ca	Cl	TDS	Na	TH	HCO ₃	EC
UTMX	۱																
UTMY	-۰/۶۴	۱															
Topography	-۰/۱۵	-۰/۱۲	۱														
h	۰/۲۷	-۰/۰۷	۰/۹۲	۱													
a*	۰/۳۳	-۰/۴۵	-۰/۰۳	-۰/۴۳	۱												
b**	-۰/۲۲	۰/۵۲	-۰/۳۷	-۰/۱۲	-۰/۵۴	۱											
c***	-۰/۰۵	-۰/۳۰	۰/۸۴	۰/۷۲	۰/۱۰	-۰/۷۷	۱										
S _γ	۰/۴۴	-۰/۳۹	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۳۱	-۰/۲۰	۰/۲۴	۱									
SAR	۰/۴۴	-۰/۲۴	-۰/۶۲	-۰/۵۸	۰/۰۴	۰/۱۰	-۰/۴۳	-۰/۱۱	۱								
Mg	۰/۱۰	-۰/۰۱	-۰/۲۲	-۰/۲۱	۰/۰۴	۰/۱۱	-۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۲۰	۱							
Ca	-۰/۳۴	۰/۴۵	-۰/۱۷	-۰/۰۵	-۰/۲۴	۰/۲۲	-۰/۱۹	-۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۲۶	۱						
Cl	۰/۰۲	۰/۰۴	-۰/۳۰	-۰/۲۴	-۰/۰۶	۰/۲۰	-۰/۳۱	-۰/۱۱	۰/۱۹	۰/۵۱	-۰/۳۴	۱					
TDS	۰/۱۴	۰/۰۷	-۰/۴۰	-۰/۳۳	-۰/۰۶	۰/۲۰	-۰/۳۵	-۰/۰۴	۰/۴۳	۰/۵۴	۰/۶۲	۰/۴۶	۱				
Na	۰/۳۳	-۰/۴۱	-۰/۵۴	-۰/۵۱	۰/۰۷	۰/۰۵	-۰/۳۷	-۰/۰۳	۰/۵۶	۰/۳۷	۰/۱۳	۰/۶۱	۰/۴۷	۱			
TH	-۰/۲۴	۰/۳۸	-۰/۰۸	-۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۲۵	-۰/۱۷	۰/۰۲	-۰/۰۴	۰/۴۷	۰/۷۰	۰/۲۴	۰/۷۷	۰/۰۶	۱		
HCO ₃	-۰/۰۵	۰/۰۹	-۰/۳۶	-۰/۲۸	-۰/۱۰	۰/۲۹	-۰/۳۶	-۰/۱۴	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۶۱	۰/۳۰	۰/۷۸	۰/۴۵	۰/۶۹	۱	
EC	۰/۰۹	۰/۱۲	-۰/۴۲	-۰/۳۴	-۰/۰۹	۰/۲۴	-۰/۳۸	-۰/۰۸	۰/۴۳	۰/۵۴	۰/۶۵	۰/۴۸	۰/۹۸	۰/۵۱	۰/۷۸	۰/۷۸	۱

a* = ضحامت منطقه غیراشباع b** = ضحامت منطقه اشباع c*** = ارتفاع سنگ کف

مربوط به نه حلقه چاه) برای آزمون مدل‌ها استفاده شده است. شایان یادآوری است که تقسیم پیرومترها برای آموزش و آزمون، به صورت تصادفی بوده است. به این ترتیب، پس از شبیه‌سازی سطح ایستابی با استفاده از روش‌های تخمینگر، مقادیر سطح آب زیرزمینی (h) در نقاط مجهول، یعنی نه پیرومتر استفاده شده برای آزمون، به دست آمده و با مقادیر واقعی آن‌ها مقایسه شده‌اند.

نرمال‌سازی داده‌ها

به دلیل اینکه محدوده قرارگیری داده‌های ورودی با یکدیگر بسیار متفاوت است، داده‌های استفاده شده بین صفر و یک، نرمال شدند. علاوه بر آن، از آنجا که در منطق فازی، تابع عضویت بین صفر تا یک قرار دارد، نرمال کردن داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

برای استفاده از روش‌های زمین‌آماری، لازم است داده‌ها توزیع نرمال نیز داشته باشند. بنابراین، لازم است که در مرحله آماده‌سازی داده‌ها برای روش‌های زمین‌آماری، در صورت نداشتن توزیع نرمال از تبدیل‌های مختلف مانند باکس-کاکس، لوگ و دیگر روش‌ها استفاده کرد. جدول ۲ توزیع زمین‌آماری داده‌های سطح ایستابی را با توزیع نرمال نشان می‌دهد.

جدول ۲. بررسی تطابق توزیع زمین‌آماری داده‌های میانگین سطح ایستابی با توزیع نرمال

نوع تبدیل	میانگین	میانه	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی
None	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۲۲	۳/۱۶	۰/۶۷
Log	-۱/۱۲	-۰/۹۸	۰/۷	۳/۹۷	-۰/۹۵
Box-Cox	-۰/۶	-۰/۶۲	۰/۲۲	۳/۱۶	۰/۶۷
Arcsin	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۳۰	۷/۰۶	۱/۷۱

کریجینگ ساده با مدل گوسی نسبت به کریجینگ معمولی و عام دقت بیشتری داشته است. در شکل ۲ نمودار اعتبارسنجی متقابل^۱ مقادیر واقعی و محاسبه شده سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان برای نه حلقه چاه آزمون نشان داده شده است.

در روش کوکریجینگ از پارامترهای توپوگرافی، ارتفاع سنگ کف و سدیم که بیشترین ضریب همبستگی را با سطح آب زیرزمینی (h) داشتند، به عنوان پارامترهای کمکی استفاده شده است. برای بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای کمکی،

همان طور که ابتدا گفته شد در مطالعه حاضر به منظور تخمین سطح ایستابی دشت دهگلان از روش زمین‌آمار، وزن دهی معکوس فاصله و هوش مصنوعی استفاده شده است. در روش زمین‌آمار از روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ عام، کوکریجینگ و در روش هوش مصنوعی از سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شده است. در روش‌های کریجینگ و IDW، با توجه به ماهیت آن‌ها، از هیچ پارامتر کمکی‌ای استفاده نشده و فقط از بار هیدرولیکی پیرومترها برای شبیه‌سازی سطح ایستابی استفاده شده است. اما روش‌های کوکریجینگ و ANFIS در چهار حالت: فقط بار هیدرولیکی، بار هیدرولیکی و توپوگرافی، بار هیدرولیکی، توپوگرافی و سنگ کف و بار هیدرولیکی، توپوگرافی، سنگ کف و سدیم اجرا شده‌اند.

برای محاسبه ضریب همبستگی داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS، انجام روش‌های زمین‌آماری از نرم‌افزار Arc Gis 10.3.1 و اجرای ANFIS از نرم‌افزار MATLAB با استفاده از کدنویسی و به کارگیری سیستم منطق فازی سوگنو با تابع عضویت خروجی خطی برای مدل‌سازی سطح آب زیرزمینی استفاده شده است. برای مدل‌سازی، از ۸۰ درصد داده‌ها (یعنی داده‌های مربوط به ۳۵ حلقه پیرومتر) برای آموزش مدل و ۲۰ درصد داده‌ها (داده‌های

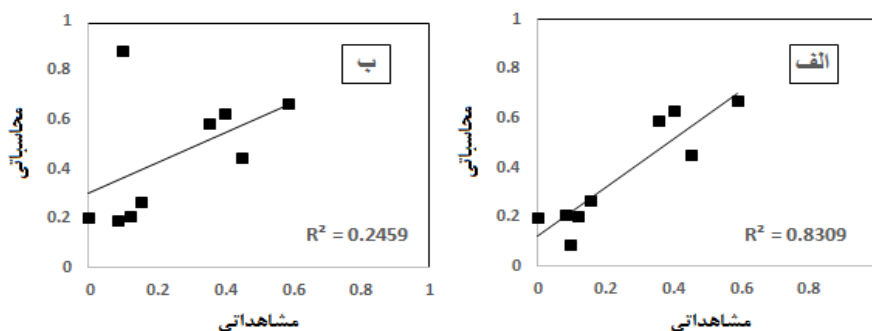
با توجه به تحلیل توزیع آماری که در جدول ۲ آورده شده است، داده‌ها تقریباً نرمال هستند و از هیچ تبدیلی برای نرمال کردن داده‌ها استفاده نشده است. تبدیل باکس-کاکس عملاً تأثیری روی داده‌ها نداشته است و تبدیل‌های لگاریتمی و آرک سین نیز شرایط را بدتر کرده‌اند.

نتایج روش زمین‌آمار و وزن دهی معکوس فاصله

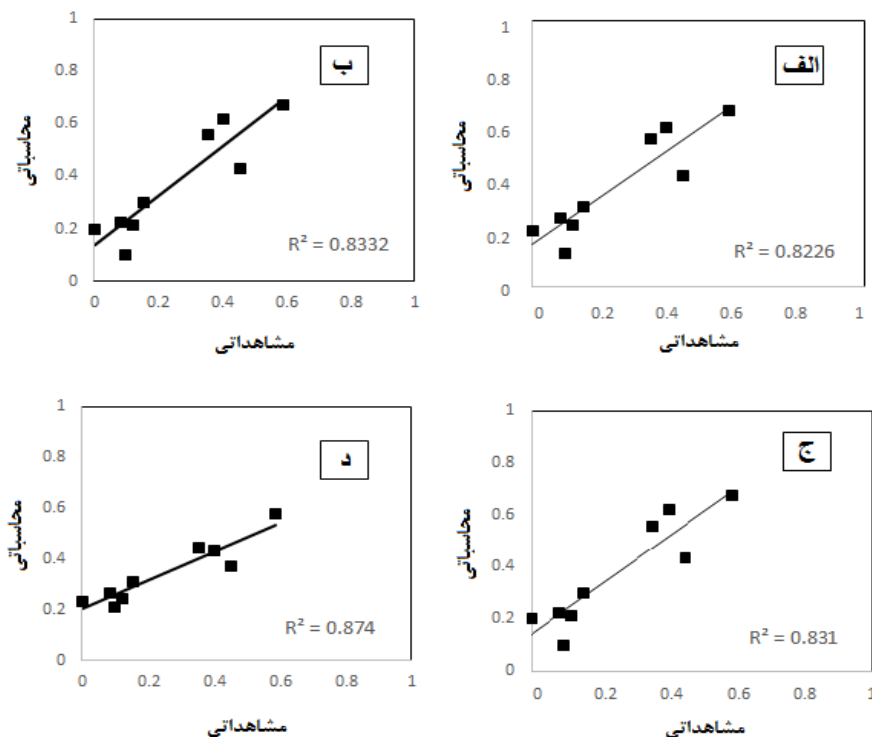
در روش‌های کریجینگ و وزن دهی معکوس فاصله، فقط از پارامتر بار هیدرولیکی پیرومترها برای شبیه‌سازی سطح ایستابی دشت دهگلان استفاده شده است. پس از تنظیم نیم‌تغییرنما در انواع روش‌های کریجینگ به کاررفته،

مدل دایره‌ای نسبت به مدل‌های دیگر دقت بیشتر و خطای کمتری داشت. در مجموع، می‌توان گفت که کوکریجینگ با دو پارامتر کمکی توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف نسبت به دو حالت دیگر دقت بیشتری داشته است. اگر بخواهیم نمودار مقادیر محاسبه شده سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان را با استفاده از کوکریجینگ در مقابل مقادیر واقعی برای نه حلقه چاه آزمون رسم کنیم، به صورت زیر خواهد بود (شکل ۳).

درون‌یابی در سه مرحله صورت گرفته است. به این ترتیب که ابتدا تنها پارامتر کمکی استفاده شده توپوگرافی بوده و مدل پنتاسفریکال نسبت به مدل‌های دیگر دقت بیشتری داشته است. در مرحله بعد از دو پارامتر کمکی توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف در درون‌یابی استفاده شده و مدل دایره‌ای نسبت به مدل‌های دیگر خطای کمتری داشت. در نهایت، سه پارامتر توپوگرافی، سدیم و ارتفاع سنگ کف به عنوان پارامترهای کمکی برای درون‌یابی استفاده شدند که در این حالت هم



شکل ۲. مقادیر مشاهداتی و محاسبه شده سطح آب زیرزمینی برای نه حلقه چاه آزمون دشت دهگلان با استفاده از الف) کریجینگ ساده ب) کریجینگ معمولی و عام

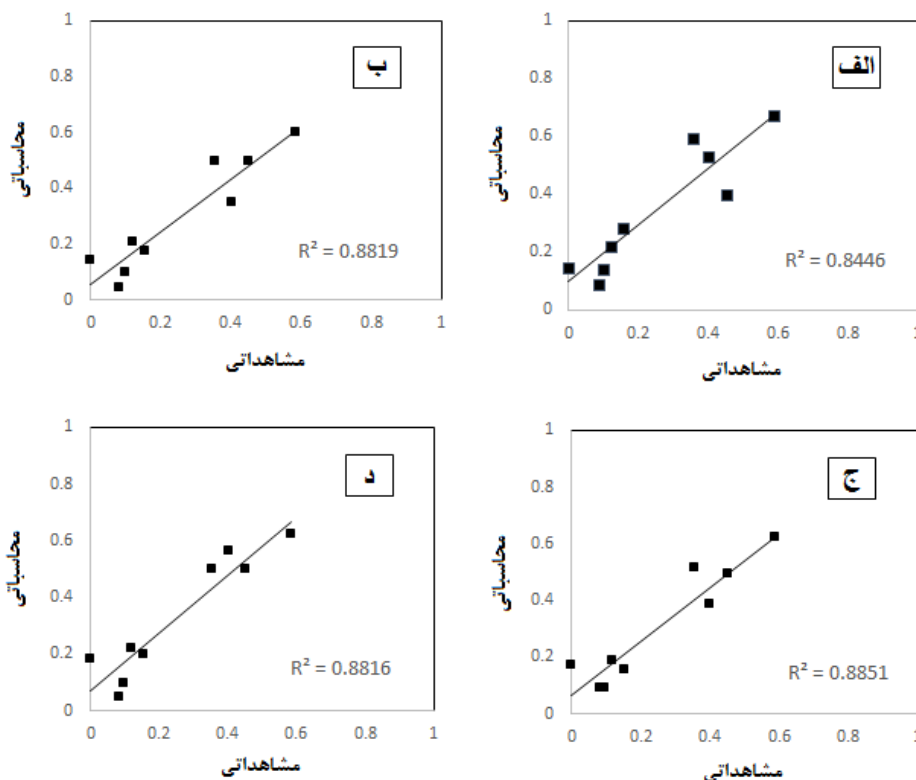


شکل ۳. مقادیر مشاهداتی و محاسبه شده سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان برای ۹ حلقه چاه آزمون با استفاده از کوکریجینگ با به- کارگیری متغیرهای کمکی الف) توپوگرافی، ب) توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف، ج) توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف و سدیم، و د) وزن- دهی معکوس فاصله

شد. گرچه تعداد تکرار زیاد ممکن است سبب بهبود آموزش شود، در مرحله آزمایش، جواب‌های مدل‌سازی رضایت‌بخش نبودند که دلیل آن می‌تواند احتمالاً آموزش کاذب مدل باشد. مدل‌سازی با تکرار ۳۰۰ مناسب‌ترین عملکرد و کمترین خطا را در مرحله صحت‌سنجی داشته است. در شکل ۴ می‌توان نمودار مقادیر محاسبه‌شده سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان با استفاده از سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی ANFIS در مقابل مقادیر واقعی برای نه حلقه چاه آزمون را برای حالت‌های مختلف مشاهده کرد. در تمامی حالت‌های استفاده از ورودی‌های مختلف، تعداد بهینه کلاس‌ها (توابع عضویت) ۲ در نظر گرفته شده است. تعداد بهینه کلاس‌ها که به وسیله روش خوشه‌بندی فازی به دست آمده است، نشان می‌دهد بهترین همبستگی مکانی بین داده‌ها با دسته‌بندی داده‌ها در چند مجموعه محقق خواهد شد.

نتایج روش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی ANFIS

در روش فازی سوگنو برای تخمین سطح آب زیرزمینی با ANFIS طول و عرض جغرافیایی، توپوگرافی، سدیم و ارتفاع سنگ کف به‌عنوان ورودی‌های مدل در چهار مرحله انتخاب شدند. به این‌صورت که در مرحله اول دو پارامتر طول و عرض جغرافیایی، در مرحله دوم سه پارامتر طول و عرض جغرافیایی و توپوگرافی، در مرحله سوم، چهار پارامتر طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع سنگ کف و سدیم و در نهایت در مرحله چهارم، پنج پارامتر طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع سنگ کف، توپوگرافی و سدیم به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند. تنها خروجی مدل هم سطح آب زیرزمینی (h) بوده است. برای تعیین تعداد توابع عضویت هر یک از حالت‌های یادشده، تعداد بهینه دسته‌ها به وسیله روش FCM در دسته‌های ۲ تا ۱۲ کلاس، خوشه‌بندی و سپس با استفاده از ANFIS با تعداد تکرار ۳۰۰، مدل‌سازی انجام



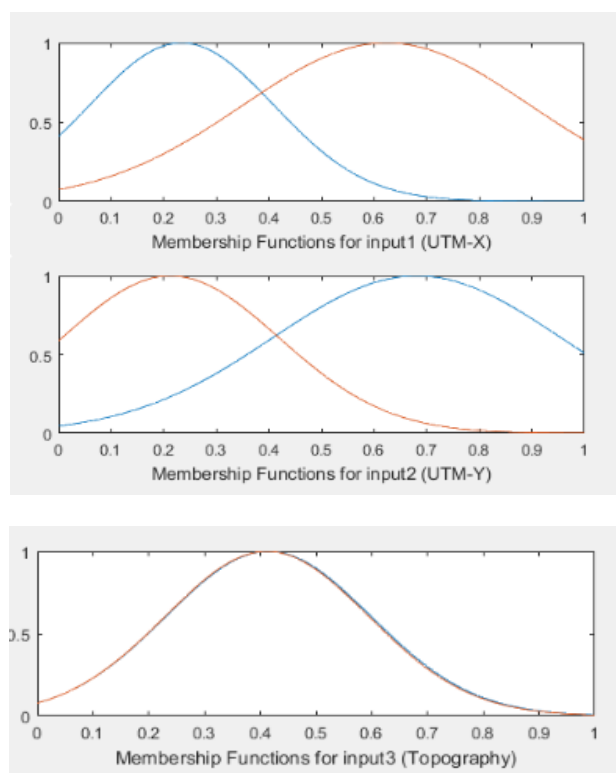
شکل ۴. مقادیر مشاهداتی و محاسبه‌شده سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان برای نه حلقه چاه آزمون با استفاده از ANFIS و ورودی‌های الف) مختصات جغرافیایی، ب) مختصات جغرافیایی و توپوگرافی، ج) مختصات جغرافیایی و توپوگرافی و ارتفاع سنگ کف و د) مختصات جغرافیایی، توپوگرافی، ارتفاع سنگ کف و سدیم

جغرافیایی و پارامترهای کمکی توپوگرافی، سنگ کف و یون سدیم برای چاه‌های آزمون گزارش شده است. با توجه به نتایج، مدل ANFIS با سه پارامتر ورودی (UtmX, UtmY, Topography) و دو تابع عضویت به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شده است. در شکل ۵ توابع عضویت پارامترهای ورودی پس از واسنجی نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ عام و وزن‌دهی معکوس فاصله برای پارامترهای ورودی مختصات جغرافیایی را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج مربوط به روش کوکریجینگ برای پارامترهای ورودی مختصات جغرافیایی و پارامترهای کمکی توپوگرافی، سنگ کف و یون سدیم آورده شده است. علاوه بر آنها، نتایج مربوط به اجرای ANFIS با استفاده از پارامترهای مختصات

جدول ۳. نتایج نهایی برای نه چاه آزمون حاصل از روش‌های زمین‌آمار، وزن‌دهی معکوس فاصله و ANFIS

Methods	Input Parameters	RMSE	MSE	MAE	MBE	R ²
Simple Kriging	Utmx,Utmy	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۸۳
Ordinary Kriging	Utmx,Utmy	۰/۳۰	۰/۰۹	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۴
Universal Kriging	Utmx,Utmy	۰/۳۰	۰/۰۹	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۴
Cokriging	Utmx,Utmy,Topography,Bedrock,Na	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۸۳
Cokriging	Utmx,Utmy,Topography,Bedrock	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۸۳
Cokriging	Utmx,Utmy,Topography	۰/۱۵	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۸۲
IDW	Utmx,Utmy	۰/۱۳	۰/۰۲	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۸۷
ANFIS	Utmx,Utmy	۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۸۴
ANFIS	Utmx,Utmy,Topography	۰/۰۷	۰/۰۰۵	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۸۸
ANFIS	Utmx,Utmy,Topography,Na	۰/۰۸	۰/۰۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۸۸
ANFIS	Utmx,Utmy,Topography,Bedrock,Na	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۸۸

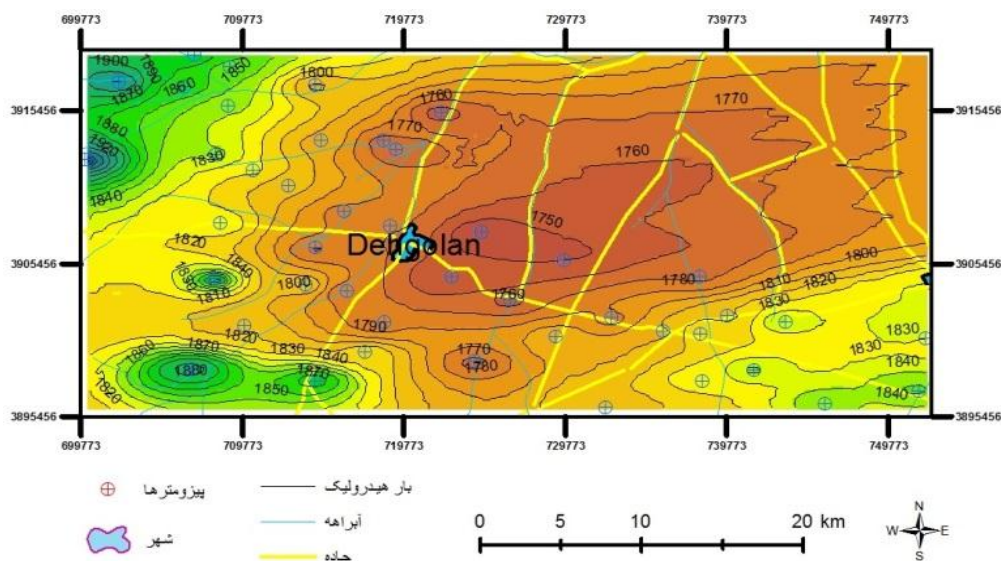


شکل ۵. توابع عضویت مربوط به داده‌های ورودی فازی برای مختصات جغرافیایی و توپوگرافی پس از واسنجی

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ، وزن دهی معکوس فاصله و ANFIS برای تخمین سطح آب زیرزمینی دشت دهگلان استفاده شده است. با توجه به همبستگی داده‌ها، بار هیدرولیکی با مختصات جغرافیایی همبستگی خوبی ندارد. این موضوع نشان می‌دهد رفتار بار هیدرولیکی در قسمت‌های مختلف آبخوان، متفاوت است. از طرفی، به کارگیری مختصات جغرافیایی جزء جدانشدنی درون‌یابی داده‌های مکانی است. در نتیجه، به کارگیری صرف داده‌های مکانی بار هیدرولیکی برای مدل‌سازی، نتایج رضایت‌بخشی نخواهد داشت. روش منطق فازی با دسته‌بندی داده‌ها سبب بهبود این همبستگی شده است، به طوری که در پژوهش حاضر با دو دسته کردن بارهای هیدرولیکی، این داده‌ها در هر دسته بیشترین همبستگی فضایی را دارند. سپس، با تنظیم یک رابطه ریاضی بین آنها، بار هیدرولیکی را شبیه‌سازی کرده است. با توجه به بررسی نتایج مدل، در دشت دهگلان، توپوگرافی بیشترین تأثیر را بر بار هیدرولیک داشته است. در مجموع، نتایج تحقیق بیان می‌کند که روش ANFIS با در نظر گرفتن مختصات نقاط و توپوگرافی دشت، با $RMSE=0/07$ ، $MSE=0/005$ ، $MAE=0/06$ ، $MBE=0/04$ و $R^2=0/88$ ، در تخمین سطح ایستابی دشت دهگلان موفق‌تر از روش‌های دیگر عمل کرده است. روش‌های کریجینگ عادی و کریجینگ عام نیز نسبت به روش‌های دیگر کمترین دقت لازم را داشته‌اند. در چنین آبخوان‌هایی که به دلیل نبود داده‌های دقیق، امکان مدل‌سازی ریاضی وجود ندارد و یا با عدم قطعیت زیادی مواجه است، استفاده از ANFIS می‌تواند دید معقولی از آبخوان ارائه دهد. با استفاده از این روش در تخمین شرایط اولیه برای مدل‌های ریاضی، می‌توان جواب مدل‌هایی مانند MODFLOW را بهبود بخشید. استفاده از این روش به خلاف مدل‌های هوش مصنوعی جعبه‌سیاه و با توجه به امکان دسترسی به توابع عضویت پس از کالیبراسیون، در فهم سیستم آبخوان و تهیه مدل مفهومی مفید است.

پس از واسنجی، همان طور که در شکل ۵ مشخص است، توابع عضویت مربوط به توپوگرافی تقریباً منطبق بر هم هستند، اما توابع عضویت مختصات جغرافیایی جدا از یکدیگر قرار گرفته‌اند. علت را این گونه می‌توان توضیح داد که در آبخوان یادشده، سطح ایستابی کاملاً از توپوگرافی تبعیت کرده است که با ضرایب همبستگی محاسبه‌شده بین پارامترهای مختلف دشت نیز کاملاً هم‌خوانی دارد. خوشه‌بندی مختصات جغرافیایی در دو کلاس مجزا نشان می‌دهد در قسمت‌های مختلف آبخوان، سطح ایستابی از قوانین متفاوتی تبعیت می‌کند. بنابراین، با توجه به اینکه در روش وزن دهی معکوس فاصله از تمام نقاط برای محاسبه مقدار مجهول استفاده شده و در روش‌های زمین‌آماری نیز با تنظیم واریوگرام برای کل داده‌ها سعی بر محاسبه میزان واریانس نسبت به فاصله می‌شود [۲۱]، می‌توان انتظار داشت که چنین روش‌هایی با تمامی مزیت‌هایی که دارند، دارای این ضعف عمده هستند که از یک قانون کلی برای محاسبه نقاط مجهول استفاده می‌کنند. همین امر سبب خواهد شد مقداری خطا به‌طور سیستماتیک به مقادیر تخمین‌زده‌شده وارد شود. به این ترتیب، روش منطق فازی با تقسیم آبخوان به بخش‌های مختلف توانسته است که مدل‌سازی بهتری نسبت به دیگر روش‌ها ارائه دهد، به گونه‌ای که ارتباط مکانی نقاط در بخش‌های مختلف آبخوان را یکسان در نظر نگرفته است. این یکی از مزیت‌های مهم روش یادشده است که می‌تواند در تهیه مدل مفهومی^۱ استفاده شود به طوری که می‌توان چگونگی ارتباط دیگر پارامترهای محیطی را بر پارامتر مد نظر تحلیل کرد. علاوه بر مدل‌های مفهومی، شرایط اولیه^۲ آبخوان نیز در اجرای مدل‌های ریاضی مانند MODFLOW که معادله حاکم بر آبخوان را در نظر می‌گیرند، بسیار حائز اهمیت است. در این گونه مدل‌ها، مقادیر اولیه بار هیدرولیکی با استفاده از روش‌های درون‌یابی تولید شده و به‌عنوان مبنای محاسبات استفاده می‌شود. در نهایت، با استفاده از مدل ANFIS سطح ایستابی دشت دهگلان تولید شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. بر این اساس، بیشترین افت سطح ایستابی در محدوده شرقی و نزدیک به شهر دهگلان مشاهده می‌شود.



شکل ۶. ارتفاع سطح ایستابی محاسبه شده در دشت دهگلان با استفاده از ANFIS

منابع

- [1]. Todd DK, Mays LW. Groundwater Hydrology. 2nd Ed. New York: Wiley; 1980. 552 pp.
- [2]. Khaledian F, Kalantari N, Javid A. Investigating the Construction's Effect of Sange Siah Reservoir Dam on Hydrogeology and Hydrogeochemistry of Dehgolan Plain Aquifer. M.Sc. Thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz; 2014. (In Persian)
- [3]. Jahani N, Fathi P, Nasri B. Mathematical Modeling of Groundwater Resources System of Dehgolan plain. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan; 2009. (In Persian)
- [4]. Ramezani E, Heidari A, Fathi P. Mathematical modeling of groundwater flow of Dehgolan Plain. 5th National conference on Water Resources Management, Shahid Beheshti University, Tehran; 2013. (In Persian)
- [5]. Ebrahimi M, Fathi P. Predicting of Groundwater Level Fluctuation Using Artificial Neural Network and Nero – Fuzzy Interface System (case study: Dehgolan Aquifer). M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan; 2011. (In Persian)
- [6]. Dehghani R, Noorali A. Comparison of geostatistical methods and artificial neural network in estimating groundwater level (Case study: Nourabad plain, Lorestan). Journal of Environmental Science and Technology. 2016; 18(1): 33-44. (In Persian)
- [7]. Zamaniahmadmahmoodi R, Akhondali A, Samadiborjeni H, Zareei H. Estimation of the groundwater level by using combined geostatistics with artificial neural networks (Case study: Shahrekord plain). Journal of Irrigation Science and Engineering. 2013; 36(1): 45-56. (In Persian)
- [8]. Mokarram M, Mokarram MJ, Zarei AR, Safarinejadian B. Using adaptive Neuro-Fuzzy network (ANFIS) to predict underground water quality in west of Fars province during 2003 to 2013 period. Iranian Journal of Eco Hydrology. 2017; 4(2): 547-559. (In Persian)
- [9]. Vadiati M, Nakhaei M. Groundwater quality evaluation of Tehran province for agricultural uses by fuzzy inference model. Water and Soil Science. 2015; 25(1): 41-52. (In Persian)
- [10]. Tumez B, Hatipoglu Z. Comparing two data driven interpolation methods for modeling nitrate distribution in aquifer. Ecological Informatics. 2010; 5: 311-315.
- [11]. Zamaniahmadmahmoodi R, Akhondali AM, Zarei H, Radmanesh F. Estimation of the groundwater level by using a combined optimized method with genetic algorithms in Ramhormoz plain. Iranian of Irrigation and water Engineering. 2014; 4(15): 26-38. (In Persian)
- [12]. Khoshravesh M, Gholami Sefidkouhia MA, Abbaspalangi J, Mirnaseric M. Estimation of nitrate concentrations in well and spring water using ANFIS and SVM models (Case study: Golestan province). Journal of Applied Hydrology. 2015; 2(2):1-12.
- [13]. Jeihouni M, Delirhasannia R, Alavipanah SK, Shahabi M, Samadianfard S. Spatial analysis of

- groundwater electrical conductivity using ordinary kriging and artificial intelligence methods (Case study: Tabriz plain, Iran). *Geofizika*. 2015; 32(5): 191-208.
- [14]. Yousefzadeh S, Nadiri AA. Comparison between ANN and ANFIS in hydraulic conductivity estimation of Maragheh-Bonab aquifer using geophysical data. International conference on Science and Engineering, Dubai, UAE; 2015. (In Persian)
- [15]. Xiao Y, Gu X, Yin S, Shao J, Cui Y, Zhang Q, Niu Y. Analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. *Springer Plus*. 2016; 5: 425.
- [16]. Hassan I, Lawal IM, Mohammed A, Abubakar S. Analysis of geostatistical and deterministic techniques in the spatial variation of groundwater depth in the northwestern part of Bangladesh. *American Journal of Engineering Research*. 2016; 5(3): 29-34.
- [17]. Talpur N, Mohd Salleh MN, Hussain K. An investigation of membership functions on performance of ANFIS for solving classification problems. International Research and Innovation Summit IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017; Volume 226, conference 1.
- [18]. Khosravi K, Habibnejad Roshan M, Solaimani K, Babaei K. Assessment of groundwater vulnerability using a-GIS based DRASTIC model (Case study: Dehgolan plain, Kurdistan province). *Journal of Watershed Management Research*. 2012; 3(5) :42-62. (In Persian)
- [19]. Ebrahimi Mohammadi S, Azari M, Entezami. Investigating the quaternary deposits of Dehgolan Plain to determine prone areas to flood spreading. 1th national conference on Rainwater Catchment Systems, Islamic Azad University, Khomeini-Shahr; 2012. (In Persian)
- [20]. Nadiri A, Naderi K, Asghari Moghaddam A, Habibi MH. Spatiotemporal predicting of groundwater level using artificial intelligence models and geostatistics model (Case study: Duzdizan plain). *Journal of Geography and Planning*. 2016; 20(58): 281-301. (In Persian)
- [21]. Hasani Pak AA. *Geostatistics*. 5nd ed. Tehran: Tehran University Press; 2013. 328 pp. (In Persian)
- [22]. Mohammadyari F, Aghdar A, Basiri R. Zoning groundwater quality for drinking using geo-statistical methods Case Study: Arid Regions in Mehran and Dehloran. *Geographical Data*. 2017; 26(101): 199-208.
- [23]. Fathi Hafashjani E, Beigi Harchegani H, Davoudian Dehkordi AR, Tabatabaei S. Comparison of spatial interpolation methods and selecting the appropriate method for mapping of nitrate and phosphate in the Shahrekord aquifer. *Iranian of Irrigation and water Engineering*. 2014; 4(15): 51-63. (In Persian)
- [24]. Haghizadeh A, Kiani A, Kiani M. Performance evaluation of geostatistical methods to estimate the spatial distribution of snow depth and density in mountainous areas (Case study: Gush Bala watershed, Mashhad). *Hydrogeomorphology*. 2017; 3(12): 45-66. (In Persian)
- [25]. Khosravi Y, Abbasi E. Spatial analysis of environmental data using geostatistics. 1nd ed. Zanjan: Azarkelk Press; 2015. 282pp. (In Persian)
- [26]. Jahanshahi A, Rohimogaddam E, Dehviri A. Investigating water quality parameters using GIS and geostatistics (Case study: Shahr-Babak plain aquifer). *Water and Soil Science*. 2014; 24(2): 183-197. (In Persian)
- [27]. Moeeni H, Bonakdari H, Fatemi SE, Ebtehaj I. Modeling the monthly inflow to Jamishan dam reservoir using autoregressive integrated moving average and adaptive Neuro-Fuzzy inference system models. 2016; 26(1-2): 273-285. (In Persian)
- [28]. Abareshi F, Meftah Helghi M, Sanikhani H, Dehghani AA. Comparison of three intelligence techniques for predicting water table depth fluctuations (Case study: Zarringol plain). *Journal of water and soil conservation*. 2014; 21(1): 163-180. (In Persian)
- [29]. Kord M, Asghari- Moghaddam A. Evaluation of drinking water quality of Ardabil plain aquifer by cokriging and fuzzy logic. *Journal of water and soil conservation*. 2015; 21(5): 225-240. (In Persian)
- [30]. Maroofpoor S, Fakheri- Fard A, Shiri, J. Development and combination of soft computing and geostatistical models in estimation of spatial distribution of groundwater level. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 2016; 6(4): 17-28. (In Persian)
- [31]. Mousavi S, Nourani V, Alami MT. Assessment of Chloride Concentration in Groundwater by Conjugation of Artificial Intelligence and Wavelet Transform Coherence Approaches. *Modares Civil Engineering Journal*. 2017; 17(6): 233-244. (In Persian)
- [32]. Ghanbari N, Rangzan K, Kabolizade M, Moradi P. Improve the results of the DRASTIC model using artificial intelligence methods to assess groundwater vulnerability in Ramhormoz

- alluvial aquifer plain. *Journal of water and soil conservation*. 2017; 24(2): 45-65. (In Persian)
- [33]. Faez K, Moradi MH, Eslami M. Introducing a general criterion for optimizing fuzzy clustering. *The Second Conference on Machine Vision, Image Processing and Applications*, Tehran; 2003. (In Persian)
- [34]. Okwu M, Adetunji O. A comparative study of artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) models in distribution system with nondeterministic inputs. *International Journal of Engineering Business Management*. 2018; 10: 1-17.
- [35]. Rajae T, Nourani V, Pouraslan F. Groundwater level forecasting using wavelet and kriging. *Journal of Hydraulic Structures*. 2016; 2(2): 1-21.