پیش‌بینی سطح ایستابی آب زیرزمینی آبخوان چهاردولی در شهرستان قروه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و ماشین‌بردار پشتیبان

اسدالله شالودگی[1] و مطلب بایزیدی[2]*

۱- کارشناس‌ارشد مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سنندج، سنندج، ایران

نویسنده مسئول: **m.byzedi@gmail.com ***

دریافت: ۱۴۰۰/۱/۸ پذیرش: ۱۴۰۰/۵/۵ نوع مقاله: کاربردی

چکیده

تخمین تراز سطح ایستابی از مسایل مهم و اساسی در برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاهان است. در این تحقیق کارایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین‌بردار پشتیبان در تخمین سطح آب زیرزمینی آبخوان چهاردولی در شهرستان قروه مورد بررسی قرار گرفت. برای اجراء مدل‌ها از داده‌های بارش، دبی و دما و تراز سطح ایستابی در ماه قبل به عنوان متغیرهای ورودی و تراز سطح ایستابی در ماه بعد به عنوان متغیر خروجی در مقیاس زمانی ماهانه در طی دوره آماری (۱۳۹۶-۱۳۸۵) استفاده گردید. معیارهای ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین قدر مطلق خطا برای ارزیابی و نیز مقایسه عملکرد مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای مدلسازی با روش‌های یاد شده، از سال ۱۳۸۵-۱۳۹۴ داده‌های آموزش و از سال ۱۳۹۴-۱۳۹۶ داده‌های اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. نتایج بدست آمده نشان داد که هر دو مدل در برآورد تراز سطح ایستابی دقت قابل قبولی داشته، به طوریکه معیار ضریب تبیین در مرحلهٔ واسنجی در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان برابر با ۰/۷۴ و ۰/۹۴ بودند. مقایسهٔ دو مدل نشان داد که مدل ماشین بردار پشتیبان نسبت به شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری دارد و دقت پیش‌بینی برای یک‌سال در این مدل کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: منابع آب، پیش‌بینی، عملکرد، آبخوان

پیشگفتار

در مطالعات آب‌های زیرزمینی، تغییرات سطح ایستابی از اهمیت فراوانی برخوردار است. به همین دلیل، امروزه شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط مدل‌های ریاضی و کامپیوتری که یک روش غیرمستقیم مطالعه آب زیرزمینی می‌باشد، با صرف هزینه کمتر صورت می‌گیرد. تخمین تراز سطح ایستابی از مسایل مهم و اساسی است که در برنامه‌ریزی کشاورزی، مدیریت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاهان دارای اهمیت فراوانی است. آگاهی از تراز سطح ایستابی می‌تواند در شوری و ماندابی شدن زمین و حتی زهکشی اراضی مفید باشد. تغییرات تراز آب زیرزمینی و پیش‌بینی آن به پارامترهای متنوعی وابسته بوده به همین دلیل برآورد این متغیر غیرخطی و پیچیده می‌باشد (دلیاکوپلاس و همکاران، ۲۰۰۵). پیشرفت‌های رایانه‌ای امکان جمع‌آوری، ذخیره و پردازش بسیاری از عوامل مؤثر و وابسته را در بعد زمان و مکان برای مدلسازی و شبیه‌سازی فراهم نموده است. از جمله روش‌های به‌کار گرفته شده زمین آمار، شبکه عصبی، منطق فازی، ماشین بردار و... در سال‌های اخیر هستند که به ترتیب در پی کشف ساختار مکانی متغیرها و تعمیم دانش نهفته در ورای اطلاعات تجربی به ساختار مدل می‌باشند (میثاقی و محمدی، ۱۳۸۵). شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان مدل‌های جعبه سیاه، ابزاری توانمند برای مدلسازی سیستم‌های غیرخطی بوده و قادرند روابط پیچیده حاکم بر چنین فرآیندهایی را مدل نمایند. در زمینه کاربردی کردن این مدل‌ها در پیش‌بینی‌ها مطالعات بسیاری صورت گرفته است که تعدادی از آن ارائه شده است. تراز سطح آب دریاچه زریوار را با چهار مدل موجک-شبکه عصبی مصنوعی (WANN)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) پیش‌بینی شد. نتایج سری زمانی پیش‌بینی با مقادیر مشاهداتی با استفاده از شاخص‌های آماری RMSE ، R^2 و MAE مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که از چهار مدل مذکور عملکرد مدل WANN

از مدل‌های دیگر در پیش‌بینی سطح آب دریاچه کارایی بهتری را داشته است (گویلی و همکاران، ۱۳۹۷). سطح آب‌زیرزمینی ۳۶ حلقه چاه مشاهداتی دشت کاشان را با استفاده از الگوریتم وارد در ۵ خوشه، خوشه‌بندی شد و از مدل‌های سری‌های زمانی شامل AR، MA، ARMA، ARIMA و SARIMA برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل سری‌های زمانی AR، بهترین دقت پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی را داشته و همچنین مشاهده کردند که نرخ افت سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۱۶، به میزان ۱/۰۲ متر در سال خواهد بود (محمدمیرزاوند و رضاقاضوی، ۲۰۱۴). در تحقیقی سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی ترکیبی موجک پیش‌بینی گردید. نتایج نشان داد که مدل ماشین بردار از مدل موجک هیبریدی برتر بوده است. از مدل موجک GMDH و ELM برای پیش‌بینی سطح ایستابی آب زیرزمینی دشت مراغه- بناب استفاده کردند. در این تحقیق بیان شد که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی چند موجک نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی یک موجک برای پیش‌بینی بهتر است (برزگر و همکاران، ۲۰۱۷). پیش‌بینی سطح ایستابی آب زیرزمینی ناحیه Rainpur از ایالات Chhattisgarh در هند با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی انجام شد. در این تحقیق از داده‌های ۲۰ ساله بارش و سطح تراز آب زیرزمینی استفاده شد. مشاهده شد که در دوره‌ی آموزش، ضریب همبستگی در ماه‌های مارس، آوریل و می بیشترین مقدار و برابر ۰/۹۷ است (پورت و همکاران، ۲۰۱۸). آبخوان‌های واقع در دشت‌های قروه، دهگلان و چهاردولی جزو مهمترین منابع آب زیرزمینی در شرق استان کردستان هستند. بنابر اهمیت این آبخوان‌ها برآورد سطح آب در آن‌ها می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های و مدیریت آن کمک نماید لذا در این مقاله سعی داریم به پیش‌بینی تراز متوسط سطح آب زیرزمینی دشت چهاردولی با استفاده از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان پرداخته شد و میزان همبستگی تراز سطح ایستابی با جریان‌های سطحی و نزولات جوی برآورد گردید. در نهایت مدلی را که عملکرد بهتری داشته انتخاب شد. تراز آب زیرزمینی برای یکساله با مدل انتخاب شده پیش‌بینی شد و میزان افت در سه دهه گذشته بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت چهاردولی در غرب ایران و در ۱۱۷ کیلومتری شرق سنندج بوده و زیر حوضه آبریز این دشت از زیر حوضه‌های حوضه آبخیز سفیدرود بزرگ است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. وسعت کل محدوده مطالعاتی چهاردولی برابر ۳۸۹ کیلومتر مربع است که حدود ۳۱ کیلومتر مربع آن را آبخوان تشکیل می‌دهد. ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقاط محدوده به ترتیب برابر ۲۳۰۰ متر و ۱۸۰۰ متر از سطح دریا است. آب و هوای منطقه قروه از نوع نیمه‌خشک و سرد بوده و براساس اطلاعات هواشناسی موجود متوسط سالانه میانگین بارش حدود ۳۵۰ میلی‌متر و متوسط بلند مدت تبخیر از سطح تشتک میلی‌متر است. شکل حوضه پهن بوده و زهکشی آن از طریق رودخانه چم شور که از کوه پنجه علی در دشت چهاردولی سرچشمه گرفته و بعد از تلاقی با چم شور در بالادست قروه و رودهای دهگلان در حوضه بیجار با اوزن‌دره و رود شیرکش مخلوط می‌شود و در نهایت به رودخانه قزل‌اوزن می‌ریزد. پتانسیل آب‌های سطحی محدوده ضعیف است. دبی متوسط سالانه ایستگاه هیدرومتری دلبران در مرکز حوضه ۰/۳۷ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت نشان می‌دهد که طی سال‌های ۸۷-۹۶ سطح آب زیرزمینی رو به کاهش است که دلیل آن کاهش ریزش‌های جوی در سال‌های مورد مطالعه و افزایش برداشت از چاه‌های بهره‌برداری است. لیکن از سال ۸۷ شیب روند کاهشی سطح تراز ایستابی کاهش یافته است.

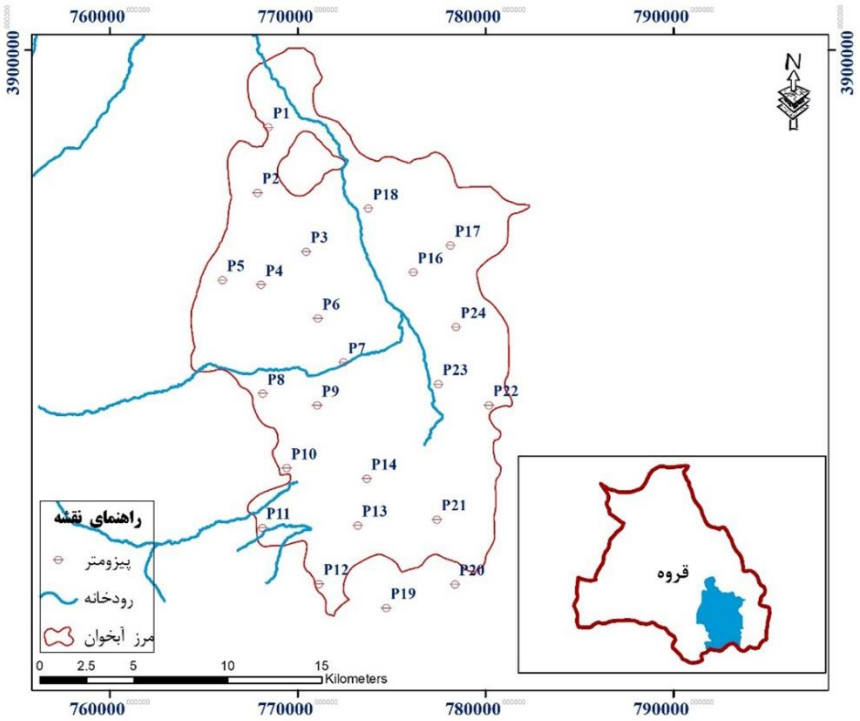
آب باران از نظر کیفی دارای مواد محلول ناچیز می‌باشد که در طی تماس با رسوبات و سازندهای زمین‌شناسی، با انحلال کانی‌های موجود تا رسیدن به حالت تعادل تغییر حالت می‌دهد و با املاح موجود واکنش نشان می‌دهند (اصغری‌مقدم،۱۳۸۹). ژئومورفولوژی به مطالعه ماهیت و فرآیندهای ظهور و توسعه و ترکیب مواد زمین می‌پردازد. در بررسی و تحلیل کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی مطالعه زمین‌شناسی از نظر سنگ‌شناسی، پیکرشناسی و ویژگی‌های هیدروژئولوژی از جمله قابلیت انتقال، نفوذپذیری و نوع مخازن آب‌دار جهت شناخت محیطی که آب از ان عبور می‌کند مهم می‌باشد. گستره مورد بررسی یکی از دشت‌های استان کردستان است و دارای امتداد

شرقی - غربی می‌باشد که در نوار سنندج - سیرجان واقع شده و دارای ویژگی‌های این نوار است. در تقسیم‌بندی دیگری ایران از ۹ واحد ژئومورفیک که این ۹ واحد خود به واحدهای کوچک‌تری تقسیم می‌شوند تشکیل شده است که محدوده مطالعاتی چهاردولی جزء واحد کردستان شرقی (قروه، بیجار، سنندج) که زیرگروه واحد شمال‌غربی کشور است قرار دارد. نخستین جنبش‌های زمین‌ساختی که در تشکیل ناهمواری‌های شمال‌غربی کشور مؤثر بوده است در اواخر دوران کرتاسه رخ داده است. به استثنای کوه‌های اطراف سنندج در همه جای کردستان دشت‌های وسیع وجود دارد که دشت چهاردولی از جمله ی این دشت‌ها است. کوه‌های اطراف دشت چهاردولی باعث جدا شدن دشت از دشت‌های دهگلان و قروه می‌شوند. دشت چهاردولی با یک مرفولوژی نسبتا آرام و امتداد جنوب به شمال از غرب و شرق در بین ارتفاعاتی واقع شده است که ارتفاعات غربی بسیار بلند و همراه با دره‌های عمیق و ارتفاعات شرقی نسبتا آرام‌تر است. ساختار زمین‌شناسی ارتفاعات مزبور در حاشیه غرب از سنگ‌های آذرین و متامرفیک‌های حاصل از فعالیت‌های ماگمایی شدید منطقه به‌وجود آمده است و این ارتفاعات بسیار بلند و نوک‌تیز بوده همراه با دره‌های عمیق در منطقه باقی مانده است. برعکس ارتفاعات حاشیه شرقی اغلب از سازندهای الیگومیوسن و بازالت‌های قبل از کواترنر پوشیده شده و به جز منطقه‌ای در شمال‌شرقی آن که آثاری شبیه به قله‌های آتش‌فشان دارد بقیه منطقه مرفولوژی آرامی داشته و حتی شبیه به تپه ماهور است. مطابق شکل (۲) در تقسیم‌بندی زمین‌شناسی براساس خصوصیات هیدروژئولوژیکی مناطق مرکزی آبخوان و دشت واحدهایی مانند قسمت‌های رسوبی واحدهای میوسن که اغلب به صورت سطحی تغذیه کننده آب‌های زیرزمینی می‌باشند. این واحدها در صورت تماس با واحدهای کواترنر (مخازن اصلی دشت)، به عنوان تغذیه کننده آبخوان منطقه عمل می‌کند. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود ۹۰ درصد آبخوان و دشت چهاردولی از نهشته‌های رسوبات رودخانه‌ای (Qal)، که در طرفین رودخانه‌های دائمی و فصلی به صورت کم شیب گسترش دارند، رسوبات واریزه‌ای Qt_2 و Qt_1 که بیشتر در دامنه‌ها دیده می‌شوند، و رسوبات Qt_1 که تراس‌های مرتفع را تشکیل می‌دهند، می‌باشند که این واحدها از نظر کیفیت آب موجود در آن‌ها آب شیرین مناسب می‌باشند. در ارتفاعات بلند حاشیه غربی آبرفت‌های دانه درشت و ضخیم‌لایه‌ای را در ابتدای ورودی رودخانه‌های شکرآباد و گلالی بوجود آورده و آبرفت‌های حاشیه شرقی تقریبا یکسان و بصورت همزمان از فرسایش ارتفاعات حاشیه شرقی تشکیل شده است. این ناحیه نتیجه فعالیت‌های ماگمایی در تریاس و ژوراسیک، کوارتزیت، مرمر و آهک کریستالیزه است که هم‌اکنون از معادن آن استخراج می‌شود. از ژوراسیک و کرتاسه، ریولیت و ریوداسیت موجود است که در بخش مرکزی ارتفاعات غرب چهاردولی رخنمون دارد. از ائوسن توف سبزرنگ و آهک نومولیت‌دار در ارتفاعات شرقی چهاردولی در یک محدوده کوچک قابل مشاهده است. در یک نگاه کلی ارتفاعات اطراف این منطقه اغلب از سنگ‌های آذرین و دگرگونی پوشیده شده و فاقد مخازن کارست است. و سیستم درز و شکاف فراوان در سطح سنگ‌ها موجب شده است که نزولات جوی به‌صورت روان‌آب و یا چشمه‌سارهای کوچک در پای ارتفاعات، آبخوان دشت را تغذیه نماید.

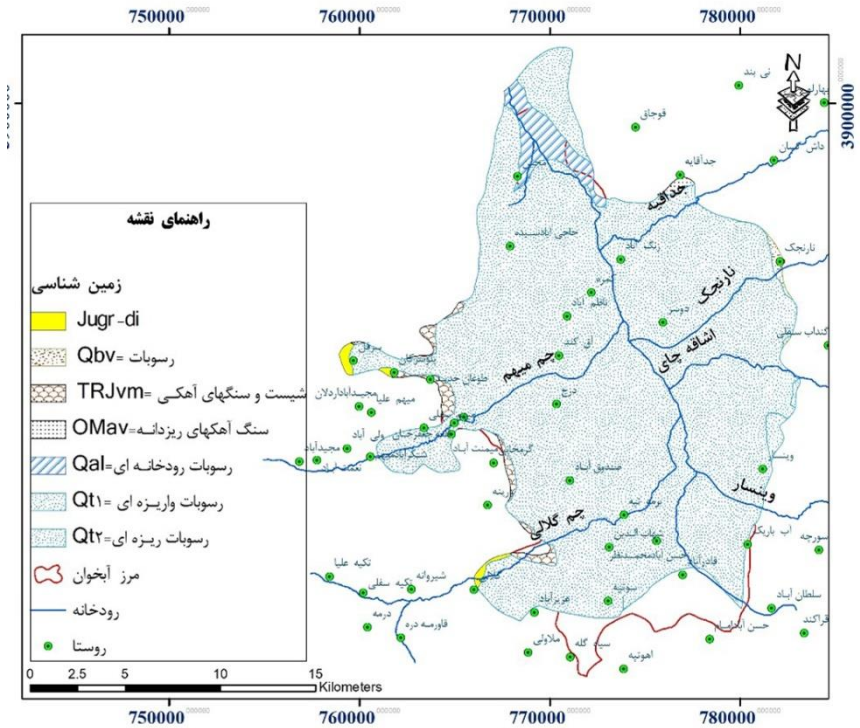
ضریب ذخیره یا قابلیت ذخیره به حجم آبی اطلاق می‌شود در اثر پایین یا بالا رفتن بار پیزومتریک به اندازه واحد از هر واحد سطح آکیفر خارج شده و یا به ذخیره آن افزوده می‌شود. این ضریب بر اساس دانه‌بندی و نوع ساختار آن‌ها در لوگ‌های زمین‌شناسی و آزمایشات مربوط به آبرفت برای دشت چهاردولی ۱/۵ درصد می‌باشد. گرادیان هیدرولیکی مطلق که مسئول حرکت آب زیرزمینی و مهاجرت ماده حل شونده در آن می‌باشد در دشت چهاردولی در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد و به‌طور کلی در ورودی‌های دشت میانگین ۰/۰۰۸ و خروجی‌ها نیز در حدود ۰/۰۰۲ می‌باشد. محاسبات بیلان آب زیرزمینی برای سال آبی ۹۵-۹۶ حاکی از این است که در محدوده بیلان، تغییرات حجم آب آبخوان منفی می‌باشد؛ به‌طوری که در سال مذکور، تخلیه از آن به میزان ۲/۹۸ میلیون مترمکعب بیشتر از میزان تغذیه می‌باشد. با توجه به هیدروگراف واحد دشت چهاردولی (شکل ۳)، سطح آب زیرزمینی در طول سال بیلان، ۰/۵۲ متر افت داشته است.

مطابق شکل‌های ۴ و ۵ تراز سطح ایستابی در قسمت غربی آبخوان بیشتر از قسمت‌های شرقی بوده است. همانطور که از نقشه‌های ترسیم شده مشاهده می‌شود تراز سطح ایستابی در قسمت‌های غربی حدود ۸ متر در طول ۳۰ سال کاهش یافته، در پیزومترهای مرکزی افت سطح

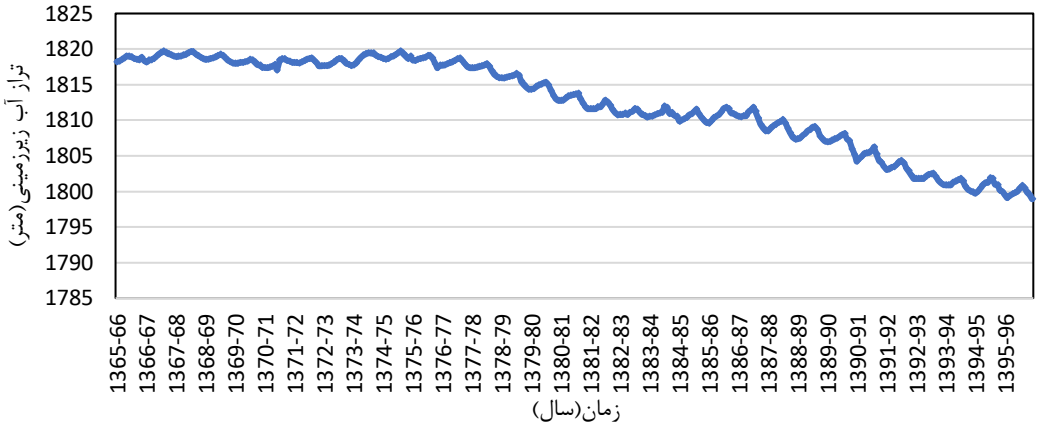
ایستابی تا حدود ۴۰متر می‌باشد. و در قسمت‌های شمالی این میزان افت به ۲۰متر و در قسمت‌های شرقی آبخوان افت خیلی شدیدی داشته و بیشتر از نواحی دیگر است. بطوریکه در پیزومترهای شماره ۲۰، ۲۲ و ۲۱ کاهش سطح ایستابی در طول ۳۰ سال ۹۰ متر بوده یعنی ۳متر در هر سال افت سطح ایستابی آبخوان چهاردولی داشته است. در پژوهشی بررسی تغییرات حجم ذخیره آبخوان دشت‌های شرقی استان کردستان نشان دادند که سطح ایستابی در دشت چهاردولی در قسمت‌های شرقی حدود ۲۰ متر در طول ۳۰ سال افت یافته است.



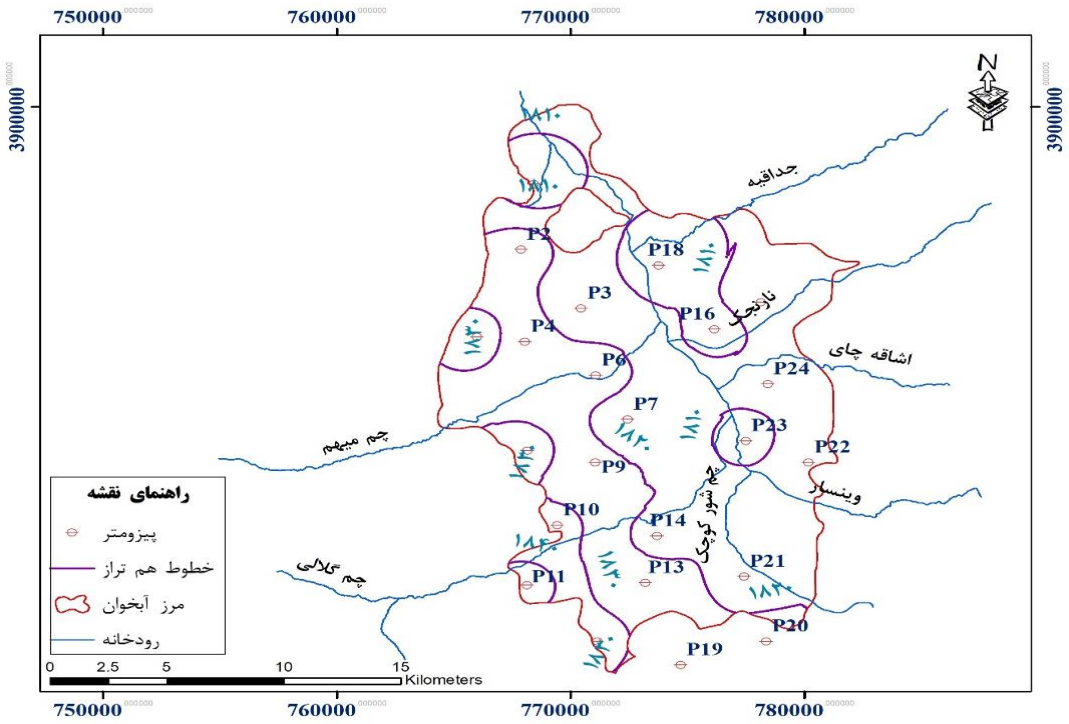
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و پیزومترها



شکل۲. نقشه زمین‌شناسی دشت چهاردولی



شکل ۳. هیدروگراف معرف آب زیرزمینی دشت چهاردولی



شکل۴. نقشه خطوط تراز آب زیزمینی آبخوان چهاردولی فروردین ماه سال ۱۳۶۶

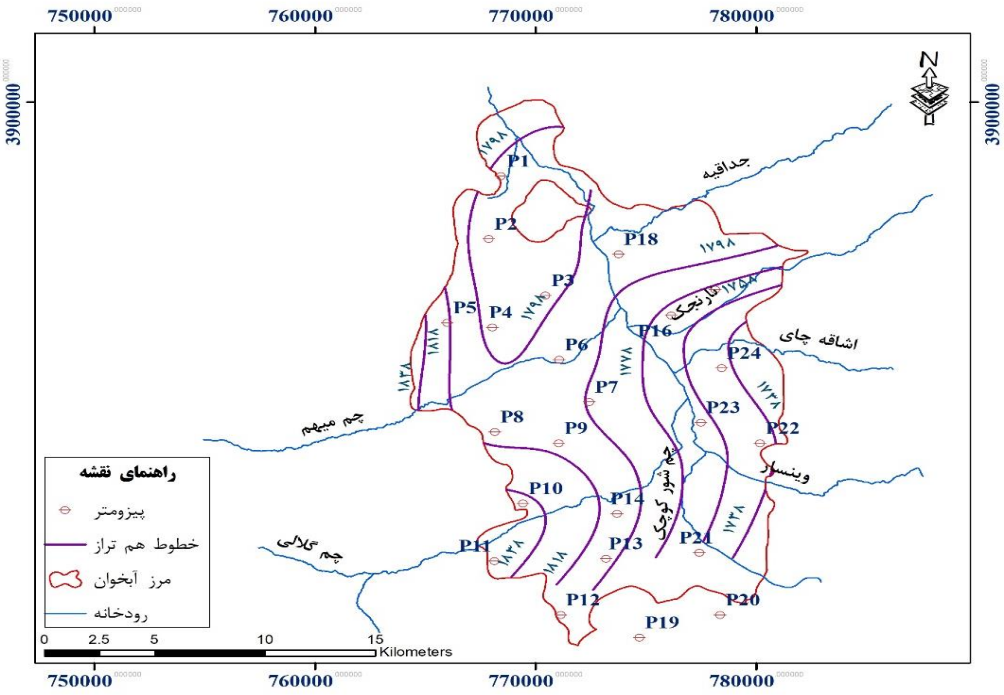
به منظور اجرای تحقیق، از داده‌های دبی ایستگاه دلبران، پارامترهای اقلیمی بارش، دمای متوسط و رطوبت نسبی ایستگاه هواشناسی دوسر و متوسط تراز آب زیرزمینی دشت استفاده شد. پس از بررسی داده‌ها در روش شبکه عصبی مصنوعی جهت کاهش حساسیت سامانه به بزرگی داده‌ها با استفاده از رابطهٔ (۱) نرمال شدند و در محدودهٔ صفر تا یک قرار گرفتند (سلیمانی، ۲۰۰۹؛ سارنگی و باتاچاریا، ۲۰۰۵). سرانجام از سال‌های آبی ۱۳۸۵-۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۴ به عنوان داده‌های آموزشی (۹ سال) و از سال ۱۳۹۴-۱۳۹۵ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۷ به عنوان داده‌های اعتبارسنجی (۳سال) استفاده گردید. فرآیند مدل‌سازی با استفاده از روش‌های حداقل مربعات ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی با نرم‌افزار MATLAB2013 استفاده شد.

$$y = \frac{Yi - Y(\min)}{Y(\max) - Y(\min)} \qquad (۱)$$

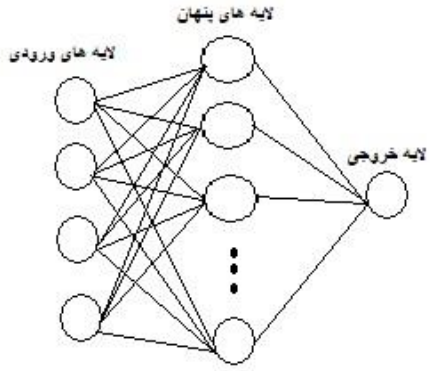
شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی با قابلیت اعتماد بیشتر زمانی و سازگاری با تغییرات پیش‌بینی نشده، جایگزین مناسبی برای مدل‌های تجربی و رگرسیونی برای پیش‌بینی رفتار منابع آب به شمار می‌روند. پارامترهای موثر در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی شامل مقدار مناسب آموزش، تعداد

لایه‌های شبکه و تعداد نرون‌های لایه میانی می‌باشد. در حالت کلی هر چه تعداد تکرار در آموزش شبکه بیشتر شود، خطای شبیه‌سازی شبکه کمتر می‌شود. اما هنگامی که تعداد تکرارها از یک مقدار تجاوز کند، خطای دسته آزمایشی نیز افزایش پیدا می کند. بهترین تعداد تکرار آموزشی مقداری است که خطای هر دو دسته آزمایشی و آموزشی تا حد ممکن کمینه گردند (دهقانی، ۲۰۰۹). انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی مانند شبکه پرسپترون چند لایه (MLP)، شبکه تابع پایه شعاعی (RBF)، شبکه هاپفیلد (Hopfild) و... وجود دارند که با توجه به کاربرد گسترده شبکه پرسپترون چند لایه در مهندسی آب در پژوهش حاضر نیز از این مدل استفاده شده است.



شکل ۵. نقشه خطوط تراز آب زیزمینی آبخوان چهاردولی فروردین ماه سال ۱۳۹۶



شکل۶ . نمای کلی یک شبکه عصبی مصنوعی

روش حداقل مربعات ماشین‌بردار پشتیبان (LS-SVM)

ماشین‌بردار پشتیبان روشی است که در آن نقاط قوت روش‌های آماری سنتی که بیشتر تئوری محور می‌باشند و از نظر تجزیه و تحلیل ساده هستند، ترکیب می‌گردد (یو و همکاران، ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر رویکرد SVM[1] به طور گسترده در حوضه‌های هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و پیش‌بینی سری‌های زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از جعبه ابزار LS-SVM1.8 در محیط MATLAB 2013 استفاده شد. الگوریتم LS-SVM در دو مرحله؛ ۱- آموزش و اعتبارسنجی؛ ۲- طراحی به کار گرفته

[1]Support vector machines

شد. در این مطالعه از روش LS-SVM با قدرت تقریب دقیق دبی استفاده شد تا این روش بتواند خطای پیش‌بینی را به حداقل برساند. چارچوب رگرسیون حداقل مربعات ماشین‌بردار پشتیبان بدین صورت است:

مجموعه داده‌های آموزشی را خواهیم داشت که $X_i^{\rho} \in R^n$ به عنوان بردار ورودی و $y_i^{\rho} \in R^n$به عنوان بردار خروجی معرفی می‌شوند. تابع رگرسیون غیرخطی در فضای وزن‌دهی اولیه به صورت رابطه ۲ قابل تعریف خواهد بود (سایکنس و همکاران، ۲۰۰۲).

$$y(x) = W^T \varphi(x_i) + b \qquad (۲)$$

در این رابطه W و b به ترتیب مقادیر وزن‌ها و بایاس تابع رگرسیون و$\varphi(x_i)$ترسیم غیرخطی ورودی‌ها در فضای ویژگی با ابعاد بالاست. رگرسیون غیرخطی بر اساس رابطهٔ بهینه‌سازی ۳ و با محدودیت رابطه ۴ حل می‌شود:

$$\min w, e, b \quad j(w,e) = \frac{1}{2} W^T W + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^{N} e_i^2 \qquad (۳)$$

$$y_i = W^T \varphi(x_i) + b + e_i \qquad (۴)$$

که در آن‌ها، γ: پارامتر تنظیم‌کنندهٔ بخش خطاست و ei: میزان خطا داده‌های آموزشی نشان می‌دهد. در بخش اعتبارسنجی از Crossvalidate-10fold و تابع بهینه‌سازی simplex برای تعیین مقادیر و پارامترهای بهینهٔ γو σ در روش حداقل مربعات ماشین‌بردار پشتیبان استفاده شد.

یکی از مهمترین مراحل در مدلسازی، انتخاب ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی است شناخت بهترین ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی و طراحی شبکه جهت تخمین سطح ایستابی یا تراز آب زیرزمینی در منطقهٔ مطالعاتی مرحلهٔ اول مدل‌سازی توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌باشد. به این منظور ساختارهای شبکه‌های عصبی مصنوعی که متشکل از شبکه‌های (FFN) و (RNN) است با الگوریتم‌های مختلف از جمله الگوریتم‌های انتشار خطا به عقب (BP)، الگوریتم گرادیان مزدوج (CG) و الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (LM) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفتند. پارامترهای بارش، دمای متوسط، رطوبت نسبی و تراز آب زیرزمینی در ماه t (ماه قبل) به عنوان لایه‌های ورودی شبکه و تراز سطح ایستابی ماه t+1 (ماه فعلی) استفاده شدند.

معیارهای ارزیابی مدل‌ها

برای روش‌های مدل‌سازی یاد شده، ضرایب کارایی شامل R^2، MAE، RMSE و NS (نش-ساتکیلیف) محاسبه شده و بر مبنای بهترین مقادیر ضرایب کارایی مدل مطلوب انتخاب شد. نحوه محاسبه این معیارها به صورت روابط زیر می‌باشد. در این روابط، Oi و Pi به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل، $\bar{O}$ و $\bar{P}$ به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل و n تعداد داده‌ها می‌باشد. در روابط فوق هر چه مقدار R^2 (ضریب تبیین معادله خطی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای) به یک نزدیک‌تر شود نشان‌دهنده‌ی همبستگی قوی‌تر مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده خواهد بود. به همین ترتیب حداقل بودن مقادیر RMSE و MAE نیز نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب‌تر مدل خواهد بود. برای ضریب NS نیز هر چقدر مقدار این ضریب به یک نزدیکتر شود به این معنی خواهد بود که تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۷۵ برای ضریب NS به معنی عملکرد خوب مدل و مقادیر در دامنه‌ی ۰/۳۶-۵/۷۵ نشان‌دهنده‌ی عملکرد رضایت‌بخش مدل است (نش و ساتکلیف، ۱۹۷۰).

$$R^2 = \left[\left(\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right) \Big/ \left(\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (P_i - \bar{P})^2} \right) \right] \qquad (۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2 \right) \times n^{-1}} \qquad (۶)$$

$$MAE = \left(\sum_{i=1}^{n} |O_i - P_i| \right) \times n^{-1} \qquad (۷)$$

$$NS = 1 - \left[\left(\sum_{i=1}^{n} (O_i - P_i)^2 \right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2 \right) \right] \qquad (۸)$$

نتایج و بحث

با توجه به اینکه تعداد نرون‌ها در لایهٔ مخفی در راستای کمینه کردن خطا و بیشینه کردن دقت مدل، بهینه‌سازی می‌شوند بنابراین با استفاده از روش آزمون و خطا، تعداد نرون‌ها در لایه میانی سه به دست آمد. تابع تانژانت هیپربولیک که به‌عنوان بهترین تابع برای مدلسازی سیستم‌های طبیعی غیرخطی تشخیص داده شده‌اند، به عنوان تابع تبدیگر نرون‌های پردازشگر در لایه دوم و تابع خطی[1] در لایه سوم مورد استفاده قرار گرفت. توابع انتقال با آزمون و خطا به گونه‌ای انتخاب شد که میانگین مربعات خطا (MSE) در دو مجموعه‌ی آموزش و آزمایش کمینه گردید، مقادیر ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا برای مرحله آموزش و آزمایش در جدول (۱) ارائه شده است. به منظور پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکه چند لایه پرسپترون با الگوریتم آموزشی لونبرگ-مارکورات به عنوان شبکه شناخته شد. به‌طوری که با کمترین MSE و بیشترین مقدار R^2 به عنوان بهترین مدل شبکه عصبی مصنوعی شناخته شده است.

جدول ۱. مقدار خطای شبکه عصبی مصنوعی با ساختارهای مختلف

نوع شبکه	FFN						RNN					
الگوریتم آموزش	LM		GC		BP		LM		GC		BP	
معیار ارزیابی	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE	R^2	MSE
مرحله آموزش	۰/۷۸	۰/۳۳	۰/۶۸	۰/۳۴	۰/۷۲	۰/۳۲	۰/۷۵	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۵۶
مرحله آزمایش	۰/۷۹	۰/۳۲	۰/۶۱	۰/۳۳	۰/۷۴	۰/۴۹	۰/۶۹	۰/۵۴	۰/۶۶	۰/۷۹	۰/۶۳	۰/۶۱

نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در شکل ۷ نشان داده شده است، که داده‌های مشاهداتی نتیجه متوسط تراز آب زیرزمینی حاصل از روش تیسن‌بندی چاه‌های مشاهداتی دشت چهاردولی برای ۳۶ ماه طی دوره‌ی آماری (۱۳۹۴-۱۳۹۶) است. همانطور که در شکل (۷- الف) مشخص است تطابق مقادیر محاسباتی میزان سطح ایستابی مدل شبکه عصبی مصنوعی با مقادیر مشاهداتی در برخی نقاط وجود دارد. به‌گونه‌ای که در شکل (۷-ب) این امر مشهود است که مدل مذکور در تخمین مقادیر بیشینه و کمینه تراز سطح ایستابی عملکرد بهتری را داشته است. از آنجاکه تراز آب زیرزمینی غیر از پارامترهای هواشناسی به پارامترهای مختلف دیگری از جمله میزان برداشت از چاه‌های بهره‌برداری و میزان آب ورودی و تغذیه آبخوان مرتبط است لذا عدم این آمار در بازه‌ی مورد مطالعه، باعث کاهش دقت مدل‌های شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی است. به همین علت در پیش‌بینی سطح ایستابی دشت چهاردولی با مدل شبکه عصبی مصنوعی فقط در مقادیر حداکثر و حداقل عملکرد بهتری را نشان داده است. در مطالعه‌ی که در خصوص پیش‌بینی مدل مکانی سطح ایستابی دشت سرخون را با استفاده از تابع هایپربولیک تانژانت شبکه‌ی عصبی انجام گردید و نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با وجود عدم پارامترهای اقلیمی هم می‌توان از آن استفاده کرد و نسبت به مدل‌های عددی پاسخ بهتری را می‌دهند (جلالی و همکاران، ۱۳۹۸).

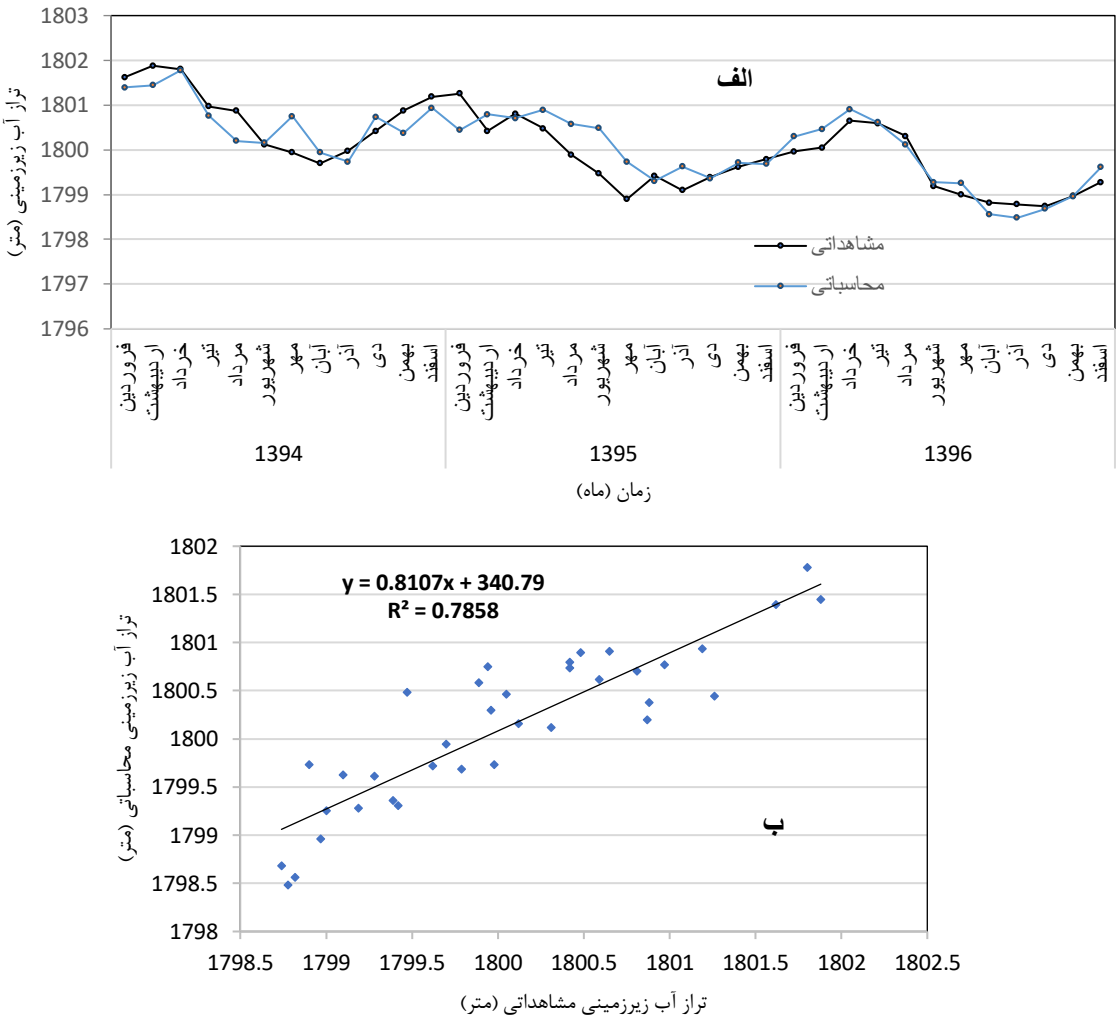
مدل ماشین بردار پشتیبان

در روش حداقل مربعات ماشین‌بردار پشتیبان ابتدا داده‌ها برای همسان‌سازی استانداردسازی شده و سپس به تخمین تراز متوسط سطح ایستابی ماه بعد دشت چهاردولی در مدل LS-SVM با تابع RBF همراه با مقدار بهینه مشخصه γ=۱.۲ تعیین گردید. طبق جدول ۲ نتایج نشان داد که مدل ماشین‌بردار پشتیبان با مقدار ضریب تبیین R2=۰/۹۴ دارای بیشترین دقت برای شبیه‌سازی نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی دارد.

نمودار مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در شکل ۸ نشان داده شده است و همانطور که در شکل (۸- الف) مشخص است تطابق مقادیر محاسباتی میزان سطح ایستابی مدل ماشین‌بردار پشتیبان با مقادیر مشاهداتی به غیر از چند نقطه وجود دارد. به‌گونه‌ای که در شکل (۸-ب) این امر مشهود است که مدل مذکور در تخمین نقاط بیشینه و کمینه بهتر عمل کرده است. نتایج این قسمت با نتایج

[1] Purlin

تحقیق انجام شده پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای که به مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین‌بردار پشتیبان پرداخته شده است همخوانی دارد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۳). در تحقیقی به بررسی تغییرات سطح ایستابی دشت اردبیل با استفاده از شبکه بیزین و مدل ماشین‌بردار پشتیبان مشاهده شد که مدل ماشین‌بردار پشتیبان نسبت به مدل بیزین عملکرد و کارایی بهتری داشته است (آخونی‌پور حسینی و اسدی، ۱۳۹۶).



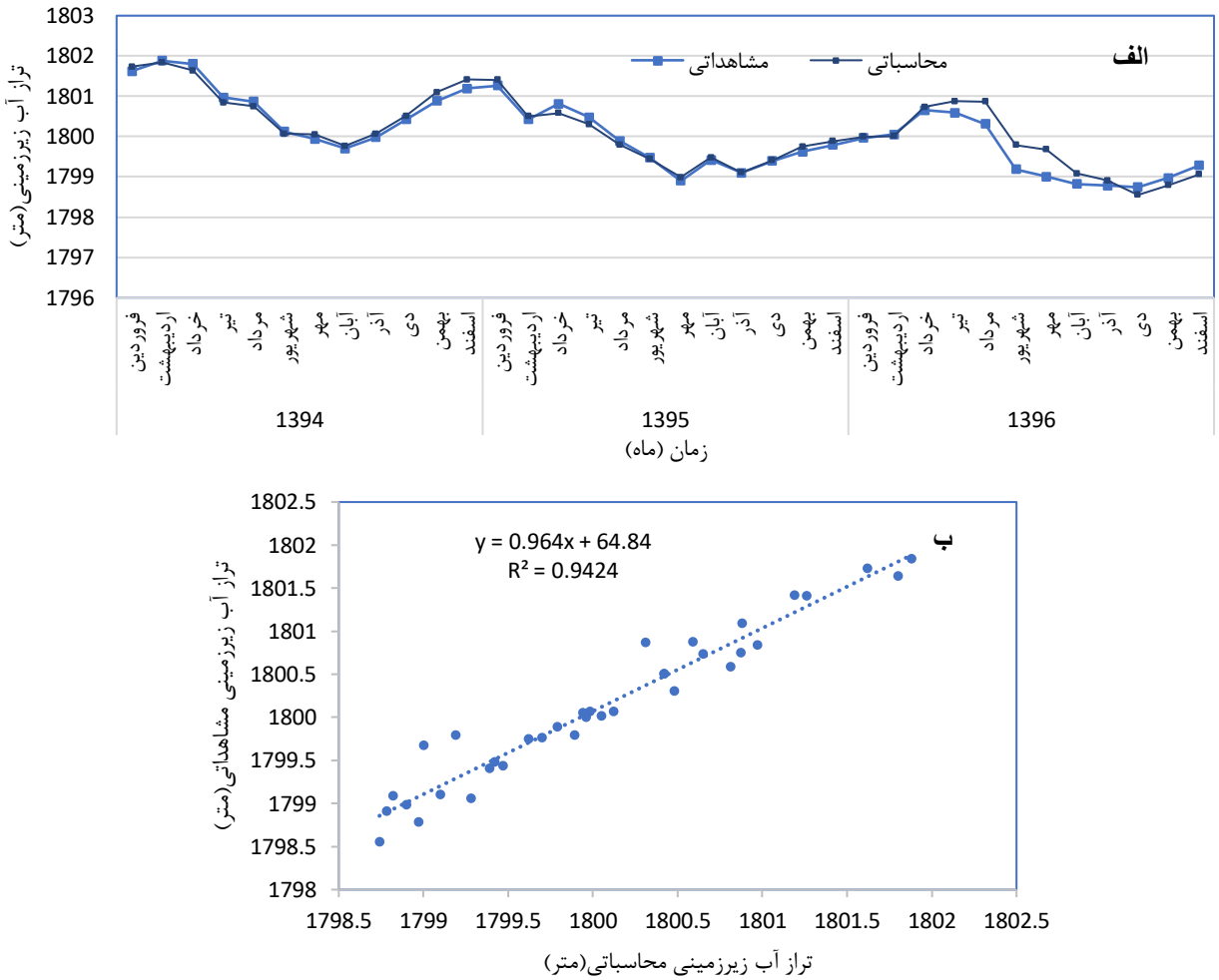
شکل ۷. الف) مقادیر محاسباتی و مشاهداتی نسبت به زمان و ب) نمودار پراکنش میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی

جدول ۲. تحلیل‌های آماری نتایج برنامه‌یزی LS-SVM برای تراز آب زیرزمینی دشت چهاردولی

صحت‌سنجی				آموزش			
NSC	MAE	RMSE	R^2	NSC	MAE	RMSE	R^2
۰/۹۹	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۹۴	۰/۸۱۴	۰/۲۶۹	۰/۶۲	۰/۹۲

براساس نتایج به دست آمده در دورهٔ آماری (۱۳۹۴-۱۳۹۶) متوسط بارندگی سالانه در سطح آبخوان در طول سه سال ۲۵۲/۵ میلی‌متر در طول دوره‌ی دراز مدت ۲۷۱/۶ میلی‌متر بوده است. همانطور که در شکل شماره ۵ هم نشان داده شده است میزان بارندگی در طول سه سال اخیر نسبت به کل دوره‌ی آماری دراز مدت کاهش زیادی نداشته است و این موضوع نیز در خط روند سه سال اخیر در نمودار شکل (۹) حاکی از سیر نزولی مقدار بارش از ماه‌های پرآب به ماه‌های کم‌آب با شیب ملایم مشاهده می‌شود و تغییرات ناگهانی خیلی شدید در آن مشاهده

نمی‌شود. همچنین طبق نمودار شکل (۱۰) میزان جریان در رودخانه شور موجود در حوضه آبریز آبخوان، در طول سه سال اخیر افزایش بوده و در ماه‌های پربارش میزان ورودی افزایش یافته است. در طول سه سال اخیر تراز سطح ایستابی ۱/۷ متر کاهش یافته است و با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که میزان جریان‌های سطحی و بارش در منطقه مناسب بوده اما میزان برداشت از سطح آبخوان در هر سال افزایش یافته است و همین امر باعث کاهش تراز سطح آبخوان شده است که نیاز به مدیریت بیشتر آبخوان در ماه‌های خرداد تا مرداد که سطح جریانات ورودی به آبخوان کاهش می‌یابد، دارد. در ادامه با فرض روند ثابت میزان ورودی‌های به آبخوان، پیش‌بینی تراز سطح ایستابی آبخوان چهادولی با مدل ماشین‌بردار پشتیبان برای یکسال انجام شد و با توجه نمودارها تراز سطح ایستابی کاهش می‌یابد.

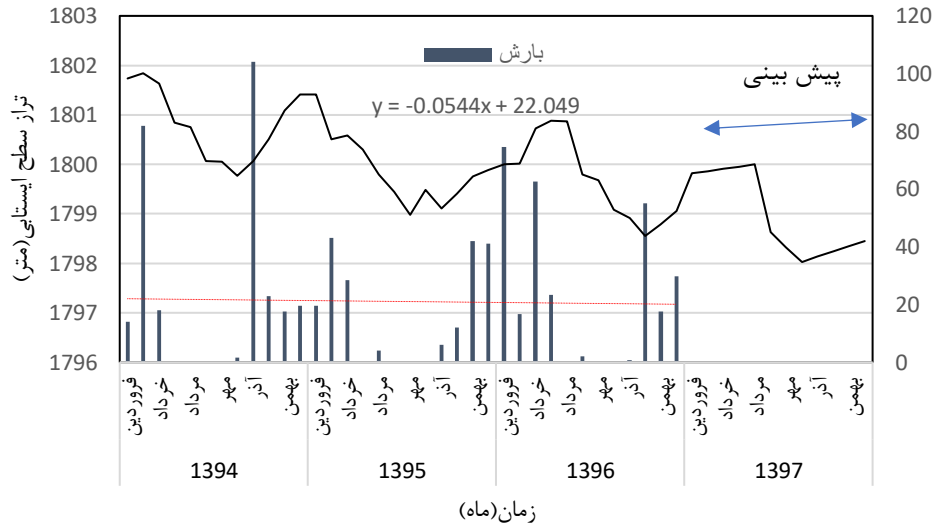


شکل ۸. الف) مقادیر محاسباتی و مشاهداتی نسبت به زمان و ب) نمودار پراکنش میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی

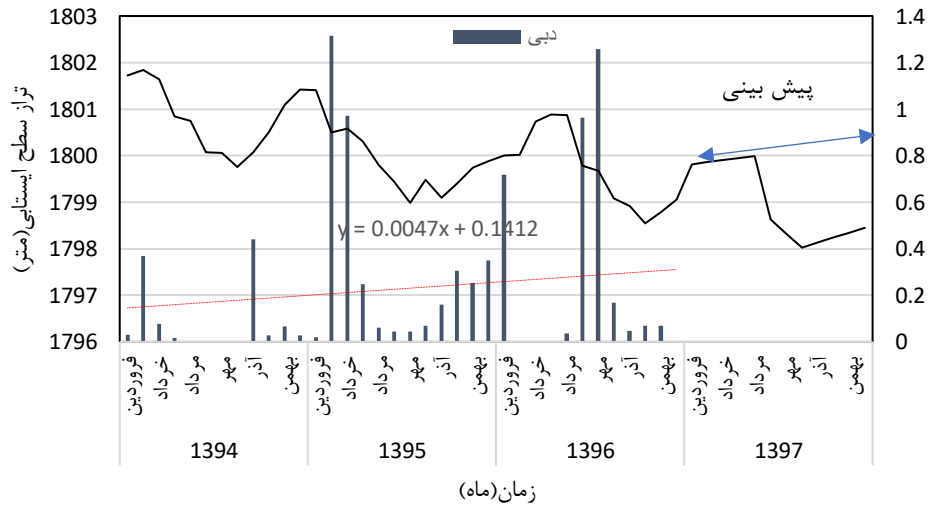
نتیجه‌گیری

شرایط اقلیمی کشور ایران و محدودیت‌های آبی سال‌های اخیر, مدیریت صحیح و کارآمد منابع آب موجود به‌ویژه منابع آب زیرزمینی را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. منابع آب زیرزمینی از منابع پرمصرف با قابلیت استحصال آسان، به شمار می‌آیند. در این پژوهش قابلیت دو مدل هوشمند ماشین‌بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی در دوره ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۶ و مقایسه مدل‌های بهینه حاصل از آن‌ها انجام گرفت. به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر ارائه می‌شود: تراز سطح ایستابی در طول دوره‌ی دراز مدت کاهشی و در طول سال بیلان، ۰/۵۲ متر افت داشته است. در پیش‌بینی تراز سطح ایستابی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی، شبکهٔ چند لایه پرسپترون با الگوریتم آموزشی لونبرگ-

مارکوارت به عنوان کاراترین شبکه شناخته شد. به طوری که با کمترین MSE و بیشترین مقدار R^2 به عنوان بهترین مدل شبکهٔ عصبی مصنوعی شناخته شده در صورتی که سایر ساختارها به طور میانگین از MSE و R^2 بالاتری برخوردار بودند. نتایج این مدل نشان می‌دهد که در تخمین نقاط بیشینه و کمینه ضعیف عمل کرده است و این نقاط را نزدیک به مقداری واقعی‌شان تخمین نزده است. براساس نتایج مدل ماشین‌بردار پشتیبان دارای بیشترین بازده، کمترین درصد خطا و توانایی بالایی در تخمین سطح آب زیرزمینی این دشت نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی می‌باشند. همچنین این مدل قابلیت بسیار بالایی در تخمین مقادیر کمینه و بیشینه و میانی را داشته است. نتایج صحیح با دقت بالا در زمینهٔ تخمین و پیش‌بینی با مدل ماشین‌بردار پشتیبان (واکاوی) نسبت به سایر مدل‌های دیگر نیز در تحقیقات پژوهشگران ها و همکاران (۲۰۱۴)، پوررضا بیلندی و همکاران (۱۳۹۳)، میسرا و همکاران (۲۰۰۹) و هوآنگ و همکاران (۲۰۱۲) وجود دارد. با توجه به نتایج مشاهد شد در این پژوهش و صرف وقت زیاد برای دستیابی به مقادیر دقیق‌تر، می‌توان با ترکیب چند روش هوش مصنوعی با یکدیگر و با روش‌های دادکاوی در زمان انجام محاسبات صرفه‌جویی کرد و سریع‌تر به مقادیر دقیق‌تر دست یافت.



شکل ۹. نمودار تراز سطح ایستابی و بارش



شکل ۱۰. نمودار تراز سطح ایستابی و دبی

تقدیر و تشکر

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

منابع

گویلی، س.، جوادی، س.، ابراهیم بنی حبیب، م.، ثانی خانی، ه (۱۳۹۷) مقایسه مدل‌های هوشمند در پیش‌بینی نوسانات تراز سطح آب دریاچه زریوار با در نظرگیری تراز آب زیرزمینی. مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال چهاردهم. شماره ۳ (پیاپی ۴۵)، ص ۳۳۹-۳۴۴.

میثاقی، ف.، محمدی، ک (۱۳۸۵) پهنه‌بندی اطلاعات بارندگی با استفاده از روش‌های آماری کلاسیک و زمین‌آمار و مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله علمی کشاورزی، دوره ۲۹، شماره ۳، ص ۱-۱۳.

آخونی‌پور حسینی، ف.، اسدی، ا (۱۳۹۶) کاربرد شبکه بیزین و مدل ماشین‌بردار پشتیبان در پیش‌بینی تغییرات سطح تراز ایستابی (مطالعه موردی: دشت اردبیل)، دوره ۱۱، شماره ۳۶، ص ۳۳-۴۲.

بایزیدی، م.، کاکی، م (۱۴۰۰) تغییرات حجم ذخیره و بهره‌برداری از آبخوان‌های دشت های شرق استان کردستان. مجله اکو هیدرولوژی، دوره ۶، شماره ۱، ص ۵۷-۷۲.

جلالی، م.، کمانگر، م.، رزمی، ر (۱۳۹۸) پیش‌بینی مدل مکانی سطح ایستابی با استفاده از تابع هایپربولیک تانژانت شبکه‌ی عصبی مطالعه‌ی موردی: دشت سرخون. مجله هیدروژئومورفولوژی، دوره ۶، شماره ۲۰، ص ۱۰۱-۱۱۹.

Ahmadi, F., Radmanesh, F., Mirabasi najafabadi, R (2014) Comparison of genetic algorithm and support vector machine to predict daily river flow (Case Study: BarandozChay River). Journal of Soil and Water (Food Science and Industry), 28(6): 1171-1116.

Nash, JE., Sutcliffe, JV (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – a discussion of principles. Journal Hydrology, 192: 211–232.

Kaveh, A (2004) Structural Mechanics: Graph and Matrix Methods, Research Studies Press (John Wiley), Exeter, U.K., 1992 (first edition), 1995 (second edition), 2004 (third edition), 100p.

Suykens, J. A. K., Gestel, T. V., Brabanter, J. D., Moor, B. D., Vandewalle, J (2002) Least Squares Support Vector Machines. Copyright by World Scientific Publishing Co. Pie. Ltd. 58: 72-75, 98-99.

Yu, P. S., Chen, S. T., Chang, I. F (2006) Support vector regression for real-time flood stage forecasting. Journal of Hydrology, 328: 704-716.

Mirzavand, M., Ghazavi, R (2014) A Stochastic Modelling Technique for Groundwater Level Forecasting in an Arid Environment Using Time Series Methods. Water Resources Manage, 29: 1315-1328.

Porte, P., Kumar Isaac, R., Kiran Singh Mahilang, K., Sonboier, K., Minj, P (2018) Groundwater Level Prediction Using Artificial Neural Network Model. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 2(7): 2319-7706.

Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P. and Tsanis, I. K (2005) Groundwater level forecasting using artificial neural networks. Journal of Hydrology, 309(4): 229-240.

He, Zh., Wen, X., Liu, H., Du, J (2014) A comparative study of artificial Neural Network, adaptive Neuro Fuzzy inference system and support vector machine for forecasting river flow in the semiarid mountain region. Journal of Hydrology, 509: 379-386.

Barzegar, R., Fijani, E., Asghari Moghaddam, A., Tziritis, E (2017) Forecasting of groundwater level fluctuations using ensemble hybrid multi-wavelet neural network-based models. Science of the Total Environment, 599: 20-31.

Sarangi, A., Bhattacharya, A. K (2005) Comparison of Artificial Neural Network and Regression Modelsfor Sediment Loss Prediction from Banha Watershed in India. Agricultural water management, 28(4): 373-385.

Solaimani, K (2009) Rainfall-Runoff Prediction Based on Artificial Neural Network (A Case Study: Jarahi Watershed). American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment, Science, 5(6): 856-865.

Dehghani, A. A., Asgari, M., Mosaedi, A (2009) Comparison of Geostatistics, Artifitial Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Approaches in Groundwater Level Interpolation (Case study: Ghazvin aquifer). Journal of Agriculture Science Natural Resource,16 (1): 517-528.

Predicting the groundwater level of Chahardoli aquifer in Qorveh city using artificial neural network and support vector machine

A. Shalodegi[1] and M. Byzedi[2*]

1- M. Sc., of Water Engineering, Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran
2 - Assist. Prof., Dept., of Water Engineering, Islamic Azad University, Sanandaj Branch, Sanandaj, Iran

*** m.byzedi@gmail.com**

Recieved: 2021/4/6 Accepted: 2021/7/26

Abstract

Estimating water level is one of the most important and basic issues in agricultural planning, water resources management and determining the water needs of plants. In this study, the efficiency of artificial neural network models and support vector machines in estimating the groundwater level of Chahardoli aquifer in Qorveh city was investigated. To run the models, from the data of precipitation, flow and temperature and water level level in the previous month as input variables and water level in the next month as output variable on a monthly time scale during the statistical period (2006-2017) was used. The criteria of correlation coefficient, root mean square error and mean absolute error value were used to evaluate and also compare the performance of the models. For modeling with the mentioned methods, training data from 2006-2015 and model validation data from 2015-2016 were used. The results showed that both models had acceptable accuracy in estimating the water table level. So that the coefficient of determination in the calibration stage in the models of artificial neural network and support vector machine were equal to 0.74 and 0.94. Comparison of the two models showed that the support vector machine model performs better than the artificial neural network and the prediction accuracy has been decreased for one year in this model.

Keywords: Water Resources, Predicting, Performance, Aquifer