

کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان در استخراج قوانین بهره‌برداری بهینه از سد زاینده‌رود

محمد رضا بازرگان لاری^{۱*}، سحر صفری^۲ و اکبر کریمی^۳

چکیده

استفاده از روش‌های داده‌کاوی و به طور خاص ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) می‌تواند به عنوان ابزاری کارا در بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها مطرح شود. نتایج مدل‌های بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، به دلیل وجود پارامترها و متغیرهای زیاد، برای کاربرد توسط تصمیم‌گیران، به واسطه تعامل متغیرها و پیچیدگی آن‌ها، گیج‌کننده خواهد بود. در این مقاله نتایج یک مدل بهینه‌سازی به هم‌پیوسته هیدرولوژیکی - اقتصادی - اجتماعی که برای تخصیص بهینه آب در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود توسعه یافته است، برای تعیین قوانین بهره‌برداری بهینه از سد زاینده‌رود با ماشین‌های بردار پشتیبان به کار گرفته شده است. مدل SVM آموزش دیده، با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی و بهره‌برداری بالادست و پایین‌دست، شامل نیاز آبی، بارش، تقاضاهای آبی شرب، کشاورزی، صنعت و حجم ذخیره اولیه مخزن، میزان رهاسازی بهینه از مخزن سد را در ماه آینده پیش‌بینی می‌کند. در ساختار پیشنهادی، از نتایج مدل بهینه تخصیص آب ۲۰ ساله در حوضه آبریز زاینده‌رود برای آموزش و آزمون SVM استفاده شده است و عملکرد آن با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) مقایسه شده است. نتایج آزمون این دو مدل نشان می‌دهد که هر دو در تعیین قوانین بهره‌برداری از سد زاینده‌رود کارایی لازم را دارند اما ANN در مقایسه با SVM، تا حدودی قدرت پیش‌بینی بهتری دارد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، سد زاینده‌رود، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین‌های بردار پشتیبان، مدیریت منابع آب.

ارجاع: بازرگان لاری م. ر. صفری س. و کریمی ا. ۱۳۹۵. کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان در استخراج قوانین بهره‌برداری بهینه از سد زاینده‌رود. مجله پژوهش آب ایران. ۲۳: ۱-۹.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق، تهران.

* نویسنده مسئول: bazargan@iauet.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۸

مقدمه

برای در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی، مشخصات بهره‌برداری مخزن و آبخوان در یک سیستم تدوین قوانین بهره‌برداری بهینه برای افزایش ارزش افزوده اقتصادی-اجتماعی بهره‌برداری از مخزن در یک ساختار چند ذینفعی، نوآوری این پژوهش است که در خصوص مسئله تخصیص آب با هدف کمک به مدیریت به هنگام و به هم پیوسته منابع آب، انجام شده است. در این پژوهش به بررسی عملکرد مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان^۱ در حوضه آبریز زاینده‌رود پرداخته شده و عملکرد آن، در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی ارزیابی شده است.

مواد و روش‌ها

در مدل تخصیص بهینه آب شیوه‌ای از تخصیص آب جستجو می‌شود که رفاه تمام ذی‌نفعان (شامل عرضه کننده آب، بخش‌های کشاورزی، صنعت، معدن، شرب و محیط‌زیست) را که با شاخص‌های اقتصادی-اجتماعی تعریف می‌شود، بیشینه کند. ساختار کلی مدل پیشنهادی برای تعیین قواعد به هنگام بهره‌برداری بهینه از سد زاینده‌رود، به نحوی که دارای بیشترین ارزش و مقبولیت اقتصادی-اجتماعی برای ذی‌نفعان باشد، در شکل ۱ نمایش داده شده است. پس از جمع‌آوری اطلاعات، لازم است دو زیرمدل تولید، اعتبار سنجی و تلفیق شوند. برای مدل‌سازی ریاضی تأمین آب و عوامل مؤثر بر آن، در مدل‌سازی جریان آب سطحی از روش گر-کانال استفاده می‌شود. بیلان آب در گر مخزن و رودخانه به عنوان نمونه در معادله‌های (۱) و (۲) ارائه و مدل مفهومی جریان آب زیرزمینی و اندرکنش‌های آن با رودخانه و سفره‌های مجاور در معادله (۳) بیان شده است.

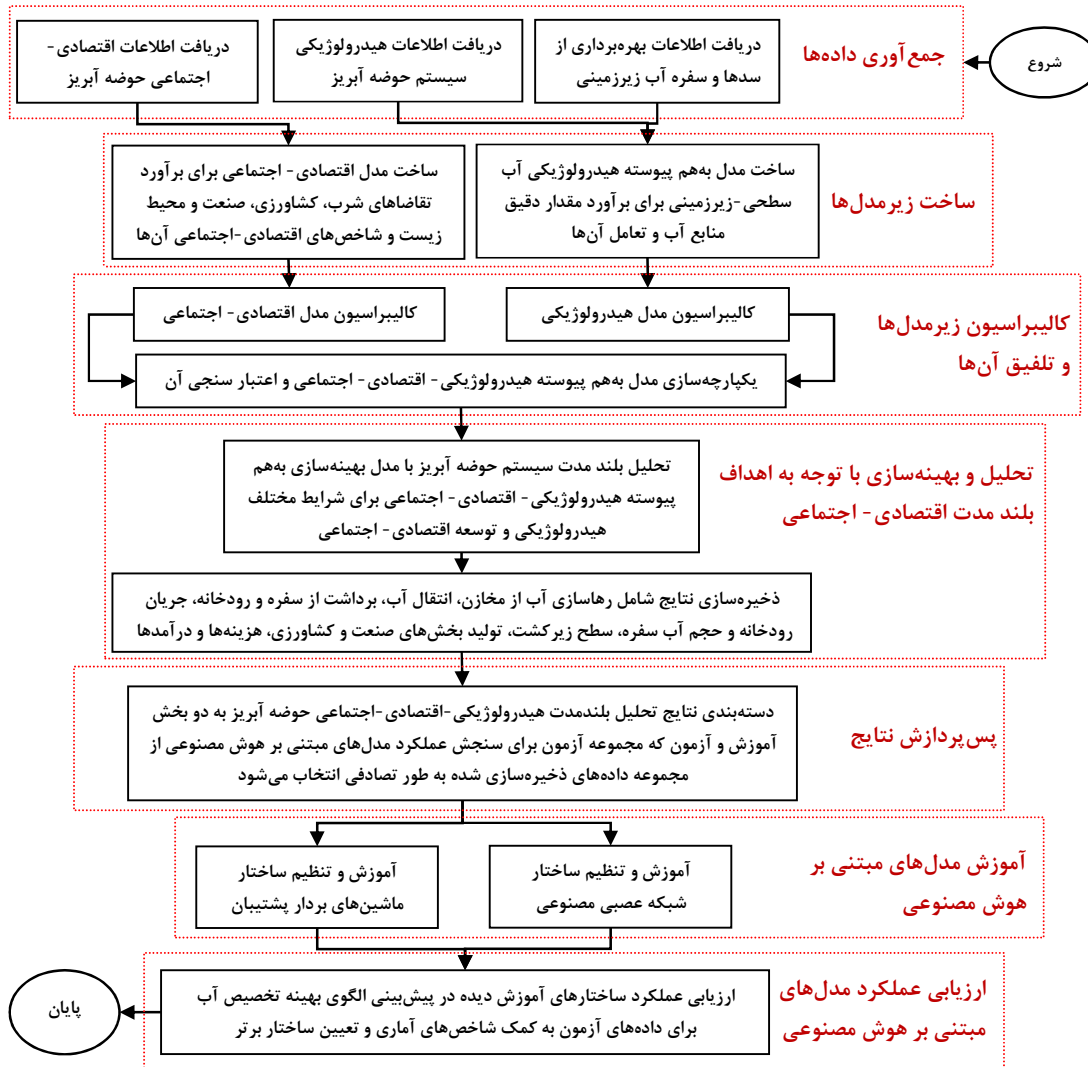
$$S_r^{y,m+1} = S_r^{y,m} + I_r^{y,m} + \sum_{r'(r)} O_{r'}^{y,m} + \sum_{r'(r)} WT_{r',r}^{y,m} - SP_r^{y,m} - PF_r^{y,m} - Ev_r^{y,m} - R_r^{y,m} - \sum_{r'(r')} WT_{r,r'}^{y,m} \quad (1)$$

$$RF_r^{y,m} = SRF_r^{y,m} + G2R_r^{y,m} - R2G_r^{y,m} + \sum_{r'(r)} O_{r'}^{y,m} + \sum_{r'(r)} WT_{r',r}^{y,m} + SP_r^{y,m} + PF_r^{y,m} + R_r^{y,m} \quad (2)$$

محدودیت منابع آب، رشد جمعیت، رشد فعالیت‌های اقتصادی و به دنبال آن رشد تقاضای آب سبب شده است که خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه آبریز، خصوصیات اقتصادی-اجتماعی ذی‌نفعان و خصوصیات زیست‌محیطی، بیش از پیش به هم پیوسته شوند. بدین ترتیب ساخت مدلی که بتواند تأثیر این عوامل را به صورت با هم در تخصیص منابع آب در نظر بگیرد مهم است. هرچه چنین مسائلی با جامعیت بیشتری بررسی شود، به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از تعدد مؤلفه‌های مؤثر، به طور معمول به مدل‌هایی غیرخطی و پیچیده می‌انجامند که به طور مستقیم قابل کاربرد در مدیریت بهره‌برداری از سامانه‌های آبی و اجزاء آن (به طور خاص مخازن سدها) نیستند. از جمله این موارد می‌توان به فرآیند تخصیص آب در حوضه زاینده‌رود اشاره کرد که ملحوظ کردن مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و هیدرولوژیکی آن حوضه، سبب حل یک مسئله پیچیده غیرخطی می‌گردد و پیچیدگی حاکم بر آن، امکان استفاده از آن را در زمان واقعی با محدودیت روبرو می‌کند. استفاده از ساختارهای مدرن داده‌کاوی مانند درخت تصمیم، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین‌های بردار پشتیبان برای برقراری ارتباط بین عوامل مؤثر بر بهینه‌سازی تخصیص آب می‌تواند گامی کاربردی برای مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخازن سد در زمان واقعی و با در نظر گرفتن همه مؤلفه‌ها و بدون نگرانی از عدم اقبال به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر مسئله باشد. به دلیل پیچیدگی‌های حاکم بر مدل‌های هیدرولوژیکی، ژانگ و همکاران (۲۰۰۹) به ارزیابی کارایی ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین جواب‌های مدل SWAT پرداختند. فلاح‌نیا و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که می‌توان از ماشین‌های بردار پشتیبان به عنوان ابزاری دقیق، ساده و سریع در تعیین مصرف انرژی استفاده کرد. در بهره‌برداری بهینه تلفیقی کمی-کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز، بازرگان لاری و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند که ماشین‌های بردار پشتیبان کارا هستند. تعیین قوانین بهینه بهره‌برداری از مخازن آبیاری با استفاده از درخت تصمیم به عنوان یکی دیگر از روش‌های مبتنی بر داده‌کاوی، مورد توجه ستاری و همکاران (۲۰۱۲) قرار گرفته است. ارائه رویکردی مبتنی بر مدل‌سازی ریاضی و ترکیب آن با مدل‌های داده‌کاوی از نوع بردار پشتیبان

کلیه پارامترهای به کار گرفته شده در این روابط بر حسب میلیون مترمکعب است و در جدول ۱ تشریح شده‌اند:

$$\begin{aligned}
 GWV_r^{y,m+1} = & GWV_r^{y,m} + Rch_r^{y,m} + \\
 & GRA_r^{y,m} + GRI_r^{y,m} + GRM_r^{y,m} \\
 & + GRD_r^{y,m} + R2G_r^{y,m} - G2R_r^{y,m} \\
 & - GAA_r^{y,m} - GAI_r^{y,m} - GAM_r^{y,m} \\
 & - GAD_r^{y,m} + \sum_{r(r)} Gf_{r,r'} \cdot GwI_{r,r'}^{y,m} - ge_r^{y,m}
 \end{aligned}
 \quad (3)$$



شکل ۱- ساختار مدل پیشنهادی مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در تدوین قوانین بهینه بهره‌برداری از سد زاینده‌رود

جدول ۱- تشریح متغیرهای به کار گرفته شده در معادله‌های (۱) تا (۳)

متغیر	شرح متغیر
$WT_{r,r'}^{y,m}$	آب انتقالی
$SP_r^{y,m}$	حجم سرریز از مخزن
$PF_r^{y,m}$	جریان خروجی از توربین
$RF_r^{y,m}$	رواناب ورودی به رودخانه
$G2R_r^{y,m}$	حجم تغذیه جریان آب رودخانه توسط سفره آب زیرزمینی
$R2G_r^{y,m}$	حجم تغذیه سفره آب زیرزمینی از جریان آب رودخانه
r, r'	شمارنده مناطق مطالعاتی تشکیل دهنده حوضه آبریز که برای آن مدل تخصیص آب ساخته می‌شود
$S_r^{y,m}$	حجم ذخیره مخزن
$I_r^{y,m}$	آورد به مخزن سد
$O_r^{y,m}$	خروجی از منطقه مطالعاتی
$EV_r^{y,m}$	حجم تبخیر
$R_r^{y,m}$	رهاسازی از مخزن
y	شمارنده شماره سال
m	شمارنده شماره ماه
$Rch_r^{y,m}$	تغذیه سفره آب زیرزمینی از بارش
$GRI_r^{y,m}$	حجم آب بازگشتی از مصرف صنعت به سفره آب زیرزمینی
$GRD_r^{y,m}$	حجم آب بازگشتی از مصرف شرب به سفره آب زیرزمینی
$G2R_r^{y,m}$	حجم تغذیه جریان آب رودخانه توسط سفره آب زیرزمینی
$GAI_r^{y,m}$	حجم برداشت آب برای صنعت از آبخوان
$GAD_r^{y,m}$	حجم برداشت آب برای شرب از آبخوان
$ge_r^{y,m}$	حجم تبخیر از سفره
$GwI_{r,r'}^{y,m}$	حجم آب خارج و یا وارد شده به سفره از سفره‌های مجاور
$GWV_r^{y,m}$	حجم آب سفره زیرزمینی
$GRA_r^{y,m}$	حجم آب بازگشتی از مصرف کشاورزی به سفره آب زیرزمینی
$GRM_r^{y,m}$	حجم آب بازگشتی از مصرف معدن به سفره آب زیرزمینی
$GAA_r^{y,m}$	حجم برداشت آب برای کشاورزی از سفره آب زیرزمینی
$GAM_r^{y,m}$	حجم برداشت آب برای معدن از سفره آب زیرزمینی
$Gf_{r,r'}$	ضریب اندرکنش سفره با سفره‌های مجاور

مطالعاتی (منطقه مطالعاتی معادل واحد هیدرولوژیک است) با یک مخزن تک‌بعدی (گره آب زیرزمینی با معادلات بیلان آبی) مدل‌سازی شده است که این به منزله استفاده از مقادیر متوسط در منطقه برای آب زیرزمینی است. در معادله (۳) برای برآورد سهم بارش در تغذیه سفره، از گزارش‌های بیلان دشت‌ها که شرکت تمام آن را تهیه کرده، استفاده شده است. تولید، درآمد مهندسی مشاور و اشتغال مشخصات اصلی اقتصادی- اجتماعی هستند و تقاضاهای آبی در بخش‌های کشاورزی، صنعت و

رواناب ورودی به رودخانه از حاصل ضرب ضریب رواناب در بارش حاصل می‌شود. این مقدار از رواناب در پایین‌دست سد یعنی بین سد و مناطق مصرف، رخ می‌دهد که قابلیت ذخیره نداشته و خارج از مدیریت مخزن است. از آنجا که این مؤلفه از لحاظ منشأ رواناب ورودی به رودخانه با آورد به مخزن یکی است اما از منظر غیر قابل ذخیره بودن با آورد تفاوت دارد، بنابراین، با دو نماد متفاوت در فرمول‌بندی مسئله (معادله‌های (۱) و (۲)) ظاهر شده است. در این پژوهش، آب زیرزمینی در هر منطقه

صورت $(x_1, y_1), \dots, (x_k, y_k), x \in R^n, y \in R$ هستند که k مبین تعداد آن‌ها است، تابع خطی‌سازی مربوطه به صورت معادله (۴) بیان می‌شود.

$$f(x) = (w, x) + b, \quad (4)$$

$$(w, x) \in R^n, b \in R$$

که در این معادله x بردار ورودی، w وزن بردار و b میزان اختلال است. در تعیین تابع $f(x)$ همواره باید مقادیر خروجی به گونه‌ای انتخاب گردد که به طور همزمان، کمترین میزان انحراف e را از y_i تعیین شده داشته و همچنین تابع، مقدار مناسب بردار وزن w را انتخاب کند. تأمین شرایط ذکر شده با حل مسئله بهینه‌سازی (۵) حاصل می‌شود:

$$\text{Minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2$$

subject to : (۵)

$$\begin{cases} y_i - (w, x_i) - b \leq e \\ (w, x_i) + b - y_i \leq e \end{cases}$$

که در آن x_i و y_i و w و b همان پارامترهای معادله (۴) بوده و e نیز میزان انحراف اعمال شده است. در نهایت برای تبدیل یک معادله بهینه‌سازی که شامل مجموعه‌ای از قیود و نامساوی‌ها است، به یک معادله صریح، از ضریب‌های لاگرانژ a_i و a'_i استفاده می‌شود و معادله (۶) به دست می‌آید:

$$f(x, b) = \sum_{i=1}^k (a'_i - a_i)(x_i, x) + b \quad (6)$$

معادله خطی‌سازی بالا از طریق یافتن ضریب‌های لاگرانژ حل خواهد شد. برای آن که بتوان در مسائل غیرخطی نیز از آن استفاده کرد، می‌توان توابع کرنل را به کار گرفت و معادله (۶) را به فرم زیر بازنویسی کرد:

$$f(x, b) = \sum_{i=1}^k (a'_i - a_i)k(x_i, x) + b \quad (7)$$

که در این معادله $k(x_i, x)$ نشان دهنده تابع کرنل است (بیشاپ، ۲۰۰۶؛ وب، ۲۰۰۲؛ لی و همکاران، ۲۰۰۹؛ عسگری و کراچیان، ۱۳۸۵ و غضنفری هاشمی و اعتماد شهیدی، ۱۳۸۸).

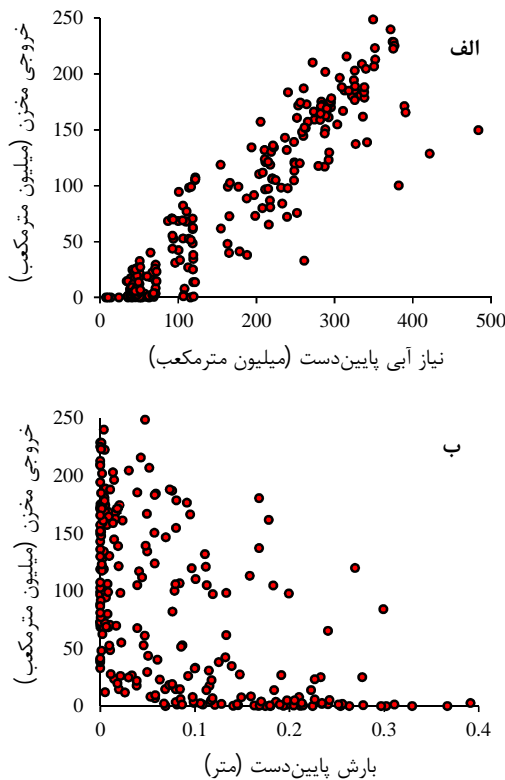
در کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی، لازم است پارامترهای خروجی از مدل بهینه‌یابی برای جلوگیری از کوچک شدن بیش از حد وزن‌ها بر اساس معادله (۸) در فاصله صفر و یک استاندارد شوند.

معدن در تعامل با خصوصیات اقتصادی- اجتماعی آن بخش‌ها قرار دارد. تابع هدف مدل بهینه‌سازی تخصیص آب، تابعی تجمعی است که مبین رفاه ذی‌نفعان است. این تابع از حاصل جمع وزنی درآمد خالص ذینفع‌های مختلف و اشتغال در بخش‌های کشاورزی و صنعت که به صورت بی‌بعد با یکدیگر جمع شده‌اند به دست می‌آید. روش بهینه‌یابی در این تحقیق نیز روش خطی پی‌درپی برای حل مسئله غیرخطی بوده است. پس از اعتبار سنجی و یکپارچه‌سازی زیرمدل‌های سیستم آبی حوضه، مدل‌های اقتصادی- اجتماعی ذی‌نفعان تحلیل و بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم آبی با توجه به اهداف بلندمدت اقتصادی- اجتماعی برای شرایط مختلف هیدرولوژیکی و اقتصادی- اجتماعی انجام شد. در حقیقت مدل به هم پیوسته هیدرولوژیکی- اقتصادی- اجتماعی مقادیر بهینه رهاسازی از مخزن سد زاینده‌رود را با توجه به قیود مختلف بهره‌برداری و هدف بهینه‌سازی شاخص‌های اقتصادی- اجتماعی ذی‌نفعان در یک افق بلندمدت تعیین می‌کند. از این روی، خروجی مدل بهینه‌یابی، تصمیم‌هایی است که دارای بیشترین ارزش اقتصادی- اجتماعی و مقبولیت برای ذی‌نفعان است همچنین قیود مختلف بهره‌برداری از رودخانه، مخزن و سفره زیرزمینی را نیز رعایت می‌کند. جزئیات بیشتر در خصوص زیرمدل‌ها، اعتبارسنجی و بهینه‌یابی در پژوهش‌های انجام شده کریمی (۱۳۸۹)، کریمی و اردکانیان (۲۰۱۰) و صفری و کریمی (۱۳۹۱) ارائه شده است. از نتایج تلفیق مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی که سبب قوانین بهینه بهره‌برداری می‌شود، برای آموزش ساختار مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. ماشین‌های بردار پشتیبان، یکی از جدیدترین روش‌های پیش‌بینی و تخمین‌های احتمالاتی است که به عنوان ابزاری برای طبقه‌بندی دودویی غیرآماري با هدف تشخیص و متمایز کردن الگوهای پیچیده در داده‌ها به کار می‌رود. در این روش، با استفاده از یک رمز تصمیم‌گیری، خطی بهینه برای جدا کردن کلاس‌ها و تفکیک آن‌ها از هم تعیین می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۰۹ و بهزاد و همکاران، ۲۰۰۹). در یک الگوریتم خطی‌سازی به کمک ماشین‌های بردار پشتیبان با فرض مقادیر ورودی x_i و مقادیر خروجی y_i ، هدف یافتن تابعی است که کمترین انحراف e را از y_i داشته باشد. اگر داده‌های آموزش به

می‌گیرند. دیگر متغیرها و پارامترها مانند تبخیر و نشت به طور ضمنی در معادلات بیلان و خروجی بهینه در نظر گرفته شده‌اند و در نظر گرفتن مجدد آن‌ها ضرورتی ندارد.

نتایج و بحث

مقدار بهینه آب خروجی از سد که خروجی مدل بهینه‌یابی است، در این پژوهش به عنوان خروجی مدل جعبه سیاه مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌عصبی مصنوعی در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، نمودار تغییرات برخی از مؤلفه‌های مؤثر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات خروجی از مخزن بر حسب (الف) تغییرات نیاز آبی پایین‌دست و (ب) بارش پایین‌دست

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش نیاز آبی پایین‌دست، خروجی از مخزن و یا استفاده از ذخایر مخزن سد بیشتر می‌شود. همچنین روشن است که با افزایش بارش در پایین‌دست، خروجی سد و یا نیاز به استفاده از منابع ذخیره شده سد کاهش می‌یابد. در این پژوهش، خروجی مدل بهینه‌یابی به کار گرفته شده، داده‌هایی به صورت ماهانه و در یک افق ۲۰ ساله بودند.

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

در این معادله، مقدار متغیر استاندارد شده، X مقدار متغیر و X_{\min} و X_{\max} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار متغیر مورد نظر در مجموعه داده‌های موجود است. برای بررسی عملکرد ساختارهای هوشمند به کار گرفته شده می‌توان از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (CC) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده کرد. هدف از این پژوهش ارائه الگویی ساده و کارآمد از نظر اقتصادی- اجتماعی برای بهره‌برداری ماهانه از سد به نحوی است، که مدیریت بهره‌برداری از سد که به طور معمول با مدل‌های بهینه‌یابی و روابط حاکم بر مسئله آشنایی ندارد، بتواند در کوتاه‌ترین زمان ممکن و به راحتی با اطلاعات در دسترس خود، مقدار بهینه خروجی از سد را با در نظر گرفتن همه مؤلفه‌های مؤثر اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی تعیین کند. به طور حتم مقدار برداشت بهینه از مخزن سد به کلیه پارامترهای اشاره شده در معادله‌های (۱) تا (۳) وابسته است اما حساسیت جواب به این پارامترها یکسان نیست. از این رو در یک بررسی اولیه، کلیه پارامترهایی که تعیین آن‌ها برای اپراتور میسر است، به عنوان ورودی در نظر گرفته شد و ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای مؤثر در دسترس به عنوان ورودی مدل‌های مبتنی بر داده‌کاوی مد نظر قرار گرفت. ترکیبی از متغیرها که نتایج بهتری برای داده‌های آزمون در پی داشتند به عنوان پارامترهای مهم تأثیرگذار انتخاب شدند. بدین ترتیب، مهم‌ترین پارامترهایی که مقدار آن‌ها در دسترس اپراتور سد است و نقش مهمی نیز در تعیین مقدار بهینه آب خروجی از سد دارند، حجم ذخیره مخزن ابتدای هر ماه، نیاز آبی کشاورزی، شرب و صنعت بالادست مخزن و نیاز آبی کشاورزی، شرب و صنعت پایین‌دست مخزن (که ارتباط مستقیمی با شاخص‌های اقتصادی- اجتماعی ذی‌نفعان در بالادست و پایین‌دست سد دارند) و همچنین بارش بالادست و پایین‌دست سد (که شرایط هیدرولوژیکی حوضه را در بالادست و پایین‌دست مشخص می‌کند) هستند که به عنوان پارامترهای ورودی مدل در نظر گرفته شده‌اند. شایان ذکر است که مقادیر رهاسازی از مخزن و تقاضاهای آبی از اجرای یک بهینه‌سازی بلند مدت حاصبه دست آمده‌اند که تمام شاخص‌های هیدرولوژیکی، اقتصادی- اجتماعی و بهره‌برداری مخزن را در نظر

خطا تعیین می‌شود. نتایج دو نمونه از این سعی و خطا در جدول ۲ آمده است. کرنلی که متناظر با بیشترین CC و کمترین RMSE باشد، به عنوان بهترین کرنل انتخاب می‌شود.

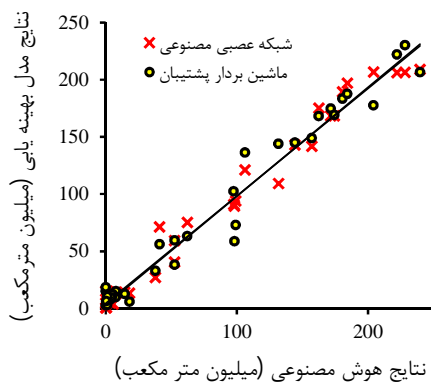
با توجه به جدول ۲، در بهترین حالت (کاربرد کرنل گوسی)، ضریب همبستگی نتایج، برای ماشین بردار پشتیبان آموزش دیده، ۹۷ درصد است حال آنکه این ضریب برای شبکه عصبی مصنوعی در بهترین حالت در ازای یک شبکه تک‌لایه با شش نرون و تابع آموزش trainlm و تابع یادگیری وزن LVQ1 برای تعیین مقادیر وزن و بایاس، ۹۹ درصد حاصل گردید. در شکل ۳ و ۴ برای اعتبارسنجی مدل‌ها، میزان آب خروجی از مخزن جهت نقاط آزمون برای مدل مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده در مقایسه با خروجی مدل بهینه‌یاب نشان داده شده است. وقتی مدلی برای پیش‌بینی و یا شبیه‌سازی فرآیندی به کار می‌رود باید بتواند بخش‌های ساختاری مسئله را به خوبی تبیین کند اما بخشی که تصادفی است و به طور حتم با مدل به کار رفته و قابل تبیین نیست نیز مهم است.

با توجه به اینکه بارش‌ها به صورت سازگار و سری زمانی تاریخی در نظر گرفته شده‌اند بنابراین مسئله همبستگی هیدرولوژیکی بارش در نقاط مختلف حوضه نیز در این روش، به طور ضمنی رعایت شده است.

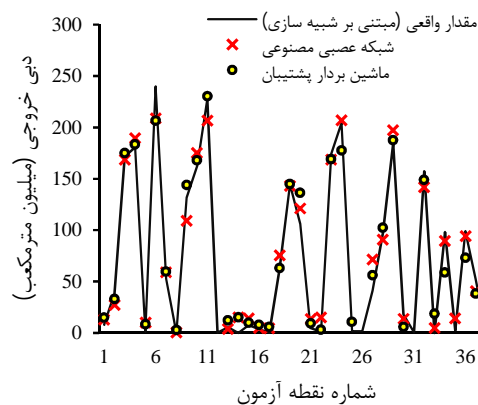
در این پژوهش از مجموعه کل ۲۴۰ داده حاصل از بهینه‌یابی، به صورت تصادفی بخشی شامل ۴۰ داده برای مجموعه آزمون حذف شد و بقیه برای آموزش به کار گرفته شد. گرچه در این حذف تصادفی، همبستگی داده‌ها نادیده گرفته می‌شود، اما در این حالت، می‌توان قابلیت مدل آموزش دیده را در شرایطی که حتی نتواند همبستگی داده‌ها را تشخیص دهد، ارزیابی کرد. در این مقاله از مدل SVR- ν نرم‌افزار 3.1 libsvm استفاده شد. در مدل SVR- ν دو پارامتر تأثیرگذار C و ν وجود دارد. C پارامتر وزن است و با آن می‌توان اختلاف بین خطای تجربی و خطای تعمیم را به حد مطلوب رساند و ν پارامتری است که از آن برای تنظیم استفاده می‌شود. تعیین این مقادیر برای نیل به بهترین مدل، با سعی و خطا انجام می‌شود. مقدار بهینه ضریب‌های C و ν در این پژوهش، به کمک زیر برنامه Gridregression به ترتیب، ۸ و ۵/۶۶ تعیین شد. مناسب‌ترین کرنل از طریق سعی و

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ارزیابی مدل برای کرنل‌های مختلف

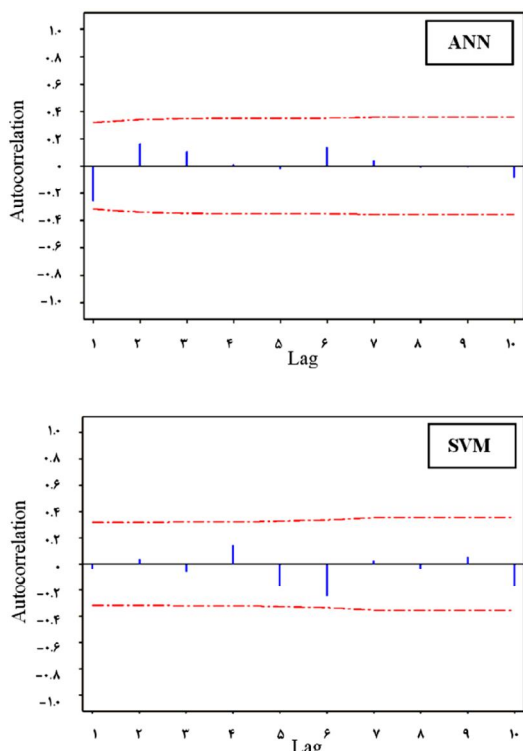
کرنل مورد استفاده								
آماره مورد بررسی	خطی		چندجمله‌ای		هیپرپولیک		گوسی	
	تست اول	تست دوم	تست اول	تست دوم	تست اول	تست دوم	تست اول	تست دوم
CC	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۸۰	۰/۸۸	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۸۷	۰/۹۷
RMSE	۰/۸۱	۰/۷۴	۱/۴۰	۱/۰۱	۶۷/۹۸	۷۴/۲۷	۰/۶۲	۰/۴۹



شکل ۳- تحلیل همبستگی مقایسه حجم آب خروجی بهینه و پیش‌بینی‌های مبتنی بر ANN و SVM



شکل ۴- مقایسه میزان حجم آب رها شده به دست آمده از مدل بهینه‌یابی GAMS و مدل پیش‌بینی ANN و SVM

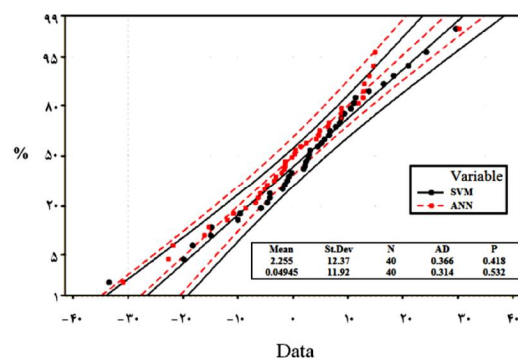


شکل ۶- نتایج آزمون مستقل بودن خطاها

نتیجه‌گیری

مدل‌های بهینه‌سازی تخصیص آب که قادر به در نظر گرفتن خصوصیات هیدرولوژیکی- اقتصادی- اجتماعی حوضه آبریز در فرآیند تخصیص آب در حوضه‌هایی مانند زاینده‌رود باشند، به دلیل پیچیدگی‌های ناشی از زیادی متغیرها، به مدل‌هایی غیرخطی و پیچیده می‌انجامد و به طور معمول کاربرد مستقیم آن‌ها در مدیریت بهره‌برداری از سیستم آبی و اجزا آن (به طور خاص مخازن سدها) دشوار است. در این پژوهش عملکرد بهینه مخزن سد زاینده‌رود با توجه به تأثیر متقابل عرضه آب در بالادست و پایین‌دست مخزن در بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی و حجم ذخیره اولیه مخزن از یک مدل بهینه‌یابی به گونه‌ای استخراج شد که میزان خروجی ماهانه متناظر با حداقل اثرات منفی بلندمدت بر عملکرد سیستم حوضه آبریز سد زاینده‌رود تعیین شد. از نتایج حاصل برای آموزش دو مدل مبتنی بر ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که هر دو ساختار به کار گرفته شده با دقت خوبی می‌توانند مقدار خروجی بهینه آب از سد زاینده‌رود را در افق بلندمدت تخمین زنند. از آنجا که ماشین‌های بردار

هرچه این بخش تصادفی (که به آن خطا نیز گفته می‌شود) کوچک‌تر و رفتار آن متقارن‌تر باشد دقت مدل بیشتر است. خطاهای تصادفی خالص (به عنوان مثال با توزیع نرمال) و بدون وجود همبستگی با یکدیگر هستند. بدین ترتیب مشخص می‌شود که مدل بخش‌های ساختاریافته فرآیند مذکور (مدیریت و بهره‌برداری از مخزن سد) را به طور نسبی کامل تبیین کرده است. آزمون نرمال بودن خطاها و بررسی همبستگی آن‌ها به روشنی خصوصیات خطا را در مدل‌سازی مشخص می‌کند. شکل ۵ نتایج آزمون نرمال بودن خطاها را نشان می‌دهد. در این تست ضریب آزمون آندرسون دارلینگ (AD)، میزان خطا در هماهنگی یک توزیع با توزیع مطلوب (در این پژوهش توزیع نرمال) را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نتایج آزمون نرمال بودن خطا

این ضریب بین صفر و یک تغییر می‌کند و هرچه مقدار آن کوچک‌تر باشد بهتر است. P-Value احتمال نرمال بودن خطاها را نشان می‌دهد و هرچه مقدار آن بزرگ‌تر باشد بهتر است. این مقدار باید بیشتر از ۵٪ باشد تا آزمون در سطح معنی‌داری ۹۵٪ صحت داشته باشد. برای داده‌های این مقاله، مقادیر این دو شاخص (که در شکل ۵ ارائه شده‌اند)، نشان می‌دهد که هر دو مدل تمام خصوصیات داده‌ها را بیان می‌کنند و مدل‌های درستی هستند. در شکل ۶ نیز نتایج آزمون مستقل بودن خطاها نشان داده شده است. از آنجا که تمام میله‌ها داخل نوار اطمینان قرار گرفته‌اند، همبستگی صفر بوده و خطاها مستقل از هم هستند.

8. Fallahnia M. Kerachian R. Etesam I. and Majedi H. 2012. The impact of window characteristics on gas and electric costs in educational buildings: Application of support vector machines, Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Mechanical Engineering. 36(M2): 193-205.
9. Karimi A. and Ardakanian R. 2010. Development of a dynamic long-term water allocation model for agriculture and industry water demands. Water Resources Management. 24: 1717-1746
10. Li Q. Meng Q. Cai J. Yoshino H. and Mochida A. 2009. Applying support vector machine to predict hourly cooling load in the building. Applied Energy. 86: 2249-2256.
11. Sattari, M. T. Apaydin H. Ozturk F. and Baykal N. 2012. Application of a data mining approach to derive operating rules for the Eleviyan irrigation reservoir. Lake and Reservoir Management. 28(2): 142-152.
12. Webb A. R. 2002. Statistical Pattern Recognition. Second Edition. John Wiley & Sons Inc. West Sussex. UK. 495 p.
13. Zhang X. Srinivasan R. and Van Liew M. 2009. Approximating SWAT model using Artificial Neural Network and Support Vector Machine. Journal of the American Water Resources Association. 45(2): 460-474.

پشتیبان و شبکه‌های عصبی بر خلاف ساختارهایی مانند درخت تصمیم به عنوان نمونه از نوع M5 قوانین بهره‌برداری را به صورت قوانین خطی و روشن ارائه نمی‌دهند و تعیین سیاست بهینه بهره‌برداری از طریق آن‌ها نیازمند اجرای ساختارهای آموزش دیده است، تحقیقات آینده می‌تواند به بررسی عملکرد مدل‌های مبتنی بر درخت تصمیم اختصاص یابد.

منابع

۱. بازرگان لاری م. ر. کراچیان ر. صدقی ح. فلاح‌نیا م. عابدعلم‌دوست ا. و نیکو م. ر. ۱۳۸۹. تدوین قوانین احتمالاتی برای بهره‌برداری بهینه تلفیقی کمی- کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در زمان واقعی: کاربرد ماشین‌های بردار پشتیبان. مجله آب و فاضلاب. ۴: ۵۴-۶۹.
۲. صفری س. و کریمی ا. ۱۳۹۱. تدوین قوانین بهینه بهره‌برداری از سد زاینده‌رود به کمک ماشین‌های بردار پشتیبان. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران ایران. اصفهان.
۳. عسگری ح. و کراچیان ر. ۱۳۸۵. کاربرد تخمین‌های احتمالاتی ماشین‌های بردار پشتیبان در پهنه‌بندی کیفی آب رودخانه‌ها مطالعه موردی: رودخانه کارون- دز. مجموعه مقالات اولین همایش تخصصی محیط‌زیست. ایران
۴. غضنفری هاشمی س. و اعتماد شهیدی ا. ۱۳۸۸. پیش‌بینی عمق آبستگي اطراف پایه پل با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی. هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران ایران. شیراز.
۵. کریمی ا. ۱۳۸۹. ساخت یک مدل تخصیص منابع آب در مقیاس حوضه آبریز با لحاظ به هم پیوستگی خصوصیات هیدرولوژیکی، اقتصادی- اجتماعی و عدم قطعیت آنها. پایان نامه دکترا. دانشگاه صنعتی شریف. تهران. ۲۲۴ ص.
6. Behzad M. Asghari K. Eazi M. and Pallhang M. 2009. Generalization performance of support vector machines and neural networks runoff modeling. Expert System with Applications. 36(4): 7624-7629.
7. Bishop C. M. 2006. Pattern Recognition and Machine Learning. First edition. Springer. New York. 740 p.

