



تدوین قوانین بلندمدت بهینه تخصیص آب و بار آلودگی در سیستم‌های رودخانه-مخزن - آب زیرزمینی: کاربرد مدل شبیه‌سازی SVR

محمد رضا نیکو^۱، اکبر کریمی^۲، رضا کراچیان^{۳*} و سید ناصر باشی ازغدی^۴

^۱استادیار بخش مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

^۲استادیار گروه عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

^۳استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۴کандیدای دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

در این تحقیق، مدل جدیدی برای تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در سیستم‌های رودخانه-مخزن-سفره زیرزمینی با در نظر گرفتن بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و کیفیت آب ارائه شده است. بدین‌منظور یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی چند-دوره‌ای کمی-کیفی در یک افق بلند مدت، تدوین شده است. در این مدل، حاصل جمع هزینه تأمین آب برای نیازهای آبی و تأمین قیود کیفی در تمام دوره برنامه‌ریزی، حداقل می‌گردد. بدین‌ترتیب، از پتانسیل هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از مخزن سفره زیرزمینی و رودخانه در یک ساختار چند دوره‌ای به نحوی استفاده می‌شود که تصمیم‌های هر دوره حداقل هزینه تأمین آب و برقراری کیفیت مورد نیاز را یک افق بلندمدت به همراه داشته باشد. نتایج حاصله از کاربرد مدل پیشنهادی در بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی آب در زیرحوضه پایین‌دست سد زاینده‌رود مبین دقت مدل بهینه‌سازی و توانایی الگوریتم حل بکار برده شده برای حل سریع مدل غیرخطی تدوین شده می‌باشد. همچنین مدل بهینه‌سازی پیشنهاد شده، کارایی بسیار مناسبی در استفاده توأمان از پتانسیل‌های مکانی و زمانی سیستم آبی و کاهش اثرات نامطلوب تخصیص نامناسب آب و بار آلودگی داشته است. در ادامه، بر مبنای نتایج حاصله از مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، یک مدل ماشین بردار پشتیبان آموزش داده شده است. نتایج حاصله از کاربرد مدل ماشین بردار پشتیبان صحت‌سنجی شده نشان‌دهنده کارایی بسیار مناسب آن در پیش‌بینی کیفیت آب و تخصیص‌های آب بوده است.

کلمات کلیدی: تخصیص توأمان آب و بار آلودگی؛ مدیریت کمی-کیفی آب؛ SVR؛ زیر حوضه سد زاینده‌رود.

تخصیص بهینه آب بین آب‌بران و در نتیجه، حداکثر نمودن سود سیستم، بار آلودگی وارد شده توسط آن‌ها به نحوی تخصیص داده می‌شود که استانداردهای زیست‌محیطی نیز تأمین می‌شوند. در حال حاضر، با توجه به مشکلات کیفی منابع آبی، تعیین الگویی مناسب برای تخصیص منابع آب به شکلی که اهداف کمی و کیفی هر کدام از بهره‌برداران ارضاء

۱- مقدمه

رویکرد تخصیص همزمان آب و بار آلودگی، نگرشی نسبتاً نو در مدیریت زیست‌محیطی حوضه‌های آبریز می‌باشد که ضمن

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۵۳۳۹۵۲۹

آدرس پست الکترونیک: kerachian@ut.ac.ir

چند- دوره‌ای پایین می‌آورد [۵]. مدل شبیه‌سازی REALM در سیستم آبی گولپورن، در ایالت ویکتوریای استرالیا، برای تعیین منحنی‌های فرمان مخازن و نقاط برداشت آب کشاورزی با لحاظ حداقل نیاز زیست‌محیطی در یک تحلیل بلندمدت ۱۱۰ ساله مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴]. علاوه بر این، مدل REALM برای تعیین سهم آب هر یک از شرکت‌های متصدی امور آب در ایالت ویکتوریا تحت تأثیر شرایط کم‌آبی و پراپی و تحلیل راهکارهای مختلف تأمین آب شهر ملبورن مورد استفاده قرار گرفته است. مدل REALM نیز از روش بهینه‌سازی تک- دوره‌ای برای تحلیل سیستم آبی استفاده می‌کند [۱۴]. از بهینه‌سازی چند-دوره‌ای برای هماهنگ‌سازی زمانی و مکانی بهره‌برداری اجزا سیستم‌های آبی در تعیین سهم بهینه آب هر یک از ایالت‌های حوضه آبریز سن‌خوآن در جنوب آمریکا و تعیین قواعد بهینه بهره‌برداری از سد هوور استفاده شده است [۲ و ۷]. با استفاده از بهینه‌سازی چند-دوره‌ای از پتانسیل‌های ذخیره‌های سیستم آبی حوضه آبریز دریای آرال در تخصیص آب در به نیازهای آبی، به ویژه کشاورزی، بنحوی که حداقل اثرات منفی را بر تأمین نیاز زیست‌محیطی دریای آرال داشته باشد، استفاده شده است [۱۷ و ۴].

اخیراً نیکو و همکاران [۱۲] قوانین بهینه بهره‌برداری از مخزن و برداشت از رودخانه و آب زیرزمینی را با لحاظ دو معیار تأمین نیاز و کنترل آلودگی رودخانه، بر پایه مدل جامع مدیریت همزمان کمی-کیفی آب در سطح حوزه و مدل داده‌کاوی MSP ارائه کردند. ایشان در این تحقیق، عملکرد مدل داده‌کاوی مذکور را با مدل SVR در تعیین قوانین تخصیص همزمان کمی-کیفی، مورد ارزیابی قرار دادند.

در این تحقیق، برخلاف اکثر مطالعات قبلی که در دوره زمانی کوتاه‌مدت بوده‌اند، ساختار جدیدی برای تدوین قوانین تخصیص در دوره زمانی بلندمدت ۱۰ ساله همزمان آب و بار آلودگی در سیستم‌های روخانه-مخزن-سفره آب زیرزمینی با لحاظ بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی ارائه شده است. به منظور لحاظ توزیع مکانی منابع و مصارف و قابلیت ذخیره‌سازی سد در مدل‌سازی سیستم آبی و کیفیت آب، ضمن در نظر گرفتن معادلات بیلان آب، تأمین نیاز و خروجی آب از منطقه، معادلات کیفیت آب در رودخانه

شده و بهره‌برداری از سیستم به صورت پایدار انجام پذیرد، ضروری به نظر می‌رسد. در بحث بهره‌برداری کمی و کیفی از منابع آب، بهره‌برداری تلفیقی از منابع سطحی و زیرزمینی به منظور حداکثر نمودن منافع حاصله و برقراری توزیع مناسب مکانی و زمانی تخصیص آب می‌تواند بسیار سودمند باشد. تأمین آب برای نیازهای شرب، کشاورزی و صنعت یکی از چالش‌های مدیریت منابع آب در افق بلندمدت، می‌باشد. مدل‌سازی دقیق حوضه آبریز با لحاظ توزیع مکانی نقاط برداشت و مصرف آب، بعلاوه برداشت از آبخوان‌ها، امکان ارزیابی صحیح‌تر امکان تأمین آب را در شرایط مختلف برای تصمیم‌گیران فراهم می‌کند [۱۶ و ۲]. اردکانیان^۱ [۲] به منظور استفاده بهینه از پتانسیل هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سیستم نیروگاه‌های آبی دز-کارون و حرارتی مدحج و رامین در تأمین حداکثری نیاز انرژی در یک افق ۳ ساله با هدف حداقل سازی هزینه بهره‌برداری از سیستم مذکور، از رویکرد بهینه‌سازی چند- دوره‌ای استفاده نموده است. پالوتینو و همکاران^۲ [۱۳] تأثیر کم‌آبی بر عملکرد سیستم آبی فلومیندوسا-کامپیدانو در ساردینیای کشور ایتالیا را با استفاده از بهینه‌سازی چند دوره‌ای، که قادر به حداقل سازی هزینه‌های بلند مدت رهاسازی آب از مخازن است، مورد بررسی قرار دادند. هیگینز و همکاران^۳ [۸] با استفاده از بهینه‌سازی چند- دوره‌ای نشان دادند که می‌توان بهره‌برداری از سیستم آبی جنوب شرق کوئینزلند را به نحوی برنامه‌ریزی نمود که تحت دو سناریوی پایه و اضافه‌شدن زهاب‌های بازگشتی به مخازن، با قابلیت اطمینان یکسان، نیازهای آبی تأمین گردد. سازمان منابع آب کالیفرنیا با استفاده از مدل CALSIM-II، اقدام به ارزیابی عملکرد تأسیسات آبی و بهره‌برداری از آن‌ها بعلاوه قابلیت اطمینان تأمین آب نمودند. البته مدل مذکور از رویکرد بهینه‌سازی تک- دوره‌ای برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم آبی استفاده کرده است [۵]. تفاوت مدل‌های تک- دوره‌ای با مدل‌های چند- دوره‌ای، عدم لحاظ اثرات بلندمدت بهره‌برداری کنونی بر تأمین آب در دوره‌های بعدی توسط مدل‌های تک- دوره‌ای می‌باشد، که قابلیت اطمینان پاسخ‌های آن‌ها را در مقایسه با مدل‌های

¹ Ardakanian

² Pallottino et al.

³ Higgins et al.

$$HE_r^{y,m} \leq Pff1_r + Pff2_r \cdot PF_r^{y,m} \quad (2)$$

$$HE_r^{y,m} \leq Hf1_r + Hf2_r \cdot S_r^{y,m} \quad (3)$$

$$HE_r^{y,m} + HESl_r^{y,m} = MHE_r^{y,m} \quad (4)$$

$$Ev_r^{y,m} = e_r^{y,m} \cdot (Af1_r + Af2_r \cdot S_r^{y,m}) \quad (5)$$

که در معادلات بالا، $S_r^{y,m}$ ، $I_r^{y,m}$ و $O_r^{y,m}$ به ترتیب، حجم ذخیره آب مخزن، حجم جریان ورودی به مخزن و حجم جریان خروجی از منطقه r' و ورودی به مخزن، به میلیون متر مکعب می‌باشند. $WT_{r,r'}^{y,m}$ ، $SP_r^{y,m}$ و $PF_r^{y,m}$ نیز به ترتیب، حجم انتقال آب به منطقه r' ، حجم سرریز از مخزن و حجم جریان عبوری از توربین به میلیون متر مکعب هستند. $Pff1_r$ و $Pff2_r$ نیز به ترتیب مقدار حجم تبخیر از مخزن، حجم رهاسازی آب از مخزن و ضرایب رابطه تولید انرژی برق آبی با حجم آب خروجی از توربین می‌باشند. $e_r^{y,m}$ نیز مقدار ارتفاع تبخیر از سطح آب مخزن (متر) است. $Af1_r$ ، $Af2_r$ و $Hf1_r$ ، $Hf2_r$ به ترتیب، ضرایب رابطه حجم-سطح برای مخزن و ضرایب رابطه تولید انرژی برق آبی با ارتفاع سطح آب مخزن می‌باشند. Ef_r ، $HE_r^{y,m}$ ، $MHE_r^{y,m}$ و $HESl_r^{y,m}$ به ترتیب، ضریب تولید انرژی توربین، انرژی برق آبی تولید شده توسط نیروگاه، کمبود در تأمین تقاضای انرژی برق نسبت به پتانسیل تولید ممکن و حداکثر انرژی قابل تولید برق آبی به مگاوات ساعت می‌باشند. همچنین $Pr_r^{y,m}$ و $Sepf_r$ به ترتیب، مقدار ارتفاع بارش ماهانه (متر) و ضریب نفوذ آب به دریاچه سد (بدون بعد) هستند.

در ادامه، معادله تأمین تقاضای حداقل زیست‌محیطی رودخانه معرفی می‌گردد. مقدار تقاضای حداقل زیست‌محیطی رودخانه معمولاً به صورت درصدی از جریان در سال نرمال در نظر گرفته می‌شود. تعیین مقدار این درصد می‌تواند روند نسبتاً پیچیده و یا ساده‌ای با توجه به ملاحظات در نظر گرفته در آن، داشته باشد. یک عدد مورد استفاده معمولاً بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ جریان رودخانه در سال نرمال می‌باشد.

$$O_r^{y,m} + IEDS_l_r^{y,m} \geq IED_r^{y,m} \quad (6)$$

و مخزن، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی چند-دوره‌ای کمی-کیفی در یک افق بلند مدت، تدوین شده است. در تابع هدف مدل بهینه‌سازی، حاصل جمع هزینه‌های عدم تأمین آب و کیفیت، برای نیازهای آبی مختلف در تمام بازه‌های زمانی، حداقل می‌گردد. بدین ترتیب، عملکرد منطقه مورد مطالعه، در هر ماه و برای تمام سال‌های برنامه‌ریزی به طور توأمان بنحوی هماهنگ و بهینه می‌گردد که حداقل هزینه تأمین آب و برقراری کیفیت مورد نیاز را یک افق بلندمدت به همراه داشته باشد. متدولوژی توسعه‌داده شده در این تحقیق، در زیر حوضه سد زاینده‌رود با لحاظ مقدار انتقال آب از تونل‌های کوهرنگ ۱، ۲ و ۳ به کار برده شده است. نتایج حاصله از کاربرد متدولوژی پیشنهادی در بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی آب در سطح حوضه آبریز، مبین توانایی مدل بهینه‌سازی تدوین شده در استفاده توأمان از پتانسیل‌های مکانی و زمانی سیستم آبی و کاهش اثرات نامطلوب تخصیص نامناسب آب و بار آلودگی بوده است.

۲- مواد و روش‌ها

همانطور که اشاره گردید، مدل تدوین شده در این تحقیق، مدلی بلندمدت بوده و به نحوی عمل می‌کند که اثرات نامطلوب تصمیمات در طول دوره برنامه‌ریزی بلندمدت، حداقل گردد. مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی تخصیص آب و بار آلودگی در سطح حوضه آبریز به این منظور تدوین می‌شود که بتوان با استفاده از آن، تأمین نیازهای کمی-کیفی آب و سایر تقاضاهای آبی (نظیر تولید انرژی برق آبی) را در سطح حوضه آبریز، در یک افق زمانی بلندمدت بهینه نمود. این مدل، تحت تأثیر مقدار نیازهای آبی، آب قابل عرضه، تخصیص آب و قیود کیفی مربوط به مقدار بار آلودگی تخلیه‌شده، قرار دارد. از فرضیات مهم در نظر گرفته شده در این مدل بهینه‌سازی، در نظر گرفتن افت مجاز سطح آب زیرزمینی به صورت قید برداشت از سفره آب زیرزمینی می‌باشد. فرم ریاضی مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن مورد استفاده در این تحقیق در معادلات زیر ارائه شده است:

$$S_r^{y,m} + I_r^{y,m} + \sum_{r(r')} O_r^{y,m} + \sum_{r(r')} WT_{r,r'}^{y,m} - SP_r^{y,m} - PFF_r^{y,m} - Ev_r^{y,m} - R_r^{y,m} - \sum_{r(r')} WT_{r,r'}^{y,m} - 0.5 \cdot Sepf_r (S_r^{y,m} + S_r^{y,m+1}) + Pr_r^{y,m} \cdot (Af1_r + Af2_r \cdot (S_r^{y,m} + S_r^{y,m+1})) = S_r^{y,m+1} \quad (1)$$

زیست‌محیطی کیفیت در منطقه r و در ماه t ام هستند. همچنین، $QpiSlack_r^t$ و $DempiRQ_r^t$ نیز به ترتیب، مقدار کمبود کیفیت در نقاط برداشت آب و استاندارد کیفی مورد نیاز در محل برداشت آب در منطقه r و در ماه t ام می‌باشند. در نهایت، $QSSlack_r^t$ و $DemSQ_r^t$ نیز به ترتیب، مقدار کمبود کیفیت در مخزن و استاندارد کیفی مورد نیاز در مخزن در منطقه r و در ماه t ام می‌باشند. لازم به ذکر است که در مدل بهینه‌سازی تخصیص کمی-کیفی آب، متغیرهای کمبود کیفیت در نقاط برگشت و برداشت آب، حداقل شده و بدین ترتیب، سعی در کاهش حداکثری ممکن مقدار تخطی از استانداردهای کیفی مورد نیاز می‌شود. در نهایت، فرم ریاضی تابع هدف با توجه به توضیحات مربوط به عرضه‌کننده و متقاضیان آب به صورت زیر قابل ارائه خواهد بود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_y \sum_r w_1 \cdot WSPF_r^y \\ & + w_2 \cdot \sum_m IEDS_r^{y,m} \end{aligned} \quad (11)$$

در معادله ۱۱، تابع هدف مساله بهینه‌سازی تخصیص آب در سطح حوضه آبریز از دید عرضه‌کننده آب در حوضه، معرفی شده است. در معادلات بالا، $WSPF_r^y$ ، تابع مطلوبیت عرضه‌کننده آب (بی‌بعد) است. Z ، تابع هدف مساله بهینه‌سازی تخصیص آب است. در نهایت، w_1 و w_2 وزن‌های نشان‌دهنده اهمیت ذی‌نفعان مختلف مساله تخصیص آب نسبت به یکدیگر می‌باشند. مدل بهینه‌سازی مد نظر در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS تهیه شده است. در این تحقیق، همچنین بعد از تدوین مدل بهینه‌سازی، به منظور تدوین قوانین بهره‌برداری تلفیقی، از مدل ماشین‌های بردار پشتیبان رگرسیونی استفاده شده است. در ادامه، معرفی مختصری از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان ارائه شده است.

۳- ماشین‌های بردار پشتیبان رگرسیونی^۲

ماشین‌های بردار پشتیبان رگرسیونی روش نسبتاً جدیدی برای تشخیص الگو و رگرسیون، می‌باشند. الگوریتم‌های

در معادله ۶، $IEDS_r^{y,m}$ و $IED_r^{y,m}$ به ترتیب، حجم ماهانه کمبود در تأمین نیاز حداقل زیست‌محیطی (میلیون متر مکعب) و حجم ماهانه نیاز حداقل زیست‌محیطی (میلیون متر مکعب) می‌باشند. تأمین نیاز زیست‌محیطی، یکی از ملزومات تمام برنامه‌های منابع آب می‌باشد. به عبارت دیگر، در تمام طرح‌های تأمین آب و برنامه‌ریزی‌های ارزیابی تأثیر بهره‌برداری از طرح بر تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه و یا تالاب‌ها و تعیین نحوه‌ای از بهره‌برداری که حداقل تأثیر منفی را بر محیط‌زیست داشته باشد از اولویت‌های مهم مطالعاتی در زمینه منابع آب می‌باشد. برای جزئیات مربوط به مربوط تأمین نیازهای آبی از منابع آب سطحی و زیرزمینی به [۱] مراجعه کنید. همچنین در این تحقیق، یک فرمول‌بندی غیرخطی برای شبیه‌سازی آلاینده‌های زوال‌ناپذیر^۱ توسعه داده شده است. این فرمول‌بندی برای لحاظ کیفیت آب در مخزن و کیفیت آب‌های برگشتی در مدل بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی تخصیص آب و بار آلودگی از منابع آب سطحی و زیرزمینی به کار برده شده است. این فرمول‌بندی شامل معادلات بیلان جرم مخزن و بیلان جرم رودخانه در محل برداشت آب و معادلات کیفیت آب در نقاط برگشت آب می‌باشند. مقدار کیفیت آب در محل آب بازگشتی را می‌توان با استفاده از معادله ۷ تعیین نمود:

$$O_r^t \times Qrep_r^t = RMF_r^t \times Qpi_r^t + \alpha_r \times RA_r^t \times Qref_r^t \quad (7)$$

که در معادله بالا، α_r و $Qref_r^t$ به ترتیب، مقدار درصد آب برگشتی در منطقه r و کیفیت آب‌های بازگشتی در منطقه r و در ماه t ام می‌باشند. علاوه بر آن، به منظور لحاظ قیود تأمین اهداف کیفی آب در محل آب‌های، محل برداشت آب و مخزن در معادلات بهینه‌سازی، معادلات ۸، ۹ و ۱۰ مورد استفاده قرار گرفته است:

$$Qrep_r^t - QrepSlack_r^t \leq EnvQ_r^t \quad (8)$$

$$Qpi_r^t - QpiSlack_r^t \leq DempiRQ_r^t \quad (9)$$

$$QS_r^t - QSSlack_r^t \leq DemSQ_r^t \quad (10)$$

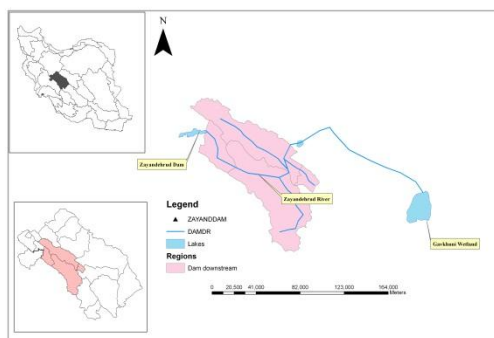
در معادلات بالا، $QrepSlack_r^t$ و $EnvQ_r^t$ به ترتیب، مقدار متغیر کمبود کیفیت در نقاط برگشت آب و استاندارد

² Support Vector Regression (SVR)

¹ Conservative

حوضه آبریز زاینده‌رود شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی ناشی از بارش باران، ذوب برف و انتقال آب می‌باشد. در حال حاضر توسط تونل‌های کوه‌رنگ ۱، ۲ و ۳، بخش قابل توجهی

از آب سرشاخه رودخانه کارون را به زیر حوضه سد زاینده‌رود منتقل می‌نماید.



شکل ۱- موقعیت زیر حوضه سد زاینده‌رود در ایران و در حوضه زاینده‌رود

سد مخزنی زاینده‌رود بر روی رودخانه زاینده‌رود در ۷۵ کیلومتری سراب رودخانه ساخته شده و از سال ۱۳۵۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از محل سد زاینده‌رود به پایین‌دست، از آب رودخانه برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت به میزان قابل توجهی استفاده می‌گردد. مشخصات منحنی حجم سطح ارتفاع سد زاینده‌رود در جدول ۲ معرفی شده است. حجم مفید و حداقل حجم بهره‌برداری از این سد به ترتیب ۱۴۷۰ و ۴۳۸/۵ در نظر گرفته شده‌اند.

بخش محیط‌زیست در این تحقیق به صورت کمی و کیفی مورد ارزیابی و مدل‌سازی قرار گرفته است. در مدل تدوین‌شده، هزینه‌ای معادل با بیشترین مقدار ارزش افزوده ذی‌نفعان به ازای واحد آب تخصیصی، به صورت مالیات از سود تمام ذی‌نفعان در صورت عدم تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی کسر می‌گردد. در بخش کیفی، عدم تخطی از استانداردهای کیفی زیست‌محیطی در مدل بهره‌برداری تلفیقی لحاظ گردیده است. در این تحقیق، سری زمانی رواناب سطحی برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰، که سال‌های پر آب و کم‌آب را در خود دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. مقدار متوسط آورد ماهانه زیر حوضه سد زاینده‌رود در شکل

شبیه‌سازی هوشمند کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی معمولاً قدرمطلق خطا یا مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش را حداقل می‌کنند ولی مدل‌های SVR اصل حداقل‌سازی خطای ساختاری را به کار می‌گیرند. ماشین‌های بردار پشتیبان برای حل مسائل غیرخطی، ابعاد مسأله را تغییر می‌دهند که اینکار از طریق توابعی به نام کرنل صورت می‌گیرد. انتخاب کرنل برای SVR به حجم داده‌های آموزشی و ابعاد بردار ویژگی بستگی دارد. به عبارت دیگر، باید با توجه به این پارامترها تابع کرنلی را انتخاب نمود که توانایی آموزش برای ورودی‌های مسأله را داشته باشد. علاوه بر این، از آنجا که در برخی از کاربردها، قابلیت تعمیم طبقه‌بندی‌کننده از اهمیت به‌سزایی برخوردار است، باید قابلیت تعمیم SVR‌های مختلف را نیز در نظر گرفت. در عمل چهار نوع کرنل خطی، کرنل چندجمله‌ای، کرنل تانژانت هیپربولیک و کرنل گوسی (RBF) بکار گرفته می‌شوند. در جدول ۱ معادلات برخی کرنل‌های رایج ارائه شده‌اند.

جدول ۱- کرنل‌های رایج در ماشین‌های بردار پشتیبان

نوع کلاسیک	تابع کرنل
کرنل خطی	$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \mathbf{x}_i^T \cdot \mathbf{x}_j$
کرنل چندجمله‌ای	$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = (\gamma \mathbf{x}_i^T \cdot \mathbf{x}_j + r)^d$
کرنل تانژانت هیپربولیک	$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \tanh(\gamma \mathbf{x}_i^T \cdot \mathbf{x}_j + r)$
کرنل گوسی	$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = e^{-\gamma \ \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\ ^2}$

با توجه به ماهیت مسائل بهره‌برداری از سیستم‌های رودخانه-مخزن، در این تحقیق جهت تدوین قوانین بهره‌برداری در زمان واقعی از ماشین‌های بردار پشتیبان مبتنی بر رگرسیون استفاده شده است. برای اطلاع از جزئیات بیشتر در مورد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان می‌توان به مراجع معتبر در این زمینه مانند [۸، ۱۲ و ۲۱] مراجعه نمود.

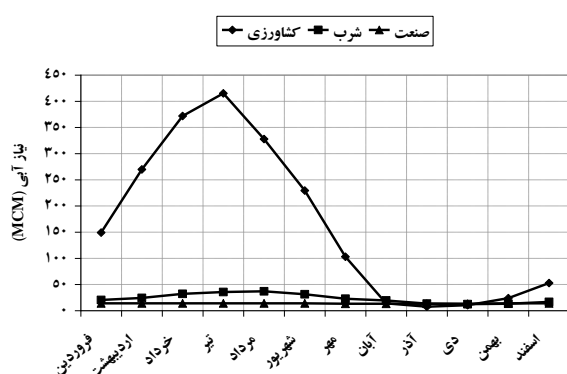
۴- مطالعه موردی: سیستم رودخانه-مخزن زیر حوضه سد مخزنی زاینده‌رود

در این تحقیق به منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، از زیرحوضه سد زاینده‌رود در حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شده است. در شکل ۱، موقعیت زیر حوضه سد زاینده‌رود در ایران و حوضه آبریز زاینده‌رود، نشان داده شده است. منابع آبی

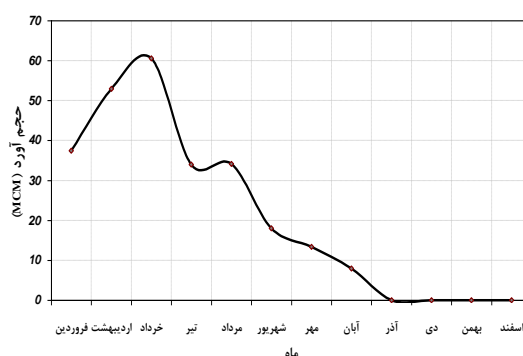
۲ ارائه شده است. مقدار نیازهای آبی و توزیع ماهانه آن‌ها، در جدول ۳ و شکل ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۲- مشخصات سد مخزنی زاینده‌رود

حجم (MCM)	0	6	48	200	303	426	578	905	1400	1444	1470
مساحت دریاچه (ha)	0	76	416	1100	1604	2007	2845	4041	4800	5292	5350
ارتفاع سطح آب (m)	0	6	18	37	41	47	57	69	78	79	80



شکل ۳- توزیع ماهانه نیازهای آبی کشاورزی، شرب و صنعت



شکل ۲- متوسط آورد ماهانه زیر حوضه سد زاینده‌رود

جدول ۳- نیازهای آبی سالانه در زیر حوضه سد زاینده‌رود (MCM)

کل نیاز	نیاز صنعت	نیاز شرب	نیاز کشاورزی
۶۱۰	۹۴/۴	۶۵/۱	۴۵۰/۵

از آب تنظیم‌شده زاینده‌رود، به وسیله سدهای انحرافی چم‌آسمان و نکوآباد در بالادست شهر اصفهان و سد آبشار در پایین‌دست شهر به طور گسترده استفاده می‌گردد. به طوری که تنها بخش کوچکی از آب رودخانه به باتلاق گاوخونی وارد می‌شود. در حال حاضر، حوزه آبریز زاینده‌رود از مشکلات مربوط به غلظت زیاد TDS، رنج می‌برد. لذا در این تحقیق، کیفیت آب از نظر متغیر کیفی TDS در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج

در این بخش، نتایج کاربرد مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی کمی-کیفی تخصیص آب در دوره برنامه‌ریزی بلندمدت ۱۰ ساله با گام زمانی ماهانه در زیر حوضه سد

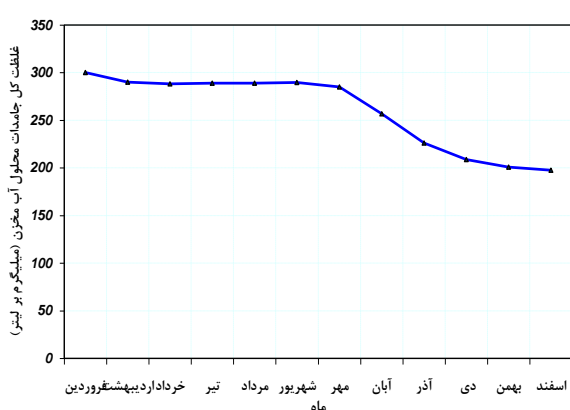
زاینده‌رود ارائه شده است. در این تحقیق، کیفیت آب از نظر متغیر کیفی TDS در نظر گرفته شده است. متغیرهای مسئله مورد بررسی در این تحقیق، مقدار تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی به بخش‌های شرب، صنعت و کشاورزی به همراه مقدار انرژی تولیدی توسط سد زاینده‌رود است. در شکل ۴، مقدار نیاز آبی و آب تخصیص داده‌شده به بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه ارائه شده است. همانطوری که ملاحظه می‌گردد، در حالتی که تخصیص به بخش کشاورزی با لحاظ کیفیت آب صورت می‌پذیرد، مقدار تأمین نیاز نسبت به حالتی که تخصیص آب بدون لحاظ کیفیت آب صورت می‌پذیرد، تفاوت فاحشی دارد. این امر بدین دلیل است که مدل به اندازه‌ای از منابع آب سطحی و زیرزمینی به بخش کشاورزی تخصیص داده است که مقدار غلظت کل جامدات محلول در محل زهاب‌های بازگشتی از حد استاندارد تخطی نکند. همین امر، موجب شده است که تأمین کمی و کمی-کیفی در این شرایط، یکسان نباشند (شکل ۴).

در شکل ۵، تغییرات غلظت TDS آب در مخزن سد زاینده‌رود نشان داده شده است. همانطوری که ملاحظه

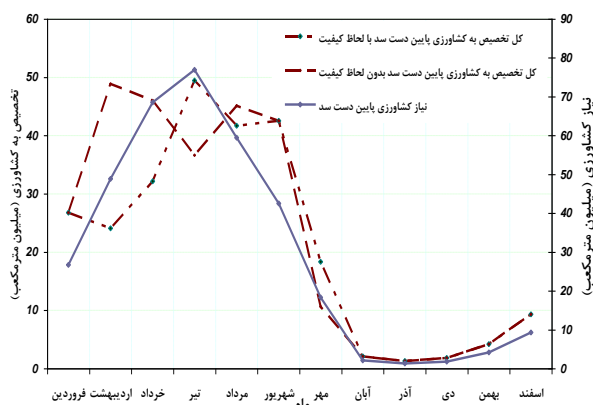
از توربین سد زاینده‌رود، چند هدف اصلی را در نظر دارد. این اهداف، شامل تأمین نیازهای آبی پایین‌دست، حفظ حجم ذخیره مخزن و تأمین انرژی می‌باشد. در ادامه، در شکل ۸، مقدار تخصیص آب به بخش صنعت، ارائه شده است. همانطوری که در این شکل مشاهده می‌گردد، در ۶ ماهه اول سال، مدل به نحوی عمل نموده است که مقدار تخصیص آب ثابتی را به بخش صنعت به همراه داشته است، در ادامه، ضمن کاهش تخصیص آب به بخش صنعت، همچنان، روند ثابت تخصیص آب به آن برقرار بوده است.

می‌گردد، مدل به‌نحوی عمل نموده است که کیفیت آب مخزن را نیز تا حد ممکن در یک حد مطلوب نگه دارد. از غلظت اولیه TDS (ماه فروردین) در مخزن سد زاینده‌رود ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده و در انتهای سال، به ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. این عملکرد مناسب، از غلظت TDS در مخزن سد که به دو سوم مقدار اولیه، رسیده است، مشخص است. در شکل ۶ نیز متوسط حجم آب ذخیره‌شده بهینه در سد زاینده‌رود با استفاده از مدل بهینه‌سازی تدوین شده، نشان داده شده است.

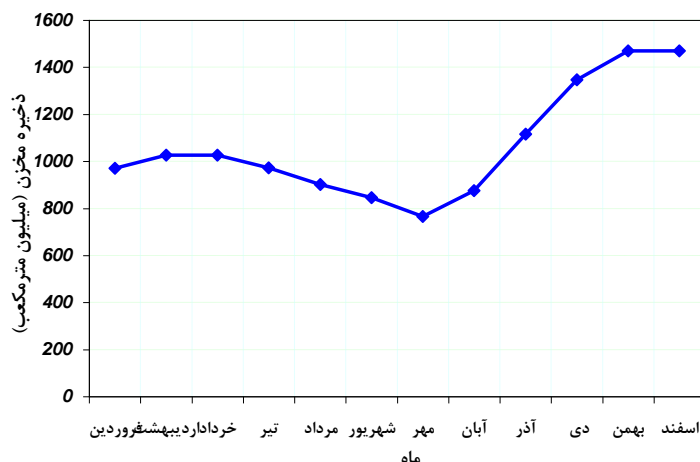
در شکل ۷ نیز مقدار حجم آب رهاسازی‌شده از توربین سد زاینده‌رود نشان داده شده است. مقدار آب رهاسازی‌شده



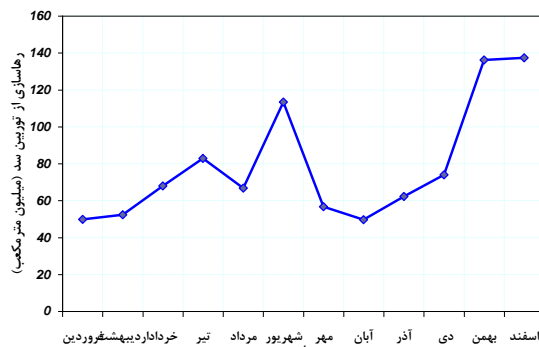
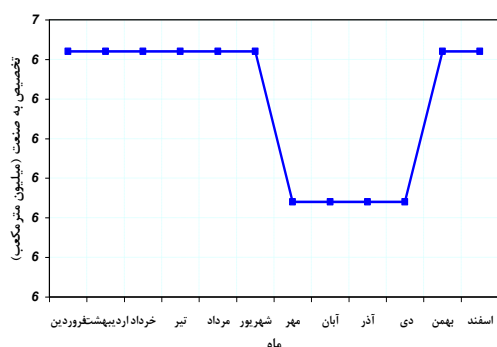
شکل ۵- تغییرات متوسط ماهانه غلظت TDS در مخزن سد زاینده‌رود



شکل ۴- مقدار متوسط ماهانه نیاز آبی و تخصیص به بخش کشاورزی (دوره بهینه‌سازی ده‌ساله)



شکل ۶- متوسط ماهانه حجم ذخیره مخزن سد زاینده‌رود (دوره بهینه‌سازی ده ساله)

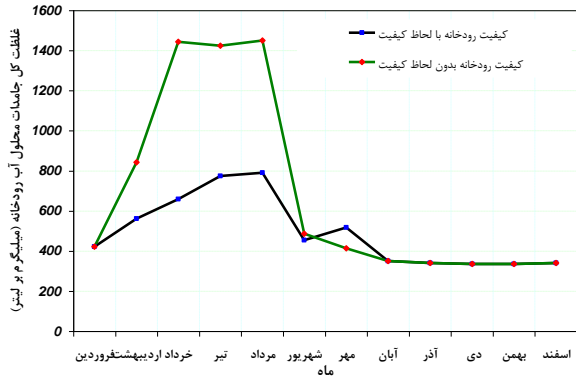


شکل ۷- مقدار متوسط ماهانه حجم آب رهاسازی شده از توربین سد زاینده‌رود (دوره بهینه‌سازی ۱۰ ساله)
 شکل ۸- تغییرات متوسط ماهانه ده ساله تأمین نیاز آبی بخش صنعت

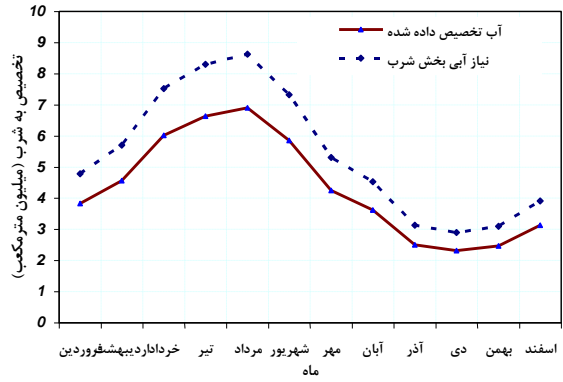
در ادامه، به تشریح نتایج مدل ماشین بردار پشتیبان رگرسیونی برای تدوین قوانین تخصیص تلفیقی آب از منابع سطحی و زیرزمینی پرداخته می‌شود. همانطور که اشاره گردید، در این تحقیق کاربرد مدل SVR در تدوین قوانین بهره‌برداری تخصیص کمی و کیفی آب در سیستم‌های رودخانه- مخزن- سفره آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور آموزش مدل SVR از هشت پارامتر جریان ورودی رودخانه به مخزن سد زاینده‌رود، انتقال آب به مخزن سد، نیاز صنعت، نیاز کشاورزی، نیاز شرب، نیاز انرژی، کیفیت آب ورودی به مخزن و نیاز زیست‌محیطی و نتایج حاصله از مدل بهینه‌سازی کمی و کیفی استفاده شده است. بر اساس تحلیل حساسیت‌های صورت پذیرفته با توابع کرنل مختلف، بهترین کرنل جهت تخمین مقدار تخصیص‌ها و کیفیت آب در زمان واقعی کرنل گوسی تعیین شده است. نمونه‌ای از مقایسه نتایج مقادیر پیش‌بینی تخصیص‌ها و کیفیت آب در محل زهاب‌های بازگشتی توسط مدل SVR و مقادیر بهینه بدست آمده از مدل بهینه‌سازی کمی-کیفی در دوره صحت‌سنجی، در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ ارائه شده است. در این شکل‌ها به ترتیب، مقایسه نتایج مدل بهینه‌سازی و SVR در تعیین مقادیر برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی، انتقال از رودخانه، برداشت از مخزن برای شرب و کیفیت آب در محل زهاب‌های برگشتی صورت پذیرفته است. میزان شاخص MSE و ضریب همبستگی بین نتایج بدست آمده از مدل بهینه‌سازی کمی-کیفی و SVR برای برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی، انتقال از رودخانه،

در شکل ۹، مقدار کل آب تخصیص داده‌شده به نیازهای شرب نشان داده شده است. دلیل عدم ایجاد بازه تغییرات مشخص در اکثر ماه‌ها، در آب تخصیص داده‌شده به بخش شرب، وزن اختصاص داده‌شده به آن به علت استراتژیک بودن تأمین نیاز شرب بوده است. لذا با توجه به اینکه تأمین نیاز شرب، اولویت بالایی دارد، در هر دو حالت حد بالا و پایین، مدل سعی در تأمین این نیاز به صورت کامل دارد. بنابراین در هر دو حالت حد بالا و پایین، تأمین کامل نیازهای بخش شرب صورت گرفته است. فقط در ماه دی تأمین نیاز بخش شرب، کمتر صورت گرفته است که البته در اثر تغییر وزن‌ها و کم‌آبی در شرایط حد پایین است. در پایین‌دست زیرحوضه سد زاینده‌رود نیز، کیفیت آب در محل ورود آب‌های بازگشتی، به صورت نشان داده‌شده در شکل ۱۰ می‌باشد. همانطوری که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد، در پایین‌دست زیرحوضه سد زاینده‌رود و در محل ورود زهاب‌های بازگشتی، اثرات لحاظ و عدم لحاظ کیفیت آب در تخصیص‌ها، کاملاً اثر خودش را نشان داده است. علت این امر نیز حضور سد زاینده‌رود در بالادست این منطقه می‌باشد. در حقیقت، به علت وجود سد در بالادست زیرحوضه سد زاینده‌رود، امکان ذخیره آب برای تأمین نیاز در ماه‌های پرمصرف که آورد رودخانه کم است فراهم می‌گردد. در چنین شرایطی، امکان ذخیره آب برای رقیق‌ترسازی آب (کاهش غلظت TDS) بویژه در پایین‌دست سد و در ماه‌های کم‌آب وجود دارد. نتایج حاصله از این تحقیق، نشان‌دهنده قابلیت مناسب مدل پیشنهادی در تخصیص همزمان کمی-کیفی آب بوده است.

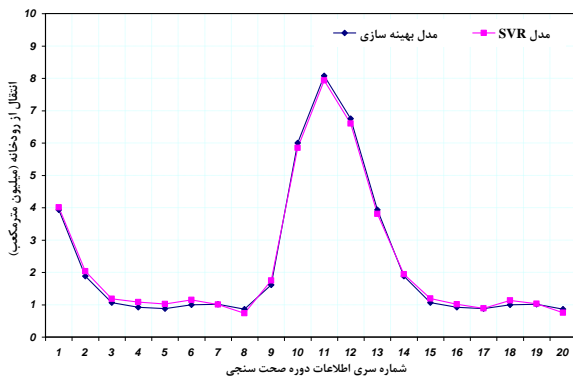
برداشت از مخزن برای شرب و کیفیت آب در پایین دست زیرحوضه زاینده رود نیز در جدول ۴ آمده است.



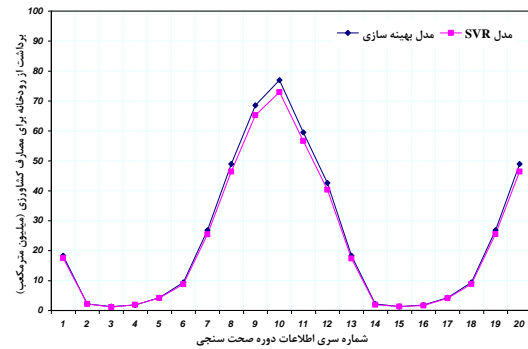
شکل ۱۰- غلظت TDS آب در محل ورود زهاب‌های بازگشتی در پایین دست زیرحوضه سد زاینده رود



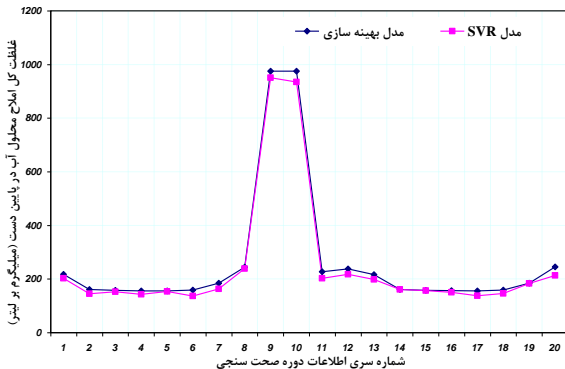
شکل ۹- متوسط مقدار کل تخصیص آب به نیازهای شرب



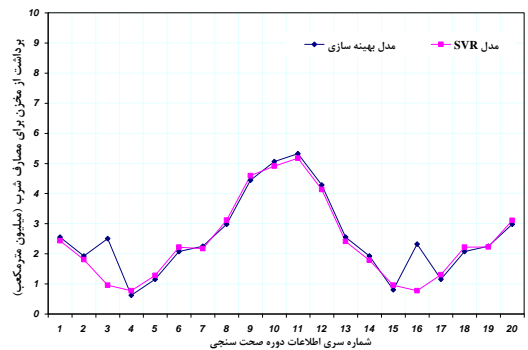
شکل ۱۲- مقایسه مقادیر انتقال از رودخانه توسط مدل بهینه‌سازی و SVR



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر تخصیص آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی توسط مدل بهینه‌سازی و SVR



شکل ۱۴- مقایسه مقادیر کیفیت آب در محل برگشت زهاب‌های بازگشتی توسط مدل بهینه‌سازی و SVR



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر برداشت از مخزن برای شرب توسط مدل بهینه‌سازی و SVR

جدول ۴- مقادیر شاخص MSE و ضریب همبستگی بین نتایج بدست آمده از مدل بهینه‌سازی کمی-کیفی و SVR

حجم (MCM)	برداشت آب از رودخانه برای مصارف کشاورزی	انتقال از رودخانه	برداشت از مخزن برای شرب	کیفیت آب در پایین دست منطقه
شاخص MSE	۰/۰۱۴۶۶	۰/۰۱۵۱۹	۰/۱۰۸۸۷	۲/۰۹۶۳۶
ضریب همبستگی	۰/۹۹۹۹۸	۰/۹۹۸۸۴	۰/۹۵۳۹۲	۰/۹۹۹۹۸

بهینه‌سازی چند-دوره‌ای. مجله علمی- پژوهشی پژوهش آب ایران (پذیرفته شده برای چاپ).

[2] Ardakanian, R. 2005. Optimization the coordination of hydro and thermal plant: the HTCOM model, The International Journal on Hydropower & Dams, Vol 12(2), pp. 49-61.

[3] Cai, X., McKinney, D.C., and Lasdon, L.S. 2001. Piece-by-piece approach to solving large nonlinear water resources management models. ASCE Journal of Water Resources and Planning, Vol. 127(6), pp. 363-368.

[4] Cai, X., McKinney, D.C., and Lasdon, L.S. 2003. Integrated hydrologic-agronomic- economic model for river basin management. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 129(1), pp. 235-245.

[5] Close, A., Haneman, W.M., Labadie, J.W., Loucks, D.P., Lund, J.R., McKinney, D.C., and Stedinger, J.R. 2003. A strategic review of CALSIM II and its use for water planning, management and operation in central California. California Bay Delta Authority Science Program, Association of Bay Governments. Oakland. California.

[6] Cortes, C., and Vapnik, V. 1995. Support-vector networks. Machine Learning, Vol. 20(3), pp. 273-297.

[7] Frevert, D., Fulp, T., Zagana, E., Leavesley, G., and Lins, H. 2006. Watershed and river system management program: Overview of capabilities. ASCE J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 132(2), pp. 92-97 .

[8] Higgins, A., Archer, A., and Hajkovicz, S. 2008. A stochastic non-linear programming model for a multi-period water resource allocation with multiple objectives. Water Resources Management, Vol. 22, pp. 1445-1460.

[9] Huang, G. H. 1996. IPWM: An interval parameter water quality management model. Engineering Optimization, Vol. 26(2), pp. 79-103.

[10] Kecman, V. 2001. Learning and soft computing. MIT Press, 541 pp.

[11] Labadie, J.W. 2004. Optimal Operation of Multi-Reservoir Systems: State-of-the-Art Review. ASCE

همانطور که نتایج نشان می‌دهد، مدل SVR به خوبی می‌تواند مقادیر تخصیص‌های کمی و کیفی آب را در زمان واقعی در سیستم‌های رودخانه-مخزن-سفره آب زیرزمینی گزارش کند.

۶- جمع‌بندی

در این مقاله، مدل جدیدی برای تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در دوره زمانی بلندمدت ۱۰ ساله در سیستم‌های رودخانه-مخزن-سفره زیرزمینی با در نظر گرفتن بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و کیفیت آب ارائه شده است. به منظور تدوین قوانین تخصیص، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی چند دوره‌ای کمی-کیفی و مدل ماشین بردار پشتیبان به کار گرفته شد. در مدل بهینه‌سازی تخصیص، حاصل جمع هزینه تأمین آب برای نیازهای آبی و تأمین قیود کیفی در تمام دوره برنامه‌ریزی، حداقل گردید. بدین ترتیب، از پتانسیل هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از مخزن-سفره زیرزمینی و رودخانه در یک ساختار چند-دوره‌ای به نحوی استفاده می‌شود که تصمیم‌های هر دوره حداقل هزینه تأمین آب و برقراری کیفیت مورد نیاز را یک افق بلندمدت به همراه داشته باشد. در ادامه، بر مبنای نتایج حاصله از مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، یک مدل ماشین بردار پشتیبان رگرسیونی آموزش داده شده است. نتایج حاصله از کاربرد متدولوژی پیشنهادی برای تدوین قوانین تخصیص کمی و کیفی آب در زیرحوضه پایین‌دست سد زاینده‌رود، نشان‌دهنده کارایی بسیار مناسب آن در تخمین سیاست‌های تخصیص‌های آب و ارزیابی کیفیت آب است.

مراجع

[۱] کریمی، ا، نیکو، م.ر، کراچیان، ر، و شیرنگی، ا. ۱۳۹۰. ارزیابی قابلیت تأمین بلندمدت آب در سطح حوضه آبریز زاینده‌رود تحت تأثیر طرح‌های انتقال آب توسط مدل

- [16] Salemi, H.R., and Murray-Rust, H. 2002. Water supply and demand forecasting in the Zayandeh rud basin, Iran, IAERI-IWMI Research Reports 13.
- [17] Schluter, M., Savitsky, A.G., McKinney, D.C., and Lieth, H. 2005. Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta: a water management model for ecological impact assessment. *Environmental Modelling & Software*, Vol. 20(5), pp. 529-545.
- [18] Stockholm Environment Institute. 2005. WEAP21: Water evaluation and planning system, 11 Arlington Street. Boston. MA 02116. USA. <http://www.weap21.org>.
- [19] Vapnik, V. N. 1995. *The nature of statistical learning theory*, New York: Springer-Verlag.
- Vapnik, V. N. 1998. *Statistical learning theory*, New York: Wiley.
- Journal of Water Resources Planning & Management, Vol. 130(2), pp. 93-111.
- [12] Nikoo, M. R., Karimi, A., Kerachian, R., Poursepahy-Samian, H., and Daneshmand, F. 2013. Rules for optimal operation of reservoir-river-groundwater systems considering water quality targets: Application of M5P model. *Water Resources Management*, Vol. 27(8), pp. 2771-2784.
- [13] Pallottino, S., Sechi, G.M., and Zuddas, P. 2005. A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis. *Environmental Modeling & Software*, Vol. 20, pp. 1031-1042.
- [14] Perera, B.J.C., James, B., and Kularathna, M.D.U. 2005. Computer software tool REALM for sustainable water allocation and management. *Journal of Environmental Management*, Vol. 77, pp. 291-300.
- [15] Rosenthal, R.E. 2006. *GAMS—A user's guide*. GAMS Development Corporation, Washington DC. USA.



shahrood University

Vol. 1, No. 1, Spring 2013: 1- 11

Iranian Journal of

Water & Environment Engineering



Long-term Optimum Water and Waste Load Allocation Rules in River-Reservoir-Groundwater Systems: Application of SVR Simulation Model

M. R. Nikoo¹ A. Karimi², R. Kerachian^{3*}, S. N Bashi-Azghadi⁴

¹ Assistant Professor, School of Engineering, Department of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, East-Tehran Branch, Tehran, Iran

³ Professor, School of Civil Engineering and Center of Excellence for Engineering and Management of Civil Infrastructures, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

⁴ PHD Candidate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

**Corresponding author: kerachian@ut.ac.ir (R. Kerachian)*

Abstract

In this paper, a new model for integrated water and waste load allocation in river-reservoir-groundwater systems under hydro-system parameters uncertainty is introduced. A non-linear multi-period interval optimization model that considers water quality constraints is developed for a long-term planning horizon. In this model, the summation of water supply and water quality standard violation costs for all months is minimized to obtain optimum integrated water and waste load allocation decisions. Coordinated reservoir-groundwater-river operation potentiality is used within a multi-period framework to obtain monthly decisions for water withdrawals and wasteload allocations that are optimum. Analysis of the results obtained for the Zayandehrude Dam sub-basin shows the model accuracy and solution method robustness in optimization of a highly non-linear model. Based on the results of the optimization model, a Support Vector Machine is trained and verified which can be accurately used for real-time operation of this complex system.

Keywords: Integrated water and waste load allocation, Water quantity-quality management, SVR, Zayandehrude dam sub-basin..