

بهره‌برداری بلندمدت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در سطح حوضه آبریز با در نظر گرفتن کیفیت آب (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود)

اکبر کریمی^{۱*}، محمدرضا نیکو^۲، رضا کراچیان^۳ و اکبر مختارپور^۴

چکیده

بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از سیستم‌های آبی با در نظر گرفتن محدودیت‌های کیفی، به‌واسطه پیچیدگی حل مسئله غیرخطی حاصله، توسط پژوهشگران بیشتر در افق زمانی کوتاه‌مدت، فرمول‌بندی و حل شده است. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی بلندمدت بهره‌برداری تلفیقی در سطح حوضه آبریز، با هدف حداکثرسازی قابلیت اطمینان بهره‌برداری از سیستم آبی و با در نظر گرفتن غلظت املاح محلول به‌عنوان شاخص کیفیت آب، تدوین شده است. در مدل پیشنهادی، با استفاده از تجزیه و هماهنگی بین بخش‌های مختلف مدل و با توسعه یک الگوریتم خطی‌سازی، امکان مدل‌سازی و تحلیل سیستم‌های واقعی آبی بزرگ‌مقیاس (در مقیاس حوضه آبریز) در یک افق بلندمدت، با هدف حداقل‌سازی کمبودهای مربوط به تخصیص کمیت و کیفیت آب فراهم شده است. نتایج کاربرد مدل بهینه‌سازی پیشنهادی در حوضه آبریز زاینده‌رود در یک دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۸۰-۱۴۰۹)، نشان دهنده امکان بهبود کیفیت آب در محل باتلاق گاوخونی تا ۵۰٪ در ماه‌های کم‌آب و پرمصرف است. قواعد بهره‌برداری تجویزی مدل، امکان تأمین آب با قابلیت اطمینان ۶۸٪ در امتداد رودخانه زاینده‌رود را فراهم کرده‌اند. کاربرد مدل نشان‌دهنده بهبود معنی‌دار در تأمین آب با کیفیت مطلوب برای بخش‌های کشاورزی و محیط‌زیست است. البته ابعاد دقیق‌تر این مسئله باید در پژوهش‌های بعدی، توسط مدل‌های ریزمقیاس‌تر مکانی و زمانی و با آرمان قرار دادن نتایج مدل بهینه‌سازی بلندمدت پیشنهاد شده در این پژوهش، تعیین شوند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی غیرخطی، بهره‌برداری تلفیقی، حوضه آبریز زاینده‌رود، مدیریت کمیت-کیفیت آب.

ارجاع: کریمی ا.، نیکو م. ر.، کراچیان ر. و مختارپور ا. ۱۳۹۳. بهره‌برداری بلندمدت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در سطح حوضه آبریز با در نظر گرفتن کیفیت آب (مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود). مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۹۷-۱۰۸.

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

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

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

۴- مربی گروه مهندسی عمران، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

* نویسنده مسئول: eraikarimi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۲

مقدمه

توسعه اقتصادی- اجتماعی در حوضه‌های آبریز و افزایش نیاز آبی به واسطه رشد جمعیت، باعث فعالیت‌های اقتصادی بیشتر و افزایش سطح رفاه ذینفعان مصرف‌کننده آب شده است. در شرایط کنونی، کاهش کمیت و کیفیت منابع آبی، سیستم تأمین آب را با مشکل روبرو کرده است. بهره‌برداری تلفیقی، به معنی هماهنگ‌سازی میزان برداشت از رودخانه و منابع آب زیرزمینی، به علاوه آب رهاسازی شده از مخازن سدها، با هدف استفاده همزمان از پتانسیل ذخیره‌سازی آبخوان و مخزن به همراه برداشت از جریان به‌هنگام رودخانه برای تأمین مطمئن‌تر آب است. بهره‌برداری تلفیقی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (فرورت و همکاران، ۲۰۰۶؛ پررا و همکاران، ۲۰۰۵؛ شلوتر و همکاران، ۲۰۰۵؛ کای و همکاران، ۲۰۰۳؛ کلوز و همکاران، ۲۰۰۳ و روزگراوت و همکاران، ۲۰۰۰). پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب با توجه به پیچیدگی حل مدل ریاضی در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت، حل‌شده و اثرات بلندمدت بهره‌برداری همزمان کمی و کیفی در آن‌ها در نظر گرفته نشده است (کای و همکاران، ۲۰۰۳ و روزگراوت و همکاران، ۲۰۰۰). بدین دلیل تعداد مدل‌های شبیه‌سازی کمی- کیفی سیستم آبی حوضه آبریز، با توجه به کم بودن هزینه محاسباتی آن‌ها به دلیل عدم لحاظ آثار آینده تصمیم‌ها در تصمیم‌گیری کنونی، بیشتر از مدل‌های بهینه‌سازی همزمان کمی- کیفی است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ کین و همکاران، ۲۰۰۹؛ سلکه و ژاکسون، ۲۰۰۵؛ گابریل و همکاران، ۲۰۰۰ و کین و همکاران، ۲۰۰۱). برتری مدل‌های بهینه‌سازی بر مدل‌های شبیه‌سازی، امکان دست‌یافتن به بهترین تصمیم در چارچوب قیود تعریف‌شده برای بهره‌برداری سیستم برای نیل به اهداف ذینفعان است. در حالی که با مدل‌های شبیه‌سازی، فقط اثر کاربرد تعداد محدودی سیاست بهره‌برداری ارزیابی می‌شود (وریز، ۱۹۹۵). همچنین برنامه‌ریزی‌های میان‌مدت و کوتاه‌مدت بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، برای بهینه‌بودن باید از یک برنامه‌ریزی بهینه بلندمدت پیروی کنند، که در آن اثرات بلندمدت بهره‌برداری از سیستم آبی لحاظ و بهینه‌سازی شده است. بدین ترتیب، نتایج برنامه‌ریزی بلندمدت بهینه‌سازی شده در سطح‌های بالاتر (در مقیاس حوضه آبریز و در افق زمانی بلندمدت) باید به عنوان هدف

(آرمان) برای برنامه‌ریزی‌های محلی، میان‌مدت و کوتاه‌مدت زمانی استفاده شود (لاکس و ونیک، ۲۰۰۵). در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی بلندمدت بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب در سطح حوضه آبریز با در نظر گرفتن محدودیت‌های کیفی آب برای تعیین قواعد بهینه بهره‌برداری با لحاظ پتانسیل بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و تأمین محدودیت کیفیت آب ساخته شده است.

فرمول‌بندی و روش حل متدولوژی پیشنهادی به گونه‌ای است که از پیچیدگی‌های مربوط به یکپارچه‌سازی مدل‌های مختلف در چارچوب یک مدل واحد بهینه‌سازی، بسیار کاسته شده است. در این پژوهش، با استفاده از یک الگوریتم برنامه‌ریزی خطی تکرارشونده، مدل غیرخطی کمی- کیفی، به صورت یکجا برای کل افق برنامه‌ریزی حل می‌شود، به نحوی که با شروع از مقدار اولیه بهینه تأمین کمی آب، مدل کمی- کیفی با بهنگام‌سازی قیود مسئله در هر تکرار مقادیر بهینه و اصلاح‌شده تأمین آب با در نظر گرفتن کیفیت (غلظت املاح محلول) را به دست می‌دهد. جزئیات نحوه فرمول‌بندی مسئله، حل آن، به کارگیری آن در یک مورد مطالعاتی واقعی و نتایج حاصله، در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

مواد و روش‌ها

برنامه‌ریزی بهره‌برداری تلفیقی از سیستم‌های منابع آب با در نظر گرفتن محدودیت‌های کیفیت آب در افق زمانی بلندمدت، نیاز به توجه خاصی در فرمول‌بندی مسئله برای کاهش پیچیدگی آن دارد. برای کاهش مشکلات محاسباتی و در عین حال، حفظ عملکرد مطلوب مدل بهینه‌سازی، در این پژوهش، ابتدا مدل بهینه‌سازی کمی- کیفی در مقیاس حوضه آبریز، در افق زمانی ۳۰ ساله با گام‌های زمانی ماهانه، توسعه داده شد. سپس با کاربرد روش برنامه‌ریزی خطی تکرار شونده (ILP¹)، مدل توسعه داده شده با مقیاس بزرگ، با دقت مورد نظر خطی‌سازی شده است. بدین ترتیب با این رویکرد، امکان مدل‌سازی و تحلیل به هم پیوسته بهره‌برداری تلفیقی کمی- کیفی از منابع سطحی و زیرزمینی، با هزینه محاسباتی کم، در مقیاس حوضه آبریز فراهم شده است (شکل ۱). در این رویکرد، از

1- Iterative Linear Programming (ILP)

خارجی در نظر گرفته شده است، که شامل تغذیه طبیعی و آب بازگشتی به آبخوان در هر منطقه است. شکل ۲، مدل به هم پیوسته تلفیقی و ارتباط اجزای مختلف آن را نشان می‌دهد. فرایند مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی کمی-

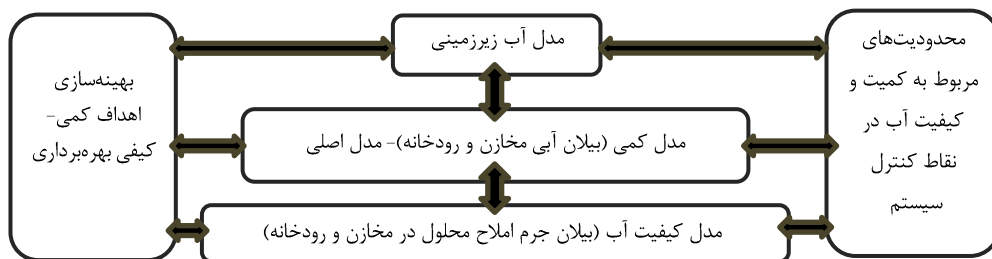
کیفی در حوضه آبریز به صورت زیر است:

۱- حوضه آبریز به منطقه‌های مطالعاتی (واحدهای هیدرولوژیک) تقسیم‌بندی می‌شود (مدل‌سازی توزیع مکانی خصوصیات و اجزای سیستم آبی) (کریمی و همکاران ۱۳۹۱؛ ایازی و کریمی ۱۳۹۲ و کریمی و اردکانیان، ۲۰۱۰). در این شکل ورودی‌ها با شکل مربع و خروجی‌های مدل با بیضی نشان داده شده است.

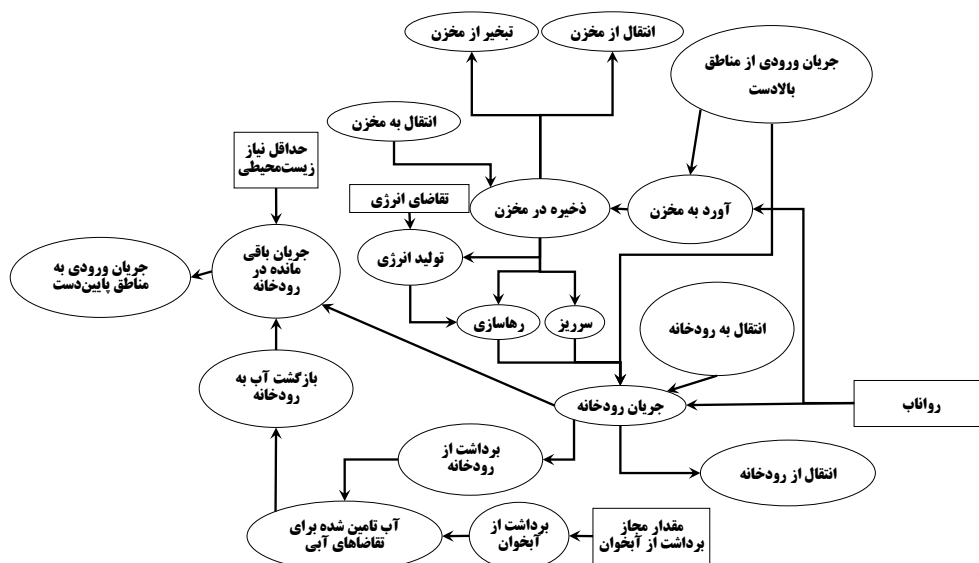
۲- در هر واحد هیدرولوژیک، یک مدل بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از یک الگوی عمومی ساخته می‌شود.

۳- ورودی، خروجی و آب‌های انتقالی از واحدهای هیدرولوژیک به واحدهای دیگر، انتقال آثار کمی- کیفی از یک منطقه به منطقه‌های دیگر را مدل‌سازی می‌کند.

تجزیه مسئله به یک مدل اصلی و زیرمدل‌ها استفاده می‌شود. مدل اصلی در این پژوهش، مدل بیلان ماهانه آبی در مخزن و رودخانه است که متغیرهای تصمیم اصلی و اندرکنش‌های آن‌ها را مدل‌سازی می‌کند. زیرمدل‌ها نیز در ساختار مدل پیشنهادی، مدل آب زیرزمینی و مدل کیفیت آب است. در مدل اصلی، برداشت‌ها از آبخوان به نحوی انجام می‌شوند که از مقدار حداکثر برداشت مجاز در هر ماه تجاوز نکنند. برای مدل‌سازی کیفیت آب، مدل‌سازی غلظت املاح محلول در رودخانه و مخزن سد (با فرض اختلاط کامل) انجام می‌شود. البته تأثیر برداشت از آبخوان در قالب زهاب بازگشتی به رودخانه نیز در نظر گرفته می‌شود. مدل تخصیص کمی-کیفی آب در سطح حوضه به صورت غیرخطی فرمول‌بندی شده است، اما ساختار مدل (مدل مقید شده مربعانی)، امکان استفاده از رویکرد حل خطی تکرارشونده را با هدف تسریع حل و در عین حال حفظ دقت جواب فراهم می‌کند. شایان ذکر است که مقدار مجاز برداشت از آب زیرزمینی به صورت یک منبع آب



شکل ۱- ساختار مدل‌سازی به هم پیوسته سیستم آب سطحی- زیرزمینی با در نظر گرفتن ویژگی‌های کیفی آب



شکل ۲- ساختار مدل به هم پیوسته سیستم آب سطحی- زیرزمینی با در نظر گرفتن ویژگی‌های کیفی آب (اقتباس شده از کریمی و همکاران، ۱۳۹۱)

غلظت املاح محلول (آلاینده زوال‌ناپذیر)، در مخزن و رودخانه است.

$$S_r^t \cdot QS_r^t + I_r^t \cdot QI_r^t + \sum_{r'} (WI_{r',r}^t \cdot \overline{QS_r^t}) - R_r^t \cdot \overline{QS_r^t} - SP_r^t \cdot \overline{QS_r^t} - PF_r^t \cdot \overline{QS_r^t} - \sum_{r'} (WE_{r,r'}^t \cdot \overline{QS_r^t}) + \sum_{r'} (RF_{r,i}^t \cdot \overline{QRF_{r,i}^t}) \quad (4)$$

$$= S_r^{t+1} \cdot QS_r^{t+1} \quad (5)$$

$$QS_r^t - QSL_r^t \leq QC_r^t \quad (5)$$

در معادله ۴، QS_r^t غلظت املاح محلول در مخزن و یا رودخانه است. دلیل کاربرد مقدار متوسط $\overline{QS_r^t}$ برای جریان خروجی و یا انتقالی از مخزن، برآورد دقیق غلظت املاح محلول است. در شرایطی که معادله ۴ برای رودخانه به کار رود، چون ذخیره انجام نمی‌شود مقدار اولیه و نهایی وجود نداشته و مقادیر محاسبه‌شده، متوسط غلظت در ماه هستند. همچنین QI_r^t ، غلظت املاح محلول در رواناب و $QRF_{r,i}^t$ غلظت املاح محلول در زه‌آب‌های بازگشتی هستند. مقادیر غلظت املاح محلول در رواناب و زه‌آب‌های بازگشتی، پارامترهای معلوم مسئله هستند و متغیرهای کیفی این مسئله، غلظت املاح محلول در مخزن‌ها و رودخانه می‌باشند. در معادله ۵، میزان تخطی شاخص کیفی (QSL_r^t) از میزان مطلوب (QC_r^t)، در قالب قید بیان شده است که در تابع هدف، مدل به سمتی حرکت می‌کند تا کیفیت آب تا حد امکان، در حد میزان مطلوب حفظ شود. مدل بهره‌برداری تلفیقی با در نظر گرفتن محدودیت کیفی آب با استفاده از معادلات ۱ تا ۵، همچنین معادلات دیگری که بیان‌کننده قیود بهره‌برداری هستند ساخته می‌شود. در این پژوهش، سعی بر بهبود تجمعی عملکرد سیستم بهره‌برداری در دوره زمانی برنامه‌ریزی بلندمدت با استفاده از تابع هدف ارائه شده در معادله ۶ است. بدین ترتیب، بهره‌برداری از سیستم آبی و تصمیم‌های گرفته شده، از بهینگی بلندمدت برخوردار هستند:

$$OF = \sum_{r,i,t} \left(w_{1,r,i}^t \frac{SLA_{r,i}^t}{D_{r,i}^t} + w_{2,r,i}^t \frac{SLQ_{r,i}^t}{QC_{r,i}^t} + w_{3,r,i}^t \frac{D_{r,i}^t - SLA_{r,i}^t}{D_{r,i}^t} \right) \quad (6)$$

که در تابع هدف بالا، w_1 و w_2 به ترتیب، وزن‌های به کار گرفته شده و هزینه کمبودهای کمی و کیفی را نشان می‌دهند. w_3 نیز به منظور لحاظ هزینه تأمین آب برای نیازهای مختلف در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب

۴- مخزن سد در هر واحد هیدرولوژیک، با قابلیت ذخیره‌سازی‌اش، آثار را از یک ماه به ماه‌ها و حتی سال‌های بعدی منتقل می‌کند و بدین ترتیب امکان ایجاد یک هماهنگی زمانی و مکانی بهره‌برداری از منابع آب برای بهبود تأمین آب و کیفیت آن در سطح واحدهای هیدرولوژیک و حوضه آبریز را فراهم می‌کند.

۵- با جمع کردن معادلات تمام واحدهای هیدرولوژیک، مدل ریاضی کل حوضه آبریز ساخته شده و برای تحلیل‌های بعدی استفاده می‌شود (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱).

۶- معادلات بخش بهره‌برداری کمی مدل، به طور عمده معادلات کلاسیک بیلان آب در مخزن و رودخانه هستند که در پژوهش‌های زیادی توضیحات مربوط به آن‌ها ارائه شده است (میز و تانگ، ۲۰۰۲، لبادیه، ۲۰۰۴ و لاکس و ونبیک، ۲۰۰۵). در این بخش، به صورت فشرده به مهم‌ترین معادلات بخش کمی - کیفی اشاره می‌شود:

$$S_r^t + I_r^t + \sum_{r'} WI_{r',r}^t - R_r^t - \sum_{r'} WE_{r,r'}^t - E_r^t + \sum_{r,i} RF_{r,i}^t - SP_r^t - PF_r^t = S_r^{t+1} \quad (1)$$

$$\sum_{r,i} GA_{r,i}^t \leq MGW_r^t \quad (2)$$

$$RA_{r,i}^t + GA_{r,i}^t + SLA_{r,i}^t = D_{r,i}^t \quad (3)$$

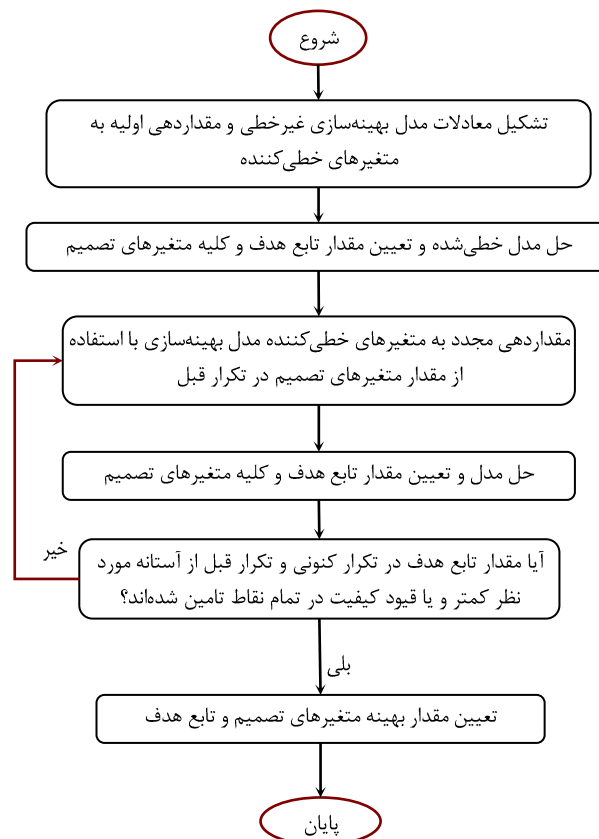
که در معادلات بالا، t و r, i به ترتیب، شمارنده مربوط به تقاضای آب (۱ شرب، ۲ صنعت و ۳ کشاورزی)، واحد هیدرولوژیک و زمان هستند. S ، I ، R ، E ، SP و PF به ترتیب مقدار ذخیره آب، جریان (رواناب) ورودی به مخزن، آب خروجی، مقدار تبخیر، سرریز و رهاسازی از توربین سد هستند (میلیون مترمکعب). همچنین WI ، WE و D و SLA به ترتیب انتقال آب به مخزن سد، انتقال آب از مخزن، نیاز آبی و کمبود در تأمین نیاز هستند (میلیون مترمکعب). GA و MGW نیز به ترتیب، مقدار برداشت (میلیون مترمکعب) و حد مجاز برداشت از آبخوان زیرزمینی (متر) هستند. در نهایت، RA و RF ، به ترتیب مقدار زه‌آب بازگشتی و برداشت از رودخانه (میلیون مترمکعب) هستند. معادله ۱ برای مخزن و رودخانه به کار برده می‌شود. البته در مورد رودخانه، ذخیره، تبخیر، سرریز و رهاسازی از توربین با مقدار صفر، جایگزین می‌شوند. در معادله ۲، میزان برداشت از سفره آب زیرزمینی (آبخوان)، در حد مقدار برداشت مجاز، محدود می‌شود. علاوه بر مدل‌سازی بهره‌برداری تلفیقی، بخش کیفیت آب مدل نیز شامل معادلات بیلان جرم

(روزنتال، ۲۰۰۶)، می‌توان از الگوریتم پیشنهاد شده ILP که به صورت خطی و با تکرارهای متوالی، مدل را حل می‌کند، استفاده نمود. فلوچارت حل مدل بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از رویکرد ILP در شکل ۳ ارائه شده است. در این روش، ابتدا مدل کمی تدوین می‌شود و گام به گام، قیود کیفیت آب به مدل اعمال شده و مقدار بهینه تخصیص‌های کمی با توجه به قیود کیفیت که به صورت تکراری به‌هنگام می‌شوند، اصلاح شده تا اختلاف بین مقدار تابع هدف در دو تکرار متوالی از یک مقدار پیش‌فرض (با توجه به دقت مورد نیاز) کمتر شود. فلوچارت کلی متدولوژی پیشنهادی در شکل ۴ نشان داده شده است.

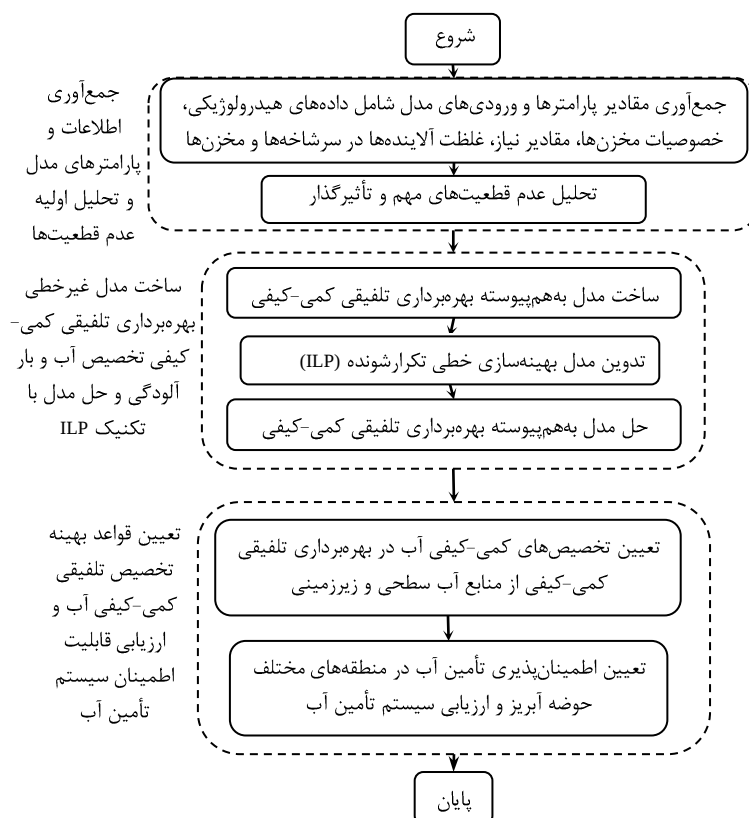
هزینه بهره‌برداری کمی- کیفی و تأمین آب از منابع مختلف به صورت تابع هدف تشکیل می‌شود، که با حداقل‌سازی آن، تأمین کمی و کیفیت مورد نیاز آب در راستای اهداف تصمیم‌گیران و ذینفعان انجام می‌شود. قیود مسئله تخصیص کمی- کیفی در سطح حوضه آبریز را می‌توان در قالب معادله ۷ ارائه نمود، که در اصطلاح پژوهش در عملیات به همراه تابع هدف خطی، مسئله خطی مقید شده مربعاتی را می‌سازد و توسط روش خطی تکرار شونده قابل حل است:

$$X^T A.X + D.X = B \quad (7)$$

این مدل، به دلیل وجود بخش کیفیت آب در قیود، غیرخطی شده است. برای حل آن، با توجه به ساختار خاص مدل که مسئله مقید شده مربعاتی نامیده می‌شود



شکل ۳- فلوچارت حل مدل بهره‌برداری تلفیقی با استفاده از رویکرد ILP



شکل ۴- فلوچارت کلی مدل به هم‌پیوسته بهره‌برداری تلفیقی کمی- کیفی در سطح حوضه آبریز

معرفی مورد مطالعاتی

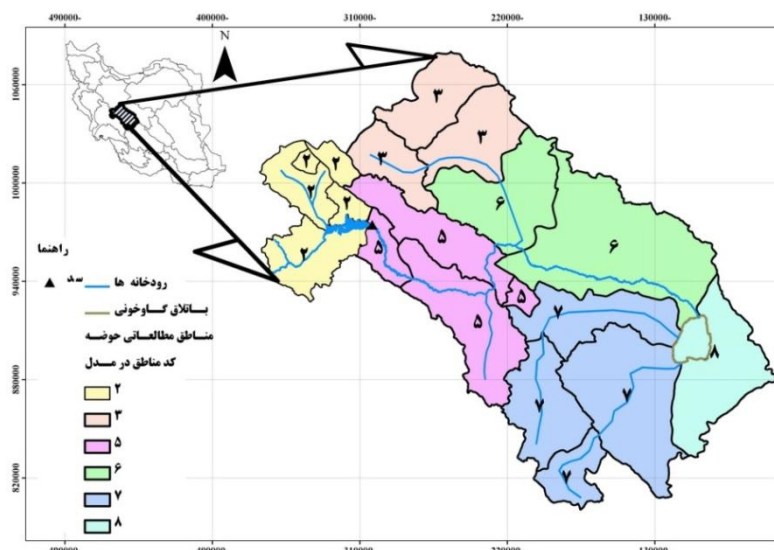
برای بررسی کارایی متدولوژی پیشنهادی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی با در نظر گرفتن محدودیت‌های کیفیت آب، از اطلاعات سیستم حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود استفاده شده است. رودخانه زاینده‌رود در بخش مرکزی ایران قرار دارد.

در این پژوهش، قواعد بهینه بهره‌برداری از سیستم مخزن، رودخانه و سفره آب زیرزمینی در منطقه‌های مختلف حوضه به صورت درصد برداشت از رودخانه و آبخوان و سهم آب هر یک از آبریان از آب برداشت‌شده در یک تحلیل بلندمدت ۳۰ ساله (برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۹) تعیین شده است. حوضه آبریز زاینده‌رود، دو مؤلفه مهم آبی شامل رودخانه زاینده‌رود و سد زاینده‌رود را در خود جای داده است که بخش مهمی از توسعه صنعتی، شهری و کشاورزی حول آن‌ها انجام شده است.

رودخانه زاینده‌رود به دلیل ورود فاضلاب‌های شهری و صنعتی، به خصوص در ماه‌های کم‌آب، با مشکل جدی کیفیت آب روبرو است. به نحوی که غلظت کل املاح محلول (TDS) به ۳۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در محل باتلاق

گاوخونی می‌رسد (کریمی و همکاران، ۱۳۸۸ و سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۸۴) در این مطالعه، بهره‌برداری از سیستم آبی زاینده‌رود به نحوی که نیازهای آبی و محدودیت‌های کیفی آن نیز رعایت شود با مدل بهینه‌سازی تدوین‌شده در سناریوی سال نرمال بررسی می‌شود. موقعیت حوضه آبریز در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، ۱۹ واحد هیدرولوژیک به ۸ منطقه برای مدل‌سازی تقسیم شده‌اند که در جدول ۱ توضیحات آن‌ها ارائه شده است. مناطق ۱ و ۴ صرفاً جهت مدل‌سازی مورد نیاز بوده و ماهیت هیدرولوژیک ندارند بلکه انتقال آب را به حوضه و از آن بیان می‌کنند (مجازی هستند). اما مناطق دیگر، با توجه تأثیرپذیری از رودخانه و سد زاینده‌رود تقسیم‌بندی شده‌اند. منطقه ۲، بالادست سد، منطقه ۳ تأثیرپذیر از رودخانه و سد نیست و البته بر جریان رودخانه زاینده‌رود تأثیرگذار است، منطقه ۵ مستقیماً در پایین‌دست سد و تأثیرپذیر از عملکرد آن است. منطقه ۶، تأثیرپذیر از رودخانه، سد و عملکرد منطقه ۳ است، منطقه ۷ مستقل از رودخانه و سد و منطقه ۳ است. منطقه ۸ باتلاق

گاوخونی و نقطه کنترل زیست محیطی رودخانه زاینده رود است، که عملکرد بقیه مناطق بر شرایط آن تأثیر گذارند.

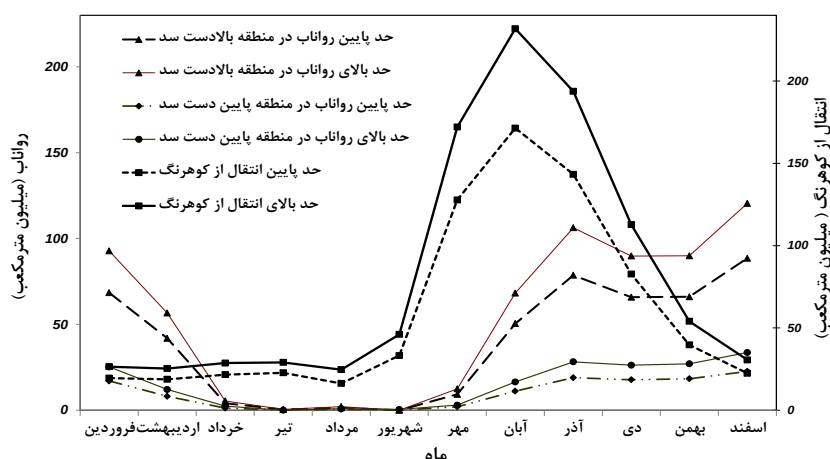


شکل ۵- موقعیت حوضه آبریز زاینده رود (کریمی و همکاران ۱۳۹۱)

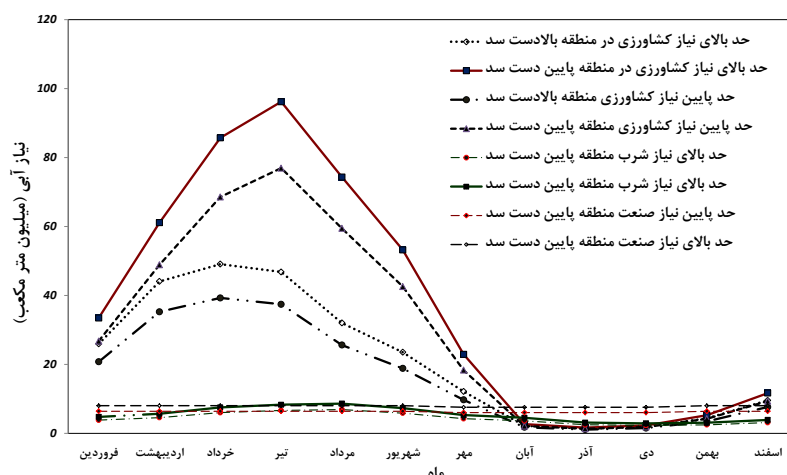
آوردها (جریان ورودی) به مخزن سد زاینده رود، رواناب و مقدار نیازهای آبی در منطقه‌های مختلف، به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. در تحلیل‌ها، از حد بالای نیازهای آبی و حد پایین رواناب (آب در دسترس) استفاده شده است، تا یک شرایط به نسبت سخت از دید کم‌آبی در حوضه آبریز تحلیل شود و قابلیت مدل برای کاهش آثار نامطلوب تعیین شود. رواناب‌های ۳۰ ساله (۱۳۸۰-۱۴۰۹)، ۸۵٪ سری تاریخی رواناب ورودی از سال ۱۳۵۱ تا ۱۳۸۰ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- توضیحات ناحیه‌های مختلف حوضه آبریز

شماره منطقه	نام منطقه
۱	انتقال از تونل‌های کوهرنگ به حوضه آبریز زاینده رود
۲	بالادست سد
۳	شمال شرقی موازی رودخانه زاینده رود
۴	انتقال به یزد (انتقال بین حوضه‌ای- جریان پایین دست سد)
۵	منطقه مرکزی شامل شهر اصفهان
۷	جنوب غربی موازی رودخانه زاینده رود
۸	باتلاق گاوخونی



شکل ۶- حدود پایین و بالای رواناب در سال نرمال برای انتقال آب به حوضه و دو منطقه نمونه از سیستم آبی زاینده رود برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۹ (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۴)



شکل ۷- حدود بالا و پایین نیازهای آبی (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۴)

اطلاعات کیفیت آب، از ارقام ارائه شده در مرجع (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۸۴) گرفته شده است (جدول ۲). وزن‌های در نظر گرفته شده برای این مورد مطالعاتی، بیان‌کننده نگرش کنونی سیستم تخصیص آب به اولویت‌های تخصیص آب هستند (جدول ۳). وزن‌ها در جدول ۳ برای تمام مناطق یکسان است.

جدول ۲- مشخصات کیفی رواناب و زه‌آب بازگشتی

(میلی‌گرم بر لیتر) (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، ۱۳۸۴)

شماره منطقه	نام منطقه	غلظت TDS در زهاب صنعت	غلظت TDS در زهاب کشاورزی	غلظت TDS در زهاب شرب	غلظت TDS در رواناب
۲	بالادست سد	۳۵۰	۷۰۰	۴۰۰	۲۱۰
۵	سد و	۴۳۰	۶۵۰	۴۸۰	۴۰۰
۶	مرکزی (۶)	۵۴۰	۷۵۰	۵۵۰	۳۳۲
۳	شمال شرقی	۴۸۰	۸۰۰	۴۹۰	۳۹۰
۷	جنوب غربی	۵۵۰	۷۸۰	۶۱۰	۴۳۰
۸	باتلاقی	۵۰۰	۶۵۰	۶۰۰	۵۰۰

جدول ۳- وزن‌های به‌کار رفته در تابع هدف

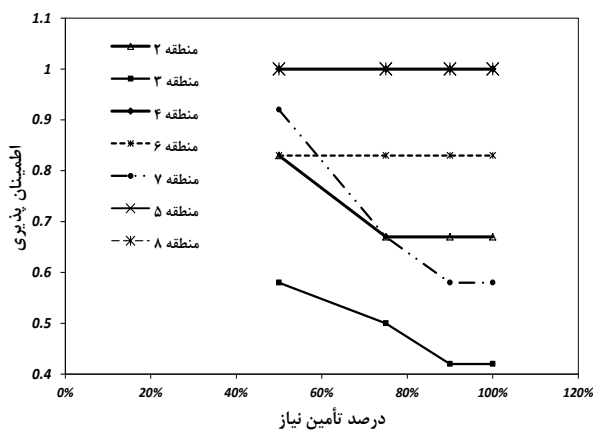
وزن	نام متغیر	وزن	نام متغیر
۷۰	تأمین آب شرب از رودخانه	۳۰	کمبود کشاورزی
۹۰	تأمین آب کشاورزی از سفره	۵۰	کمبود صنعت
۹۵	تأمین آب صنعت از سفره	۱۰	کمبود شرب
۳۰	تأمین آب شرب از سفره	۵	تأمین آب کشاورزی از مخزن
۴۵	کمبود انرژی	۸۰	تأمین آب صنعت از مخزن
۴۵	کمبود انتقال آب	۸۰	تأمین آب شرب از مخزن
۱۵	سرریز	۱۰	تأمین آب کشاورزی از رودخانه
۳۰	رها سازی از توربین	۲	تأمین آب صنعت از رودخانه
۹۰	کمبود کیفیت آب از استاندارد	۸۰	کمبود تأمین حداقل نیاز

مدل کمی این پژوهش، در پژوهش‌های مختلف قبلی اعتبارسنجی شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۱ و ایازی و کریمی، ۱۳۹۲). همچنین در زمینه مطالعات مرتبط با این پژوهش، سالمی و همکاران تأمین آب در حوضه آبریز را به صورت جمعی (Lumped) و با بیلان منبع‌ها و مصرف‌ها در سطح حوضه برای سناریوهای مختلف کاهش ۱۰ و ۲۰٪ آورد به سد بررسی و به این نتیجه رسیدند که در حالت اول، تأثیری بر تأمین آب ندارد و در سناریوی دوم نیز حداکثر ۲٪ تأمین آب را کاهش خواهد داد (سالمی و موری راست، ۲۰۰۲). صفوی (۲۰۰۴) در پژوهشی در مورد مدیریت کیفی رودخانه زاینده‌رود از شهر اصفهان تا باتلاق گاوخونی، نتیجه‌گیری کردند که برای کاهش غلظت BOD_5 از ۲۸ میلی‌گرم در لیتر موجود به ۱۰ میلی‌گرم در لیتر در محل باتلاق، باید راندمان تصفیه‌خانه فاضلاب شهر اصفهان به ۹۶٪ برسد. در بخش نتایج، به ارزیابی دقیق‌تر مدیریت کمی- کیفی سیستم آبی رودخانه زاینده‌رود با رویکرد بهره‌برداری تلفیقی منابع آب و تأثیر آن بر کاهش اثرات مأمولوب در نتیجه ۱۵٪ کاهش در آوردها، به‌عنوان یک سناریوی میانی (مابین ۱۰٪ و ۲۰٪ کاهش آوردها به مخزن سد) پرداخته خواهد شد.

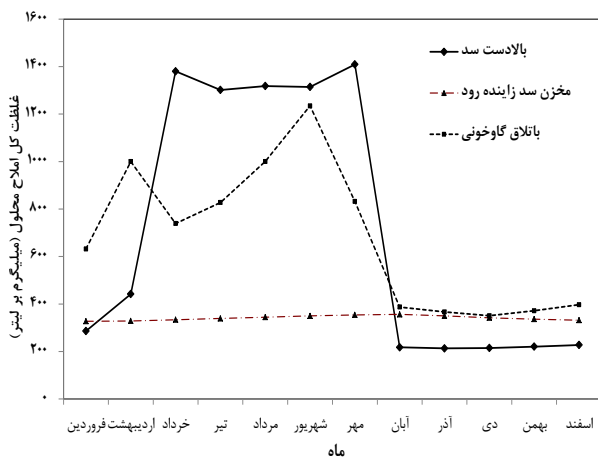
نتایج و بحث

شکل ۸ نشان می‌دهد که در شرایط کم‌آبی و پرمصرف، به جز انتقال آب به یزد و تأمین آب در منطقه

بیشترین درصد تخصیص از رودخانه در منطقه پایین‌دست سد و کم‌ترین آن در منطقه شمال شرق حوضه (منطقه ۳)، به واسطه کم آب بودن این منطقه است. در جدول ۴ ملاحظه می‌شود که درصدهای تخصیص کلی آب (از رودخانه و آبخوان زیرزمینی) در منطقه‌های مختلف، متفاوت است و درصدهای تخصیص جزیی آب برداشت شده به نیازها نیز متفاوت هستند. این امر مبین تأثیر ساختار ترجیح برداشت آب از منابع و تخصیص آن‌ها به نیازهای آبی در تابع هدف مدل است (جدول ۳).

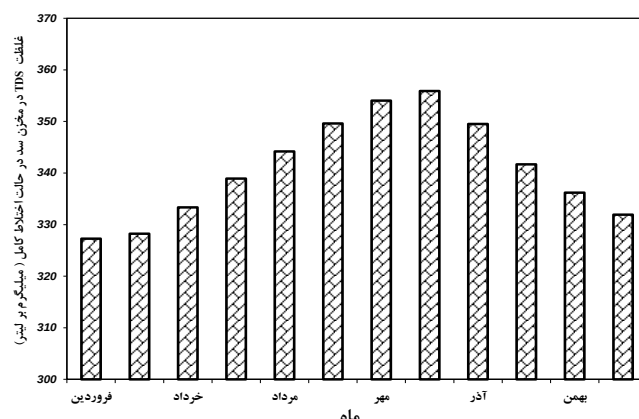


شکل ۸- تغییرات متوسط ۳۰ ساله قابلیت اطمینان تأمین نیازهای آب

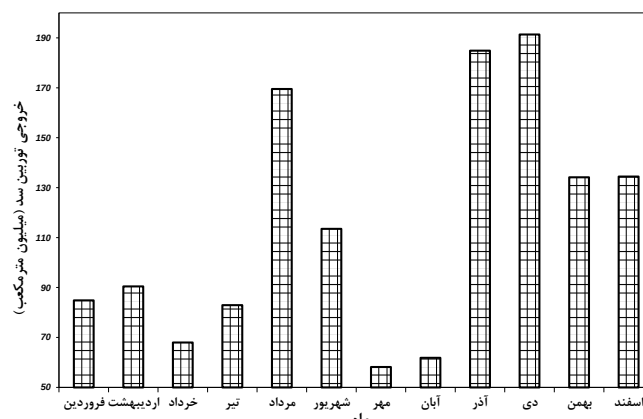


شکل ۹- توزیع ماهانه متوسط ۳۰ ساله غلظت املاح محلول در سه منطقه مختلف در اثر اعمال قانون‌های بهره‌برداری به دست آمده از مدل بهینه‌سازی

پایین‌دست سد، در بقیه منطقه‌های سیستم آبی زاینده‌رود که روی مسیر رودخانه و یا موازی آن قرار دارند، بهره‌برداری تلفیقی از مخزن، رودخانه و آبخوان زیرزمینی نیز نمی‌تواند ۱۰۰٪ تأمین آب کند. در شرایط در نظر گرفته شده، قابلیت اطمینان سیستم در شرایط خوش‌بینانه، فقط برای منطقه‌های اطراف رودخانه زاینده‌رود از ۶۸٪ بیشتر بوده و برای مناطقی که نمی‌توانند از ذخیره مخزن استفاده کنند، همانند مناطق ۳ و ۷، قابلیت اطمینان تأمین نیاز تا ۲۹٪ نیز در منطقه ۳ کاهش نشان می‌دهد. در منطقه بالادست (منطقه ۲) که مخزن سدی وجود ندارد، در ماه‌های پرمصرف و کم‌آب، مدل توانسته است فقط کاهشی در حدود حدود ۷٪ در غلظت املاح محلول ایجاد کند. این در حالی است که وجود مخزن سد در آستانه خشکسالی (حد پایین سال نرمال و حد بالای تقاضای آب) توانسته است در چهارچوب بهره‌برداری تلفیقی با آب زیرزمینی، تا ۵۴٪ غلظت املاح محلول را در محل باتلاق گاوخونی کاهش دهد (شکل ۹). بدین ترتیب دیده می‌شود که بهره‌برداری تلفیقی در شرایط کم‌آبی، تا چه مقدار می‌تواند در کنترل کیفیت آب مؤثر باشد. این نتیجه برای یک آلاینده زوال‌ناپذیر (TDS) فقط با به هنگام‌سازی مدیریت بهره‌برداری از سیستم آبی در مقایسه با رویکرد سازهای و پرهزینه‌تر بهبود راندمان تصفیه فاضلاب (صفوی، ۲۰۰۴)، که به طور حتمی لازم است، قابل دیدن است. با ترکیب رویکرد غیرسازهای و سازهای بهبود راندمان تصفیه، با هزینه به مراتب کم‌تری برای بهبود راندمان تصفیه، می‌توان مدیریت کیفیت آب رودخانه زاینده‌رود را با کارایی بیشتری انجام داد. شایان ذکر است که سد زاینده‌رود، یک نقطه قوت برای کنترل کمی- کیفی آب محسوب می‌شود. این امر با توجه به نتایج ارائه شده در این پژوهش، به در چارچوب مدل توسعه داده شده در این پژوهش، به طور کامل مشخص است. در شکل ۱۰ نیز قابلیت مخزن در کنترل کیفی آب، در سال نرمال، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۱، توزیع ماهانه متوسط ۳۰ ساله خروجی آب از توربین سد زاینده‌رود ارائه شده است.



شکل ۱۰- توزیع ماهانه غلظت املاح محلول در مخزن سد زاینده‌رود در دوره زمانی ۳۰ ساله



شکل ۱۱- توزیع ماهانه متوسط ۳۰ ساله خروجی آب از توربین سد زاینده‌رود

جدول ۴- متوسط ۳۰ ساله درصد تخصیص و برداشت آب از رودخانه و آبخوان زیرزمینی (به اعشار)

منطقه	تخصیص از شرب	تخصیص از صنعت	تخصیص از آبخوان به کشاورزی	تخصیص از رودخانه به شرب	تخصیص از رودخانه به صنعت	تخصیص از رودخانه به کشاورزی	تخصیص از سفره	تخصیص از رودخانه
۲	۰/۱۴	۰/۰۱	۰/۸۶	۰	۰	۱	۰/۳۳	۰/۳۶
۳	۰/۱	۰/۲۵	۰/۶۵	۰	۰	۱	۰/۲۹	۰/۰۷
۵	۰/۱۹	۰/۸۱	۰	۰/۰۹	۰	۰/۹۱	۰/۱۹	۰/۸۱
۶	۰/۴۷	۰/۱۵	۰/۳۹	۰	۰	۱	۰/۳۳	۰/۴۲
۷	۰/۱	۰	۰/۸۸	۰	۰	۱	۰/۶۲	۰/۰۹
۸	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰

می‌باشد تا بتوان به نتایج ارائه شده رسید. نتایج تحلیل سیستم آبی زاینده‌رود نشان می‌دهد که نیازهای آبی شرب و صنعت در وضعیت کنونی، در سال به نسبت کم‌آب به طور کامل تأمین شده، و فقط تأمین نیازهای کشاورزی در تعامل جدی با دیگر هدف‌های بهره‌برداری از سیستم قرار گرفته است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهند که تحلیل تجمیعی^۱ حوضه آبریز (سالمی و موری راست، ۲۰۰۲)، که توزیع مکانی منبع‌ها و مصرف‌ها را در نظر نمی‌گیرد تا چه

تخصیص از رودخانه به صنعت و شرب به دلیل اولویت برداشت آب از آبخوان برای این نیازهای آبی، صفر تعیین شده است. علاوه بر برتری تأمین آب، حفظ آب بیشتر در رودخانه و برداشت از آبخوان با کیفیت بهتر به کنترل کیفیت آب رودخانه کمک کرده است، که از دلایل دیگری برداشت کمتر از رودخانه است. اعتبار این قواعد و نتایج مورد انتظار از آن‌ها، که در قالب درصد تأمین نیاز در جدول ۵ و کیفیت آب در شکل ۹ ارائه شده است، در گرو به‌هم‌پیوسته بودن سیستم بهره‌برداری از حوضه آبریز

1- Lumped

بدین ترتیب، مدل سازی به هم پیوسته کمی- کیفی بهره برداری تلفیقی با هدف استفاده از پتانسیل های موجود سیستم آبی در مدیریت کمی- کیفی تخصیص آب انجام شده است. همچنین، قواعد تخصیص آب در سطح حوضه آبریز زاینده رود با در نظر گرفتن محدودیت های کیفی، توسط این مدل در شرایط ۸۵٪ سال نرمال تحلیل و ارائه شده است. تحلیل ها نشان می دهد که در شرایط سال نرمال، امکان مدیریت کمی- کیفی برداشت های آب در ساختار تلفیقی در مسیر رودخانه زاینده رود با تأمین ۱۰۰٪ نیازهای شرب و صنعت و ۶۸٪ نیازهای آبی کشاورزی وجود دارد. کاربرد مدل نشان می دهد که در شرایط خشکسالی، غلظت املاح محلول در محل باتلاق گاوخونی تا ۵۰٪ در مقایسه با منطقه بالادست سد با رویکرد بهره برداری تلفیقی کاهش می یابد. این نتیجه، معنی دار بودن قابلیت بهره برداری تلفیقی در بهبود کیفیت آب را در رودخانه، به ویژه در ماه های پرمصرف، نشان می دهد. برای تعیین ابعاد دقیق تر این نتایج نیاز به مدل سازی در مقیاس کوچک تر مکانی و زمانی، با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش است.

منابع

۱. ایازی ا. و کریمی ا. ۱۳۹۲. ارزیابی تأثیر هماهنگ سازی بهره برداری توأمان از سیستم چند مخزنی حوضه آبریز کرخه در مراحل مختلف توسعه بر تأمین بلند مدت آب. مجله مهندسی منابع آب. ۶(۱۸): ۹۹-۱۱۶.
۲. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۸۴. مطالعات برنامه جامع سازگاری با اقلیم (تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوزه های آبریز). دفتر امور آب، کشاورزی و منابع طبیعی، گزارش فنی، جلد ۱ (۲۹۹ ص) و جلد ۲ (۱۴۲ ص).
۳. کریمی ا. نیکو م. ر. کراچیان ر. و شیرنگی ا. ۱۳۹۱. ارزیابی قابلیت تأمین بلندمدت آب در سطح حوضه آبریز زاینده رود تحت تأثیر طرح های انتقال آب توسط مدل بهینه سازی چند- دوره ای. مجله پژوهش آب ایران. ۶(۱۱): ۱۵۳-۱۶۳.
۴. کریمی م. کریمی ع. و جعفری م. ۱۳۸۸. بررسی مشکلات زیست محیطی رودخانه زاینده رود. دوازدهمین همایش ملی بهداشت محیط ایران. دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، دانشکده بهداشت.

حد می تواند در مقایسه با یک تحلیل دقیق تر از نظر مقیاس مکانی و زمانی مدل سازی، خطا تولید کند. همچنین، این پژوهش، نشان می دهد که توزیع نامناسب منابع آب سطحی و عدم وجود سیستم های تأمین آب کافی به فراخور نیاز، از عمده ترین نقاط ضعف سیستم آبی زاینده رود محسوب می شود. نکته مهم دیگری که تحلیل مدل بهینه سازی آشکار ساخته است، عدم تأثیر انتقال آب به خارج از حوضه بر وضعیت کمی و کیفی آب در حوضه است. دلیل این امر نیز، انتقال آب از پایین دست سد می باشد که به واسطه تنظیم جریان توسط سد در چارچوب بهره برداری تلفیقی تأثیر آن بر عملکرد سیستم آبی زاینده رود کم شده است.

جدول ۵- متوسط ۳۰ ساله تأمین نیاز بخش های شرب، صنعت و کشاورزی

منطقه	تأمین نیاز	تأمین نیاز	تأمین نیاز
۲	۱	۰/۹	۰/۶۸
۳	۱	۱	۰/۲۹
۵	۱	۱	۱
۶	۱	۱	۰/۶۸
۷	۱	۱	۰/۶۸
۸	۱	۰	۰

نتیجه گیری

در این پژوهش، بهینه سازی بهره برداری تلفیقی کمی- کیفی از منابع آب سطحی و زیرزمینی برای تعیین قابلیت های این رویکرد مدیریتی، در تخصیص آب با در نظر گرفتن محدودیت کیفیت آب در سطح حوضه آبریز بررسی گردید. دلیل استفاده از این رویکرد، افزایش قابلیت اطمینان تأمین آب با استفاده از پتانسیل های سیستم آبی و ایجاد حداقل مقدار اثرات نامطلوب در تأمین کمیت و کیفیت آب مورد نیاز است. در این چارچوب، یک مدل بهینه سازی بهره برداری بلندمدت کمی- کیفی از سیستم آبی رودخانه- مخزن- سفره آب زیرزمینی برای حداقل سازی نسبت تجمعی کمبود نیازهای کمی- کیفی تدوین شده است. متدولوژی پیشنهادی، امکان مدل سازی بلندمدت بهره برداری کمی- کیفی سیستم حوضه آبریز بدون مانع های محاسباتی برای تحلیل و بهینه سازی تصمیم ها، به واسطه به کارگیری ساختار خاص تجزیه مسئله و الگوریتم حل تکرار شونده خطی، فراهم می کند.

17. Quinn N. W. T. Miller N. L. Dracup J. A. Brekke L. and Grober L. F. 2001. An integrated modeling system for environmental impact analysis of climate variability and extreme weather events in the San Joaquin Basin, California. *Advances in Environmental Research*. 5:309-317.
18. Safavi H. R. 2004. A water quality management model for the Zayandehrood river in Iran. 1st International conference on managing rivers in the 21st Century: Issues and challenges. Penang, Malaysia. 296-301.
19. Salemi H. R. and Murray-Rust H. 2002. Water Supply and demand forecasting in the Zayandeh Rud basin. Iran. *IAERI-IWMI Research Reports* 13.
20. 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 and Software*. 20(5):529-545.
21. Sehlke G. and Jacobson J. 2005. System dynamics modeling of transboundary systems: The bear river basin model. *Groundwater*. 43(5):722-730.
22. Wurbs R. A. 1995. Computer models for water resources planning and management. USACE. Institute for Water Resources. IWR Report 94-NDS-7.
23. Zhang W. Wang Y. Peng H. Li Y. Tang J. and Wu K.B. 2010. A coupled water quantity-quality model for water allocation analysis. Springer. *Journal of Water Resources Management*. 24:485-511.
5. 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*. 129(1):235-245.
6. 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.
7. Frevert D. Fulp. T. Zagona. E. Leavesley. G. and Lins H. 2006. Watershed and river system management program: Overview of capabilities. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 132(2):92-97.
8. Gabriel L. de Azvedo T. Gates T. K. Fontane D. G. Labadie J. W. and Porto R. L. 2000. Integration of water quantity and quality in strategic river basin planning. *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*. 126(2):85-97.
9. Karimi A. and Ardakanian R. 2010. Development of a long-term water allocation model for agriculture and industry demands. *Journal of Water Resources Management*. 24:1717-1746.
10. Labadie J. W. 2004. Optimal Operation of Multi-Reservoir Systems: State-of-the-Art Review. *ASCE Journal of Water Resources Planning & Management*. 130(2):93-111.
11. Loucks D. P. and Van Beek E. 2005. Water resources systems planning and management: An Introduction to Methods, Models and Applications. 1st edn. UNESCO.
12. Mays L. W. and Tung Y. K. 2002. *Hydrosystems engineering and management*. Water Resources Publications. LLC. Colorado. USA.
13. Perera B. James B. and Kularathna M. D. U. 2005. Computer software tool REALM for sustainable water allocation and management. *Journal of Environmental Managemen*. 77:291-300.
14. Rosenthal R. E. 2006. GAMS - A user's guide. GAMS development corporation. Washington DC. USA.
15. Rozengrant M. W. Ringler C. McKinney D. C. Cai X. Keller A. and Donoso G. 2000. Integrated economic-hydrologic water modeling at basin scale: the Maipo river basin. *Agricultural Economics*. 24(1):33-46.
16. Qin X. Huang G. Chen B. and Zhang B. 2009. An interval-parameter waste-load-allocation model for river water quality management under uncertainty. *Environmental Management*. 43:999-1012.