ارزیابی تأثیر هماهنگ‌سازی بهره‌برداری توامان از سامانه‌ی چند– مخزنی حوضه‌ی آبخیز کرخه در مراحل مختلف توسعه بر تامین بلند مدت آب

امیر ایازی*[۱]، اکبر کریمی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۲/۱۲ تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۷/۲۴

چکیده

با ساختن سازه‌های جدید تامین آب، طرح‌های آبیاری، صنعتی و توسعه‌ی شهرها، ساختار حوضه‌ی آبخیز، و به تبع آن، شرایط سامانه‌ی آبی حوضه‌ی دچار تغییر می‌گردد. در چنین شرایطی، استفاده از شیوه‌ی بهره‌برداری موجود، علاوه بر این که بهینه نیست، منجر به هزینه‌های گوناگون اقتصادی و اجتماعی نیز می‌گردد؛ بنابراین، نیاز به هماهنگ‌سازی بهره‌برداری با شرایط جدید، و به‌روزرسانی قواعد بهره‌برداری و منحنی‌های فرمان سدها می‌باشد. در این پژوهش، به موضوع هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی و به‌روزرسانی قواعد بهره‌برداری از آبگیر سدها در مراحل گوناگون توسعه‌ی حوضه‌ی آبخیز، پرداخته شده است. برای این منظور، یک شبیه بهینه‌سازی بهره‌برداری بلند مدت از سامانه‌ی آبی ساخته شده است، که اثرات بالادست بر پایین‌دست، و اثرات بلند مدت بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی را در نظر گرفته، و به‌نحوی عملکرد سامانه‌ی آبی را هماهنگ می‌نماید، که اهداف بهره‌وران در افق بلند مدت برنامه‌ریزی تا حد ممکن تامین گردد. کاربرد شبیه در ارزیابی تأثیر هماهنگ‌سازی و به‌روزرسانی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی کرخه نشان می‌دهد که در شرایط ساختن سدهای کرخه، سیمره و سازبن، چنانچه از منحنی‌های فرمان معمول سدها، که به صورت مجزا برای هر سدی تهیه می‌گردد، استفاده شود، ۶۰٪ از نیازهای آبی تامین نمی‌گردد در حالی که در شرایط هماهنگ‌شده، تمامی نیازها تامین می‌شوند. علاوه براین، عدم هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی کرخه، و به‌روزرسانی قواعد بهره‌برداری از آبگیر سدها، ۵۰٪ قابلیت اطمینان تامین تقاضاهای آبی را در یک افق ۲۰ ساله در مقایسه با عملکرد هماهنگ شده کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، سامانه‌ی منابع آب، بهره‌برداری از مخزن، حوضه‌ی آبخیز کرخه.

[۱]- عضو هیئت علمی (استادیار) دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس، گروه مهندسی عمران

[۲]- عضو هیئت علمی (استادیار) دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق گروه مهندسی عمران

*- نویسنده مسئول: a.ayazi86@gmail.com

مقدمه

با ساختن طرحهای جدید، شامل: سدها، اجرای برنامه‌های کشاورزی، صنعتی و توسعه‌ی شهری، ساختار سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز تغییر می‌کند. تغییر در ساختار سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز (به‌علت تغییر در سامانه‌ی تامین آب و یا تقاضاهای آبی)، تغییر در شرایط زمانی و مکانی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی را به همراه دارد (لاکس و ونبیک، ۲۰۰۵). بنابراین، کاربرد شیوه‌ی کنونی بهره‌برداری از اجزا سامانه‌ی آبی (سدها، رودها و سفره‌های زیرزمینی) در شرایط جدید، الزاما بهینه نبوده و منجر به ناکارآمدی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی در شرایط جدید می‌گردد. عدم هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از بخش جدید و موجود سامانه‌ی آبی، منجر به کاهش ظرفیت تامین آب، و قابلیت اطمینان تامین آب در یک افق بلند مدت برنامه‌ریزی می‌شود (پررا و همکاران، ۲۰۰۵). کاهش آوردها به آبگیر و جریان رود به‌علت بهره‌برداری ناهماهنگ اجزاء سامانه‌ی آبی منجر به مسائل اقتصادی-اجتماعی، مانند: هدر رفتن سرمایه‌گذاریها، تغییر کاربری آب و مهاجرت کشاورزان می‌گردد (کراچیان و کارآموز، ۲۰۰۶؛ کارآموز و همکاران، ۲۰۱۰؛ لچر و همکاران، ۲۰۰۶؛ راجاسکرام و ناندالال، ۲۰۰۵؛ کرول و برنسترت، ۲۰۰۷).

لابادیه (۲۰۰۴) نیز در مروری که بر بهره‌برداری از سامانه‌های چند- مخزنی نموده است، بر اهمیت هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از آبگیر در یک سامانه‌ی آبی برای تامین بهینه‌ی آب، و در عین حال کاهش اثرات منفی بهره‌برداری از سامانه‌های آبی، تاکید می‌کند. یکی از مشخصات بارز هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های آبی، به‌روزرسانی منحنیهای فرمان و قواعد بهره‌برداری از سدها در مراحل مختلف توسعه‌ی سامانه می‌باشد. مسأله به‌روزرسانی قواعد بهره‌برداری از آبگیر در سامانه‌های چند-مخزنی در مراحل مختلف توسعه، و تأثیر آن بر عملکرد سامانه از منظر ظرفیت، و قابلیت اطمینان تامین تقاضاهای آبی در ادبیات بهره‌برداری از سامانه‌های آبی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، در این تحقیق، به بررسی تأثیر به‌روزرسانی و هماهنگ‌سازی منحنیهای فرمان بهره‌برداری از آبگیر در یک سامانه‌ی آبی پرداخته می‌شود. برای این منظور با ساختن یک شبیه بهینه‌سازی، که قادر است تأثیر بهره‌برداری بالادست را بر پایین‌دست در تحلیل بلند مدت سامانه‌ی آبی لحاظ کند، بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی در دوره‌ی کنونی به‌نحوی بهینه می‌گردد که تا آخر افق برنامه‌ریزی مطلوبیتهای بهره‌وران بیشینه گردد. از خصوصیات بارز این شبیه چند-دوره‌ای بودن آن می‌باشد، بدین معنی که رهاسازی از آبگیر در ماه کنونی به‌نحوی تعیین می‌شود که تا آخرین ماه دوره برنامه‌ریزی، با توجه به آوردها، تقاضاها و تغییرات آنها، حجم ذخیره‌ی آبگیر در محدوده‌ی مجاز بهره‌برداری قرار گرفته، و رهاسازی در دوره‌های بعدی به گونه‌ای صورت پذیرد که مطلوبیت بهره‌وران شرب، کشاورزی، صنعت، محیط‌زیست و بهره‌بردار از سامانه‌ی آبی نیز در افق برنامه‌ریزی بیشینه گردد. این خصوصیت، که هماهنگ‌سازی زمانی بهره‌برداری از آبگیرها می‌باشد، در کنار هماهنگ‌سازی بهره‌برداری بالادست و پایین‌دست حوضه‌ی آبخیز، توان بیشتری را برای ارتقاء ظرفیت، و قابلیت اطمینان تامین آب در سطح حوضه‌ی در اختیار تصمیم‌گیران بخش آب قرار می‌دهد. در ادامه، نحوه فرمولبندی این شبیه، و حل مسأله در بخش فرمولبندی مسأله تشریح می‌شود. پس از آن، نتایج کاربرد شبیه ساخته شده در یک مورد واقعی، یعنی سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه ارائه می‌گردد. در نهایت نیز جمع‌بندی تحقیق و پیشنهاد برای کارهای آتی ارائه خواهند شد.

مواد و روشها

بهره‌برداری از سامانه‌های آبی به‌وسیله‌ی دو رویکرد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مزیت روش بهینه‌سازی امکان جهت‌دهی به شیوه‌ی بهره‌برداری در سمت مطلوب بهره‌وران می‌باشد. علاوه بر این، رویکرد بهینه‌سازی قابلیت حداقل نمودن اثرات بلند مدت نامطلوب بهره‌برداری کنونی را بر حجم ذخیره، رهاسازی و تامین نیازهای آتی دارد. در این تحقیق با توجه به مزیتهای روش بهینه‌سازی و قابلیت انطباق آن با مطلوبیت‌های بهره‌وران، از

روش بهینه‌سازی برای ارزیابی بهره‌برداری از سامانه‌های آبی استفاده می‌شود.

شیوه‌ی بررسی اثرات هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز

در این تحقیق به بررسی اثرات به‌روزرسانی و هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های آبی در مراحل مختلف توسعه بر ظرفیت تامین آب، قابلیت اطمینان تامین آب و بیشینه‌سازی مطلوبیتهای بهره‌وران پرداخته می‌شود. بنابراین، چگونگی این بررسی یکی از بخشهای مهم در فرمولبندی مسأله می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است. برای تعیین میزان اثرات به‌روزرسانی و هماهنگ‌سازی بهره‌وری از سامانه‌ی آبی در تامین آب مطابق شکل ۱ به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- نخست سامانه‌ی آبی در شرایط موجود تحلیل شده و منحنی فرمان بهینه‌ی ماهانه آبگیرها در سامانه‌ی موجود تعیین می‌گردد.

۲- سپس سامانه در شرایط جدید توسعه، مثلا، اضافه شدن یک یا چند آبگیر جدید، با مقید نمودن شبیه به پیروی از منحنیهای فرمان تعیین شده در مرحله‌ی ۱ برای آبگیرهای موجود، تحلیل می‌گردد. تحلیل سامانه‌ی آبی در این شرایط نشان می‌دهد که اگر آبگیر موجود مطابق با برنامه‌ی قبلی خود از مرحله‌ی ۱ عمل کنند، و آبگیرهای جدید در تعامل با آنها، عملکرد بهینه‌ی خود را بدون تغییر در برنامه‌ی بخش موجود تعیین نمایند، میزان پاسخ‌گویی به نیازهای آبی و تامین شرایط بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی با هدف بیشینه‌سازی مطلوبیتهای بهره‌وران چگونه تغییر می‌کند. در حال حاضر، در بسیاری از سامانه‌های منابع آب بدین صورت عمل می‌شود که برنامه بهره‌برداری سامانه‌ی موجود تغییر ننموده، و بخش توسعه‌ی داده شده عملکرد خود را به‌نحوی تعیین می‌کند که، با لحاظ شرایط موجود، اهداف مورد نظر توسعه تا حد ممکن تامین گردد.

۳- در مرحله بعدی، سامانه مجدداً در شرایط جدید توسعه، بدون مقید نمودن شبیه به پیروی از منحنیهای فرمان تعیین شده در مرحله‌ی ۱ برای آبگیرهای موجود پیش از توسعه، تحلیل می‌گردد. در این شرایط جدید برای سامانه‌ی آبی، شبیه آزاد است که عملکرد بخش موجود سامانه را با بخش توسعه یافته هماهنگ نموده، و بهره‌برداری از سامانه را به‌نحوی که مطلوبیتهای بهره‌وران بیشینه گردد، بهینه نماید.

۴- با مقایسه‌ی نتایج تحلیل شبیه سامانه‌ی منابع آب در دو حالت مختلف برای برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی در شرایط توسعه، امکان ارزیابی تأثیر هماهنگ‌سازی و به‌روزرسانی برنامه بهره‌وری از آبگیرهای سدها در پاسخ‌گویی بهتر به نیازهای آبی در بلند مدت، قابلیت اطمینان تامین آب در سطح حوضه‌ی آبخیز، و بیشینه‌سازی مطلوبیتهای بهره‌وران تخصیص آب در سطح حوضه‌ی آبخیز فراهم می‌گردد.

بدین ترتیب، با مقایسه‌ی نتایج تحلیلهای شبیه در شرایط توسعه برای دو حالت مختلف، که در بندهای ۲ و ۳ توضیح داده شدند، امکان ارزیابی اثرات به‌روزرسانی و هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های آبی در مراحل مختلف توسعه فراهم می‌گردد.

خصوصیات ابزار تحلیل سامانه‌ی آبی

ابزار لازم برای انجام تحلیل سامانه‌ی آبی، به‌نحوی که قادر به لحاظ و تحلیل اثرات توسعه در حوضه‌ی آبخیز باشد، بایستی مشخصات زیر را دارا باشد:

- لحاظ توامان تأثیر بهره‌برداری بالادست بر پایین‌دست؛ به‌علاوه، تأثیر رهاسازی کنونی آبگیرها بر ذخیره و رهاسازی از آنها در دوره‌های بعدی.
- لحاظ توامان مطلوبیت‌های بهره‌وران شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست در تعیین مقادیر بهینه‌ی تخصیص آب به تقاضاهای گوناگون.

شبیه سامانه‌ی منابع آب معمولا در قالب گره-نهر، مشابه شکل ۲، نمایش داده می‌شود. در شکل ۲ سامانه‌ی

آبی در یک منطقه، یا بخشی از حوضه‌ی آبخیز، شامل: مخزن، رود و سفره‌ی زیرزمینی، که برای پاسخ‌گویی به تقاضاهای آبی بهره‌برداری می‌شوند، نشان داده شده است.

فرمول بندی ریاضی مسأله

به منظور فرمولبندی مسأله‌ی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی در قالب ریاضی، ابتدا شبیه مفهومی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی در شکل ۲ نشان داده شده است. در یک منطقه‌ی r، اجزاء سامانه‌ی آبی و ارتباط انها با یکدیگر نشان داده شده‌اند. در شکل ۲، ارتباط یک منطقه r با مناطق دیگر (بالادست و یا پایین‌دست) از طریق انتقال آب و جریان ورودی و خروجی از منطقه‌ی r به آنها و بالعکس صورت می‌گیرد. بدین ترتیب، حوضه‌ی آبخیز قابل تقسیم به مناطق مختلفی می‌باشد که شامل آبگیر، رود، سفره‌ی زیرزمینی، انتقال آب و تقاضاهای آبی بوده، و از طریق انتقال آب و جریان ورودی و خروجی با مناطق دیگر در ارتباط می‌باشند. بدین ترتیب، شبیه‌سازی سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز با لحاظ اثرات بالادست بر پایین‌دست صورت می‌گیرد. علاوه بر این، با لحاظ خصوصیت ذخیره آبگیرها سدها در سامانه‌ی آبی، اثر بهره‌برداری از یک ماه به ماههای بعد، در سال کنونی و سالهای بعدی نیز به‌وسیله‌ی معادله‌ی تراز جرم شبیه‌سازی می‌گردد. بدین شکل، علاوه بر آن‌که تأثیر بهره‌برداری کنونی از سامانه در دوره‌های بعدی شبیه‌سازی می‌شود، به‌نحوی نیز بهینه می‌گردد که بیشترین اثر مثبت را بر مطلوبیت بهره‌وران داشته باشد. فرمولبندی ریاضی بهره‌برداری از آبگیر، رود و سفره‌ی زیرزمینی در معادلات ۱ تا ۵ نمایش داده شده است.

$$S_r^{y,m} + I_r^{y,m} + \sum_{r'(r)} O_{r'}^{y,m} + \sum_{r'(r)} WT_{r',r}^{y,m} - SP_r^{y,m} - PF_r^{y,m} - EV_r^{y,m} - RL_r^{y,m} - \sum_{r(r')} WT_{r,r'}^{y,m} = S_r^{y,m+1} \quad (۱-۲)$$

$$HE_r^{y,m} = EF_{r,m} \cdot PF_r^{y,m} \cdot \left(H_r^{y,m} - TWL_r^{y,m} - HL_r\right) \quad (۲-۲)$$

$$AA_r^{y,m} + AI_r^{y,m} + AD_r^{y,m} + \sum_{r(r')} WT_{r,r'}^{y,m} + UARF_r^{y,m} = SRF_r^{y,m} + \sum_{r'(r)} O_{r'}^{y,m} + \sum_{r'(r)} WT_{r',r}^{y,m} + SP_r^{y,m} + PF_r^{y,m} + RL_r^{y,m} \quad (۳-۲)$$

$$UARF_r^{y,m} + RFA_r^{y,m} + RFI_r^{y,m} + RFD_r^{y,m} = O_r^{y,m} \quad (۴-۲)$$

$$GWV_r^{y,m} \geq GAA_r^{y,m} + GAI_r^{y,m} + GAD_r^{y,m} \quad (۵-۲)$$

در معادلات ۲-۱ تا ۲-۵ متغیرها و فراسنجها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$GWV_r^{y,m}$ حجم مجاز برداشت آب از سفره‌ی زیرزمینی (میلیون متر مکعب)

$GAA_r^{y,m}$ حجم آب برداشتی برای مصرف کشاورزی از سفره‌ی آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب)

$GAI_r^{y,m}$ حجم آب برداشتی برای مصرف صنعت از سفره‌ی آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب)

$GAD_r^{y,m}$ حجم آب برداشتی برای مصرف شرب از سفره‌ی آب زیرزمینی (میلیون متر مکعب)

$S_r^{y,m}$ حجم ذخیره در آبگیر سد (میلیون متر مکعب)

$I_r^{y,m}$ حجم رواناب سطحی ورودی به آبگیر سد (میلیون متر مکعب)

$O_r^{y,m}$ حجم جریان خروجی از منطقه‌ی r (میلیون متر مکعب)

$WT_{r,r'}^{y,m}$ حجم آب انتقالی از منطقه‌ی r به منطقه r' (میلیون متر مکعب)

$SP_r^{y,m}$ حجم سرریز از آبگیر سد (میلیون متر مکعب)

$PF_r^{y,m}$ حجم جریان عبوری از مولد برق برای تولید کارمایه (میلیون متر مکعب)

$RL_r^{y,m}$ حجم رهاسازی از آبگیر (میلیون متر مکعب)

$EV_r^{y,m}$ حجم تبخیر ماهانه از آبگیر (میلیون متر مکعب)

$HE_r^{y,m}$ تولید ماهانه کارمایه برق‌آبی (مگاوات ساعت)

EF_r^m ضریب سازگاری در معادله‌ی تولید کارمایه حاصل‌ضرب؛ بازده‌ی تولید، تعداد ساعات در ماه و وزن مخصوص آب

$H_r^{y,m}$ ارتفاع سطح آب آبگیر (متر)

$TWL_r^{y,m}$ ارتفاع پایاب نیروگاه (متر)

HL_r افت بار آبی در مسیر مولد برق (متر)

$RFA_r^{y,m}$ حجم آب بازگشتی از مصرف کشاورزی به رود (میلیون متر مکعب)

$RFI_r^{y,m}$ حجم آب بازگشتی از مصرف صنعت به رود (میلیون متر مکعب)

$RFD_r^{y,m}$ حجم آب بازگشتی از مصرف شرب به رود (میلیون متر مکعب)

$AA_r^{y,m}$ حجم آب برداشتی برای مصرف کشاورزی از رود (میلیون متر مکعب)

$AI_r^{y,m}$ حجم آب برداشتی برای مصرف صنعت از رود (میلیون متر مکعب)

$AD_r^{y,m}$ حجم آب برداشتی برای مصرف شرب از رود (میلیون متر مکعب)

$UARF_r^{y,m}$ جریان باقی مانده در رود پس از برداشتها (میلیون متر مکعب)

$SRF_r^{y,m}$ رواناب سطحی در منطقه‌ی r

معادله‌ی ۲-۱ تراز آبی آبگیر سد را با لحاظ مؤلفه‌های مختلف تراز نشان می‌دهد. معادله‌ی ۲-۲ تابع تولید کارمایه برق‌آبی را به‌وسیله‌ی سد عرضه می‌کند، که یک معادله‌ی غیرخطی و غیرمحدب وابسته به رقوم سراب و پایاب، افت با آبی و جریان عبوری از مولد برق می‌باشد. معادله‌ی ۲-۳، تراز آبی رود و معادله‌ی ۲-۴، آب خروجی از یک منطقه و ورودی به منطقه پایین‌دست را نشان می‌دهد. معادله‌ی ۲-۴ آب باقی مانده در رود پس از برداشتها می‌باشد، که بایستی قید حداقل نیاز زیست‌محیطی را تامین کند. معادله‌ی ۲-۵ نیز برداشت از آب سفره را نشان می‌دهد، که مقید به حداکثر آب قابل استحصال در هر ماه می‌باشد.

معادلات اصلی شبیه‌سازی بهره‌وری از سامانه‌ی آبی در معادلات ۲-۱ تا ۲-۵ ارائه گردیده‌اند. در ادامه، شبیه‌سازی مطلوبیت بهره‌وران و تابع هدف مسأله شرح داده می‌شود. بهره‌وران مسأله بهره‌وری از سامانه‌های آبی در سطح حوضه‌ی آبخیز شامل ۵ ذینفع بهره‌بردار (سامانه‌ی آبی)، شرب، صنعت، کشاورزی و محیط‌زیست می‌شوند. مطلوبیت بهره‌وران بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی با توجه به نیاز آبی آنها، قابل تعریف بر حسب آب تامین شده برای هر ذینفع می‌باشد. البته، منبع تامین آب نیز برای بهره‌وران اهمیت دارد، زیرا که هزینه و محدودیتهای استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی متفاوت است. با توجه به این نکات مطلوبیت بهره‌وران به صورت زیر تعریف و فرمولبندی می‌گردد.

مطلوبیت بهره‌بردار از سامانه‌ی آبی (مثلاً، آب منطقه‌ای در ایران)، WSU_r^y، در بهره‌برداری از مخزن سد، حفظ ارتفاع آب مخزن، برای تولید کارمایه، استفاده‌های تفریحی، رهاسازی برای نیازهای پایین‌دست مخزن و انتقال آب می‌باشد. علاوه بر این، بهره‌بردار از برداشت آب به‌وسیله‌ی متقاضیان از رود نسبت به سفره‌ی زیرزمینی به‌واسطه قیمت بیشتر آب رود، سود بیشتری می‌برد. با توجه به این موارد، مطلوبیت بهره‌بردار از سامانه آبی (سازمانها و نهادهای آبی) به صورت معادله‌ی ۲-۶ فرمولبندی می‌گردد:

$$WSU_r^y = \sum_m \begin{bmatrix} W1_r^m \cdot S_r^{y,m} + \\ W2_r^m \cdot \sum_{r'(r)} WT_{r,r'}^{y,m} + \\ W3_r^m \cdot SP_r^{y,m} + \\ W4_r^m \cdot PF_r^{y,m} + \\ W5_r^m \cdot RL_r^{y,m} + \\ W6_r^m \cdot AA_r^{y,m} + \\ W7_r^m \cdot AI_r^{y,m} + \\ W8_r^m \cdot AD_r^{y,m} + \\ W9_r^m \cdot GAA_r^{y,m} + \\ W10_r^m \cdot GAI_r^{y,m} + \\ W11_r^m \cdot GAD_r^{y,m} + \\ W12_r^m \cdot HE_r^{y,m} \end{bmatrix} \quad (۶-۲)$$

مطلوبیت بهره‌بردار شرب، DDU_r^y، بر حسب کمبود در تامین آب و آب مصرفی با رعایت اولویت برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی، به صورت معادله‌ی ۲-۷ تعریف می‌شود:

$$DDU_r^y = \sum_m \begin{bmatrix} \left(W13_r^m \cdot DDSL_r^{y,m}\right) + \\ \left(W14_r^m \cdot RAD_r^{y,m}\right) + \\ \left(W15_r^m \cdot GAD_r^{y,m}\right) \end{bmatrix} \quad (۷-۲)$$

مطلوبیت بهره‌بردار کشاورزی، ADU_r^y، بر حسب کمبود در تامین آب مصرفی و اولویت برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی، به صورت معادله‌ی ۲-۸ تعریف می‌شود:

$$ADU_r^y = \sum_m \begin{bmatrix} \left(W16_r^m \cdot ADSL_r^{y,m}\right) + \\ \left(W17_r^m \cdot RAA_r^{y,m}\right) + \\ \left(W18_r^m \cdot GAA_r^{y,m}\right) \end{bmatrix} \quad (۸-۲)$$

مطلوبیت بهره‌بردار صنعت، IDU_r^y، بر حسب کمبود در تامین آب مصرفی و رعایت اولویت برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی به صورت معادله‌ی ۲-۹ قابل تعریف است:

$$IDU_r^y = \sum_m \begin{bmatrix} \left(W19_r^m \cdot IDSL_r^{y,m}\right) + \\ \left(W20_r^m \cdot RAI_r^{y,m}\right) + \\ \left(W21_r^m \cdot GAI_r^{y,m}\right) \end{bmatrix} \quad (۹-۲)$$

در نهایت نیز مطلوبیت بهره‌بردار محیط‌زیست، $ENVU_r^y$، بر حسب مقدار کمبود در آب تامین شده به صورت نشان داده شده، در معادله‌ی ۲-۱۰ فرمولبندی می‌گردد.

$$ENVU_r^y = \sum_m W22_r^m \cdot ENVDSL_r^{y,m} \quad (۱۰-۲)$$

شایان ذکر است که W ها در معادلات ۲-۶ تا ۲-۱۰ مبین مطلوبیت بهره‌وران در رابطه با متغیرهای متناظر آنها می‌باشند، که بین ۱۰۰ تا ۱۰۰- تغییر می‌کنند. مثبت بودن اعداد نشان دهنده‌ی مطلوبیت، و منفی بودن وزن نشان دهنده‌ی نامطلوب بودن متغیر متناظر از دید بهره‌ور مربوطه می‌باشد. بدین ترتیب، مطلوبیت بهره‌وران مختلف مسأله در قالب معادلات ۲-۶ تا ۲-۱۰ تعریف گردیده‌اند که اجزاء تابع هدف می‌باشند. بیشینه‌سازی مطلوبیت تمام بهره‌وران در افق برنامه‌ریزی تابع هدف این مسأله را تشکیل می‌دهد، که بدین وسیله بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی به سمتی جهت داده می‌شود تا مطلوبیت تمام بهره‌وران تا حد ممکن بیشینه گردد:

$$TU = \sum_{r,y} \begin{bmatrix} ENVU_r^y + WSU_r^y + \\ DDU_r^y + IDU_r^y + ADU_r^y \end{bmatrix} \quad (۱۱-۲)$$

شبیه حاصل از معادلات ۲-۱ تا ۲-۱۱ از نوع مقید شده مربعاتی[1] می‌باشد. شبیه ۲-۱۲ شکل کلی شبیه مقید شده مربعاتی با تابع هدف خطی را نشان می‌دهد. این شبیه با کاربرد روشهای حل خطی ترتیبی، و یا غیرخطی با بهره وری از نرم‌افزار GAMS حل می‌شود (روزنتال ۲۰۰۶):

[1]- quadratic constraint programming

$$\begin{aligned} &Max. \quad Z = B^T X \\ &s.t. \\ &\qquad X^T AX = D \\ &\qquad X \geq 0 \end{aligned} \qquad (۱۲-۲)$$

در معادله‌ی ۲-۱۲، Xها متغیرهای مسأله، B بردار شامل ضرایب تابع هدف، A ماتریس ضرایب قیود، و D نیز بردار حاوی مقادیر سمت راست قیود می‌باشند. در مسأله فرمولبندی شده در این تحقیق، B معادل وزنهای W در معادلات ۲-۶ تا ۲-۱۰ می‌باشد.

مورد مطالعاتی

حوضه‌ی آبخیز کرخه با مساحت ۵۰۷۶۴ کیلومتر مربع، دربرگیرنده‌ی بخشهایی از ۶ استان در غرب و جنوب غرب ایران می‌باشد. در این حوضه‌ی آبخیز رود مشهور و پرآب کرخه جاری است که به هورالعظیم در مرز ایران و عراق می‌ریزد. علاوه بر آن، حوضه‌ی آبخیز کرخه با وسعتی در حدود ۳/۴٪ از مساحت کشور جمعیت ۷۰،۴۵۶،۳۰۰ نفری، معادل ۵٪ جمعیت کشور، را در خود جای داده است (مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۸۴). ۳۵ سد مخزنی و انحرافی در این حوضه‌ی آبخیز علاوه بر سد کرخه در افق برنامه‌ریزی ساخته و بهره‌برداری خواهند شد (بانک طرحهای توسعه‌ی منابع آب، ۱۳۸۸).

شرایط سامانه‌ی آبی کرخه در این تحلیل

شکل ۳ موقعیت حوضه‌ی آبخیز کرخه، رودها، طرحهای کشاورزی و سدهای کرخه، سیمره و سازبن را نشان می‌دهد. در این تحقیق بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی، در شرایط ساختن و بهره‌برداری از سدهای کرخه، سیمره و سازبن بررسی می‌گردد. در شکل ۴ طرحواره‌ی سامانه‌ی حوضه‌ی آبخیز کرخه در مرحله‌ی نهایی مورد نظر این مطالعه موردی، یعنی، ساختن و بهره‌برداری از سدهای کرخه، سیمره و سازبن نشان داده شده است. در شکل ۴، منظور از مصارف بالادست، نیاز آبی طرحهای کشاورزی گلوم‌بحری، چمچمال و تپه‌یزدان می‌باشد، که در شرایط کنونی، یعنی، سال ۱۳۸۹ در حال بهره‌برداری هستند. سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه طی سه مرحله در این تحقیق بررسی می‌گردد؛ در مرحله‌ی اول فرض بر آن است که تنها سد کرخه و مصارف بالادست مطابق شکل ۴ وجود داشته، عملکرد آنها در یک افق ۲۰ ساله در بازه‌های زمانی ماهانه بهینه گردیده، و وضعیت تامین آب و منحنی فرمان سد کرخه به‌دست می‌آید. در مرحله‌ی بعد فرض بر این است که سد سیمره نیز ساخته شده، بهره‌برداری از سامانه‌ی مذکور بهینه گردیده و منحنیهای فرمان سدهای کرخه و سیمره در شرایط جدید، و بر اساس میانگین بلند مدت حجم ذخیره ماهانه‌ی مخازن، محاسبه می‌شوند. در مرحله‌ی سوم فرض بر این است که سدهای کرخه، سیمره و سازبن ساخته شده، و بهره‌برداری از آنها در یک افق بلند مدت ۲۰ ساله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. خصوصیات سامانه‌ی آبی کرخه در جداول ۱ و ۲ بطور خلاصه ارائه شده‌اند. در جدول ۱، مقدار نیاز آبی کشاورزی در افق طرح بر اساس سطح زیرکشت و الگوی کشت محاسبه شده است (بانک طرحهای توسعه‌ی منابع آب ۱۳۸۸؛ مهندسین مشاور جاماب ۱۳۸۴). مشخصات بهره‌برداری از مخزن شامل حجم بهنجار، و حجم حداقل نیز بر اساس گزارشهای مهندسین مشاور انتخاب و به‌کار برده شده است (بانک طرحهای توسعه‌ی منابع آب، ۱۳۸۸؛ مهندسین مشاور جاماب ۱۳۸۴).

ارزیابی عملکرد سامانه‌ی حوضه‌ی آبخیز کرخه در شرایط نشان داده شده در شکل ۴، در سه حالت بررسی می‌گردند؛ اول، مقید نمودن سامانه به پیروی از منحنیهای فرمان حاصل از تحلیل منفک هر یک از آبگیر، که بطور جداگانه، و با توجه به اهداف و نیازهای مربوط به هر یک به صورت مجزا بهینه‌سازی شده، و منحنی فرمان مربوطه محاسبه شده است (این شرایط با عنوان *بهره‌برداری هماهنگ نشده‌ی* ۱ در شکلهای ۸ تا ۱۲ مشخص شده است)؛ دوم، مقید نمودن سامانه به پیروی از منحنیهای فرمان حاصله برای عملکرد هماهنگ سدهای کرخه و سیمره، در حالی که بهره‌برداری از سد سازبن، با توجه منحنی فرمان حاصله از تحلیل منفک، صورت می‌پذیرد (این شرایط مبین این واقعیت است که وقتی سدهای کرخه و سیمره ساخته شدند، چنانچه هماهنگ‌سازی در بهره‌برداری

از آنها صورت پذیرد، و منجر به منحنیهای فرمان هماهنگ گردد، در شرایط ساختن سد سازبن اگر هماهنگ‌سازی با سد جدید صورت نپذیرد، و سد سازبن طبق منحنی فرمان خود در حالت منفک عمل کند، عملکرد سامانه چگونه خواهد بود؛ این حالت با عنوان بهره‌برداری هماهنگ نشده‌ی ۲ در شکلهای ۸ تا ۱۲ مشخص شده است)؛ و سوم، هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از آبگیر بدون مقید نمودن آنها به پیروی از منحنیهای فرمان حاصل از تحلیل‌های قبلی، و آزاد گذاشتن شبیه برای تعیین مقدار بهینه‌ی حجم ذخیره آبگیر (این شرایط با عنوان بهره‌برداری هماهنگ شده در شکلهای ۸ تا ۱۲ مشخص شده‌اند) در شرایط توسعه نشان داده شده در شکل ۴. شایان ذکر است که در شرایط معمول منحنیهای فرمان مخازن، و قواعد بهره‌برداری از سدها و سازه‌های آبی، از تحلیل منفک آبگیر با توجه به اهداف مخزن و آوردها به مخزن صورت می‌پذیرد. در این تحقیق اثرات کاربرد این منحنیهای فرمان در عملکرد سامانه‌ی حوضه‌ی آبخیز، یعنی، وقتی که عملکرد مخزن تأثیرگذار و تأثیرپذیر از سامانه‌ی آبی می‌گردد بررسی می‌شود.

صحت‌سنجی عملکرد شبیه بهینه‌سازی

به منظور صحت‌سنجی شبیه چند-دوره‌ای ساخته شده در این تحقیق، و قبل از کاربرد آن در تحلیل و ارزیابی سامانه‌ی آبی سد کرخه و پایین‌دست آن (شکل ۴ بدون لحاظ مصارف بالادست و سدهای سیمره و کرخه)، عملکرد این شبیه با شبیه WEAP در سامانه‌ی آبی کرخه مقایسه می‌شود (موسسه‌ی زیست‌محیطی استکهلم، ۲۰۰۵). شبیه WEAP از رویکرد برنامه‌ریزی خطی برای بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی با لحاظ آبگیر سدها، رود، آب زیرزمینی، نقاط مصرف و آب بازگشتی، با لحاظ اولویتهای تامین آب از منابع و تخصیص آن به مصارف، استفاده می‌کند. معادلات استفاده شده در این شبیه نیز روابط تراز آبی (مشابه با معادلات ۲-۱ تا ۲-۵ بدون نمایه‌ی زمانی) می‌باشند. البته، مدل WEAP شبیه‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی را با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی تک- دوره‌ای، با لحاظ شرایط اولیه هر دوره‌ی زمانی، انجام می‌دهد. با توجه به کاربرد وسیع شبیه WEAP، و تایید صحت نتایج آن در مراجع متعدد، از نتایج تحلیل آن به‌عنوان معیار برای سنجش صحت شبیه ساخته شده در این تحقیق استفاده گردیده، و نیاز به صحت‌سنجی شبیه WEAP نمی‌باشد. برای اطلاع از جزئیات بیشتر شبیه WEAP، نحوه کار و ساختار آن، کاربردهای عملی آن و نحوه واسنجی آن به مرجع موسسه زیست‌محیطی استکهلم مراجعه کنید. هر دو شبیه در شرایط یکسان از منظر ترجیحات و قیود برای سامانه‌ی آبی کرخه، شامل سد کرخه و پایین‌دست آن در یک افق یک ساله تحلیل شده، و نتایج آن در شکلهای ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. در جدول ۳ ضرایب مبین ترجیحات برداشت آب از منابع مختلف، و تخصیص آن به متقاضیان بر اساس اولویت برداشت از منابع سطحی و تخصیص به نیاز شرب، تعیین شده‌اند. بر اساس این سیاست، آب سطحی نسبت به آب زیرزمینی اولویت داشته، و تخصیص ابتدا به نیاز شرب، سپس صنعت و کشاورزی و تولید کارمایه، و در نهایت به محیط‌زیست صورت می‌پذیرد. وزنها در این تحقیق به صورت مقادیر تقریبی در جدول ۳ در نظر گرفته شده‌اند. شایان ذکر است که WEAP یک مدل شبیه‌سازی بوده و از بهینه‌سازی تک-دوره‌ای برای بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی استفاده می‌کند. در شبیه‌سازی سامانه‌ی آبی کرخه، بهره‌برداری از سامانه مزبور، به‌نحوی که برداشت بیشتری از آب سطحی صورت پذیرد، اهمیت بیشتری را در مقایسه با آب زیرزمینی، به‌واسطه‌ی محدودیت و هزینه‌های برداشت، دارد؛ بنابراین، ضریب اهمیت برداشت از آب سطحی بیشتر از آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، تامین نیاز شرب در اولویت اول، نیاز صنعت، کشاورزی و کارمایه در اولویت دوم، نیاز زیست‌محیطی در اولویت سوم، و تامین آب انتقالی در اولویت چهارم قرار دارد. علت یکسان گرفتن اولویت تامین نیازهای صنعت، کشاورزی و کارمایه آزاد گذاشتن شبیه برای ایجاد تعامل یکسان بین تامین نیازهای مذکور و تأمین بهره‌برداری می‌باشد. این در حالی است که معمولا نیاز شرب با توجه به اهمیت خاص آن بایستی کاملا تامین گردد، و در تعامل قرار دادن آن با تامین دیگر نیازها مورد قبول نیست.

شبیه WEAP، به‌علت تحلیل تک-دوره‌ای، آورد ماه کنونی را در تحلیل در نظر گرفته، و آوردها در ماههای بعدی را در نظر نمی‌گیرد، تا این‌که شبیه در ماه مورد نظر قرار گیرد. بنابراین، شبیه رهاسازی کنونی از مخزن را به‌گونه‌ای تنظیم می‌نماید که اهداف ماه کنونی تامین شود، بدون آن‌که اثرات مثبت یا منفی این تصمیم بر بهره‌برداری در ماههای بعدی با توجه به آورد در آن ماهها در نظر گرفته شوند. از آن‌جا که اهداف تولید کارمایه و حفظ ارتفاع آب مخزن همسو می‌باشند، معمولاً شبیه WEAP به‌نحوی عمل می‌کند که ارتفاع آب مخزن تا حد ممکن بالا نگه داشته شده، و رهاسازی برای نیازهای پایین‌دست نیز صورت گیرد. اما، از آن‌جا که شبیه WEAP آوردهای ماههای بعدی و اثرات آنها را در نظر نمی‌گیرد، عملکردی محافظه‌کارانه خواهد داشت، که بعضاً بدون این‌که نیاز باشد، آب را در مخزن نگه می‌دارد، در حالی که با خروج بیشتر آب و انتقال بخشی از آن به دشت عباس، افت سطح آب رامی‌توان در حدی نگه داشت که اهداف تولید کارمایه و هدفهای دیگر تا انتهای سال به نحوی بهینه و کامل تامین شود، همان‌طور که شبیه چند-دوره‌ای آن را در مقایسه‌ها در شکلهای ۵ و ۶ نشان می‌دهد.

شبیه بهینه‌سازی با توجه به لحاظ افزایش آوردها از دی تا اردیبهشت در بهره‌برداری، آب بیشتری از سد کرخه به دشت عباس انتقال داده است، بدون آن‌که از کاهش آب مخزن نگران باشد، زیرا در ماههای بعد این کاهش جبران می‌شود. از آن‌جا که شبیه WEAP آوردهای آتی را در بهره‌برداری کنونی در نظر نمی‌گیرد، محافظه‌کارانه عمل نموده، بویژه که در ماههای مهر تا دی با کاهش آورد نیز مواجه بوده، و سعی در حفظ آب مخزن داشته است. بنابراین، در شبیه WEAP نیاز آبی دشت عباس تامین نشده، که این موضع در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۶ تولید کارمایه بیشتر به‌وسیله‌ی شبیه بهینه‌سازی در مقایسه با شبیه WEAP در شرایط یکسان، با توجه به لحاظ شرایط آوردها در دوره‌های آتی، در شبیه بهینه‌سازی نمایش داده شده است. با توجه به این‌که شبیه بهینه‌سازی چند-دوره‌ای بوده، و از مقدار آوردها تا انتهای دوران برنامه‌ریزی اطلاع دارد، میزان رهاسازی از مخزن و حفظ ارتفاع آب آن را به‌نحوی در تعامل با دیگر اهداف مخزن تنظیم نموده است که حداکثر تولید حاصل گردد. این در حالی است که شبیه تک-دوره‌ای WEAP چون مقدار آوردهای آتی را در نظر نمی‌گیرد با محافظه‌کاری بیشتری آب را از مخزن رها نموده و بنابراین با ظرفیت کمتری اهداف مخزن را تامین می‌کند. بنابراین شبیه تک-دوره‌ای WEAP از منظر تامین آب و اهداف بهره‌برداری از مخزن با قابلیت کمتری در مقایسه با شبیه بهینه‌سازی چند-دوره ای، در شرایط مساوی از منظر آوردها و قیود مسأله، عمل نموده است.

شکلهای ۵ و ۶ نشان می‌دهند که بهره‌برداری با استفاده از شبیه‌سازی چند-دوره‌ای امکان تامین بهتر نیازهای آبی را در مقایسه با یک شبیه تک-دوره‌ای، مانند WEAP، فراهم می‌کند؛ علت آن نیز لحاظ اثرات بهره‌برداری از مخزن در دوره‌ی کنونی بر مقدار ذخیره مخزن و رهاسازی از مخزن در دوره‌های بعدی می‌باشد. با توجه به این‌که در شبیه چند-دوره‌ای، شبیه از میزان آورد تا انتهای شهریور پیش‌آگهی دارد، ذخیره‌ی آب را در مخزن به گونه‌ای تنظیم می‌نماید که اهداف مختلف بهره‌برداری از مخزن، به صورت بهینه، تا حد ممکن تامین گردد. این در حالی است که در یک شبیه تک-دوره‌ای، مانند؛ WEAP، شبیه با توجه به شرایط ماه کنونی بهره‌برداری از مخزن را به هدف تامین اهداف مختلف بهینه می‌نماید، بدون این‌که تأثیر شرایط انتهایی مخزن در ماه کنونی بر بهره‌برداری در ماههای بعدی در نظر گرفته شود. بنابراین، شبیه WEAP به منظور تامین کارمایه سعی در حفظ و ذخیره آب در مخزن می‌نماید، و بدین ترتیب تأمین نیاز دشت‌عباس در شبیه WEAP در مقایسه با شبیه چند-دوره‌ای خوب صورت نگرفته است. بنابراین، همان‌طور که انتظار می‌رفت، نحوه‌ی تامین آب در شبیه چند-دوره‌ای بهتر از یک شبیه تک-دوره‌ای صورت گرفته، و این موضوع در شکلهای ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

نتایج و بحث در زمینه‌ی کاربرد شبیه بهینه‌سازی در تحلیل سامانه‌ی آبی کرخه

در ادامه ارزیابی تأثیر هماهنگ‌سازی بهره‌برداری توامان از آبگیر سدهای کرخه، سیمره و سازبن در مراحل مختلف ساخت، و بهره‌برداری این سدها صورت گرفته و نتایج آن ارائه می‌گردد. در این ارزیابی، تأثیر به‌روز رسانی و عدم به‌روزرسانی منحنی فرمان آبگیر در مراحل مختلف بهره‌برداری از آبگیر، بر تامین نیازهای آبی در یک دوره‌ی ۲۰ ساله نیز ارزیابی می‌گردد. بطور معمول، قوانین بهره‌برداری از مخزن سد با توجه به اهداف مختلف بهره‌برداری از سد مربوطه، و حداکثر لحاظ اثرات برداشت بالادست در کاهش آب ورودی به مخزن، در حالت منفک صورت می‌گیرد. منحنی فرمان به بهره‌بردار کمک می‌کند که از مخزن سد در جهت تامین اهداف بهره‌برداری استفاده کند. منحنی فرمان در قالب حجم و یا ارتفاع آب مخزن در هر ماه بیان می‌شود. بدین ترتیب، بهره‌بردار در هر ماه با رهاسازی آب از مخزن و حفظ حجم و یا ارتفاع آب مخزن در موقعیت مشخص شده به‌وسیله‌ی منحنی فرمان از عملکرد مناسب سد مطمئن می‌گردد. ساخت سدهای در بالادست و پایین‌دست یک طرح، ساختار سامانه‌ی آبی را تغییر داده، و به همین علت، وضعیت بهینه بهره‌برداری در شرایط جدید الزاماً با شرایط قبل از ساختن و بهره‌برداری یکسان نخواهد بود. در این قسمت، میزان تأثیر لحاظ این هماهنگ‌سازی و به روزرسانی در بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه بررسی می‌گردد.

شکل ۷، گروه زمانی آوردها را برای بخشهای مختلف سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه در شرایط ساخت و بهره‌برداری سدهای کرخه، سیمره، سازبن و طرحهای آبیاری گلوم‌بحری، چمچمال و تپه‌یزدان نشان می‌دهد. گروه زمانی مذکور آمار مشاهداتی آورد در سامانه‌ی آبی کرخه برای سالهای ۱۳۶۰ تا ۱۳۸۰ است که شامل سالهای مختلف کم‌آب، معمولی و پرآب می‌باشد؛ بنابراین، امکان ارزیابی عملکرد سامانه‌ی آبی کرخه در یک افق بلند مدت ۲۰ ساله، که در آن شرایط مختلفی از نظر کم‌آبی رخ می‌دهد، فراهم می‌گردد. طرحهای آبیاری نام برده تحت عنوان نیاز آبی بالادست کرخه در شبیه‌سازی لحاظ گردیده، و در طرح‌واره‌ی سامانه‌ی کرخه نشان داده شده‌اند.

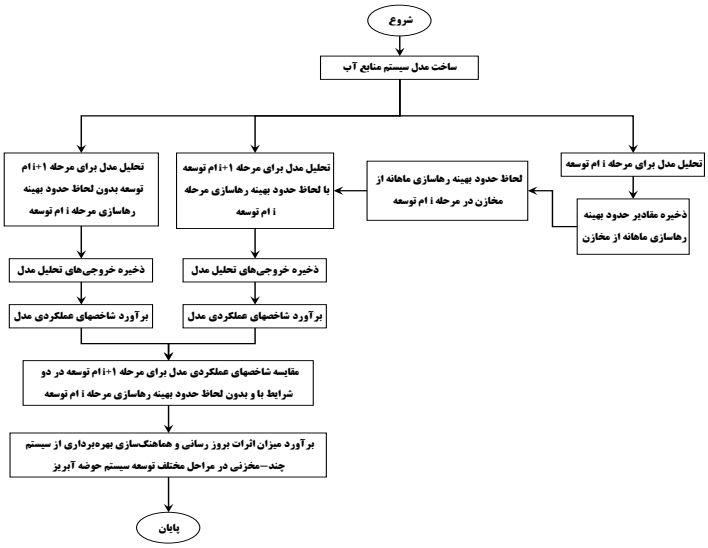
در منحنی فرمان برای سدها، در هر یک از تحلیلها، میانگین بلند مدت حجم ذخیره در ماههای مختلف سال، در نظر گرفته شده و در شبیه‌ها استفاده می‌شود؛ بنابراین، تمامی منحنیهای فرمان از یک تحلیل بلند مدت به‌وسیله‌ی رویکرد بهینه‌سازی حاصل می‌شوند. اما تفاوت آنها در میزان هماهنگی عملکرد توامان آبگیر سدها در سامانه‌ی آبی کرخه می‌باشد. نتایج تحلیلها نشان می‌دهند که از دید تامین نیازهای آبی، بویژه از منظر شاخصهای بلند مدت، که خلاصه کننده‌ی عدم‌قطعیت بهره‌برداری (نسبت تعداد دفعاتی که تقاضا تامین شده به کل بازه‌های افق برنامه‌ریزی) نیز می‌باشند، در سامانه‌ی آبی کرخه، چنانچه، منحنیهای فرمان به‌هنگام نشوند، قابلیت اطمینان تامین نیازهای آبی پایین‌دست کرخه ۵۳٪، و نیازهای بالادست کرخه ۸۵٪ می‌باشد (شکل ۸). شکل ۸ نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان تامین نیازهای آبی در پایین‌دست کرخه، وقتی هماهنگ‌سازی در بهره‌برداری از سدها صورت پذیرد، ۳۰٪ افزایش یافته و ۸۰٪ می‌شود، و بقیه نیازها نیز بطور کامل تامین می‌شوند.

شکل ۹ نشان می‌دهد که بزرگی شکستها (شاخص آسیب‌پذیری) در تامین نیازهای آبی، وقتی بدون هماهنگ‌سازی و به‌روزرسانی منحنیهای فرمان بهره‌برداری صورت پذیرد، ۲/۵ برابر بزرگی شکستها در حالت هماهنگ شده، در یک تحلیل بلند مدت سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه می‌باشد. بنابراین، ملاحظه می‌گردد تا چه حد موضوع هماهنگ‌سازی بهره‌برداری توامان از سامانه‌ی آبی و به به‌روزرسانی منحنیهای فرمان سدها، می‌تواند بر تامین نیازهای آبی و عملکرد سامانه‌ی آبی تأثیرگذار باشد.

با توجه به شکلهای ۸ تا ۱۲، ملاحظه می‌گردد که نتایج تحلیل نوع هماهنگ نشده‌ی ۲ بین نتایج تحلیل هماهنگ نشده۱ و هماهنگ شده را دارد. این نکته مبین این موضوع است که با افزایش درجه‌ی هماهنگی بهره‌برداری و

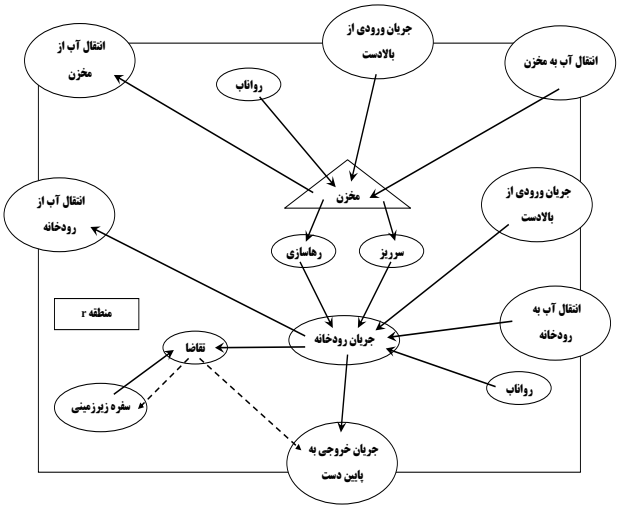
به‌روزرسانی منحنیهای فرمان، عملکرد سامانه‌ی آبی بهتر، و به مقدار بهینه نزدیکتر می‌شود. منتخب منحنیهای فرمان بهینه سدها در هر یک از تحلیلها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در شرایط هماهنگ نشده، بهره‌برداری از مخزن سد کرخه بدون لحاظ تأثیر بهره‌برداری از آبگیر بالادست صورت گرفته، و جریان ورودی رود را به صورت تنظیم نشده در نظر می‌گیرد؛ بنابراین، منحنی فرمان آن با توجه به تغییرات فصلی دامنه‌ی تغییر زیادی دارد (شکل ۱۰ نمودارهای هماهنگ نشده ۱ و ۲)؛ این در حالی است که در شرایط هماهنگ‌شده، بهره‌برداری از سد کرخه با توجه به جریان تنظیم شده بر حسب نیازهای پایین‌دست کرخه وارد سد شده، و ذخیره‌ی آب در مخزن سد نیز دستخوش تغییرات کمتری قرار می‌گیرد (شکل ۱۰ نمودار هماهنگ شده). شایان ذکر است برای به‌دست آوردن منحنیهای فرمان مخازن در سامانه‌ی آبی، بهره‌برداری بلند مدت از آنها را در شرایط تک مخزنی، دو مخزنی و سه مخزنی، بدون مقید نمودن حجم آخر ماه مخازن، به یک مقدار پیش‌فرض بهینه گردیده و میانگین آن برای هر ماه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شیوه‌ی محاسبه‌ی منحنی فرمان، یعنی میانگین ۲۰ ساله‌ی حجم ذخیره‌ی مخزن در هر ماه، با توجه به لحاظ شرایط مختلف آبشناسی، این مزیت را دارد که محافظه‌کارانه و یا خوش‌بینانه نیست، زیرا تنها با توجه به کم‌آبی و یا پرآبی به‌دست نیامده، بلکه هر دوی آنها را در نظر گرفته است.

شکلهای ۱۱و ۱۲ نشان می‌دهند که از منظر تولید کارمایه نیز شبیهی که هماهنگ‌سازی بهره‌برداری و به‌روزرسانی منحنیهای فرمان را در شرایط جدید سامانه‌ی آبی در نظر می‌گیرد (تحلیل هماهنگ‌شده)، به مراتب عملکرد بهتر و مطمئنتری را از نظر تولید کارمایه، بویژه در یک افق بلند مدت، خواهد داشت؛ بدین ترتیب، ملاحظه می‌گردد که هماهنگ‌سازی بهره‌برداری و به روزرسانی قواعد بهره‌برداری از آبگیر می‌تواند تا ۲ برابر تامین نیازها و تولید کارمایه را در حوضه‌ی آبخیز، در مقایسه با حالتی که این به‌روزرسانی صورت نگیرد، افزایش دهد. پیامد دیگر این تحلیل آن است که عدم هماهنگ‌سازی بهره‌برداری و به‌روزرسانی قواعد بهره‌برداری از آبگیر سدها در مراحل مختلف توسعه‌ی حوضه‌ی آبخیز بیش از نیمی (تا ۶۰٪ طبق شکل ۹) از توانهای بهره‌برداری بهینه از سامانه‌ی آبی را غیرقابل استفاده می‌نماید.

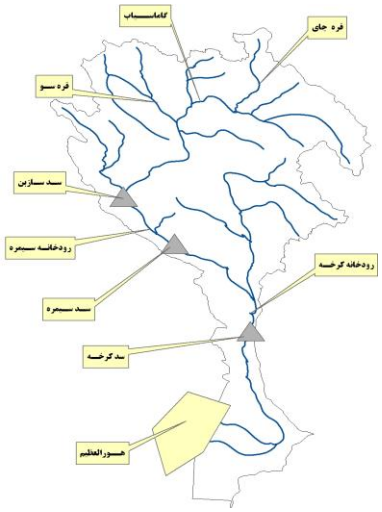


شکل ۱: نمودار گردشی[1] تعیین میزان اثرات به‌روزرسانی و هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز در مراحل مختلف توسعه.

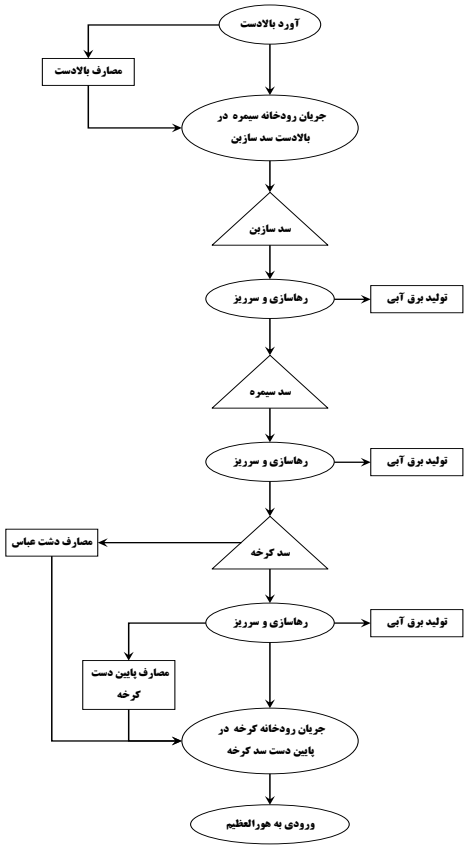
[1]- flow chart



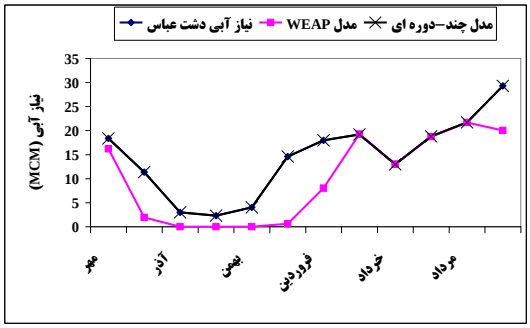
شکل ۲: طرح واره سامانه‌ی منابع آب برای یک بخش از حوضه‌ی آبخیز



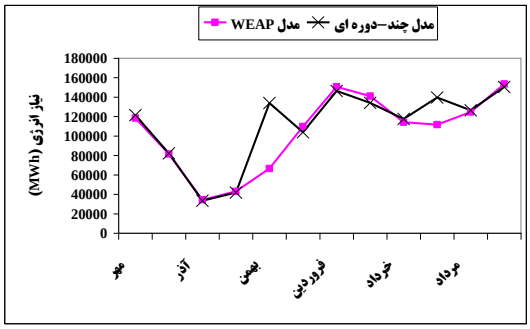
شکل ۳: نقشه‌ی حوضه‌ی آبخیز کرخه و سامانه‌ی آبی آن



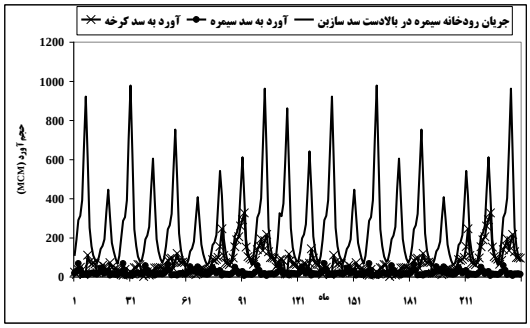
شکل ۴: طرح واره‌ی سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه.



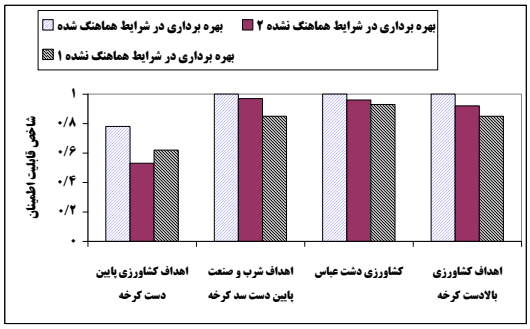
شکل ۵: تامین نیاز آبی کشاورزی دشت‌عباس برای شبیه WEAP و شبیه چند–دوره‌ای.



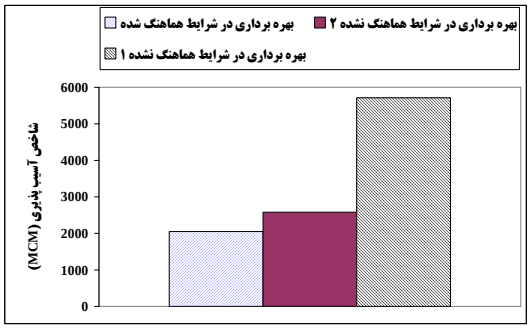
شکل ۶: مقایسه تولید کارمایه‌ی برق‌آبی به‌وسیله‌ی سد کرخه برای شبیه WEAP و شبیه چند–دوره‌ای.



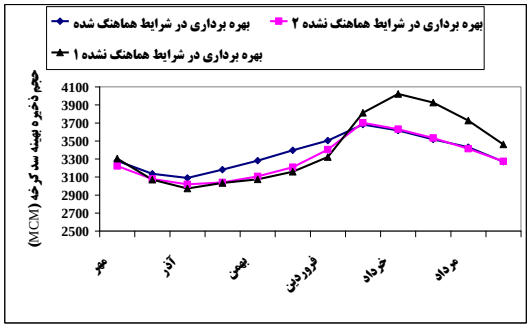
شکل ۷: آوردهای ۲۰ ساله در سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه.



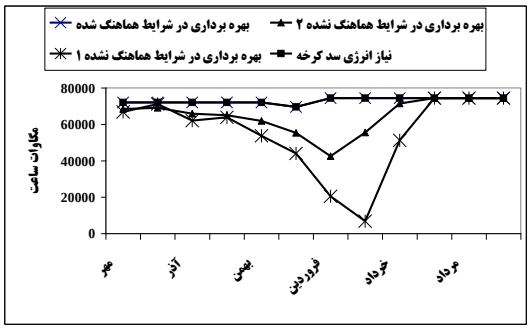
شکل ۸: شاخص قابلیت اطمینان بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه.



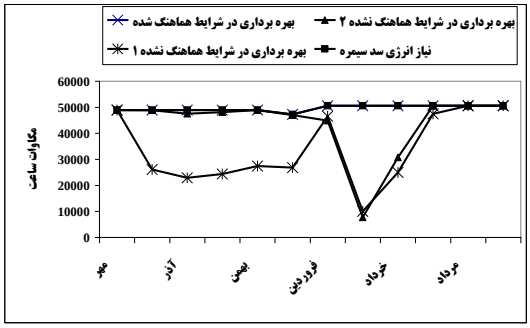
شکل ۹: شاخص آسیب‌پذیری بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه در شرایط مختلف هماهنگ‌شده و هماهنگ نشده.



شکل ۱۰: منحنی فرمان بهره‌برداری از سد کرخه در شرایط مختلف هماهنگ‌شده و هماهنگ نشده.



شکل ۱۱: تولید کارمایه‌ی سد کرخه در شرایط مختلف هماهنگ‌شده و هماهنگ نشده.



شکل ۱۲: تولید کارمایه‌ی سد سیمره در شرایط مختلف هماهنگ‌شده و هماهنگ نشده.

جدول ۱: مشخصات سامانه‌ی حوضه‌ی آبخیز با توجه به شکل طرح واره‌ی ۴ (بانک طرح‌های توسعه‌ی منابع آب ۱۳۸۸، مهندسین مشاور جاماب ۱۳۸۴).

نیاز شرب پایین دست سد کرخه	نیاز انرژی سد سازبن	نیاز انرژی سد سیمره	نیاز انرژی سد کرخه	نیاز آبی کشاورزی بالا دست کرخه	نیاز آبی کشاورزی دشت عباس	نیاز آبی کشاورزی پایین دست کرخه
۱/۹	۴۷۰۱۴	۴۸۹۱۲	۷۲۰۰۰	۱۶/۱۸	۱۸/۳۵	۴۷۱/۱
۱/۷	۴۷۰۱۴	۴۸۹۱۲	۷۲۰۰۰	۱/۹۲	۱۱/۳۴	۳۲۸/۸
۱/۴	۴۷۰۱۴	۴۸۹۱۲	۷۲۰۰۰	۰/۰۰	۳	۱۳۴/۶۸
۱/۴	۴۷۰۱۴	۴۸۹۱۲	۷۲۰۰۰	۰/۰۰	۲/۳۱	۱۶۳/۴
۱/۴	۴۷۰۱۴	۴۸۹۱۲	۷۲۰۰۰	۰/۰۰	۴/۰۱	۲۴۹/۴۲
۱/۵	۴۵۴۴۷	۴۷۲۸۲	۶۹۶۰۰	۰/۵۲	۱۴/۵۹	۴۰۲/۶۶
۱/۷	۴۸۵۸۱	۵۰۵۴۳	۷۴۴۰۰	۷/۵۰	۱۷/۹۸	۵۳۳/۷۸
۲/۰	۴۸۵۸۱	۵۰۵۴۳	۷۴۴۰۰	۲۰/۳۰	۱۹/۱۹	۴۹۲/۶۴
۲/۳	۴۸۵۸۱	۵۰۵۴۳	۷۴۴۰۰	۲۸/۸۷	۱۲/۹۷	۴۰۲/۶۳
۲/۶	۴۸۵۸۱	۵۰۵۴۳	۷۴۴۰۰	۲۴/۶۹	۱۸/۷۹	۳۹۶/۲۸
۲/۷	۴۸۵۸۱	۵۰۵۴۳	۷۴۴۰۰	۲۱/۶۷	۲۱/۶۹	۴۵۳/۰۷
۲/۳	۴۸۵۸۱	۵۰۵۴۳	۷۴۴۰۰	۱۹/۰۶	۲۹/۲۷	۵۷۴/۴۶

جدول ۲: مشخصات سدهای سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه (بانک طرح‌های توسعه‌ی منابع آب ۱۳۸۸، مهندسین مشاور جاماب ۱۳۸۴).

راندمان تولید انرژی	حداقل حجم بهره برداری از مخزن (MCM)	حجم نرمال مخزن (MCM)	نام سد
۰/۸	۱۴۴۳	۵۳۴۷	کرخه
۰/۹۵	۲۲۷۵	۳۲۱۵	سیمره
۰/۹۴	۶۵۸	۱۳۰۹/۳۹	سازبن

جدول ۳: ضرایب اهمیت متغیرهای مختلف تشکیل دهنده تابع هدف.

ضریب اهمیت	متغیر تصمیم	ضریب اهمیت	متغیر تصمیم
۱۰۰	تامین نیاز شرب	۸۰	تخصیص از سفره زیرزمینی به نیاز کشاورزی
۹۰	تامین نیاز صنعت	۹۰	تخصیص از رودخانه به نیاز کشاورزی
۹۰	تامین نیاز کشاورزی	۱۰۰	تخصیص از رودخانه به نیاز شرب
۹۰	تامین نیاز انرژی	۱۰۰	تخصیص از رودخانه به نیاز صنعت
۷۵	تامین نیاز زیست محیطی	۹۰	تامین حجم مطلوب آخر ماه مخازن
		۵۰	تامین آب انتقالی از مخزن سد

جمع‌بندی

در تحقیق حاضر به این سؤال مهم پاسخ داده شد که عدم هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی در مراحل مختلف توسعه‌ی حوضه‌ی آبخیز تا چه حد می‌تواند بر استفاده از توان‌های سامانه‌ی آبی برای تامین نیازها، بویژه در یک افق بلند مدت، تأثیرگذار باشد. برای این منظور، یک شبیه بهینه‌سازی بلند مدت چند-دوره‌ای ساخته شد که بتواند تأثیر بهره‌برداری کنونی را از مخازن بر ذخیره و رهاسازی آب در دوره‌های بعدی، و تامین نیازها، در نظر بگیرد. به منظور صحت‌سنجی، عملکرد این شبیه با شبیه WEAP برای سامانه‌ی آبی سد کرخه و پایین‌دست آن مقایسه گردید، و مشخص شد که شبیه چند-دوره‌ای بهتر

پاسخگوی نیازهای آبی پایین‌دست سد کرخه می‌باشد. این شبیه در سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه در شرایط توسعه پس از ساختن سد کرخه تا سد سازبن به‌کار گرفته شد. تحلیل بلند مدت سامانه‌ی مورد نظر برای یک دوره‌ی ۲۰ ساله نشان می‌دهد که عدم هماهنگ‌سازی بهره‌برداری توامان از سامانه‌ی مخازن، و عدم به‌روزرسانی قواعد بهره‌برداری از آنها در شرایط مورد بررسی، ۶۰٪ از توانهای سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز را برای پاسخ‌گویی به نیازهای آبی بلااستفاده می‌گذارد. علاوه بر این، ۵۰٪ قابلیت اطمینان بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه، از دید تامین نیازهای آبی بر اثر عدم هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از سه مخزن کرخه، سیمره و سازبن کاهش می‌یابد.

با توجه به این‌که در حوضه‌ی آبخیز کرخه سدها و طرحهای زیادی در آینده ساخته خواهند شد، عدم توجه به موضوع هماهنگ‌سازی بهره‌برداری از این سامانه در مراحل مختلف توسعه می‌تواند اثرات منفی معنی‌داری بر کارایی تخصیص آب در حوضه، با توجه به پیچیدگی اندرکنشها، داشته باشد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌گردد از این شبیه برای بررسی تأثیر ساخته شدن بقیه‌ی سدها (۳۵ سد دیگر) بر عملکرد سامانه‌ی حوضه‌ی آبخیز کرخه استفاده شود. علاوه بر این، سؤالات مهم دیگری نیز در بهره‌برداری از سامانه‌ی آبی حوضه‌ی آبخیز کرخه قابل طرح می‌باشند، از قبیل:

- یکی از موضوعات مهم در توسعه‌ی منابع آب، حد بالای تامین آب یک سامانه‌ی آبی می‌باشد، یعنی، حوضه‌ی آبخیز کرخه با توجه به تمام طرحهایی که در آن ساخته خواهند شد و طرحهای انتقال آب، حداکثر توانایی تامین چه میزان آب را برای متقاضیان خواهد داشت؟
- علاوه بر این، در شرایط مختلف توسعه‌ی حوضه‌ی آبخیز کرخه، زمان رسیدن به این حد بالا در تامین آب چه وقت خواهد بود؟ بهبود بازده‌ها در حوضه‌ی آبخیز تا چه میزان در به تعویق افتادن این زمان موثر می‌باشد؟

پاسخ به پرسشهای مذکور نیز با کاربرد شبیه ساخته شده در این تحقیق قابل بررسی می‌باشد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌گردد که این موضوعهای مهم مدیریت منابع آب نیز با کاربرد شبیه مزبور بررسی گردند.

قدردانی و تشکر

مولفین از حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرقدس در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

۱. بانک طرح‌های توسعه‌ی منابع آب، ۱۳۸۸. شرکت مدیریت منابع آب ایران. دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا.

۲. مهندسین مشاور جاماب، ۱۳۸۴. مطالعات برنامه جامع سازگاری با اقلیم (تعادل بخشی بین منابع و مصارف آب در حوضه‌های آبخیز) حوضه‌ی آبخیز کرخه. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. دفتر امور آب کشاورزی و منابع طبیعی.

3. Karamouz, M., M. Akhbari, and A. Moridi. 2010. Resolving disputes over reservoir-river operation: A case study. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000292
4. Kerachian, R., and M. Karamouz. 2006. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river systems. Adv. Water Resour. doi:10.1016/j.advwatres.2006.07.005.
5. Krol, M., and A. Bronstert. 2007. Regional integrated modeling of climate change impacts on natural resources and resource usage in semi-arid Northeast Brazil. Environ. Model. Software. 22: 259-268.
6. Labadie, J.W. 2004. Optimal operation of multi-reservoir systems: State-of-the-art review. J. Water Resour. Plan Manage. ASCE. Vol. 130. No. 2.
7. Letcher, R.A., B.F.W. Croke, A.J. Jakeman, and W.S. Merritt. 2006. An integrated modeling toolbox for water resources assessment and management in highland catchments: Model description. Agr. Sys. 89: 106-131.
8. Loucks, D.P., and E. van beek. 2005. Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications. 1st edn. UNESCO.

9. Perera, B.J.C., B. James, and M.D.U. Kularathna. 2005. Computer software tool REALM for sustainable water allocation and management. J. Environ. Manage. Elsevier. Vol. 77.
10. Rajasekaram, V., and K.D.W. Nandalal. 2005. Decision support system for reservoir water management conflict resolution. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE. Vol. 131. No. 6.
11. Rosenthal, R.E. 2006. GAMS – A user's guide. GAMS development corporation, Washington DC, USA.
12. Stockholm Environment Institute. 2005. WEAP21: Water evaluation and planning system. 11 Arlington Street. Boston. MA 02116. USA.