مهندسی عمران شریف
دوره‌ی ۲-۲۷، شماره‌ی ۱، ص. ۹۵-۱۰۵

ساخت و کاربرد مدل تخصیص بلندمدت آب در ارزیابی اثرات سیاست‌های آبی

رضا اردکانیان (استادیار)
اکبر کریمی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این تحقیق ضمن ارزیابی اثرات بلندمدت سیاست‌های آبی بر منافع ذی‌نفعان، ساخت و کاربرد یک مدل تخصیص بهینه‌ی آب که تأثیر متقابل عرضه و تقاضای آب بخش‌های صنعت و کشاورزی را در نظر می‌گیرد، معرفی می‌شود. یکی از موارد مورد توجه سیاست‌گزاران بخش آب، ارزیابی و کاهش اثرات بلندمدت سیاست‌ها بر شرایط حوضه‌ی آبریز و بیشینه‌سازی منافع ذی‌نفعان در صورت کاربرد یک سیاست خاص است. برای بررسی این موضوع، مدلی مورد نیاز است که بتواند با در نظر گرفتنِ به‌هم‌پیوستگیِ بخش عرضه و تقاضای آب، تأثیر بلندمدت عملکرد یک بخش بر بخش‌های دیگر را نشان دهد. تحقیقاتِ صورت‌گرفته در این زمینه معمولاً به مدل‌سازی‌های کوتاه‌مدت در حد یک سال منحصر شده است، لذا فقط برای بررسی کوتاه‌مدت سیاست‌ها می‌توان از آن بهره جست. در این تحقیق مسئله‌ی تخصیص آب با هدف بیشینه‌سازی درآمد خالص بخش صنعت از تولید صنعتی، درآمد خالص بخش کشاورزی از تولید کشاورزی، درآمد خالص تخصیص‌دهنده‌ی آب، بیشینه‌سازی اشتغال در بخش‌های صنعت و کشاورزی (پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی) به‌همراه تأمین قید کم‌ترین جریان زیست‌محیطی رودخانه حل می‌شود. مدل مقدار بهینه‌ی رشد سطح زیرکشت، تولید کشاورزی، اشتغال در بخش کشاورزی، تولید صنعتی، اشتغال در بخش صنعت، مقدار تخصیص به هریک از بخش‌های متقاضی آب و مقدار تخصیص به تقاضای زیست‌محیطی رودخانه را تعیین می‌کند. در این تحقیق کاربرد مدل در ارزیابی دو سیاست متفاوت برای یک حوضه‌ی آبریز فرضی در افق ۳۰ سال نشان داده می‌شود.

واژگان کلیدی: منابع آب، تقاضاهای آبی، پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی، عرضه و تقاضا، بهینه‌سازی.

ardakanian@civil.sharif.edu
ak_karimi@civil.sharif.edu

۱. مقدمه

تخصیص منابع آب بخش مهمی از فرایند مدیریت به‌هم‌پیوسته‌ی منابع آب در سطح حوضه‌ی آبریز است که بر عرضه و تقاضای آب تأثیر قابل ملاحظه‌یی دارد. محدودیت منابع آب و رشد تقاضاهای آبی سیاست‌گزاران بخش آب را از مدیریت عرضه‌محور به سمت مدیریت تقاضامحورِ حوضه‌ی آبریز سوق داده است که اصلی‌ترین مشخصه‌ی مدیریت به‌هم‌پیوسته منابع آب است.[۱] یکی از فعالیت‌های مهم برای تحقق بخشیدن به مدیریت به‌هم‌پیوسته‌ی منابع آب، که در Agenda۲۱ مورد توجه قرارگرفته است، بهینه‌سازی تخصیص منابع آب با درنظرگرفتن قیود فیزیکی و اقتصادی ـ اجتماعی است. پایداری توسعه‌ی اقتصادی و سلامت زیست‌محیطی به تخصیص منابع آب وابسته است.[۲] عمده‌ترین محدودیت رویکرد عرضه‌محور به تخصیص منابع آب غیرکشسان در نظرگرفتن تقاضاهای آبی نسبت به عرضه و قیمت آب در زمان است. این موضوع قابلیت اعتماد سیاست‌ها و تصمیم‌ها را، به‌ویژه در بلندمدت، با مشکل مواجه می‌کند.[۳] بدین‌ترتیب نقطه‌ی اشتراک مدیریت به‌هم‌پیوسته و تخصیص منابع آب، به‌وجود آوردن تعادل پایدار بین عرضه و تقاضای آب است. البته این به‌هم‌پیوستگی عرصه‌های مختلف فیزیکی ـ اقتصادی ـ اجتماعی را دربرمی‌گیرد.[۴] در این تحقیق یک مدل جدید تخصیص بلندمدت منابع آب با درنظرگرفتن توأمان پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی و اندرکنش عرضه و تقاضای آب ساخته می‌شود. از این مدل می‌توان برای ارزیابی اثرات بلندمدت سیاست‌ها و طرح‌های آبی مختلف تأثیرگذار بر تخصیص آب و منافع ذی‌نفعان در سطح حوضه‌ی آبریز و اولویت‌بندی سیاست‌ها و طرح‌های آبی استفاده کرد.

۲. مروری بر ادبیات موضوع

در سال ۲۰۰۰، تخصیص منابع آب در حوضه‌ی آبریز مایپو در کشور شیلی، با هدف بیشینه‌سازی سود بهره‌برداری از سیستم آبی و تولید محصولات کشاورزی و با در نظرگرفتن به‌هم‌پیوستگیِ خصوصیات هیدرولوژیکی ـ اقتصادی ـ کشاورزی در

تاریخ: دریافت ۱۳۸۷/۱۰/۲۳، اصلاحیه ۱۳۸۸/۶/۲۵، پذیرش ۱۳۸۸/۱۰/۱۴.

یک افق یک‌ساله بهینه شد.[۵] در این مدل‌سازی تقاضای آب کشاورزی با منظور داشتن بیلان آبی منطقه ریشه تدقیق‌شده و در مدل استفاده می‌شود.

در سال ۲۰۰۳، تخصیص منابع آب در حوضه‌ی آبریز دریای آرال با ملحوظ داشتن به‌هم‌پیوستگیِ خصوصیات اقتصادی ـ هیدرولوژیکی ـ کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز، با هدف بیشینه‌سازی سود بهره‌برداری از سیستم آبی و تولید محصول کشاورزی تحت قید تأمین کم‌ترین نیاز آبی دریای آرال، در افق یک‌ساله انجام شد.[۶] در این مدل‌سازی تأثیر بیلان آبی منطقه ریشه در تدقیق تقاضای آب کشاورزی در نظر گرفته شده است.

در سال ۲۰۰۶، با مدل‌سازی سالانه‌ی تخصیص منابع آب در حوضه‌ی آبریز ریوگرانده، تخصیص منابع آب به تقاضاهای کشاورزی، شرب و صنعت در بین ایالت‌های کلورادو و نیومکزیکو، با هدف بیشینه‌سازی سود تأمین‌کننده‌ی آب بهینه شد. در این مدل‌سازی قیود نهادی و زیست‌محیطی مربوط به جریان رودخانه بین ایالت‌ها و دو کشور آمریکا و مکزیک، با توجه به هزینه‌ی عدم تأمین قیود در نظر گرفته شده است. در این مدل، تخصیص آب به‌گونه‌یی صورت می‌گیرد که سود حاشیه‌یی حاصل از تخصیص آب به متقاضیان با یکدیگر مساوی شود.[۷]

در سال ۲۰۰۶، تخصیص منابع آب در حوضه‌ی آبریز رودخانه اورنج ـ که بین کشورهای بوتسوانا، نامیبیا، لسوتو و آفریقای جنوبی مشترک است ـ در یک افق یک‌ساله و با هدف بیشینه‌سازی درآمد ناخالص داخلی هریک از کشورها بهینه‌سازی شد. در این مدل‌سازی ارزش آب در قالب تولید ناخالص داخلی بیشینه می‌شود.[۸]

در سال ۲۰۰۵، با استفاده از مدل‌سازی اقتصاد خرد و اتصال آن به اقتصاد کلان ارزش آب در بخش کشاورزی در یک افق یک ساله مورد بررسی قرار گرفت.[۹] در این مدل‌سازی مقدار آب تأمین شده یکی از نهاده‌های تابع تولید کشاورزی است که با توجه به سود حاصل از تولید بهینه می‌شود. در این مدل‌سازی تأثیر مقدار تأمین آب در تولید، اشتغال نیروی کار و سود بخش کشاورزی از رهگذر اقتصاد خرد و کلان بررسی شده است.

در برخی از تحقیقات اخیر، رضایت ذی‌نفعان تخصیص آب در قالب تابع مطلوبیت در مدل تخصیص آب لحاظ و بیشینه می‌شود. تابع مطلوبیت در نظر گرفته‌شده در این تحقیقات به‌صورت ضمنی مبین منافع ذی‌نفعان است اما، این توابع معمولاً متأثر از نظرات شخصی و ایستا هستند. به‌عبارت دیگر، تعاملی بین تابع مطلوبیت ذی‌نفعان و مقدار تقاضای آب وجود ندارد، در حالی که در واقعیت بین تأمین و تقاضای آب اندرکنش وجود دارد.[۱۰-۱۲]

در تحقیقات مرورشده محدودیت‌های عمده‌یی از منظر تحلیل بلندمدت تخصیص آب و اثرات آن بر منافع ذی‌نفعان و مقدار تقاضای آبی وجود دارد. تقاضاهای آبی در این تحقیقات در بازه تحلیل دارای مقدار ثابتی است و از تأمین آب تأثیر نمی‌پذیرد. یکی از علل عدم رعایت تغییرات تقاضای آب (کشسانی تقاضای آب نسبت به تأمین) کوتاه‌مدت بودن تحلیل است. در کوتاه‌مدت (یک‌سال) تعامل قابل ملاحظه‌یی بین عرضه و تقاضای آب وجود ندارد، در حالی که در بلندمدت این اندرکنش‌ها می‌تواند تغییرات قابل ملاحظه‌یی در الگوی زمانی و مکانی تقاضاهای آبی به وجود آورد. این تغییرات به‌نوبه‌ی خود اثرات قابل ملاحظه‌یی بر تخصیص آب، قابلیت تأمین تقاضاها و قابلیت اعتماد سیاست‌ها خواهد داشت. علت دیگر، تشخیص و مدل‌سازی عوامل تأثیرگذار بر تأمین و تقاضای آب است. به‌طور معمول عوامل هیدرولوژیکی و اقتصادی ـ اجتماعی بر عملکرد ذی‌نفعان تأمین و تقاضای آب عمده‌ترین تأثیر را دارند. از طرفی مقیاس عملکرد این عوامل با یکدیگر متفاوت است، یعنی معمولاً تغییرات بخش هیدرولوژیکی در تحلیل‌ها به‌صورت ماهانه در نظر گرفته می‌شود، در حالی که مقیاس تغییرات در پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی مضربی از سال است. مدل‌سازی این عوامل در یک چارچوب یکپارچه[۱] از منظر حل عددی به‌واسطه‌ی بزرگ‌شدن مدل ریاضی با محدودیت مواجه است.

در این تحقیق یک مدل تخصیص آبی ساخته می‌شود که در یک چارچوب یکپارچه تعامل عرضه و تقاضای آب را با توجه به عوامل هیدرولوژیکی و اقتصادی ـ اجتماعی در نظر می‌گیرد. از نتایج این مدل که در مقیاس سالانه و در افق بلندمدت (سی‌ساله) تخصیص آب به تقاضاهای آبی را بهینه می‌کند می‌توان به‌عنوان هدف برای مدل‌های میان‌مدت و کوتاه‌مدت ماهانه مورد استفاده قرار گیرد. بدین‌ترتیب امکان ارزیابی اثراتِ بلندمدتِ تخصیصِ منابع آب بر توزیع منابع آب، تقاضاهای آبی و منافع ذی‌نفعان تخصیصِ آب در یک مدل یک‌پارچه، که قادر به تحلیل چنددوره‌یی است، فراهم می‌شود.

۳. تعریف مسئله

در فرایند تخصیص آب، عرضه‌کننده‌ی آب تحت تأثیر محدودیت دسترسی به منابع آب و بیشینه‌سازی درآمدِ حاصل از تأمین آب برای متقاضیان مختلف بر تخصیص آب تأثیر می‌گذارد. متقاضیان آب نیز تحت تأثیر شرایط اقتصادی ـ اجتماعیِ تأثیرگذار بر عملکردشان، مانند هزینه‌ی تأمین آب، هزینه‌ی تولید، قیمت فروش تولیدات، مقدار تولید و به‌تبع آن تقاضای آب لازم برای تولید را تعیین می‌کنند. علاوه بر این، قیودی مانند تأمین کم‌ترین جریان زیست‌محیطی رودخانه و هزینه‌ی مترتب بر عدم تأمین آن بر عملکرد بخش‌های متقاضی و عرضه‌کننده‌ی آب اثر می‌گذارند. در مسئله‌ی تخصیص آب عوامل مشترکی وجود دارند که بر عملکرد و تصمیم عرضه‌کننده و متقاضی آب تأثیر مستقیم دارند، مانند نرخ بهره، نرخ تورم و قیمت فروش آب. عوامل دیگری نیز وجود دارند که با تأثیر مستقیم در یک بخش، اثرات غیرمستقیمی بر بخش‌های دیگرِ مسئله‌ی تخصیص آب دارند، مثلاً بر قیود فیزیکی بهره‌برداری از مخزن، قوانین تخصیص آب برحسب حجم مخزن، یا جریان آب رودخانه و کارآیی انتقال آب که بر عرضه‌کننده آب و مقدار آب قابل تخصیص اثر می‌گذارند. هزینه‌ی تولید، مقدار نیروی کار لازم، کارآیی تولید، قیمت فروش محصولات و تعامل بخش‌های متقاضی آب با یکدیگر نیز از عواملی هستند که بر تقاضای آب و به‌تبع آن بر تخصیص آب اثر می‌گذارند.

بدین‌ترتیب ملاحظه می‌شود عوامل متعددی بر تخصیص منابع آب در سطح حوضه‌ی آبریز اثر می‌گذارند. ساخت مدلی که بتواند تأثیر این عوامل را به‌صورت توأمان در تخصیص منابع آب لحاظ کند، برای ارزیابی اثر سیاست‌های مختلف آبی و اقتصادی ـ اجتماعی بر تخصیص آب و منافع ذی‌نفعان در سطح حوضه از اهمیت ویژه‌یی دارد. در این تحقیق مدل تخصیص منابع آبی ساخته می‌شود که تأثیر توأمان بسیاری از عوامل یادشده را در تخصیص بهینه‌ی منابع آب در سطح حوضه‌ی آبریز لحاظ می‌کند. بدین‌وسیله تأثیر بسیاری از سیاست‌ها ـ مانند تغییر اولویت تخصیص، تغییر قوانین تخصیص، تغییر کارآیی انتقال آب، تغییر نرخ بهره و تورم، تغییر قیمت‌ها، کارآیی تولید بر مقدار آب تخصیص یافته، جریان رودخانه، وضعیت مخازن، رشد تقاضاهای آبی، تولید، اشتغال نیروی کار و درآمد بخش‌های کشاورزی و صنعت، درآمد عرضه‌کننده‌ی آب و تخصیص تقاضای زیست‌محیطی ـ قابل پیگیری می‌شود. بدین‌وسیله سیاست‌های گوناگون برمبنای اثرات بلندمدت بر

وضعیت حوضه‌ی آبریز قابل ارزیابی و اولویت‌بندی شده و مبنایی برای تصمیم‌گیری می‌شوند.

۴. فرضیات مسئله‌ی تخصیص منابع آب در این تحقیق

فرضیات به‌کارگرفته شده در این مسئله عبارت‌اند از:

۱. برای ایجاد سازگاری در مقیاس بخش‌های مختلف مسئله‌ی تخصیص منابع آب، ابتدا مسئله در مقیاس سالانه فرمول‌بندی و حل می‌شود. از پاسخ‌های به دست آمده در این مقیاس می‌توان به‌عنوان آرمانی برای مسائلی در مقیاس‌های کوچک‌تر (ماهانه) استفاده کرد. در این تحقیق مسئله در مقیاس حوضه‌ی آبریز، برای گام‌های سالانه و در افق بلندمدت فرمول‌بندی و حل می‌شود.

۲. مسئله ابتدا از دید کمّی فرمول‌بندی و بهینه می‌شود. سپس با توجه به مقادیر جریان، مصارف گوناگون و آب‌های بازگشتی کیفیت آب شبیه‌سازی می‌شود. در این تحقیق فرمول‌بندی و حل کمّی مسئله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. مسئله از دید سیاست‌گزاران بخش آب فرمول‌بندی و حل می‌شود. وظیفه‌ی این سیاست‌گزاران در سطح حوضه‌ی آبریز بیشینه‌کردن منافع ذی‌نفعان کشاورزی، صنعت، تخصیص‌دهنده‌ی آب و محیط‌زیست در بحث تخصیص منابع آب است.

۴. پتانسیل رشد تولید کشاورزی، سطح زیرکشت، اشتغال نیروی کار و تقاضای آب در این مدل برآورد و در تحلیل لحاظ می‌شود. علاوه بر این، در این مدل فرض می‌شود تولید کشاورزی به‌صورت تجمیعی و تابعی از سطح زیرکشت، آب مصرفی و نیروی کار قابل بیان است (رویکرد اقتصاد کلان).

۵. در این مدل پتانسیل رشد تولید صنعتی، اشتغال نیروی کار و تقاضای آب برآورد و در مدل‌سازی لحاظ می‌شود. تولید صنعتی به‌صورت تجمیعی و تابعی از آب مصرفی، نیروی کار و درصدی از تولید کشاورزی در سطح حوضه در نظرگرفته می‌شود. فرض بر این است که با تعیین این پتانسیل‌ها از حیث محدودیت‌های یادشده، مدل دیگری در هریک از بخش‌ها قابل فرمول‌بندی و تحلیل خواهد بود که جزئیات رشد تولید کشاورزی و صنعت را در چارچوب پتانسیل‌های تعیین‌شده مشخص می‌کند.

۶. تقاضای آب زیست‌محیطی به‌صورت جریان کمینه زیست‌محیطی رودخانه و با توجه به سری زمانی جریان رودخانه تعیین شده و به‌صورت قید در مدل تخصیص منابع آب لحاظ می‌شود.

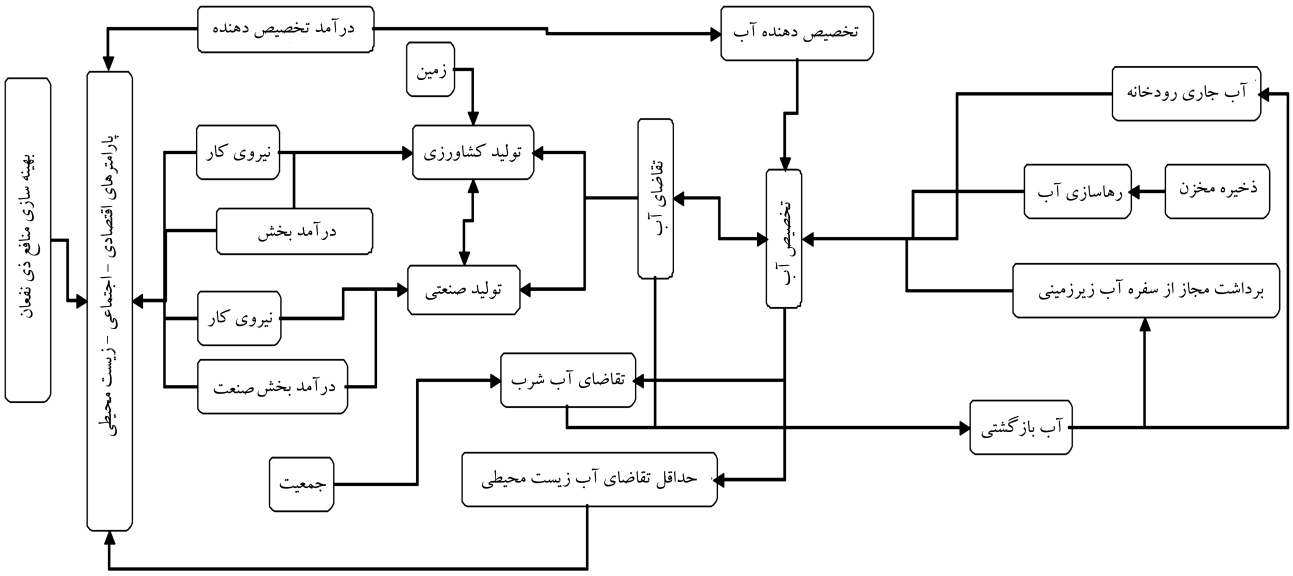
۷. در این مدل فرض بر این است که بهینه‌سازی تخصیص منابع آب برای باقی‌مانده‌ی جریان رودخانه پس از برداشت حق‌آبه‌ها صورت می‌گیرد.

۵. فرمول‌بندی و روش‌شناسی حل مسئله

در مسئله‌ی تخصیص منابع آب سه بخش عمده وجود دارد: تأمین، تقاضا و تعامل تأمین و تقاضا. فرمول‌بندی مسئله با مدل‌سازی این سه بخش و در قالب نمودار گردشی شکل ۱ صورت می‌پذیرد.

براساس این مدلِ مفهومی عمده‌ترین بخش‌های فرمول‌بندی عبارت است از: تأمین آب، تقاضای آب و اندرکنش بین تأمین و تقاضای آب. البته تأثیر عوامل اقتصادی ـ اجتماعی بر بخش‌های یادشده نیز در این فرمول‌بندی می‌گنجند:

- تأمین آب: بیلان آب در رودخانه، مخزن، مقدار مجاز برداشت از سفره‌ی آب زیرزمینی و درآمد عرضه‌کننده‌ی آب عمده‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تأمین آب هستند.
- تقاضاهای آبی: جمعیت، سطح زیرکشت، کارآیی تولید، نیروی کار مورد نیاز، درآمد بخش‌های کشاورزی و صنعت عمده‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تقاضاهای آبی هستند. این عوامل از طریق تابع تولید و سود به یکدیگر و تقاضاهای آبی مرتبط می‌شوند.
- اندرکنش عرضه و تقاضای آب: تأمین و تقاضای آب از طریق معادله‌ی بیلان عرضه و تقاضای آب با یکدیگر تعامل داشته و بر هم اثر می‌گذارند.



شکل ۱. مدل مفهومی تخصیص منابع آب باتوجه به پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی ـ زیست‌محیطی و تعامل تخصیص و تقاضای آب.

- تابع هدف جمع وزنی شاخص‌های مختلف مبین منافع ذی‌نفعان است. در این مدل تابع هدف بیشینه می‌شود.
- دیگر قیود مسئله: برخی از قیودی که شرایط خاصِ مد نظر سیاست‌گزار را بر مسئله تحمیل می‌کند، در این بخش توضیح داده شده‌اند.

۱.۵. تأمین آب

تأمین آب متأثر از دسترسی به منابع آب در سطح حوضه‌ی آبریز، مقدار جریان رودخانه، آب ذخیره‌شده در مخازن و آب قابل برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی هستند. آب‌های بازگشتی نیز به آب جاری رودخانه یا سفره‌ی آب زیرزمینی وارد می‌شوند و منابع آب را تغذیه می‌کنند. معادلات تعادل آبی در مخازن و رودخانه عمده‌ترین بخش تأمین آب را تشکیل می‌دهند.

۱.۱.۵. تعادل و تخصیص آب از مخزن

معادله‌ی تعادل آب در مخزن، وضعیت منابع آب ذخیره‌شده در مخزن را با توجه به ورودی‌های به مخزن، تخصیص‌ها و تلفات نشان می‌دهد (معادله‌ی ۱):

$$Sto_{r,y} + Inf_{r,y} - AloIndSto_{r,y} - AloAgrSto_{r,y} - AloDomSto_{r,y} - Spi_{r,y} - eva_{r,y} = Sto_{r,y+1} \quad (1)$$

که در آن $Inf_{r,y}$ معرف جریان ورودی به مخزن پس از برداشت حق‌آبه از آن ـ در صورت وجود ـ است. مقدار تخصیص سالانه‌ی آب از مخزن در هر سال برابر با حاصل‌جمع $AloDomSto_{r,y}$، $AloAgrSto_{r,y}$ و $AloIndSto_{r,y}$ است.

۲.۱.۵. جریان رودخانه

بخشی از آب تولیدشده‌ی هر منطقه که وارد مخزن نمی‌شود به‌علاوه‌ی سرریز از مخزن، آب جاری رودخانه را در آن منطقه تشکیل می‌دهند.

$$RivFlo_{r,y} = RivFeeSur_{r,y} + Spi_{r,y} \quad (2)$$

در معادله‌ی ۲، $RivFeeSur_{r,y}$ معرف جریان رودخانه پس از برداشت حق‌آبه از آن ـ در صورت وجود ـ است.

۳.۱.۵. تخصیص سفره‌ی آب زیرزمینی

در این تحقیق مقدار برداشت مجاز از سفره‌ی آب زیرزمینی به‌علاوه‌ی آب‌های بازگشتی به سفره، آب قابل تخصیص سفره‌ی آب زیرزمینی را تشکیل می‌دهند.

$$RetGroDom_{r,y} + RetGroInd_{r,y} + RetGroAgr_{r,y} + AloWit_{r,y} \geq AloIndGro_{r,y} - AloAgrGro_{r,y} - AloDomGro_{r,y} \quad (3)$$

۴.۱.۵. آب خروجی از هر منطقه

آن بخش از آب رودخانه که به تقاضاهای شرب، کشاورزی و صنعت تخصیص داده نشده است، آب خروجی از هر منطقه را تشکیل می‌دهد. آب خروجی از هر منطقه باید کمینه تقاضای زیست‌محیطی رودخانه را تأمین کند.

$$Outflo_{r,y} = RivFlo_{r,y} - AloIndRiv_{r,y} - AloAgrRiv_{r,y} - AloDomRiv_{r,y} + RetSurInd_{r,y} + RetSurAgr_{r,y} + RetSurDom_{r,y} \quad (4)$$

معادلات مهم بیان‌کننده‌ی بیلان منابع آب در سطح حوضه‌ی آبریز و تخصیص آب از آن‌ها در این بخش معرفی شد. در بخش بعدی تقاضاهای آبی و معادلات مهم مربوط به آنها معرفی می‌شود.

۵.۱.۵. تأمین آب برای تقاضای آب صنعت

در این مدل تقاضای آبی صنعت به‌طورکامل تأمین می‌شود. معادله‌یی که تأمین آب صنعت را بیان می‌کند اندرکنش بین عرضه و تقاضای آب صنعت را نشان می‌دهد:

$$AloRivInd_{r,y} + AloGroInd_{r,y} + AloStoInd_{r,y} = IndWatDem_{r,y} \quad (5)$$

در این معادله بخش سمت چپ وابسته به عملکرد عرضه‌کننده‌ی آب، و بخش سمت راست وابسته به عملکرد متقاضی آب است. بدین‌ترتیب در فرایند تخصیص منابع آب، تقاضای آب و تخصیص آب باید در تعادل باشند.

۶.۱.۵. تأمین آب برای تقاضای آب کشاورزی

تقاضای آب کشاورزی نیز در این مدل به‌صورت کامل تأمین می‌شود. معادله‌ی بیلان تقاضای آب کشاورزی (معادله‌ی ۶) مبین اندرکنش عرضه و تقاضای آب کشاورزی است:

$$AloRivAgr_{r,y} + AloGroAgr_{r,y} + AloStoAgr_{r,y} = AgrWatDem_{r,y} \quad (6)$$

معادلات ۵ و ۶ اندرکنش مستقیم عرضه و تقاضای آب را برای بخش‌های صنعت و کشاورزی بیان می‌کنند. بیلان آبی مخزن باعث می‌شود اثرات عملکرد مخزن از زمان کنونی به زمان (زمان‌های) بعد منتقل شود. بدین‌ترتیب مقدار آب قابل تخصیص از مخازن، متأثر از عملکرد مخازن در زمان‌های قبل هستند. معادله‌های ۵ و ۶ این اثرات را به تقاضاهای آبی در دوره‌های بعد منتقل می‌کنند. بدین‌ترتیب مقدار آب تأمین‌شده برای تقاضا در دوره‌ی کنونی به‌صورت غیرمستقیم بر تقاضاهای آبی در دوره‌های بعدی تأثیر می‌گذارد. این تأثیر از رهگذر حل یک‌پارچه‌ی معادلات مدل در نظرگرفته شده و در مدل لحاظ می‌شود.

۷.۱.۵. تأمین تقاضای آب شرب

تقاضای آب شرب براساس جمعیت و سرانه‌ی مصرف در هر منطقه تعیین شده و تخصیص به آن به‌صورت کامل صورت می‌گیرد. در واقع تخصیص به تقاضای آب شرب یکی از قیود مسئله تلقی می‌شود.

$$DomWatDem_{r,y} = DWf_{r,y} \cdot Pop_{r,y} \quad (7)$$

$$AloRivDom_{r,y} + AloGroDom_{r,y} + AloStoDom_{r,y} = DomWatDem_{r,y} \quad (8)$$

علاوه بر قید تخصیص منابع آب به تقاضای شرب، قید تخصیص منابع آب به تقاضای زیست‌محیطی رودخانه نیز وجود دارد.

۸.۱.۵. تأمین تقاضای آب زیست‌محیطی

تقاضای زیست‌محیطی در این تحقیق، حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه در نظرگرفته شده است. در این مدل بهره‌برداری از سیستم آبی ممکن است به‌گونه‌یی صورت پذیرد که تأمین تقاضای زیست‌محیطی به‌طورکامل انجام نشود. کمبود در تأمین تقاضای زیست‌محیطی رودخانه با هزینه‌یی همراه است که از سود بقیه‌ی ذی‌نفعان کاسته می‌شود.

$$OutFlo_{r,y} + OutFloSla_{r,y} \geq MinRivFlo_{r,y} \quad (9)$$

۹.۱.۵. سود عرضه‌کننده آب

عرضه‌کننده‌ی آب در حوضه‌ی آبریز، براساس منافع اقتصادی حاصل از تخصیص منابع آب به متقاضیان و اولویت‌های تخصیص، بر تخصیص منابع آب تأثیرگذارده و اقدام به تخصیص می‌کند. درآمد عرضه‌کننده‌ی آب از تخصیص آب براساس قیمت متوسط فروش آب به متقاضیان و حجم آب تخصیصی، طبق معادله‌ی ۱۰ تعیین می‌شود.

$$AloBen_{r,y} = WatPriInd_y IndWatDem_{r,y} + WatPriAgr_y AgrWatDem_{r,y} + WatPriDom_y DomWatDem_{r,y} \quad (۱۰)$$

هزینه‌ی تخصیص آب به متقاضیان نیز برحسب حجم آب تخصیصی قابل بیان است.

$$AloCos_{r,y} = WatCosInd_y IndWatDem_{r,y} + WatCosAgr_y AgrWatDem_{r,y} + WatCosDom_y DomWatDem_{r,y} \quad (۱۱)$$

عرضه‌کننده‌ی آب با توجه به بیشینه‌سازی درآمد خالص حاصل از تخصیص آب و اولویت تقاضاهای آبی برمبنای قیمت فروش آب به آنها، بر تخصیص آب تأثیر می‌گذارد.

در این مدل مقدار تخصیص‌ها به‌صورت سالانه تعیین می‌شود. برای دست‌یابی به مقادیر ماهانه باید گونه‌یی مدل تخصیص آب ماهانه ساخته شود که با توجه به توزیع درون‌سالی تقاضاهای سالانه، هزینه‌ی عدم دست‌یابی به آنها و مقادیر سالانه‌ی تخصیص، تخصیص ماهانه را به‌نحوی بهینه‌سازی کند که تقاضاهای آبی تأمین‌شده و هزینه‌ی عدم تأمین تقاضاها نیزکمینه شود. این مقادیر تقاضا (تخصیص) به‌عنوان هدف در تخصیص آب ماهانه، عملکرد مدل را در جهتی که بهینگی بلندمدت آن تضمین شده باشد، سوق می‌دهند. توجه به این نکته ضروری است که در این مدل مقدار تقاضا و تخصیص آب با توجه به معادلات بیلان عرضه و تقاضا با یکدیگر برابرند.

۲.۵. تقاضاهای آبی

تقاضاهای آبی یکی از بخش‌های بسیار مهم و تأثیرگذار در مسئله‌ی تخصیص آب هستند. اندرکنش این تقاضاها با مقدار آب عرضه‌شده که منجر به تغییر تقاضاها به‌واسطه‌ی اثر متقابل تقاضاهای آبی و تخصیص منابع آب می‌شود، در این مدل‌سازی در نظرگرفته شده است. البته در این تحقیق فقط تعامل تقاضاهای آبی بخش‌های کشاورزی و صنعت با تخصیص آب در نظرگرفته شده است. تقاضاهای آبی شرب و محیط زیست تعاملی با مقدار آب تأمین شده ندارند. در حقیقت، این تقاضاها قیودی برای مسئله‌ی تخصیص آب هستند که باید تأمین شوند.

۱.۲.۵. تقاضای آبی بخش صنعت

تقاضای آب صنعت براساس زیرمدلی تعیین می‌شود که تولید صنعتی، نیروی کار، آب مورد نیاز برای تولید، درآمد حاصل از فروش تولید صنعت و هزینه‌ی تولید صنعت را در نظر می‌گیرد. تولید صنعت در این تحقیق به دو بخش تقسیم شده است: تولید صنعت وابسته به کشاورزی و تولید صنعت غیروابسته به کشاورزی. بخش وابسته به کشاورزی، وابسته به کل تولید کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز در نظرگرفته شده است. علت این امر نیز امکان وابستگی تولید صنعت به کشاورزی برون‌منطقه‌یی و درون حوضه‌ی آبریز است. بنابراین، تولید صنعتی هر منطقه با کل تولید کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز رابطه‌ی منطقی‌تری خواهد داشت تا تولید کشاورزی در همان منطقه که تولید صنعتی صورت می‌گیرد.

$$IndPro_{r,y} = \left(NonAgrIndPro_{r,y} + AgrSha_{r,y} \cdot TotAgrPro_y\right) \quad (۱۲)$$

مقدار تولید صنعتی متغیر تصمیم بوده و با توجه به آن تقاضای آب و اشتغال نیروی کار تعیین می‌شود. نیروی کار مورد نیاز صنعت تابعی از تولید صنعتی است. مقدار نیروی کار مورد نیاز صنعت در این تحقیق به‌صورت یک تابع خطی در نظرگرفته شده است.

$$IndLab_{r,y} = IndLabFac_y IndPro_{r,y} \quad (۱۳)$$

مقدار تقاضای آب صنعت نیز برحسب تولید قابل برآورد است. با فرض برقراری رابطه‌یی خطی بین تقاضای آب و تولید صنعتی، مقدار تقاضای آب صنعت طبق معادله‌ی ۱۴ برآورد می‌شود:

$$IndWatDem_{r,y} = IndWatDemFac_y IndPro_{r,y} \quad (۱۴)$$

هزینه‌ی تولید و درآمد حاصل از فروش تولید صنعتی با فرض خطی‌بودن به‌صورت نمایش داده شده در معادلات ۱۵ و ۱۶ بیان می‌شوند:

$$IndProBen_{r,y} = IndProAvePri_y IndPro_{r,y} \quad (۱۵)$$

$$IndProCos_{r,y} = IndProAveCos_y IndPro_{r,y} \quad (۱۶)$$

زیرمدلی که در این بخش برای صنعت معرفی شد، تولید صنعت را به‌صورت تجمیعی در نظر می‌گیرد و مشخصات آن را بیان می‌کند. در این زیرمدل، تولید به‌صورت تجمیعی و قیمت فروش و هزینه‌ها به‌صورت متوسط در نظرگرفته شده است. ملاحظه می‌شود که عوامل مختلفی مانند اشتغال نیروی کار، تولید و درآمد بخش صنعت بر مقدار تقاضای آب صنعت تأثیر مستقیم دارند. در تابع هدف حاصل‌جمع اشتغال نیروی کار و درآمد بخش صنعت درکل دوره‌ی برنامه‌ریزی در نظرگرفته شده و بیشینه می‌شود. بنابراین، عملکرد بخش صنعت در یک دوره بر عملکرد بخش صنعت و بخش‌های دیگر در بقیه‌ی دوره‌ها در قالب تابع هدف و به‌صورت ضمنی اثر می‌گذارد. بدین‌ترتیب، تقاضای آب صنعت و کشاورزی در دوره‌ی کنونی، علاوه بر عملکرد سیستم آبی، بر تقاضای آبِ کشاورزی و بخشِ صنعت در دوره‌های بعدی نیز اثرگذار است. این تأثیر به‌واسطه‌ی چنددوره‌یی بودن مدل‌سازی و تحلیل در مدل قابل پیگیری است.

۲.۲.۵. تقاضای آبی بخش کشاورزی

تقاضای آبی بخش کشاورزی به‌صورت تجمیعی برای هر منطقه، و براساس زیرمدلی که سطح زیرکشت، نیروی کار، آب مورد نیاز، هزینه تولید کشاورزی و درآمد حاصل از فروش محصولات را در نظر می‌گیرد، تعیین می‌شود. تولید کشاورزی را می‌توان به‌صورت تابعی از کارآیی متوسط تولید و سطح زیرکشت بیان کرد:

$$AgrPro_{r,y} = AgrProEff_{r,y} CulLan_{r,y} \quad (۱۷)$$

تقاضای آب کشاورزی به‌صورت تابعی از تبخیر و تعرق متوسط منطقه برحسب الگوی کشت و سطح زیرکشت (معادله‌ی ۱۸) قابل بیان است. تأمین آب لازم برای تبخیر و تعرق متوسط باعث تولید با کارآیی نشان داده شده در معادله‌ی ۱۷ می‌شود.

$$AgrWatDem_{r,y} = EvaTra_{r,y} CulLan_{r,y} \quad (۱۸)$$

اشتغال نیروی کار در تولید کشاورزی، یکی از پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی بیان‌کننده‌ی منافع بخش کشاورزی است. نیروی کار مورد نیاز برای تولید بخش کشاورزی به‌صورت خطی و تابعی از تولید کشاورزی در نظر گرفته شده است.

$$AgrLab_{r,y} = AgrLabFac_{r,y} AgrPro_{r,y} \quad (۱۹)$$

درآمد حاصل از فروش محصولات کشاورزی و هزینه‌ی تولید از دیگر پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی هستند که منافع بخش کشاورزی را بیان می‌کنند:

$$AgrProBen_{r,y} = AgrProAvePri_y AgrPro_{r,y} \quad (۲۰)$$

هزینه‌ی تولید کشاورزی نیز به‌صورت تابعی خطی از تولید و هزینه‌ی متوسط تولید در نظر گرفته شده است:

$$AgrProCos_{r,y} = AgrProAveCos_y AgrPro_{r,y} \quad (۲۱)$$

معادلات ۱۷ تا ۲۱ زیرمدلی را تشکیل می‌دهند که تعیین‌کننده‌ی تقاضای آب کشاورزی است. چنان که پیش‌تر نیز ذکر شد، تعامل زمانی تقاضاهای آبی از طریق تابع هدف صورت می‌گیرد. علاوه بر این، مخازن به‌واسطه‌ی قابلیت ذخیره‌سازی خود نقش بسیار مهمی در انتقال اثرات زمانی از یک دوره به دوره‌ی دیگر بازی می‌کنند؛ همچنین اثر تخصیص به تقاضاهای آبی را از دوره‌ی کنونی به‌صورت ضمنی به تقاضاهای آبی و تخصیص آب در دوره‌های زمانی بعد منتقل می‌کنند.

۳.۵. تابع هدف

در این مسئله هدف بیشینه‌سازی منافع ذی‌نفعان مختلف از تخصیص منابع آب است. به‌همین علت، این مسئله شامل اهداف مختلفی است که مبین منافع ذی‌نفعان مختلف مسئله است. این اهداف توسط رویکرد جمع وزنی در قالب یک هدف بیشینه می‌شوند. وزن‌ها بیان‌گر اهمیت هریک از پارامترها در تابع هدف نسبت به یکدیگر است. پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی ـ زیست‌محیطی لحاظ شده در تابع هدف شامل: درآمد خالص حاصل از فروش تولیدات و اشتغال نیروی کار برای بخش‌های کشاورزی و صنعت، درآمد خالص تخصیص‌دهنده‌ی آب و آب تخصیص‌یافته به تقاضای زیست‌محیطی رودخانه است. نحوه‌ی درنظرگرفتن این پارامترها در تابع هدف در ادامه توضیح داده می‌شود.

۱.۳.۵. درآمد خالص ذی‌نفعان مسئله‌ی تخصیص منابع آب

ذی‌نفعانی که درآمد خالص آنها از تخصیص منابع آب یا کاربرد آب به‌عنوان متقاضی تأمین می‌شود عبارت‌اند از: تخصیص‌دهنده‌ی آب، بخش کشاورزی و بخش صنعت. درآمد خالص بخش صنعت از فروش تولید صنعت در معادله‌ی ۲۲، درآمد خالص بخش کشاورزی از فروش تولید کشاورزی در معادله‌ی ۲۳، و درآمد خالص تخصیص‌دهنده‌ی آب از تخصیص آب به بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب در زمان کنونی، در معادله‌ی ۲۴ معرفی شده است.

$$IndProNetBen_y = \frac{(1+InfRat_y)^y \sum_r IndProBen_{r,y} - IndProCos_{r,y}}{(1+IntRat_y)^y} \quad (۲۲)$$

$$AgrProNetBen_y = \frac{(1+InfRat_y)^y \sum_r AgrProBen_{r,y} - AgrProCos_{r,y}}{(1+IntRat_y)^y} \quad (۲۳)$$

$$AloNetBen_y = \frac{(1+InfRat_y)^y \sum_r AloBen_{r,y} - AloCos_{r,y}}{(1+IntRat_y)^y} \quad (۲۴)$$

۲.۳.۵. اشتغال نیروی کار بخش‌های کشاورزی و صنعت در سطح حوضه‌ی آبریز

اشتغال نیروی کار به‌عنوان پارامتر اقتصادی ـ اجتماعی مهمی در بیان منافع ذی‌نفعان متقاضی آب مورد توجه قرارگرفته و در تابع هدف لحاظ شده است.

$$TotEmp_y = \sum_r AgrLab_{r,y} + IndLab_{r,y} \quad (۲۵)$$

۳.۳.۵. شکل تابع هدف مسئله‌ی تخصیص منابع آب

با توجه به اهداف متعددِ مسئله‌ی چندمنظوره‌ی «تخصیص منابع آب»، از رویکرد تجمیع وزنی برای تبدیل این اهداف به هدفی واحد استفاده شده است. به‌همین منظور ابتدا مقادیر بیشینه‌ی هریک از پارامترها ـ با توجه به قیود مسئله و با فرض وجود آن پارامتر به‌عنوان هدف واحد مسئله ـ تعیین می‌شود. سپس از این مقدار بیشینه برای هر پارامتر، برای بی‌بعدکردن پارامترهای تابع هدف و تجمیع وزنی آنها استفاده می‌شود (معادله‌ی ۲۶):

$$ProObj = w_1 \frac{\sum_y IndProNetBen_y}{\sum_y MaxIndProNetBen_y} + w_2 \frac{\sum_y AgrProNetBen_y}{\sum_y MaxAgrProNetBen_y} + w_3 \frac{\sum_y TotEmp_y}{\sum_y MaxTotEmp_y} + w_4 \frac{\sum_y \sum_r OutFlo_{r,y}}{\sum_y \sum_r MinRivFlo_{r,y}} + w_5 \frac{\sum_y AloNetBen_y}{\sum_y MaxAloNetBen_y} \quad (۲۶)$$

با بیشینه‌سازی این تابع هدف، منافع ذی‌نفعان تخصیص آب تا حد امکان تأمین می‌شود. بدین‌ترتیب تخصیص‌ها از مقبولیت اجتماعی ـ اقتصادی ـ زیست‌محیطی بیشتری برخوردار خواهند بود.

۴.۵. دیگر قیود مسئله

دو قید مهم دیگر در مسئله لحاظ شده‌اند که ذکر آنها لازم به نظر می‌رسد: ۱. بهبود درآمد کلی در سطح حوضه‌ی آبریز؛ ۲. افزایش اشتغال نیروی کار. وجود این دو قید به مدل تأکید می‌کند که با درنظرگرفتن ورودی‌های مسئله تا انتهای افق برنامه‌ریزی تخصیص منابع آب را به‌گونه‌یی انجام دهد که پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی در سطح حوضه‌ی آبریز با زمان بهبود پیدا کنند. قید بهبود ارزش کنونی درآمد کلی در

سطح حوضه‌ی آبریز (معادله‌ی ۲۷ و ۲۸)، درآمد بخش‌های صنعت، کشاورزی و تخصیص‌دهنده‌ی آب در سطح حوضه‌ی آبریز را در دوره‌ی فعلی و بعدی مقایسه می‌کند.

$$TotNetBen_y = AloNetBen_y + AgrProNetBen_y + IndProNetBen_y \quad (۲۷)$$

$$TotNetBen_{y+1} \geq TotNetBen_y \quad (۲۸)$$

علاوه بر درآمد، بهبود اشتغال نیروی کار در سطح حوضه‌ی آبریز نیز یکی از عوامل مهم اقتصادی ـ اجتماعیِ مبین منافع ذی‌نفعان در سطح حوضه‌ی آبریز است. مدل تخصیص آب موظف است به‌نحوی تخصیص آب را بهینه کند که میزان اشتغال نیروی کار در بخش‌های کشاورزی و صنعت در هر دوره بهبود یابد. این قید در رابطه‌ی ۲۹ نشان داده شده است.

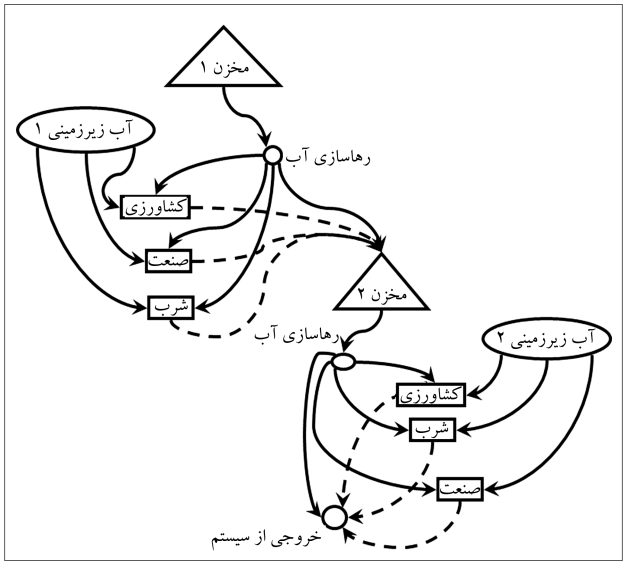
$$TotEmp_{r,y+1} \geq TotEmp_{r,y} \quad (۲۹)$$

این دو قید بر این موضوع تأکید دارند که تخصیص منابع آب در سطح حوضه‌ی آبریز باید به‌گونه‌یی باشد که پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی با زمان بهبود یابند. این مسئله با فرمول‌بندی خطی در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار GAMS، برنامه‌نویسی و حل می‌شود.

۶. حل مثال

یکی از کاربردهای مدل‌هایی از نوع مدل ساخته‌شده در این تحقیق، تحلیل و ارزیابی سیاست‌های آبی در سطح حوضه‌ی آبریز است. از آنجا که این مدل تخصیص آب درنظرگیرنده‌ی اندرکنش عرضه و تقاضای آب است، بررسی اثر سیاست‌های مختلف بر عرضه و تقاضای آب امکان‌پذیر خواهد بود. در این بخش دو سیاست مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند: ۱. سیاست A۱ که ۵٪ بهبود سالانه در تولید بخش‌های کشاورزی، صنعت و مصرف آب را مد نظر دارد؛ ۲. سیاست پایه‌ی A۲ که فرض می‌کند روندهای کنونی تا انتهای دوره‌ی برنامه‌ریزی ادامه یابد. تفاوت عمده‌ی این دو سیاست علاوه بر اختلاف کارآیی تولید بخش‌های کشاورزی، صنعت و مصرف آب، هزینه‌ی بهبود کارآیی در سیاست‌های A۱ و A۲ است. چنانچه سود حاصل از اجرای سیاست A۱ در مقایسه با سیاست پایه‌ی A۲ توجیه‌کننده‌ی اختلاف هزینه‌ی آنها باشد، آنگاه سیاست A۱ نسبت به سیاست پایه‌ی A۲ در اولویت قرار می‌گیرد.

این دو سیاست در یک حوضه‌ی آبریز فرضی ـ که مشخصه‌های اصلی آن چند مخزنی بودن، داشتن جمعیت بالای دو میلیون نفر، داشتن فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی است ـ توسط مدل تخصیص آبِ ساخته‌شده در این تحقیق تحلیل می‌شود. در این بخش نحوه‌ی استفاده از چنین مدلی، که قابلیت نشان‌دادن تأثیر بلندمدت سیاست‌ها بر منافع ذی‌نفعان و شرایط حوضه‌ی آبریز را دارد، ارائه می‌شود. حوضه‌ی آبریز مورد نظر شامل دو مخزن بزرگ به‌صورت متوالی (سری) است تا تأثیر عملکرد بالادست بر پایین‌دست با وضوح بیشتری قابل بررسی شود. هریک از مخازن دارای اهداف تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت هستند. در این مثال هدف تعیین تأثیر سیاست‌های ذکرشده بر تقاضاهای آبی، تولید کشاورزی و صنعت، اشتغال نیروی کار، درآمد عرضه‌کننده‌ی آب، بخش کشاورزی و صنعت و تأمین کم‌ترین جریان زیست‌محیطی رودخانه است. شماتیک حوضه‌ی آبریز مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده است. دیگر مشخصات این سیستم در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. شماتیک سیستم آبی حوضه‌ی آبریز با دو مخزن.

سیستم آبی و مشخصات آن در شکل ۲ و جداول ۱ تا ۴ معرفی شده است. مدل‌سازی و تحلیل سیستم برای سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۴۱۶ صورت می‌پذیرد. در این موردِ مطالعاتی، هدف اصلی نشان‌دادن نحوه‌ی کار مدل و کاربرد آن در تحلیل و ارزیابی سیاست‌ها است. دو عامل اقتصادی مهم ـ نرخ بهره و نرخ تورم ـ برای مقایسه‌ی ارزش درآمدها در زمان ابتدای تحلیل و تعیین قیمت‌ها در آینده به‌ترتیب ۱۴٪ و ۱۶٪ در نظر گرفته شده است. این سیستم آبی با استفاده از فرمول‌بندی خطی مدل‌سازی، و توسط نرم‌افزار GAMS تحلیل شده است. شکل‌های ۳ تا ۹ خروجی‌های پردازش‌یافته‌ی مدل است. در این شکل‌ها، عملکرد سیستم آبی در تخصیص منابع آب و کارآیی تخصیص منابع آب در بهبود پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی ـ زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۳ و ۴ عملکرد مخازن را در صورت کاربرد دو سیاست مختلف نشان می‌دهد. برای سیستمی با مشخصات ذکرشده، عملکرد مخازن در بخش عمده‌یی از دوره‌ی برنامه‌ریزی تفاوت قابل ملاحظه‌یی ندارد. نحوه‌ی تخصیص آب در سطح حوضه‌ی آبریز نیز با توجه به تأثیر زیاد مخازن در بخش عمده‌یی از دوره‌ی برنامه‌ریزی مشابه یکدیگر است. البته تفاوت‌هایی نیز در اثرات دو سیاست در بخش‌های کشاورزی و صنعت وجود دارد که در شکل‌های ۸ و ۹ این تفاوت‌ها نشان داده شده است. با توجه به این که در سیاست A۱ کارآیی تولید در بخش‌های کشاورزی و صنعت به میزان ۵٪ در سال بهبود می‌یابد، میزان تولید و به‌تبع آن درآمد در این دو بخش نسبت به سیاست پایه بیشتر است؛ این تفاوت در بخش کشاورزی بیشتر است. بهبود کارآیی در سیاست A۱، مصرف آب، نیاز به نیروی کار و درآمد عرضه‌کننده‌ی آب را کاهش داده است (شکل‌های ۵، ۷ و ۸)، اما درآمد بخش‌های صنعت و کشاورزی را افزایش داده است. کل درآمد ذی‌نفعان، به‌جز در دوره‌ی آخر، برای سیاست A۱

جدول ۱. مشخصات مخازن سیستم آبی.

	حجم (میلیون متر مکعب)		
	حجم اولیه	حجم حداقل	حجم نرمال
مخزن ۱	۳۵۰۰	۸۵۰	۴۵۸۰
مخزن ۲	۲۵۰۰	۵۵۰	۳۵۶۰

جدول ۲. مشخصات سیستم آبی و بخش‌های متقاضی آب در سال ۱۳۸۶.

	اشتغال اولیه کشاورزی (نفر)	اشتغال اولیه صنعت (نفر)	تولید اولیه صنعتی (تن)	سطح زیر کشت اولیه (هکتار)	ضریب رشد جمعیت	جمعیت اولیه
زیرحوضه ۱	۲۷۳۸۱	۳۰۱۵۹	۷۸۰۰۰۰۰	۷۵۶۰۶	۰/۰۲۵	۱۴۰۰۰۰۰
زیرحوضه ۲	۵۵۶۷۷/۴	۷۱۱۹۲	۹۹۵۰۰۰۰	۱۷۳۳۴۶	۰/۰۲۵	۱۲۰۰۰۰۰

جدول ۳. مشخصات سالانه‌ی تقاضاهای آبی در ابتدای دوره‌ی برنامه‌ریزی.

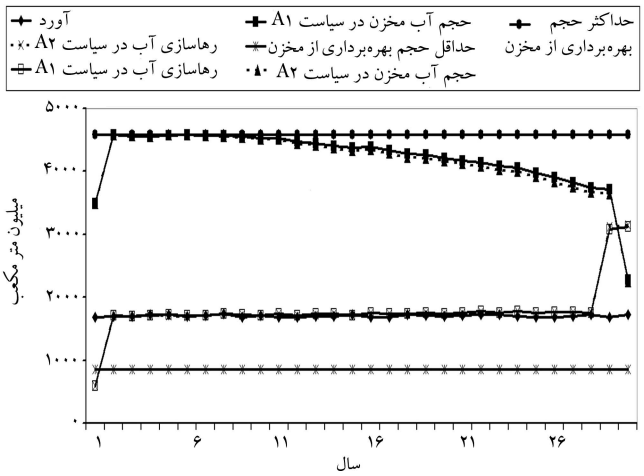
تقاضای شرب برحسب میلیون متر مکعب در نفر	۰/۰۰۰۰۴۸
تقاضای آبی صنعت برحسب تولید (میلیون متر مکعب در تن)	۰/۰۰۰۱۱۳
کارآیی تولید کشاورزی (تن در هکتار)	۵
ضریب $AgrSha_{r,y}$، (برای تمام حوضه آبریز یکسان فرض شده است)	۰/۰۱۵
مقدار متوسط تبخیر و تعرق (متر در هکتار)	۰/۳۹۵
اشتغال برحسب تولید صنعتی (نفر در تن)	۰/۰۰۳۸
اشتغال برحسب تولید کشاورزی (نفر در تن)	۱/۸۱

جدول ۴. هزینه و درآمد سالانه‌ی حاصل از تخصیص منابع آب در ابتدای دوره‌ی برنامه‌ریزی.

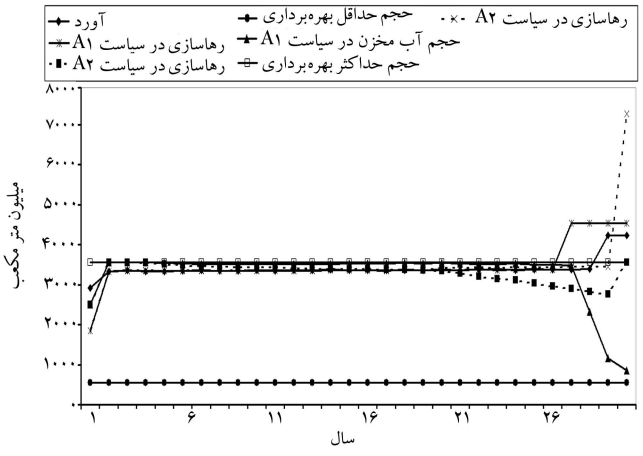
هزینه‌ی تامین آب (دلار در متر مکعب)	۳
درآمد تامین آب برای شرب (دلار در متر مکعب)	۶
درآمد تامین آب برای صنعت (دلار در متر مکعب)	۱۲
درآمد تامین آب برای کشاورزی (دلار در متر مکعب)	۴/۸
هزینه تولید کشاورزی (دلار در تن)	۴۵
هزینه تولید صنعت (دلار در تن)	۶۷۰
درآمد تولید کشاورزی (دلار در تن)	۶۷
درآمد تولید صنعتی (دلار در تن)	۱۵۰۰

افزایش ۵۰۰۰ میلیون دلاری را نسبت به سیاست پایه حفظ می‌کند، که در دوره‌های انتهایی این تفاوت بیشتر نیز می‌شود. شایان ذکر است که در تحلیل هر دو سیاست، کم‌ترین تقاضای زیست‌محیطی به‌طور کامل تأمین شده است.

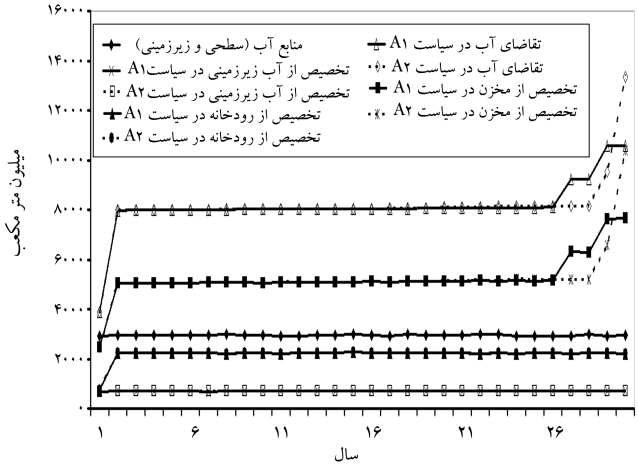
برای ارزیابی و مقایسه‌ی بهتر دو سیاست نسبت به یکدیگر، شاخص‌هایی تعریف شده که وضعیت بلندمدت حوضه‌ی آبریز و ذی‌نفعان را نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص‌ها برای هریک از سیاست‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است. براساس این جدول کاربرد سیاست A۱ بهبود معنی‌داری نسبت به کاربرد سیاست A۲ در بلندمدت نخواهد داشت. به‌عبارت دیگر، هزینه‌های عملی‌ساختن سیاست A۱ در مقایسه با سودی که ازکاربرد آن به دست می‌آید، این سیاست را در مقایسه با سیاست A۲ در اولویت دوم قرار می‌دهد. در این بخش بیشتر نحوه‌ی کاربرد این مدل در ارزیابی سیاست‌ها با توجه به قابلیت درنظرگرفتن اندرکنش عرضه و تقاضای آب نشان داده شد. توسط این مدل تخصیص آب، تأثیرکاربرد یک سیاست خاص در رشد تقاضاها، مقدار درآمد ذی‌نفعان، اشتغال نیروی کار، عملکرد مخازن از منظر رهاسازی آب و پربودن در بلندمدت قابل تحلیل و ارزیابی است.



شکل ۳. عملکرد مخزن شماره‌ی ۱ در طی دوره‌ی برنامه‌ریزی.



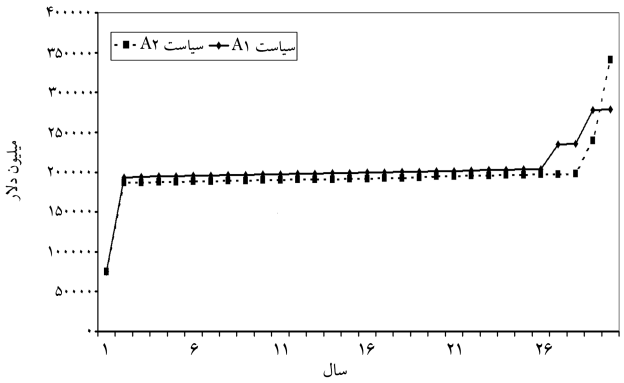
شکل ۴. عملکرد مخزن شماره‌ی ۲ در طی دوره‌ی برنامه‌ریزی.



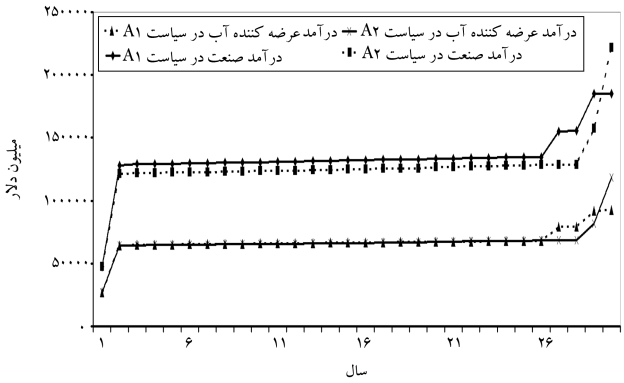
شکل ۵. جزئیات تخصیص آب به‌تفکیک منابع در سطح حوضه‌ی آبریز.

جدول ۵. شاخص‌های بلندمدت ارزیابی سیاست‌های A۱ و A۲.

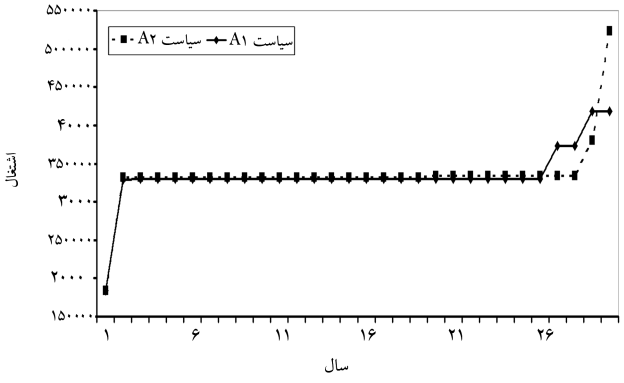
شاخص ارزیابی	سیاست A۲	سیاست A۱
متوسط تولید کشاورزی برحسب تن در متر مکعب	۰/۰۰۱۲۷	۰/۰۰۱۳۹
متوسط درآمد خالص کشاورزی برحسب دلار در متر مکعب	۰/۵۴۸	۰/۶۰۲
متوسط تولید صنعت برحسب تن در متر مکعب	۰/۰۰۶۸۲	۰/۰۰۷۱۴
متوسط درآمد خالص صنعت برحسب دلار در متر مکعب	۱۸/۱۲۱	۱۸/۹۸۹
متوسط درآمد خالص عرضه کننده آب از تامین آب برحسب دلار در متر مکعب	۸/۲۲۱	۸/۲۷۲
متوسط اشتغال برحسب متر مکعب آب تحویلی به کشاورزی و صنعت	۴۲/۲۹۹	۴۲/۰۰۸
مقدار اولیه تقاضای آب قابل تامین برحسب میلیون متر مکعب	۳۸۸۰/۱	۳۸۸۰/۱
مقدار نهایی تقاضای آب قابل تامین برحسب میلیون متر مکعب	۱۳۳۴۰/۴	۱۰۵۸۲/۷
متوسط درآمد خالص بر آب تخصیصی برحسب دلار برمتر مکعب	۲۳/۷۶	۲۴/۶۹
قابلیت اعتماد پر بودن حجم مخزن در دوره برنامه‌ریزی	۰/۹۲	۰/۹۲



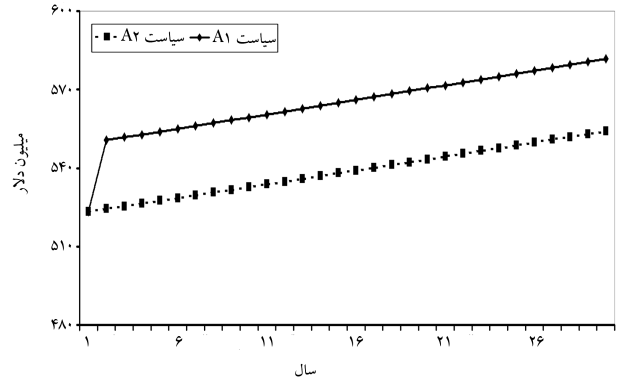
شکل ۶. کل درآمد خالص در سطح حوضه‌ی آبریز.



شکل ۸. درآمد بخش‌های صنعت و عرضه‌کننده‌ی آب در سطح حوضه‌ی آبریز.



شکل ۷. اشتغال نیروی کار بخش صنعت و کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز.



شکل ۹. درآمد بخش کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل‌سازی تخصیص بلندمدت منابع آب به بخش‌های کشاورزی، صنعت، شرب و محیط‌زیست با توجه توأمان به تعامل تقاضاهای آبی بخش صنعت و کشاورزی با تخصیص منابع آب و پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی ـ زیست‌محیطی تأثیرگذار بر تخصیص منابع آب ارائه شد. به‌وسیله‌ی این مدل‌سازی امکان بررسی تأثیر تخصیص منابع آب در منافع ذی‌نفعان و تعبیر اقتصادی ـ اجتماعی ـ زیست‌محیطی تخصیص‌های داده شده در قالب پارامترهایی مانند درآمد ذی‌نفعان یا اشتغال نیروی کار در بخش‌های متقاضی آب فراهم شد. این مدل‌سازی علاوه بر این که امکان بررسی اثر متقابل عملکرد بخش عرضه و تقاضای آب را برای تحلیل‌گر به وجود می‌آورد، امکان جهت‌دهی به تخصیص‌ها در یک فضای تعاملی، که منافع تمام ذی‌نفعان تا حد امکان بیشینه می‌شود، را نیز فراهم می‌کند. نتایج کاربرد این مدل‌سازی در ارزیابی سیاست‌های آبی اثرات بلندمدت کاربرد سیاست‌ها را به تحلیل‌گر نشان می‌دهد. از این اثرات می‌توان برای اولویت‌بندی سیاست‌ها بهره جست. البته فرضیات انجام

شده در فرمول‌بندی مسئله که بعضاً به بخشی از واقعیت حاضر در سیستم آبی و تقاضاهای آبی توجه نمی‌کند، منجر به پاسخ‌های نزدیک بهینه می‌شوند. در همین راستا پیشنهاداتی برای بهبود تحقیق اخیر و مدل‌سازی واقعی‌تر سیستم آبی قابل بیان است:

۱. تقاضای آبی بخش شرب در تعامل با تأمین آب و پارامترهای اقتصادی ـ اجتماعی است. در مدل فعلی این تعامل به‌صورت یک‌طرفه در قالب قید تأمین آب شرب وارد مدل شده است. لحاظ این تعامل در مدل تخصیص آب می‌تواند نقاط بهینه‌ی جدیدی را به تحلیل‌گر ارائه کند.

۲. مدل تخصیص کنونی مقدار تخصیص‌ها و تقاضاها را به‌صورت سالانه تعیین می‌کند. عوامل متعددی وجود دارند که ممکن است دست‌یابی کامل به اهداف سالانه‌ی تعیین‌شده توسط مدل تخصیص بلندمدت را با کمبود مواجه کنند. مهم‌ترین این عوامل تغییرات فصلی عرضه و تقاضاهای آبی است. ساخت یک مدل تخصیص ماهانه که در جهت و تعامل با تصمیم‌های مدل سالانه عمل می‌کند به واقعی‌تر شدن تصمیم‌ها کمک می‌کند.

۳. مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌صورت دقیق‌تر و لحاظ اندرکنش آن با آب سطحی به واقعی‌تر شدن منابع آب بسیار کمک می‌کند.

۴. لحاظ عدم‌قطعیت آوردها به مخزن، قیمت‌ها و هزینه‌ها در مدل برای تحلیل بلندمدت نیز بر قابلیت اعتماد تصمیم‌های مدل خواهد افزود.

۸. توضیح علائم و اختصارات به‌کار رفته

$AgrLab$: نیروی کار در بخش کشاورزی

$AgrLabFac$: نیروی کار برای تولید واحد در بخش کشاورزی

$AgrPro$: تولید کشاورزی

$AgrProAveCos$: هزینه متوسط تولید واحد در بخش کشاورزی

$AgrProAvePri$: متوسط قیمت فروش واحد محصولات کشاورزی

$AgrProBen$: درآمد ناخالص فروش محصولات کشاورزی

$AgrProCos$: هزینه تولید محصولات کشاورزی

$AgrProEff$: کارآیی تولید کشاورزی در واحد زمین زیرکشت

$AgrProNetBen$: درآمد خالص فروش محصولات کشاورزی

$AgrSha$: ضریب نشان‌دهنده سهم تولید کشاورزی در تولید صنعت

$AgrWatDem$: تقاضای آب کشاورزی

$AllWit$: مقدار برداشت مجاز از سفره آب زیرزمینی

$AloAgrGro$: آب تخصیصی به تقاضای بخش کشاورزی از آب زیرزمینی

$AloAgrRiv$: آب تخصیصی به تقاضای بخش کشاورزی از رودخانه

$AloAgrSto$: آب تخصیصی به تقاضای بخش کشاورزی از مخزن

$AloBen$: درآمد ناخالص حاصل از تخصیص آب به تقاضاهای آبی برای تخصیص‌دهنده آب

$AloCos$: هزینه تخصیص آب به تقاضاهای آبی برای تخصیص‌دهنده آب

$AloDomGro$: آب تخصیصی به تقاضای شرب از آب زیرزمینی

$AloDomRiv$: آب تخصیصی به تقاضای شرب از رودخانه

$AloDomSto$: آب تخصیصی به تقاضای شرب از مخزن

$AloIndGro$: آب تخصیصی به تقاضای صنعت از آب زیرزمینی

$AloIndRiv$: آب تخصیصی به تقاضای صنعت از رودخانه

$AloIndSto$: آب تخصیصی به تقاضای صنعت از مخزن

$AloNetBen$: درآمد خالص حاصل از تخصیص منابع آب برای تخصیص‌دهنده آب

$CulLan$: سطح زیرکشت

$DomWatDem$: تقاضای آب شرب

DWf: سرانه مصرف آب شرب در ابتدای دوره برنامه‌ریزی

Eva: تبخیر از مخزن

$EvaTra$: تبخیر و تعرق متوسط

Inf: آورد به مخزن

$InfRat$: نرخ تورم

$IntRat$: نرخ بهره

$IndLab$: نیروی کار بخش صنعت

$IndLabFac$: نیروی کار در تولید واحد بخش صنعت

$IndPro$: تولید صنعت

$IndProAveCos$: هزینه متوسط تولید صنعتی

$IndProAvePri$: متوسط قیمت فروش محصولات صنعتی

$IndProBen$: درآمد ناخالص فروش تولیدات صنعتی

$IndProCos$: هزینه تولید صنعتی

$IndProNetBen$: درآمد خالص فروش تولیدات صنعتی

$IndWatDem$: تقاضای آب صنعت

$IndWatDemFac$: تقاضای آب در تولید واحد بخش صنعت

$MaxAgrProNetBen$: حداکثر درآمد خالص قابل حصول برای بخش کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز

$MaxAloNetBen$: حداکثر درآمد خالص قابل حصول برای تخصیص‌دهنده آب در سطح حوضه‌ی آبریز

$MaxIndProNetBen$: حداکثر درآمد خالص قابل حصول برای بخش صنعت در سطح حوضه‌ی آبریز

$MaxTotEmp$: حداکثر اشتغال قابل حصول نیروی کار بخش صنعت و کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز

$MinRivFlo$: حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه

$NonAgrIndPro$: تولید صنعتی غیروابسته به کشاورزی

$OutFlo$: آب جاری در رودخانه پس از برداشت تخصیص‌ها به تقاضاهای آبی

$OutFloSla$: مقدار کمبود در تأمین قید تخصیص آب به حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه

Pop: جمعیت

$ProObj$: تابع هدف

$RivFlo$: جریان آب رودخانه

$RivFeeSur$: تغذیه جریان رودخانه از رواناب سطحی

$RetGroAgr$: آب بازگشتی به آب زیرزمینی از مصرف آب کشاورزی

$RetGroDom$: آب بازگشتی به آب زیرزمینی از مصرف آب شرب

$RetGroInd$: آب بازگشتی به آب زیرزمینی از مصرف آب صنعت

$RetSurAgr$: آب بازگشتی به آب رودخانه از مصرف آب کشاورزی

$RetSurDom$: آب بازگشتی به آب رودخانه از مصرف آب شرب

$RetSurInd$: آب بازگشتی به آب رودخانه از مصرف آب صنعت

Spi: سرریز از مخزن

Sto: حجم آب مخزن

$TotAgrPro$: کل تولید کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز

$TotEmp$: اشتغال نیروی کار بخش صنعت و کشاورزی در سطح حوضه‌ی آبریز

$TotNetBen$: کل درآمد خالص بخش‌های صنعت، کشاورزی و تخصیص‌دهنده آب در سطح حوضه‌ی آبریز

$WatPriAgr$: قیمت فروش واحد آب به بخش کشاورزی

$WatPriDom$: قیمت فروش واحد آب به متقاضی شرب

$WatPriInd$: قیمت فروش واحد آب به بخش صنعت

$WatCosAgr$: هزینه تخصیص واحد آب به بخش کشاورزی

$WatCosDom$: هزینه تخصیص واحد آب به بخش شرب

$WatCosInd$: هزینه تخصیص واحد آب به بخش صنعت

w: ضرایب اهمیت پارامترهای تابع هدف

y: شمارنده سال

r: شمارنده زیرحوضه

پانوشت

1. holistic

منابع

1. Loucks, D.P. and van beek, E. "Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications", 1st ed. UNESCO (2005).
2. McKinney, D.; Cai, x.; Rosegrant, M.; Ringler, C. and Scott, C "Modeling water resources management at basin level: Review and future directions", IWMI (1999).
3. Howitt, R. and Sunding, D., *Water Infrastructure and Water Allocation in California,* Department of Agriculture and Resources Economics, University of California, Davis, USA (2005).
4. Burton, J. "Integrated water resources management on a basin level: A training manual", UNESCO (2003).
5. Rozegrant, M.W.; Ringler, C.; McKinney, D.C.; Cai, X.; Keller, A. and Donoso, G. "Integrated economic-hydrologic water modeling at basin scale: the Maipo river basin", *Elsevier, Agricultural Economics,* **24** (2000).
6. Cai, X.; McKinney, D.C. and Lasdon, L.S. "Integrated hydrologic- agronomic- economic model for river basin management", *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management,* **129**(1) (2003).
7. Ward, F.A.; Booker, J.F. and Michelsen A.M. "Integrated economics, hydrologic, and institutional analysis of policy responses to mitigate drought impacts in rio grande basin", *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management,* **132**(6) (2006).
8. Lange, G.M.; Mungatana, E. and Hassan, R. "Water accounting for the Orange River Basin: An economic perspective on managing a transboundary resource", Elsevier, Ecological Economics, DOI:10.1016/j.ecolecon.2006.07.032 (2006).
9. Johansson, R., *Micro and Macro-Level Approach for Assessing the Value of Irrigation Water,* World Bank Policy Research Working Paper 3778, (2005).
10. Bazargan-Lari, M.R.; Kerachian, R. and Mansoori, A. "A conflict-resolution model for the conjunctive use of surface and groundwater resources that considers water-quality issues: A case study", *Environmental management,* **43**(3), pp. 470-482 (2009).
11. Shirangi, E.; Kerachian, R. and Bajestan, M.S. "A simplified model for reservoir operation considering water quality issues: Application of the Young conflict resolution theory", *Environmental Monitoring Assessment,* **146**, (1-3), pp. 77-89 (2008).
12. Ganji, A.; Khalili, D.; Karamouz, M.; Ponnambalam, K. and Javan, M. "A fuzzy stochastic dynamic nash game analysis of policies for managing water allocation in a reservoir system", *Water Resources Management,* **22**, pp. 51-66, DOI 10.1007/s11269-006-9143-y (2008).