

انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب

محمد کارآموز (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

بنفشه زهرایی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی - گروه مهندسی عمران، دانشگاه تهران

ساختار غالب مدل‌های مورد استفاده در مدیریت بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب کشور، فاقد ابزارهای مناسب برای ثبت تأثیرات ناشی از تغییر مؤلفه‌های مختلف بر عملکرد سیستم‌های هیدرولیکی‌اند. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد تعدادی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در بهره‌برداری از مخازن که از مؤلفه‌های اصلی سیستم‌های منابع آب هستند - نظیر نیازها، خصوصیات هیدرولوژیکی سیستم، خصوصیات کیفی و زیست محیطی حاکم بر مخزن و رودخانه‌ی پایین دست آن و یا حتی شرایط فیزیکی آنها - در سال‌های مختلف تغییرات قابل توجهی داشته‌اند که این تغییرات به میزان قابل ملاحظه‌ی در کارایی مدل‌هایی که بدون در نظر گرفتن آنها تدوین شده‌اند، تأثیر می‌گذارند. فرضیات ساده‌سازی سیستم‌های هیدرولیکی و در نظر نگرفتن عدم قطعیت‌های موجود، منجر به کاهش کارایی مدل‌های بهره‌برداری موجود می‌شوند. این کاستی‌ها، لزوم توجه به تدوین الگوهای انعطاف‌پذیر در بهره‌برداری از منابع آب را بیش از پیش روشن ساخته است. در این مقاله ضمن برشمردن جنبه‌های مختلف مؤثر در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری کارا برای مدیریت منابع آب، برخی از مهم‌ترین عوامل ایجاد عدم قطعیت در بهره‌برداری از این سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین کلیات یک الگوی انعطاف‌پذیر جهت بهره‌برداری پایدار از منابع آب ارائه شده و مدل‌های پیشنهادی قابل استفاده در بخش‌های مختلف آن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

مقدمه

پیشرفته را دوچندان ساخته‌اند. در واقع روش‌های انعطاف‌پذیر، ابزارهایی هستند برای توجیه دانش محدود ما پیرامون پدیده‌های طبیعی و عدم توانایی در پیش‌بینی دقیق این پدیده‌ها، روش‌های محاسباتی غیر دقیق که ملزم به استفاده از آنها هستیم، و نیز فرضیاتی که برای ساده‌سازی خصوصیات سیستم در نظر گرفته می‌شوند.

تاکنون مطالعات مختلفی در مورد توسعه‌ی مدل‌های بهره‌برداری از منابع آب، به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها و دخالت دادن آنها در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از تأسیسات مختلف صورت گرفته است که بخش قابل ملاحظه‌ی از آنها معطوف به مدل‌های بهره‌برداری از مخازن سدها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های طرح‌های توسعه‌ی منابع آب بوده است. نویسنده ضمن مطالعه‌ی جنبه‌های مختلف انعطاف‌پذیری در بهره‌برداری از مخازن سدها، مدل‌ها و الگوریتم‌های مختلفی را برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها پیشنهاد کرده است.

به‌منظور در نظر گرفتن ماهیت احتمالی جریان ورودی به مخازن در مدل‌های بهینه‌سازی پویا، روشی تدوین شده است که در آن، نظریه‌ی تصمیم‌گیری بیز^۱ را برای مدل‌سازی عدم قطعیت جریان ورودی به کار گرفته‌اند.^[۲]

رشد روزافزون جمعیت شهرها و تمرکز فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، در بسیاری از نقاط جهان - و ایران - به افزایش نیاز به آب برای مصارف مختلف انجامیده است. افزایش نیازها، بروز خشکسالی‌های مکرر، و نیز محدودیت استفاده‌ی مجدد از حجم قابل توجهی از منابع آب، به دلیل آلودگی‌ها و محدودیت‌های زیست‌محیطی، نیاز به نگرش سیستمی در مدیریت منابع آب را دوچندان کرده است. تعدد مؤلفه‌های تأثیرگذار و تأثیرپذیر از سیستم‌های منابع آب و عدم قطعیت‌هایی که در مدل‌سازی این سیستم‌ها با آنها مواجه هستیم، تعیین‌کننده‌ی لزوم بیش از پیش توسعه‌ی ابزارهای لازم برای کمک به مدیران در فرایند تصمیم‌گیری است. لاکس و همکاران، چارچوب پایداری در مدیریت منابع آب را با توجه به ضرورت‌های اجتماعی و زیست محیطی و چالش‌های فراروی آن تشریح کردند.^[۱] یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها، توجه به عدم قطعیت‌ها و توانایی برای کمی کردن و مدل‌سازی آنها است.

این عدم قطعیت‌ها با توجه به رشد سریع جمعیت و گسترش و توسعه‌ی شهرها و فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی در ایران اهمیت بیشتری یافته‌اند و ضرورت استفاده از مدل‌ها و ابزارهای محاسباتی

وضعیت منابع آب را در شرایط مختلف عادی و اضطراری، در زمان واقعی، فراهم می‌کند. شرایط عادی علاوه بر عدم قطعیت‌های طبیعی حاکم بر متغیرهای مختلف، از سیاستگذاری‌هایی نظیر تغییر اولویت‌های تخصیص آب و مطرح شدن نیازهای جدید به دلیل طرح‌های توسعه، تأثیر می‌پذیرد. شرایط اضطراری نیز به دو وضعیت سیلابی و خشک‌سالی تقسیم‌بندی می‌شوند. انعطاف‌پذیری به طور عام، به مفهوم تعبیه‌ی ضربه‌گیرهایی^۲ در سیستم است که با توجه به عدم قطعیت‌های مختلف حاکم بر سیستم، امکان تحمل تغییرات غیر محتمل و شوک‌های پیش‌آمده در مدیریت سیستم منابع آب را فراهم می‌کند. برخی از مهم‌ترین عواملی که تغییرات آنها منجر به عدم قطعیت در بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب می‌شوند در ادامه مورد بحث قرار گرفته‌اند.

الف) تغییرات فیزیکی مؤلفه‌های مختلف سیستم‌های منابع آب تغییر شرایط فیزیکی سیستم‌های منابع آب از جمله عوامل مؤثر بر کارایی سیاست‌های بهره‌برداری‌اند. تغییر در حجم مفید مخزن، ظرفیت دریاچه‌های آبیگری و سرریزها، حجم کنترل سیلاب و ظرفیت سالم رودخانه‌ی پایین دست مخازن، نمونه‌هایی از تغییر پارامترهای فیزیکی در سیستم‌های رودخانه - مخزن هستند.

حجم مفید مخازن به دلیل ورود رسوبات به تدریج کاهش می‌یابد که این امر علاوه بر کاهش حجم مفید مخازن، رابطه‌ی حجم نسبت به ارتفاع را نیز به نسبت توزیع رسوبگذاری در کف و دیواره‌های مخزن، تغییر می‌دهد. لازم به ذکر است در تمام سدهای مخزنی کشور، حجم آب ورودی به سد براساس میزان خروجی‌ها و تغییرات حجم و با استفاده از منحنی‌های حجم - سطح - ارتفاع که در زمان ساخت سد تهیه شده، محاسبه می‌شود که با عنایت به عدم دقت این منحنی‌ها، به دلیل در نظر نگرفتن حجم رسوبات ورودی به مخزن، می‌تواند خطای قابل توجهی به همراه داشته باشد. شکل ۱ نشان‌دهنده‌ی منحنی تغییرات حجم - سطح - ارتفاع سد لتیان، در اثر رسوبات ورودی است.

ظرفیت رودخانه‌های پایین دست مخازن از دیگر موارد با اهمیت در برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از مخازن، به ویژه در مواقع سیلابی است. اگر چه سرریزهای اکثر سدهای مخزنی کشور برای تحمل سیلاب‌هایی با دوره‌ی بازگشت چند هزار ساله طراحی می‌شوند، در بسیاری از این سدها، رودخانه‌های پایین دست به دلیل احداث تأسیسات در حریم رودخانه‌ها، ظرفیت تحمل سیلاب‌های بسیار کوچک‌تر از مقادیر در نظر گرفته شده برای طراحی سرریز را ندارند. در یک نگرش سیستمی به مسئله‌ی بهره‌برداری از مخزن بایستی به این محدودیت‌ها توجه شود. همچنین ظرفیت سالم رودخانه متأثر از

بررسی‌های انجام شده پیرامون اثرات تغییرات نیاز آبی بر عملکرد مدل‌های بهره‌برداری از مخازن سدها نشانگر آن است که تغییرات قابل توجه نیازهای آبی، خصوصاً نیازهای کشاورزی، در سال‌های مختلف بر کاهش کارایی مدل‌های بهره‌برداری که در آنها این تغییرات منظور نشده‌اند، تأثیر به‌سزایی داشته است. نویسنده و همکاران از طریق به کارگیری سری زمانی نیاز و نیز افزودن متغیر نیاز در قوانین بهره‌برداری روشی جدید برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در نیازها ارائه کردند. به منظور کاهش محدودیت‌های محاسباتی در مدل بهینه‌سازی پویای احتمالی که نیاز متغیر را به عنوان یک متغیر حالت در نظر می‌گیرد روشی نوین ارائه شده است. کاربرد تئوری مجموعه‌های فازی در برخی از مطالعات نشانگر کارایی این تئوری در توسعه‌ی مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن جهت در نظر گرفتن نیاز متغیر بوده است.^[۳-۵]

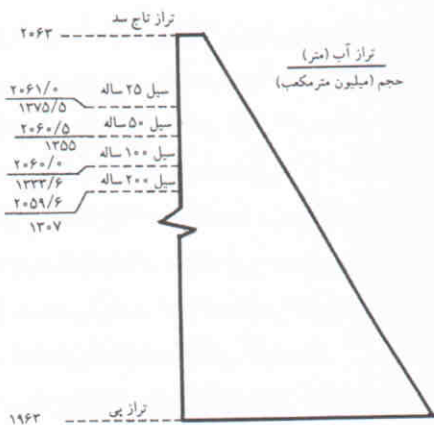
نویسنده و همکاران مدل بهره‌برداری از مخزن را جهت بهینه‌سازی همزمان شرایط کمی - کیفی توسعه دادند. آنان ضمن در نظر گرفتن کیفیت آب در مخزن و جریان خروجی، امکان تدوین سیاست‌های بهینه‌ی بهره‌برداری را با در نظر گرفتن شرایط کیفی رودخانه‌ی پایین دست فراهم کردند.^[۷]

تدوین یک ساختار جامع برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب به نحوی که امکان استفاده از ابزارهای فوق فراهم شود، توسط محققین مختلف مورد توجه قرار گرفته است. پلیت، چهار مرحله‌ی برنامه‌ریزی مقدماتی، جمع‌آوری اطلاعات و داده‌پردازی، فرموله کردن و انتخاب گزینه‌ها و تدوین نتایج نهایی را در فرایند برنامه‌ریزی منابع آب معرفی، و جزئیات بخش‌های مختلف در هر مرحله را تشریح کرده است.^[۸]

در این نوشتار سعی بر آن است تا ضمن برشمردن جنبه‌های مختلف تأثیرگذار در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب، برخی از مهم‌ترین تغییرات و عدم قطعیت‌های پارامترهای مختلف که بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب را تحت تأثیر قرار می‌دهند، معرفی شوند. همچنین برخی از تمهیدات در نظر گرفته شده در مدل‌های بهره‌برداری برای اعمال انعطاف‌پذیری در مقابل این تغییرات تشریح خواهد شد، و در نهایت ساختار یک سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری که با برقراری ارتباط صحیح بین مدل‌ها، داده‌ها و کاربر، امکان ارائه‌ی روشن‌تر نتایج را برای تغییر در اولویت‌ها و نگرش فعلی به مسئله‌ی بهره‌برداری از منابع آب فراهم می‌آورد، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

مؤلفه‌های انعطاف‌پذیری

انعطاف‌پذیری، عبارت است از ایجاد ساز و کاری که امکان بررسی

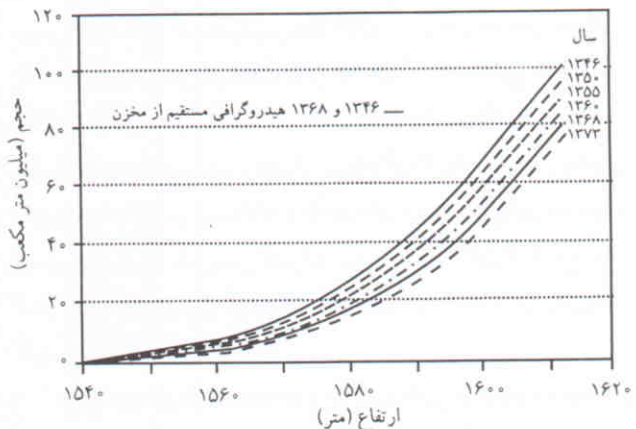


شکل ۲. درجه بندی مخزن سد زاینده رود برای تحمل سیلاب‌هایی با دوره‌های بازگشت مختلف.

تأثیرگذار در وضعیت بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب هستند. فرض کنید جریان ورودی به سد در ماه آینده مشخص نیست و بایستی پیش‌بینی شود. در اینجا تصمیم‌گیرنده با دو نوع عدم قطعیت روبرو است: یکی عدم قطعیت ذاتی و طبیعی در تشخیص میزان واقعی آب و رفتار رودخانه، و دیگری عدم قطعیت ناشی از مدل‌سازی و انتخاب پارامترهای مدل برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن (عدم قطعیت پیش‌بینی) است.

در ارتباط با عدم قطعیت طبیعی، بررسی تغییرات ماهانه و سالانه‌ی رواناب‌های سطحی حاکی از آن است که علاوه بر این که متوسط ماهانه تغییرات زیادی را نشان می‌دهد، آورده‌های سطحی در یک ماه خاص نیز در سال‌های مختلف تغییرات قابل توجهی دارد. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات فصلی و غیر فصلی، مدل‌سازی آماری داده‌های تاریخی ورودی به سد به دو صورت مختلف صورت می‌گیرد.

در رویکرد اول، تولید انبوه داده‌های مصنوعی و جریان ورودی به سد با استفاده از مدل‌های آماری مورد توجه قرار می‌گیرد. ساخت داده‌های مصنوعی بر مبنای تولید اطلاعات جدید از داده‌های تاریخی است که از لحاظ خصوصیات آماری به همان داده‌های مشاهداتی تعلق داشته و تعدد آن، منعکس‌کننده‌ی عدم قطعیت‌ها و تغییرات تصادفی متغیر جریان در مدل است. این رویکرد در نظر گرفتن تأثیر عدم قطعیت بر جریان ورودی را در مدل‌های بهینه‌سازی قطعی ممکن می‌سازد. لازم به ذکر است که کارایی داده‌های مصنوعی در مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها تا حد زیادی به دقت برازش مدل‌های آماری به اطلاعات تاریخی بستگی دارد و این داده‌ها فقط قادرند عدم قطعیت‌ها را تا حد تغییراتی که در داده‌های تاریخی رخ داده است، منعکس سازند.



شکل ۱. تغییرات منحنی‌های حجم-ارتفاع سد لتیان برای سال‌های مختلف در اثر رسوب‌گذاری.

عوامل طبیعی مثل رویش‌های گیاهی در بستر و حاشیه‌ی آن است، زیرا این عوامل در ضریب زبری رودخانه، که شرایط هیدرولیکی جریان و ظرفیت نهایی رودخانه از آن متأثرند، تأثیر می‌گذارد.

حجم کنترل سیلاب از دیگر مواردی است که در اکثر مدل‌های موجود، مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که این حجم در ماه‌های مختلف تغییر می‌کند. مثلاً در شکل ۲، درجه بندی مخزن سد زاینده رود برای مهر سیلاب‌هایی که دوره‌ی بازگشت آنها متفاوت است نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حجم کنترل سیلاب برای این سیلاب‌ها تغییرات زیادی دارد، که با توجه به توزیع ماهانه‌ی احتمال وقوع سیلاب‌ها، می‌تواند راهنمایی برای تعیین این حجم در ماه‌های مختلف باشد. پارامترهای متعددی در محاسبه‌ی احجام کنترل سیلاب نشان داده شده در این شکل، مورد توجه قرار گرفته است که از جمله می‌توان به ظرفیت رودخانه‌ی پایین دست و تداوم و حجم سیلاب‌های به وقوع پیوسته در ماه‌های مختلف اشاره کرد. احجام کنترل سیلاب بایستی مرتباً با توجه به توسعه‌ی مناطق حاشیه‌ی رودخانه پایین دست مخازن و اطلاعات سیلاب‌های اخیر، به‌هنگام سازی شده و مورد بازنگری قرار گیرند.

تغییر در شرایط فیزیکی تنها محدود به این نمونه‌ها نیست و حتی می‌تواند در سطح حوزه‌های آبریز مطرح شود. تغییر ضریب رواناب در بسیاری از حوزه‌های آبریز کشور تحت تأثیر خشکسالی‌های اخیر که بیلان آب را در این مناطق دگرگون ساخته، نمونه‌ی بارز از اهمیت توجه به این تغییرات در سطح حوزه‌های آبریز است.

ب) عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی

رواناب‌های^۳ سطحی و ورودی‌های به سدها از مهم‌ترین عوامل

حرارت سطح آب اقیانوس‌ها (SST)^۷، نوسان اطلس شمالی (NAO)^۸ و شاخص نوسان جنوبی (SOI)^۹ است. نتایج تحقیقات انجام شده در بسیاری از مناطق جهان نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه تغییرات درجه حرارت و فشار سطح آب اقیانوس‌ها بر وقوع دوره‌های خشک و تر سالانه با تأخیرهای زمانی قابل توجه بوده است به نحوی که با بررسی تغییرات این پارامترها، قبل از شروع یک سال آبی، می‌توان قرار گرفتن در یک سال خشک یا تر را پیش‌بینی کرد.

علاوه بر عدم قطعیت‌ها، عدم صراحت ناشی از وجود ابهام در تعریف و تعیین حد و مرز تغییرات یک متغیر از دیگر عوامل مؤثر در کاهش دقت مدل‌سازی‌هاست. عدم صراحت لزوماً به معنی سهل‌انگاری در اندازه‌گیری یک پدیده نیست، بلکه در اکثر موارد، عدم عینیت میزان و شدت و نفس یک پدیده است. مثلاً، هرچه پیش‌بینی ورودی به یک سد دقیق‌تر بیان شود، احتمال وقوع آن کمتر خواهد بود، ولی اگر پیش‌بینی محتمل به صورت یک بازه ارائه شود، احتمال وقوع در این بازه تا حدی بیشتر خواهد بود.

استفاده از روش مجموعه‌های فازی^{۱۰} این امکان را فراهم می‌سازد که در ارتباط با متغیرهایی که به صورت بازه تعریف می‌شوند، عضویت مقادیر امکان‌پذیر در داخل بازه و مرز بازه‌ها و نحوه هم‌پوشانی بازه‌ها به یکدیگر به صورت سیستماتیک تعریف و تحلیل شوند. قوانین فازی برای طیف وسیعی از مسائلی که به صورت «اگر... آن‌گاه»^{۱۱} در مدیریت منابع مطرح می‌شوند، قابل تعمیم است. استفاده یا حذف این قوانین به معیاری به نام «درجه‌ی مصداق»^{۱۲} بستگی دارد. تعیین مقدار این شاخص از اهمیت خاصی برخوردار است. بدین صورت که با انتخاب مقداری بزرگ برای این شاخص، داده‌های کم‌تری برای تعریف و تدوین قوانین مورد استفاده قرار می‌گیرند و حتی ممکن است بعضی از داده‌های تاریخی در ساخت هیچ قانونی دخالت داده نشوند. بنابراین قوانین طراحی شده قادر نخواهند بود به سادگی رفتار سیستم را مدل‌سازی کنند. از سوی دیگر، با انتخاب مقدار کوچکی برای این شاخص، هرچند که داده‌های بیشتری برای تدوین قوانین مورد استفاده قرار می‌گیرند، تعدد قوانین ممکن است باعث افت کارایی سیستم شود. البته معیار بزرگی یا کوچکی، به شرایط فیزیکی مسئله و تعداد تقسیم‌بندی متغیرهای ورودی سیستم دارد ولی در هر صورت مقدار در نظر گرفته شده بسته به شرایط مسئله باید به گونه‌ی تدوین شود تا علاوه بر استفاده مؤثر از داده‌های تاریخی، با کنترل ابعاد مسئله، موجب کاهش در دقت و کارایی مدل نشود.^[۶] بدین ترتیب، استفاده از این شاخص، انعطاف‌پذیری لازم در برخورد با اطلاعات نادقیق را برای

رویکرد دوم ساخت سری زمانی پیش‌بینی برای مدل‌سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی جریان ورودی است که امکان استفاده از سیاست‌های بهینه را در زمان واقعی نیز فراهم می‌کند. در این رویکرد، تکیه بر نحوه‌ی مدل‌سازی همبستگی‌ها و استفاده از حداکثر خصوصیات رفتاری نهفته در داده‌ها و پردازش آنها بوده است، به نوعی که بتوان از داده‌های مشاهده‌ای، خصوصیات آماری جامعه‌ی مربوطه را جستجو کرد. در این نحوه‌ی برخورد، تکیه بر ارتباط متغیرهای تصادفی و خودهمبستگی^۴ آنهاست.

نمونه‌ی از مدل‌هایی که امکان در نظر گرفتن هر دو دسته عدم قطعیت‌های طبیعی و پیش‌بینی را فراهم می‌کند، توسعه داده شده است. این مدل که به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن توسعه داده شده، BDSDP^۵ نامیده شده است و امکان به‌هنگام سازی احتمالات انتقال جریان را با استفاده از نظریه‌ی تصمیم‌گیری بیز فراهم کرده است. متغیرهای حالت در این مدل عبارت‌اند از: حجم ذخیره‌ی مخزن در ابتدای ماه، جریان ورودی مشاهده شده در طول ماه (I_t) و پیش‌بینی جریان ورودی به سد در ماه بعد (H_{t+1}). بدین ترتیب با در نظر گرفتن همزمان جریان ورودی مشاهده شده در ماه t و جریان پیش‌بینی شده در ماه $t+1$ ، علاوه بر آن‌که ماهیت احتمالاتی جریان ورودی به سد در نظر گرفته می‌شود، عدم قطعیت ناشی از خطای مدل‌های پیش‌بینی نیز در فرایند تدوین سیاست‌های بهینه مورد توجه قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، در ماتریس احتمال انتقال ($I_{t+1} | I_t$) که عدم قطعیت ذاتی جریان ورودی مستتر است، متغیر H_{t+1} اضافه می‌شود تا به شکل ($I_{t+1} | H_{t+1}, I_t$) نه تنها عدم قطعیت ذاتی در نظر گرفته می‌شود، بلکه عدم قطعیت حاصل از استفاده از مدل پیش‌بینی نیز ملحوظ می‌شود.^[۲]

تجربه‌ی کاربرد مدل‌های خودهمبسته میانگین متحرک تفاضلی (ARIMA)^۶ برای ساخت سری زمانی پیش‌بینی جریان ورودی به هفت سد مخزنی کشور و نیز پیش‌بینی در زمان واقعی در مقیاس ماهانه و فصلی نشانگر کارایی این مدل‌ها بوده است. علاوه بر این، ممکن است روش‌های مختلفی در اصلاح پیش‌بینی‌های آماری مورد توجه قرار گیرد که عمدتاً بر پایه‌ی استفاده از اطلاعات هواشناسی، بودجه‌ی برفی حوزه و نیز اطلاعات کوتاه‌مدت آورده‌های سطحی متکی‌اند.^[۹-۱۲]

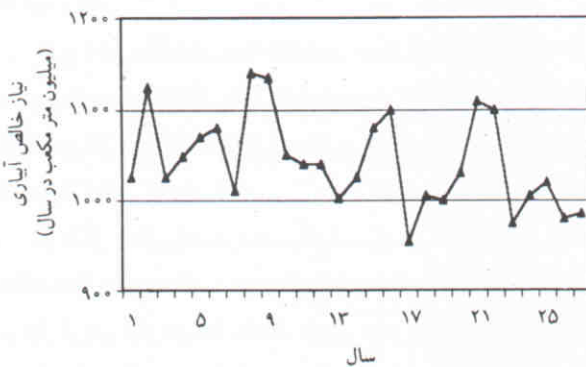
از جمله زمینه‌های تحقیقاتی که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته و روش‌های جدیدی را به منظور اصلاح پیش‌بینی‌های فصلی - و حتی سالانه - پیش روی تصمیم‌گیرندگان قرار داده است، استفاده از سیگنال‌های هواشناسی نظیر قرار گرفتن در سال‌های El Nino و La Nina و پارامترهایی نظیر تغییرات درجه

عوامل مختلف، به ویژه عوامل طبیعی، تأثیر پذیرد. همچنین عوامل سیاسی و اجتماعی ناشی از تغییر ساختار جوامع، در ایجاد تغییرات در نیازها - خصوصاً نیازهای کشاورزی - تأثیر قابل ملاحظه‌یی دارند. عوامل سیاسی ناشی از سیاستگذاری‌ها و برنامه‌های توسعه‌ی کشت‌های استراتژیک در برنامه‌های عمرانی‌اند. عوامل اجتماعی نیز ناشی از تمایل کشاورزان به کشت محصولاتی است که بازده اقتصادی بالاتری دارند.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی - نظیر بارندگی، رطوبت، درجه حرارت، سرعت باد، ساعات آفتابی و میزان تشعشع خالص - در میزان نیاز آبی خالص گیاهان مختلف تأثیر قابل ملاحظه‌یی دارند. همین نکته منجر به تغییرات نیازهای آبی گیاهان در سال‌ها و ماه‌های مختلف می‌شود. اکثر مدل‌های بهره‌برداری موجود، عدم قطعیت در نیاز را در نظر نمی‌گیرند.

در شکل ۴ تغییرات نیاز آبی شبکه‌های کشاورزی حاشیه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود تحت تأثیر تغییر پارامترهای اقلیمی نشان داده شده است. مثلاً نیاز آبی خالص گندم براساس اطلاعات هواشناسی سال ۱۳۵۶، ۴۱۷ میلی‌متر، و در سال ۱۳۶۱ معادل ۲۸۸ میلی‌متر کاهش برآورد شده که با توجه به شرایط اقلیمی کاهش قابل توجهی است.

مقایسه‌ی کل نیاز آبی در الگوی کشت فعلی در این دو سال نشان‌دهنده‌ی حدود ۱۵ درصد تغییر بوده که با توجه به حجم قابل ملاحظه‌ی نیازهای کشاورزی در این منطقه، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در کارایی سیاست‌های بهره‌برداری خواهد داشت. نکته‌ی قابل توجه این است که در ارتباط با نیازهای کشاورزی، زمانی که گیاه نیاز بیشتری دارد، محدودیت منابع آب نیز قابل ملاحظه است که لزوم در نظر گرفتن تغییرات نیاز را در برنامه‌ریزی دوچندان می‌کند. در نظر گرفتن تغییرات نیازهای آبی مستلزم استفاده از نوعی مدل بهره‌برداری است که امکان مدل‌سازی عدم قطعیت در نیاز را فراهم

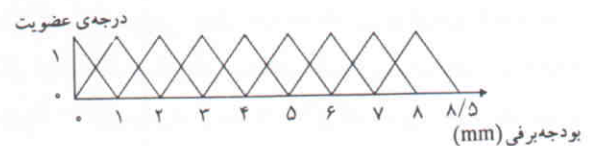


شکل ۴. تغییرات نیاز آبی اراضی کشاورزی حاشیه‌ی رودخانه‌ی زاینده‌رود در سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۷۵.

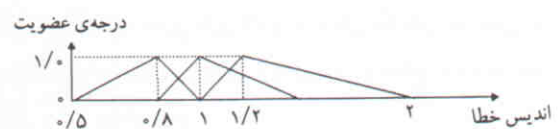
تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌کند. [۱۳۵] در دسته‌یی از مطالعات انجام شده از نظریه‌ی مجموعه‌های فازی در اصلاح پیش‌بینی‌های آماری رودخانه‌ی سالت (salt) در ایالت آریزونا، آمریکا استفاده شده است. [۱۴] برای این منظور تابع عضو مثلثی ۱۳ برای خطای نسبی پیش‌بینی و نیز بودجه‌ی برفی حوزه‌ی آبریز در ماه‌های مختلف تعریف شده است (شکل ۳). در انتخاب توابع عضویت فازی، میزان تغییرات رواناب و بودجه‌ی برفی در ماه‌های مختلف و میزان حساسیت الگوریتم اصلاح پیش‌بینی به تغییرات بودجه‌ی برفی مورد توجه بوده است. قوانین اصلاح پیش‌بینی براساس میزان بودجه‌ی برفی در ابتدای هر فصل به صورت مجزا برای سال‌های El Nino، ENSO Neutral و La Nina تدوین شده که امکان در نظر گرفتن تأثیر سیگنال‌های هواشناسی در پیش‌بینی جریان رودخانه را نیز فراهم می‌کند. این شرایط هواشناسی براساس تغییرات فشار و درجه‌ی حرارت سطح آب دریا در نواحی استوایی بین جزیره‌ی تاهیتی (Tahiti) در غرب و داروین (Darwin)، در شمال اندونزی در شرق اقیانوس آرام تعیین می‌شود که با شاخص نوسانات جنوبی در بازه‌ی ۳- تا ۳+ سنجیده می‌شود. در تدوین این روش، عدم صراحت الگوریتم‌های پیش‌بینی به گونه‌یی مورد توجه قرار گرفته که امکان در نظر گرفتن محدوده‌یی از جریان فصلی پیش‌بینی شده، و نیز اصلاح آن به مقداری مشخص که به‌طور ملموس در مدل‌های بهره‌برداری قابل استفاده باشد، فراهم شود.

ج) تغییرات در نیازهای آبی

نیازهای آبی از دیگر پارامترهای مؤثر در ساختار مدل‌ها و تدوین سیاست‌های بهره‌برداری است. رشد روزافزون جوامع شهری، توسعه و گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی موجب افزایش نیازهای آبی در بسیاری از مناطق جهان شده است. رشد مصرف آب در سال‌های مختلف تغییرات قابل ملاحظه‌یی دارد که ممکن است از

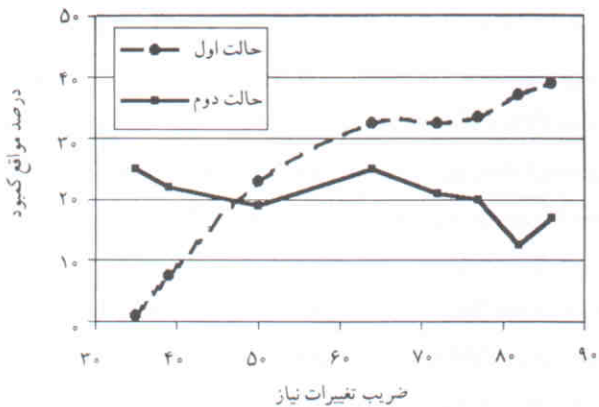


الف) عمق متوسط بودجه‌ی برفی



ب) اندیس خطای پیش‌بینی

شکل ۳. تابع عضویت فازی.



شکل ۵. درصد مواقع کمبود نیاز در نتایج شبیه‌سازی سیستم رودخانه - مخزن زاینده‌رود براساس سیاست‌های بهینه‌ی مدل DDSPP با در نظر گرفتن نیاز متوسط ماهانه (حالت اول) و نیاز متغیر (حالت دوم).

سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ضریب تغییرات نیاز، درصد مواقعی که کمبود اتفاق افتاده است در حالت دوم، به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

د) فعل و انفعالات کمی و کیفی در مسیر رودخانه

حاشیه‌ی اکثر رودخانه‌های پایین دست سدها، محل تجمع مراکز شهری و فعالیت‌های مختلف کشاورزی و صنعتی است که این فعالیت‌ها خود عامل ایجاد تغییرات کیفی یا کمی در جریان خروجی از سد هستند. برداشت‌های آب از نقاط مختلف و پساب‌های آنها که به رودخانه بازمی‌گردند، علاوه بر تغییرات کمی، گاهی اوقات محدودیت‌های زیست‌محیطی قابل ملاحظه‌یی ایجاد می‌کنند که خود می‌تواند به محدودیتی برای تدوین سیاست‌های بهره‌برداری تبدیل شود. به عبارت دیگر شناخت چرخه‌ی آب در داخل یک سیستم رودخانه - مخزن، از ملزومات برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از آن است. در شکل ۶ سیستم رودخانه - مخزن زاینده‌رود همراه با نمودار شبکه‌های کشاورزی، مصارف عمده‌ی صنعتی و شهری و طرح‌های انتقال آب بین حوزه‌یی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، اجزای مختلفی طول رودخانه‌ی زاینده‌رود (حدوداً ۳۲۰ کیلومتر)، از سد تا باتلاق گاوخونی، بر شرایط کمی و کیفی رودخانه تأثیر می‌گذارند که پیچیدگی آن در نظر اول، مانع از در نظر گرفتن تمام این مؤلفه‌ها در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب می‌شود. به همین دلیل لازم است طی نگرشی سیستمی کل این اجزاء شناسایی شده و تصویر روشن‌تری از منابع آب و عوامل تأثیرگذار بر آن ایجاد شود.

در چنین شرایطی، تحلیل‌های انجام شده برای تدوین سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب، نباید تنها به وضعیت منابع و

می‌کند. اکثر مدل‌های بهره‌برداری موجود، عدم قطعیت در نیاز را در نظر نمی‌گیرند.

مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالی بر مبنای نیاز متغیر (DDSP)، برای بهره‌برداری از مخازن سدها تدوین شده است که در آن، نیاز غیر قطعی در هر ماه به‌عنوان یک متغیر حالت، دخالت داده شده است. [۱۵] در این مدل متغیر پیش‌بینی جریان ورودی به‌عنوان یک متغیر حالت در نظر گرفته شده و احتمالات انتقال جریان ورودی با استفاده از نظریه‌ی تصمیم‌گیری بیز (BDT) به روز می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن شماری دوره‌ی زمانی درون سالی به‌عنوان یک متغیر حالت، امکان در نظر گرفتن نیاز ماهانه به‌عنوان یک متغیر حالت فراهم شده است. مقدار متغیر تصمیم‌گیری^{۱۴} یعنی جریان خروجی به وضعیت سیستم شامل: شاخص حجم ذخیره‌ی مخزن، K ، (S^c_M) ، شاخص جریان ورودی به مخزن، I ، (I^c_M) و شاخص جریان پیش‌بینی شده در ماه بعد، ii ، (H^c_{M+1}) بستگی دارد. معادله‌ی بازگشتی در این مدل چنین است:

$$F_{Y,M}(D^c_M, S^c_M, I^c_M, H^c_{M+1}) = \min\{E(D^c_{M+1}|D^c_M)$$

$$\cdot [CR_M + CS_{M+2} + (E(I^c_{M+1}|H^c_{M+1}), I^c_M)$$

$$\cdot \{E(H^c_{M+2}|I^c_{M+1}) \cdot [f^*_{Y,M+1}(D^c_{M+1}, S^c_{M+1}, I^c_{M+1},$$

$$H^c_{M+2})]\}\}$$

D^c_M : شاخص نیاز کل ماه

$$s.t. \quad D^c_M = DS(M) + DI(M) + DK^c_M$$

$DS(M)$: نیاز قطعی شرب در ماه

$DI(M)$: نیاز قطعی صنعت در ماه

DK^c_M : شاخص نیاز احتمالی کشاورزی در ماه

Y : شاخص سال یا تکرار

CR_M : خسارت خروجی در ماه

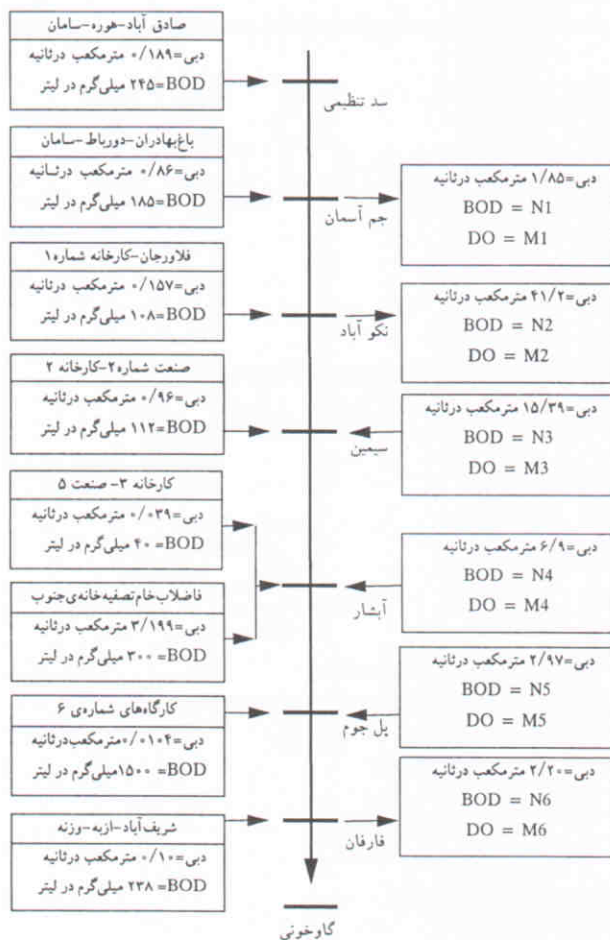
CS_{M+2} : خسارت ذخیره در انتهای ماه $M+1$

E : امید ریاضی

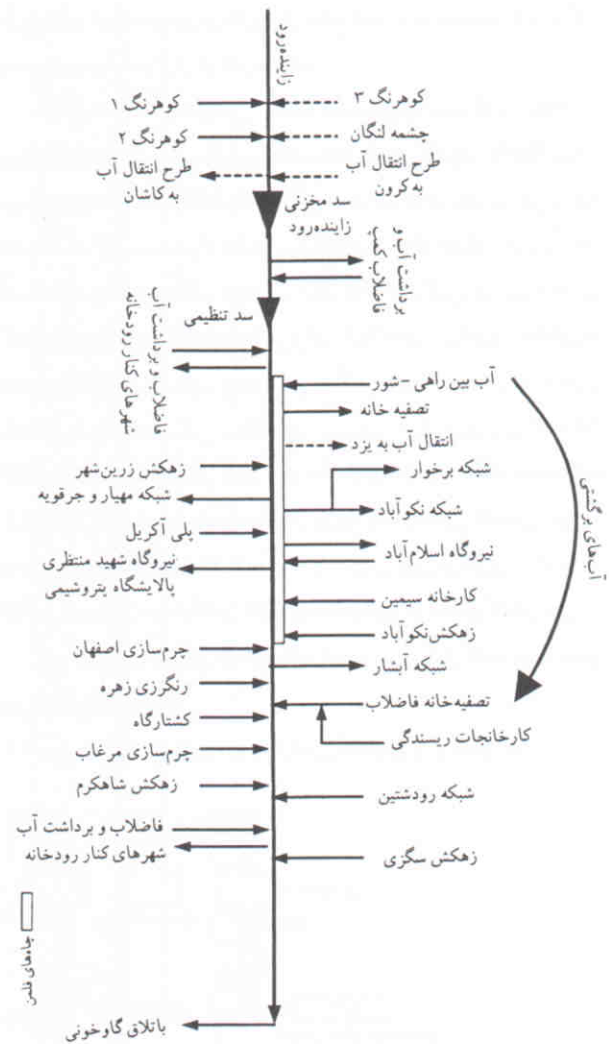
کاربرد این مدل برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم رودخانه - مخزن زاینده‌رود نشانگر تأثیر قابل توجه در نظر گرفتن عدم قطعیت نیازها در کارایی سیاست‌های بهینه‌ی بهره‌برداری از سد زاینده‌رود در شرایط واقعی بوده است.

در شکل ۵ تغییرات درصد مواقع کمبود در تأمین نیاز در دو حالت نشان داده شده است: در حالت اول، سیاست‌های بهینه‌سازی با در نظر گرفتن نیاز متوسط ماهانه تدوین شده و شبیه‌سازی سیستم تحت سیاست‌های بهینه با توجه به نیاز متغیر صورت گرفته است. در حالت دوم، نیاز متغیر در تدوین سیاست‌های بهینه و شبیه‌سازی

در حد فاصل سد تا باتلاق گاوخونی به هفت بازه تقسیم شده و پارامترهای مدل کیفی برای این هفت بازه محاسبه شده است. در انتخاب این بازه‌ها، موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری دبی و پارامترهای کیفی، موقعیت و میزان فاضلاب‌های ورودی به رودخانه، مشخصات هیدرولیکی رودخانه و بررسی اجمالی تغییرات پارامترهای DO و BOD₅ مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این روش به دلیل سادگی معادلات و نیز امکان اندازه‌گیری پارامترهای مختلف نظیر ثابت‌های اکسیژن‌گیری و اکسیژن‌دهی با استفاده از اطلاعات واقعی موجود، براساس اندازه‌گیری‌های کیفی در نقاط مختلف می‌تواند کاربرد بسیاری داشته باشد. نتایج شبیه‌سازی تغییرات این دو پارامتر و مقایسه‌ی آن با مقادیر ثبت شده در ایستگاه‌ها نشان داد که علی‌رغم اطلاعات بسیار کمی که در دسترس بوده و ساختار ساده‌ی که برای مدل در نظر گرفته شده، اندازه‌گیری پارامترها به نحوی انجام گرفته که نتایج از تطابق قابل قبولی برخوردارند. پس از نهایی شدن پارامترها از مدل بهینه‌سازی که با



شکل ۷. نمودار ورودی‌ها و برداشت‌های آب از زاینده‌رود جهت مدل‌سازی کیفی رودخانه.



شکل ۶. نمودار مؤلفه‌های مختلف تأثیرگذار بر سیستم رودخانه - مخزن زاینده‌رود.

تأسیسات بهره‌برداری از آنها محدود شوند، بلکه باید تا هر فاصله‌ی که شرایط حاکم بر سیستم بر سیاست‌های بهره‌برداری تأثیرگذار باشد، گسترش یابد. پیچیدگی‌های موجود در اکثر سیستم‌های هیدرولیکی ممکن است در این بررسی‌ها، مشکلات و محدودیت‌هایی را ایجاد کند. برای این منظور لازم است چنان‌که ذکر شد، با نگرشی سیستمی کل این اجزاء شناسایی شده و تصویر روشن‌تری از رودخانه و عوامل تأثیرگذار بر آن ایجاد شود، تحلیل‌گر می‌تواند اجزای این ساختار ساده شده را در تدوین سیاست‌های بهره‌برداری مد نظر قرار دهد.

از مؤلفه‌های مهم برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در این سیستم، ساختار مدل خودپالایی^{۱۵} آن است که با استفاده از معادلات بقای جرم تعادل DO و BOD₅ برای بازه‌های مختلف تدوین شده است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، رودخانه‌ی زاینده‌رود

طرح های توسعه ی بهره برداری از منابع آب را به تصمیم گیرندگان به نحوی بسیار مؤثرتر فراهم می کند.

شکل ۸ نشانگر نمونه یی از مدل شبیه سازی است که با استفاده از روش برنامه ریزی شیء گرا و با استفاده از نرم افزار Stella برای سیستم رودخانه ها و کانال های واقع در محدوده ی جنوب تهران تهیه شده است. این سیستم از هفت رودخانه ی سرخه حصار، فیروزآباد، آب سیاه، یاخچی آباد، بهشتی، نعمت آباد، و کن، و نیز اراضی کشاورزی واقع در قلعه ی نو، کهریزک، اسلام شهر، ورامین و فشافویه، مخزن فشافویه و مخزن پیشنهادی دیگری در غرب این مخزن متشکل است. هدف این مطالعات، بررسی امکان پذیری احداث کانالی است برای انتقال آورد رودخانه های مذکور - که مشکلات کیفی قابل توجهی دارند - پیش از ورود به اراضی کشاورزی به محل های پیشنهادی برای تصفیه، و سپس بهره برداری از آنها در اراضی جدیدی در منطقه ی فشافویه به منظور توسعه ی کشاورزی.

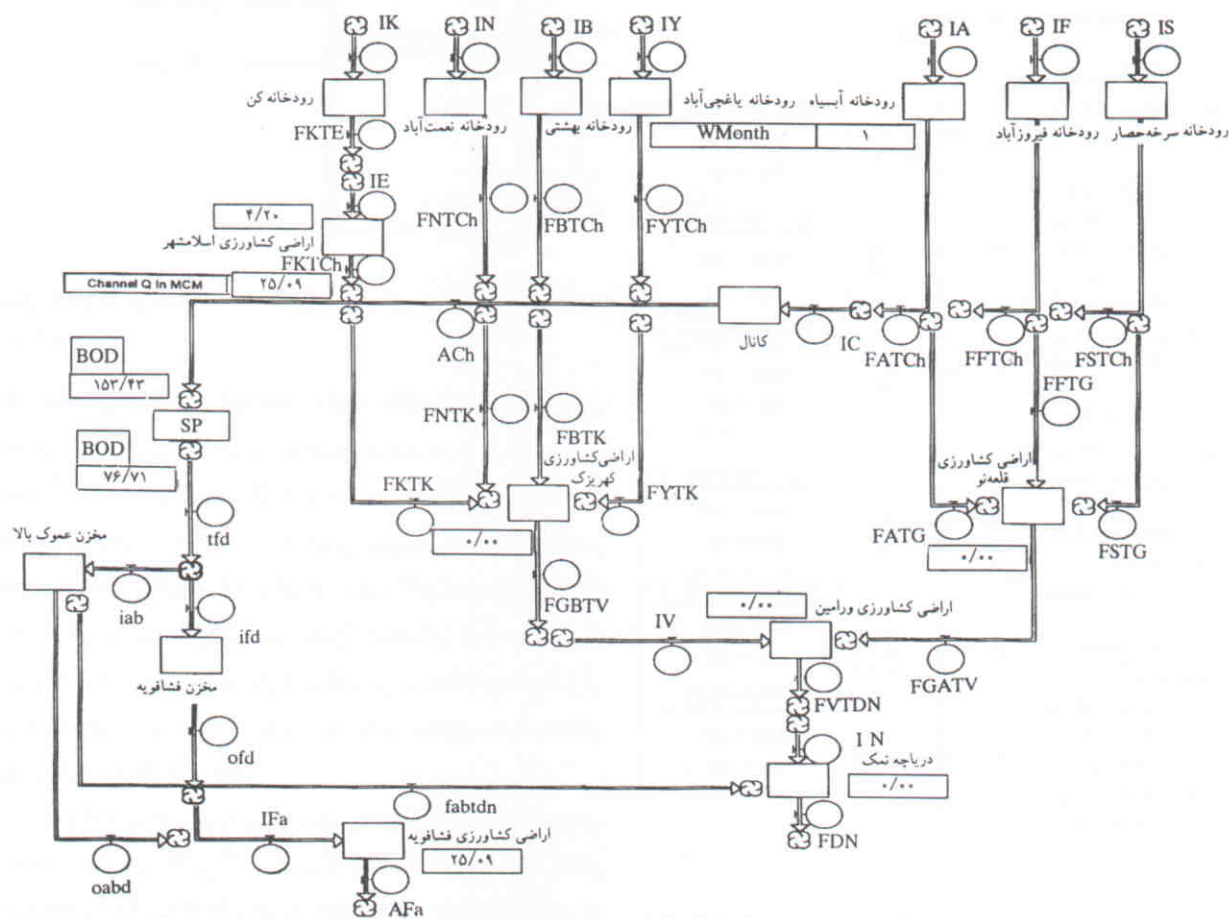
در مدل شبیه سازی نشان داده شده در شکل ۸، قابلیت های

زیر فراهم شده است:

- تعیین میزان تخصیص آب به اراضی کشاورزی و کمبودها؛

استفاده از روش برنامه ریزی خطی تدوین شده برای تعیین حداقل تصفیه ی لازم که بایستی برخوردارهای کیفی رودخانه حفظ شود، استفاده شده است که نتایج آن نشانگر قابلیت اجرایی مدل تدوین شده است. [۱۶]

استفاده از مدل های شبیه سازی پیشرفته که امکان بررسی اثرات سیاست های مختلف بهره برداری را بر مؤلفه های مختلف سیستم فراهم کنند از جمله روش هایی است که در این بخش مطرح است. روش برنامه ریزی شیء گرا از آخرین دستاوردها در زمینه ی توسعه ی مدل های شبیه سازی است. این روش امکان شبیه سازی واقعی تر سیستم را با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی مؤلفه های مختلف آن فراهم می کند. برای این منظور، یک سری اشیاء پایه در این مدل ها انتخاب می شوند و با ترکیب های متنوعی از این اشیاء اجزاء مختلف سیستم تعریف می شوند. خصوصیات مختلف این اشیاء و ارتباطات مختلف بین آنها، امکان مدل سازی سیستم های پیچیده ی منابع آب را با استفاده از مدل های شیء گرا فراهم می کند. قابلیت های گرافیکی مدل های شیء گرا، امکان ارائه ی نتایج گزینه های مختلف در



شکل ۸. مدل شبیه سازی سیستم منابع آب جنوب تهران با استفاده از برنامه ریزی شیء گرا.

روش‌های پیشرفته‌ی مدل‌سازی متکی باشد، به استفاده‌ی مناسب از فرضیات ساده‌کننده و قضاوت‌های مهندسی بستگی دارد. مطالعه‌ی انجام شده برای تخمین پارامترهای مدل خودپالایی رودخانه‌ی زاینده‌رود، که قبلاً توضیح داده شد، نمونه‌ی است از کاربرد قضاوت‌های مهندسی در ساده‌سازی سیستم و تخمین پارامترها. در این مطالعه، نمودار سیستم رودخانه-مخزن زاینده‌رود که در شکل ۶ نشان داده شد، با توجه به اطلاعات کمی و کیفی موجود، ساده‌سازی شده است. در ادامه‌ی این مطالعه، همین سیستم به ۱۲ بازه بسط داده شد.^[۱۷] این نحوه‌ی عملکرد با نگرش سیستمی بوده است که در آن با مهیا شدن اطلاعات جدید، سیستم طراحی شده قابل تعمیم به شرایط پیچیده‌تری خواهد بود.

روش‌های اعمال انعطاف‌پذیری در مدل‌های بهره‌برداری از منابع آب

با توجه به توضیحاتی که در مورد برخی از مهم‌ترین عدم قطعیت‌ها و تغییرات در پارامترهای مؤثر در بهره‌برداری از منابع آب ذکر شد، لزوم تدوین الگوهای انعطاف‌پذیر روشن‌تر شد. با توجه به پیچیدگی اکثر سیستم‌های هیدرولیکی و ماهیت ناشناخته‌ی بسیاری از این تغییرات و عدم قطعیت‌ها، لازم است تا ابتدا مؤلفه‌ها و پارامترهای سیستم و ارتباطات بین آنها شناخته شوند (Disintegration) و سپس با نگرش برنامه‌ریزی یکپارچه‌ی منابع آب^{۱۶}، بهره‌برداری از سیستم مدل‌سازی شود.

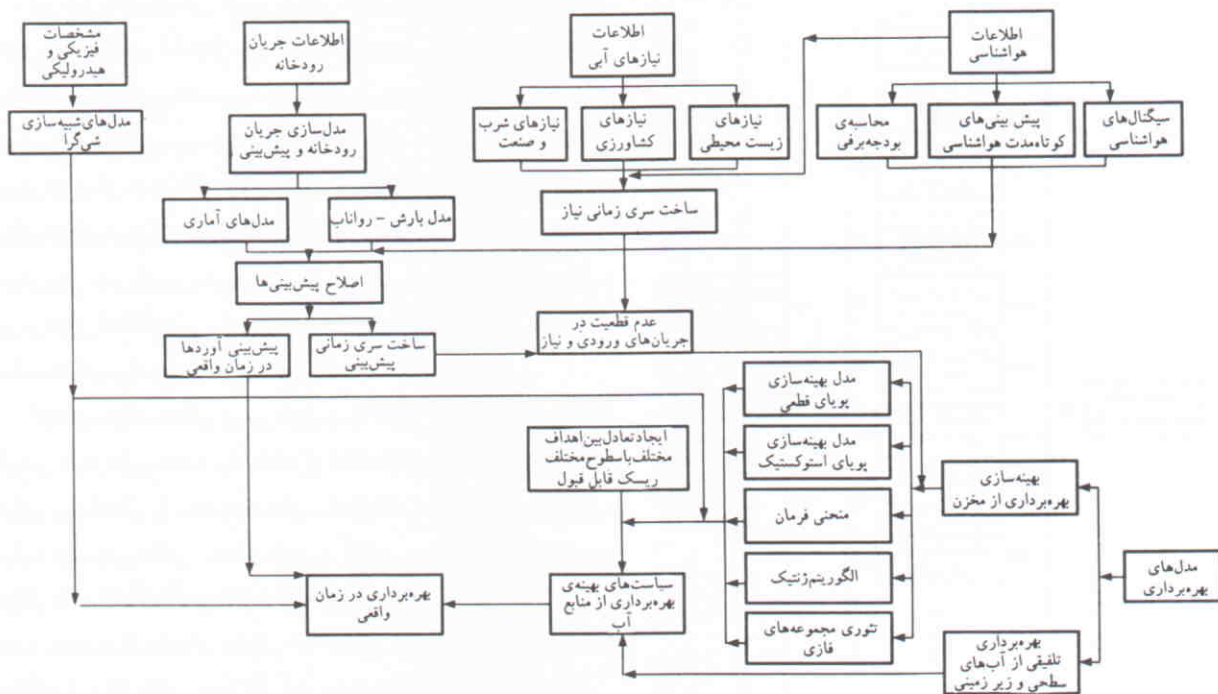
- تعیین میزان آب قابل انتقال توسط کانال؛
- شبیه‌سازی وضعیت بهره‌برداری از مخزن فشافویه و مخزن پیشنهادی، شامل میزان خروجی در هر ماه و تغییرات ذخیره‌ی مخزن؛
- تعیین خروجی از کل سیستم به دریاچه‌ی نمک، با توجه به میزان آب‌های برگشتی؛
- محاسبه‌ی تغییرات BOD₅ در طول مسیر کانال انتقال، براساس مشخصات هیدرولیکی کانال و نیز با توجه به میزان دبی، شیب کانال، سرعت جریان و کیفیت جریان‌های ورودی از نهرها.

ه) فرضیات در محاسبات و تخمین پارامترها

کافی نبودن دانش بشر در تحلیل وقایع طبیعی، کارشناسان را ملزم به استفاده از روابط و روش‌های محاسباتی کرده است که علی‌رغم عدم دقت و به همراه داشتن خطاهای مختلف، تا حدی فراهم آورنده‌ی امکان شناسایی، بررسی و پیش‌بینی تغییرات پارامترهای مختلف سیستم‌های هیدرولیکی اند.

کمبودهای اطلاعاتی، عدم کارایی مدل‌ها و ابزارهای محاسباتی و روابط ریاضی، کاربرد قضاوت‌های مهندسی، در نظر گرفتن مناسب‌ترین فرضیات ساده‌کننده و روش‌های اندازه‌گیری پارامترها را به زمینه‌ی برای رشد خلاقیت‌ها و نوآوری در تحلیل‌های کارشناسی تبدیل کرده است.

امروزه علی‌رغم توسعه‌ی قابل توجه روش‌های محاسباتی، ارزش دانش فنی یک مجموعه و کارایی آن بیش از آن‌که به استفاده از



شکل ۹. الگوی انعطاف‌پذیر بهره‌برداری از منابع آب.

تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۱۸} در مدل‌سازی فرایند تصمیم‌گیری تأثیر قابل ملاحظه‌یی دارد.

از جمله روش‌هایی که در تصمیم‌گیری چند معیاره برای برنامه‌ریزی منابع آب کاربرد گسترده‌یی یافته است، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^{۱۹} است. دلیل این امر در ماهیت روش و برخی از ویژگی‌های آن، نظیر امکان اندازه‌گیری معیارهای کیفی، تحلیل سازگاری قضاوت‌های استفاده شده در تعیین اولویت‌ها و ایجاد تعادل بین آنها و نیز امکان توافق گروهی از طریق تلفیق نظرات، نهفته است. برای مثال چنانچه هدف انتخاب سیاست‌های بهره‌برداری بهینه از بین نتایج درازمدت مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باشد، ساختار سلسله مراتبی را می‌توان مطابق شکل ۱۰ تعریف کرد. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، معیارهای مختلفی نظیر اطمینان‌پذیری تأمین نیازهای آبی و برق آبی، تأمین محدودیت‌های زیست‌محیطی و کنترل سیلاب برای مقایسه‌ی سیاست‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین مرحله در مقایسه‌ی گزینه‌ها، تشکیل ماتریس مقایسه‌ی زوجی براساس هر یک از معیارهاست. در مراحل بعدی، با جمع مقادیر هر یک از ستون‌ها و تقسیم عناصر در هر ستون بر جمع آن ستون، ماتریس مقایسه‌ی زوجی نرمال محاسبه می‌شود. مقادیر متوسط سطرهای این ماتریس، نشانگر بردار ارجحیت نسبی مدل‌ها نسبت به معیار انتخاب شده خواهد بود. به همین ترتیب سایر وزن‌ها برای معیارهای مختلف محاسبه می‌شوند که در نهایت امکان اولویت‌بندی سیاست‌ها را فراهم می‌کنند.



شکل ۱۰. ساختار سلسله مراتبی برای انتخاب سیاست‌های برتر بهره‌برداری از مخزن.

در چنین فرایندی ضمن نگرشی سیستمی و جامع به مسئله‌ی برنامه‌ریزی منابع آب، ابتدا با ساده‌سازی و مجزا کردن اجزای سیستم، نسبت به شناخت عدم قطعیت‌ها اقدام می‌شود. پس از شناخت این عدم قطعیت‌ها می‌توان تمهیداتی برای اعمال آنها در الگوی بهره‌برداری در نظر گرفت.

همچنین لازم است ابزارهای مناسب برای نمایش قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل‌های موجود و تأثیر اعمال الگوهای انعطاف‌پذیر در این مدل‌های ایجاد شود تا بتوان در نگرش موجود به مسئله‌ی بهره‌برداری از منابع آب و اولویت‌های سیاست‌گذاری در سطح ملی تغییراتی ایجاد کرد. شکل ۹ نشانگر ساختار کلی الگوی انعطاف‌پذیری است که با توجه به این تفکر برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب طراحی شده است.

همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، از آنجا که منظور نمودن جنبه‌های مختلف انعطاف‌پذیری در یک مدل بهره‌برداری، پیچیدگی مدل را بسیار زیاد می‌کند و سنجش درستی نتایج حاصله مشکل می‌شود، در ساختار انعطاف‌پذیر پیشنهادی، مدل‌های مختلفی وجود دارند، که هر یک جنبه‌هایی از انعطاف‌پذیری را در بر می‌گیرند. بنابراین ساختار بهینه‌ی بهره‌برداری از یک سری مدل‌های بهره‌برداری با ویژگی‌ها و خصوصیات انعطاف‌پذیری متفاوت تشکیل شده است. این مدل‌ها در ارتباط با هم کار می‌کنند و در مجموع شاخص‌های انعطاف‌پذیری و عدم قطعیت‌های مهم را در تدوین سیاست‌های بهینه و انعطاف‌پذیر بهره‌برداری در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، با

بخش‌های مختلف ساختار بهینه‌ی پیشنهادی در ارتباطند. انتخاب مدل یا مدل‌های مناسب به شرایط هیدرولوژیکی و اقلیمی، مشخصات فیزیکی سیستم، عدم قطعیت‌های موجود و هدف از بهره‌برداری از سد بستگی دارد. به‌عنوان مثال، در مواردی که عدم قطعیت‌های موجود در نیاز، تولید برق، مؤلفه‌های اقتصادی، پیش‌بینی جریان ورودی و غیره قابل توجه باشند، یک مدل بهره‌برداری انعطاف‌پذیر باید بتواند این عدم قطعیت‌ها را در تدوین سیاست‌های بهینه بهره‌برداری منظور کند.

انتخاب سیاست‌های بهره‌برداری و یا تلفیق آنها نیازمند در نظر گرفتن معیارهایی متعدد و استفاده از اطلاعات مفهومی جهت ایجاد توازن بین اهداف یا محدودیت‌های مختلف است که در بسیاری از موارد تخصیص مقادیر عددی دقیق به آنها میسر نیست. مثلاً تعیین ارزش دقیق اهداف تأمین نیاز و تولید برق در بهره‌برداری از مخزن در مورد بسیاری از سدهای مخزنی امکان‌پذیر نیست. در این شرایط، استفاده از روش‌هایی چون نظریه‌ی مجموعه‌های فازی به‌منظور کمی کردن اطلاعات مفهومی، روش‌های خاص حل اختلاف^{۱۷} و

طراحی سیستم‌های پشتیبانی در تصمیم‌گیری مستلزم یک دوره همکاری و همفکری نزدیک بین مهندسان سیستم، تصمیم‌گیرندگان و کاربران نهایی سیستم است. این همکاری و روند رفت و برگشتی تأثیر قابل توجهی در کارایی سیستم، در برخورد با شرایط واقعی دارد. در طراحی سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری، شناسایی کاربران سیستم و کسانی که از سیستم تأثیر می‌پذیرند (Stakeholders) از جمله مسائل کلیدی است که بخشی از اولین مراحل طراحی سیستم است. لازم به ذکر است منظور از کاربران سیستم، همان‌طور که ذکر شد، طیف وسیعی از استفاده‌کنندگان، آزمایش‌کنندگان سیستم و متخصصان تجزیه امکان برخورد یا تصمیم‌گیرندگان است.

نمونه‌هایی از این سیستم‌ها برای بهره‌برداری از برخی از مهم‌ترین سدهای کشور توسعه داده شده است. این سیستم‌ها دارای پنج ماجول اصلی مدیریت اطلاعات، مدل‌سازی جریان ورودی، مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن، پیش‌بینی جریان ورودی و بهره‌برداری در زمان واقعی هستند. ساختار این سیستم‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده است که با وجود یکپارچگی کلیه مؤلفه‌های سیستم و ارتباطات بین آنها، ماجول‌ها و بانک‌های اطلاعاتی، مدل‌ها و دستورالعمل‌ها به‌وضوح مشخص و لایه‌بندی شده‌اند. لایه‌های مختلف این سیستم‌ها به ترتیب عبارتند از: [۲۱، ۲۰، ۱۲، ۱۰، ۹، ۴]

- لایه‌ی صفر: ماجول‌های تشکیل‌دهنده و ماهیت ارتباطی آنها در بالاترین سطح؛

- لایه‌ی یک: ماهیت ارتباطی داخل ماجول‌ها؛

از جمله مشخصه‌های مهم این روش، امکان کنترل سازگاری تصمیم است. به‌عبارت دیگر می‌توان با محاسبه‌ی سازگاری تصمیم، نسبت به قبول یا مردود بودن آن اظهار نظر کرد. در محاسبه‌ی نرخ ناسازگاری از رابطه‌ی زیر استفاده می‌شود: [۱۸]

$$IR = \left[\frac{\delta_{\max} - n}{n - 1} \right] / CRI \quad (2)$$

که در آن:

δ_{\max} : بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه‌ی زوجی؛

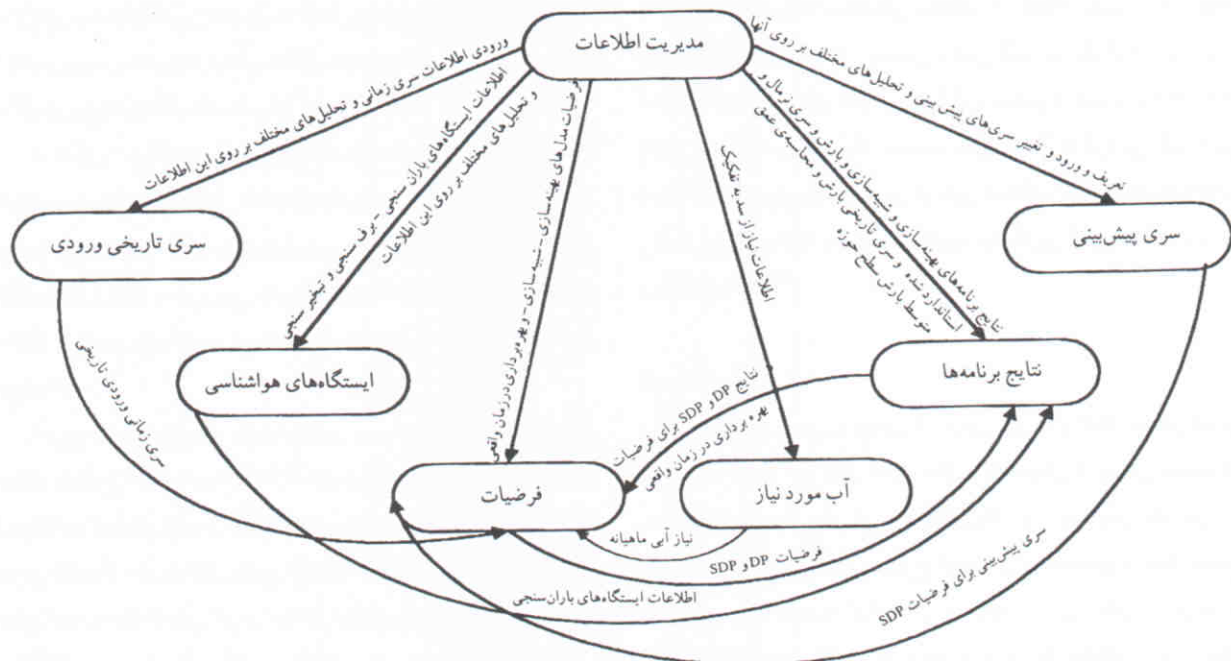
n: تعداد معیارهای مقایسه؛

CRI: شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی؛

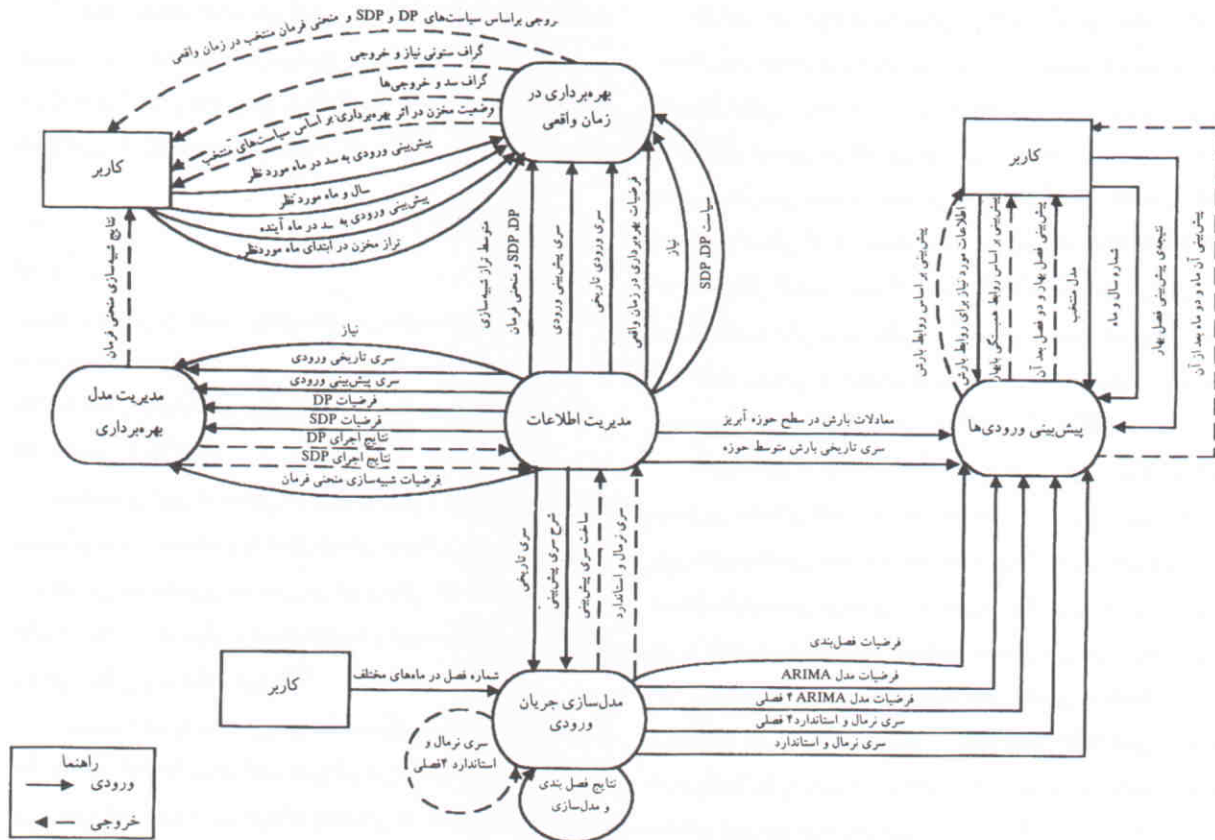
IR: شاخص ناسازگاری.

محاسبه‌ی این شاخص امکان تحلیل و مقایسه‌ی نظرات تصمیم‌گیرندگان مختلف و یا قضاوت‌های مختلف یک تصمیم‌گیرنده را فراهم می‌کند به‌نحوی که حتی در تصمیماتی که تعداد معیارهای مقایسه زیاد است، بتوان اولویت‌بندی‌ها و ارجحیت‌های گزینه‌ها را به‌شکل منطقی‌تری فراهم کرد. [۱۹]

سیستم‌های پشتیبانی در تصمیم‌گیری (DSS) یکی از مناسب‌ترین ابزارها برای اجرایی کردن الگوهای انعطاف‌پذیر بهره‌برداری‌اند. کاربرد سیستم‌های پشتیبانی در تصمیم‌گیری به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای توسعه‌ی نگرش سیستمی در فرایند برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع آب در سال‌های اخیر در سطح بین‌المللی گسترش قابل ملاحظه‌ی یافته است.



شکل ۱۱. لایه یک - ماجول‌های تشکیل‌دهنده‌ی سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری و ماهیت ارتباطی داخل ماجول‌ها.



شکل (۱۲): لایه‌ی دو-ارتباط بین ماچول‌ها از طریق داده‌ها.

- لایه‌ی دو: ارتباط بین ماچول‌ها از طریق ارتباط داده‌ها؛
 - لایه‌ی سه: ارتباط بین ماچول‌ها از طریق زیر برنامه‌ها؛
 - لایه‌ی چهار: ماهیت ارتباطی داخل ماچول‌ها در پایین‌ترین سطح؛
 - لایه‌ی پنج: فرهنگ داده‌ها و فهرست برنامه‌ها.
 در شکل ۱۱، لایه‌ی یک حاوی ماچول مدیریت اطلاعات است. لایه‌ی دو، چنانچه در شکل ۱۲ نشان داده شده است، انتقال اطلاعات بین ماچول‌های مختلف را شامل می‌شود. در این لایه، کلیدی اطلاعات ورودی و خروجی ماچول‌های مختلف برای انجام مراحل مختلف برنامه‌ریزی که در این سیستم پیش‌بینی شده است، مشخص می‌شود.

مشخص می‌شود. تنها با چنین نگرشی می‌توان سیستمی طراحی کرد که نسبت به تغییرات مؤلفه‌های مختلف آن انعطاف‌پذیر باشد. نتیجه آنکه انعطاف‌پذیری زمانی به معنی واقعی کلمه در نظر گرفته می‌شود، که نه تنها در جنبه‌های نظری و تحلیلی، ملحوظ شود، بلکه باید کلیدی عوامل در قالب یک سیستم یکپارچه^{۲۱} به گونه‌ی طراحی شوند که تصمیم‌گیرنده و کاربر توانایی استفاده از لایه‌های مختلف برنامه‌ریزی را داشته باشند و شفافیت جایگزین کاربردهای جعبه‌ی سیاه شود.^(۲۲ و ۲۳)

نتیجه‌گیری

رشد روزافزون جمعیت جهان، گسترش شهرها و اتمام بخش قابل توجهی از منابع غیر قابل احیاء مثل نفت، بیش از پیش مسئله‌ی مدیریت جامع منابع آب و بهره‌برداری از آن را به‌عنوان یک انرژی پایدار در سطح بین‌المللی مطرح کرده است. حساسیت حفظ منابع آب و بهره‌برداری بهینه از آنها، لزوم استفاده از ابزارهای پیشرفته را - که انعطاف‌پذیری لازم برای برخورد با شرایط مختلف را در زمان واقعی فراهم می‌کنند - دوچندان کرده است. بررسی نتایج استفاده از

اگرچه بحث درباره‌ی جزئیات این سیستم‌ها از حوصله‌ی این مقاله خارج است، هدف از ارائه‌ی شمای برخی از لایه‌ها و ارتباطات، نمایش نحوه‌ی نگرش سیستمی به مسئله‌ی مدیریت بهره‌برداری از سد - بخش مهمی از مطالعات مدیریت بهره‌برداری از منابع آب - است که طی آن در مراحل اولیه‌ی اجزای سیستم به‌طور جداگانه بررسی و مدل‌سازی می‌شوند. سپس در نگرشی جامع و یکپارچه، ارتباطات کل اجزا و میزان تأثیرپذیری آنها از یکدیگر

سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری یکی از مؤثرترین این ابزارهاست. در این سیستم ضمن تحلیل کل ساختار منابع آب در محدوده‌ی مطالعاتی به شکل یکپارچه، ارتباط اجزا با یکدیگر کاملاً روشن و مشخص است.

نتایج بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که نه تنها در زمینه‌های مختلف برنامه‌ریزی و مدیریت، در نظر گرفتن جامع‌نگری و انعطاف‌پذیری لازم است، بلکه باید ابزار کارهایی تهیه شود که ضمن انجام تحلیل‌های مختلف در لایه‌های برنامه‌ریزی، از شفافیت کافی برخوردار باشد تا تصمیم‌گیرنده و کاربر از سیستم بتواند با آگاهی کامل از نحوه‌ی عملکرد مدل‌ها و ابزارکارها، قضاوت مهندسی، تجارب و اطلاعات استنباطی و محدودیت‌های اجرایی را به‌طور مؤثری در مدیریت منابع آب به کار گیرد.

مدل‌های بهره‌برداری از منابع آب در سطوح مختلف پیچیدگی نشان می‌دهد که به دلیل در نظر نگرفتن تغییرات بسیاری از مؤلفه‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های هیدرولیکی، این مدل‌ها از انعطاف‌پذیری و دقت مورد انتظار بهره‌برداران و مدیران برخوردار نیستند.

در این مقاله نتایج بررسی تغییرات و عدم قطعیت‌های موجود در برخی از پارامترهای مؤثر در بهره‌برداری از منابع آب ارائه شد و پیشنهادهایی نیز برای اعمال انعطاف‌پذیری در مدل‌های بهره‌برداری مطرح شد. علی‌رغم اینکه نتایج مطالعات انجام گرفته نشانگر اهمیت به کارگیری الگوهای انعطاف‌پذیر است، تغییر نظام فعلی بهره‌برداری و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با آن مستلزم استفاده از ابزار مناسب برای نمایش مؤثر مزایای به کارگیری مدل‌های انعطاف‌پذیر است.

پانوشته‌ها

1. Bayes decision theory
2. shock absorbers
3. runoff variations
4. autocorrelation
5. Bayesian Stochastic Dynamic Programming
6. Autoregressive Integrated Moving Average Models
7. sea surface temperature
8. North Atlantic Oscillation
9. Southern Oscillation Index
10. fuzzy set
11. if..., then
12. degree of fulfillment
13. triangular membership function
14. decision variable
15. self-purification model
16. integrated water resources planning
17. conflict resolution
18. multi-criterion-decision- making
19. analytical hierarchy process
20. decision support systems
21. integrated system

منابع

1. Loucks, D. P. Stakhiv, E.Z. and Martin, L.R. "Sustainable water resources management", *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, **126**, (2), (2000).
2. Karamouz, M., and Vasiliadis, H. "A bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecast", *Journal of Water Resources Research*, **28**, (5), (1992).

۳. کارآموز، محمد، ترابی پلت کله، صدیقه. «اثر تغییرات نیاز روی عملکرد مدل‌های بهره‌برداری از مخزن»، مجله‌ی آب و فاضلاب، شماره ۲۸، زمستان (۱۳۷۷).

4. Karamouz, M., Moosavi, S.J. and Sabzivand, Sh. "Operation of zayandeh-rud river-reservoir system, usinf uncertain and variable demand", *Proceedings of the 8th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Tehran, Iran, (1997).*

۵. موسوی، سیدجمشید. «مدل‌سازی استوکستیک بهره‌برداری از مخازن چندمکانه‌ی چندمنظوره»، پایان‌نامه‌ی دکترای به راهنمایی دکتر محمد کارآموز، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پائیز (۱۳۷۹).

۶. کارآموز، محمد. «کاربرد تئوری مجموعه‌های فازی در مدیریت منابع آب»، گزارش‌هایی طرح تحقیقات کاربردی معاونت پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب، دی‌ماه (۱۳۷۸).

۷. کارآموز، محمد، عراقی نژاد، شهاب، کراچیان، رضا جهان‌دیده، فریدون. «بهره‌برداری کمی-کیفی از مخازن سدها»، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس سدسازی کشور، (۱۳۷۹).

8. Plate, E. J. "Sustainable development of water resources: achallenge to science and engineering", *Water International*, Vol. **18**, (2), pp.84-94, (1993).

9. Karamouz, M. and Zahraie, B. "A decision support system (DSS) for water resources management of greater tehran metropolitan area", *Proceedings of Regional Conference on Water Resources Management, Isfahan, Iran, (1995).*

10. Karamouz, M., and Zahraie, B. "Water resources management of tehran metropolitan area: a decision support system (DSS)", *Proceedings of the fifth ASCE Water Resources Operation Management Workshop, Virginia, Arlington, (March 3-5, 1996).*

11. Karamouz, M., Zahraie, B. Torabi, S. Shahsavari, M.

- "Integrated water resources planning and management for tehran metropolitan area in Iran, 26th ASCE annual water Resources Planning and Management Conference, Tempe, Arizona, (June 6-9, 1999).
12. Karamouz, M., Zahraie, B. Khodatalab, N. "Decision support system for operation of karoon and dez reservoirs in Iran", ASCE 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management, Minneapolis, Minnesota, (2000).
۱۳. کارآموز، محمد، «ساختار بهینه برای بهره برداری انعطاف پذیر از سدها» گزارش نهایی طرح تحقیقات ملی شورای پژوهش های علمی کشور، (۱۳۸۰).
14. Zahraie, B., Karamouz, M., Sorooshian, S., and Imam, B. "Improved statistical streamflow forecasting by snow budget calculation", Paper presented in 2001 Spring American Geophysical Union Meeting, Boston, MA, (2001).
15. Vasiliadis H. V. and Karamous, M. "Demand - driven operation of reservoir using uncertainty-based optimal operating policies", *ASCE Journal of Water Resource Planning and Management*, **120**, (1), (1994).
۱۶. کارآموز، محمد، استاد رحیمی، آزاده، زهرایی، بنفشه و صفوی، حمیدرضا. «برنامه ریزی برای توسعه پایدار: مدل های خودپالایی رودخانه ها»، مجله آب و فاضلاب، شماره ۱۹، پاییز (۱۳۷۵).
۱۷. نیکخوی مجره، مجید. «بررسی مدل های خودپالایی رودخانه با کاربرد روی رودخانه زاینده رود» پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، استاد راهنما: دکتر محمد کارآموز، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۷۵).
18. Pomerol, J C. and Barba-Romero, S. "Multi-criterion decision in management: principles and practice", Kluwer Academic Publishers, (2000).
19. Jones, A. C., S. A. El-Swaify, R. Graham, D.P. Storehouse, and I. Whitehous, "A synthesis of the state-of-the-art on multiple objective decision making for managing land, water, and the environment", *In Multi-Objective Decision Making for Land, Water, and Environmental Management*, Edited by S. A. El-Swaify and D.S. Yakowitz, Proceeding of the First International Conference on Multiple Objective Decision Support Systems (MODSS) for Land, Water, and Environmental Management, Hawaii, (1996).
۲۰. کارآموز، محمد، شهسواری، مرضیه، اسلامی، حمیدرضا، کبرایی، محمد رضا و پروینی، ندا. «سیستم پشتیبانی در تصمیم گیری (DSS) برای مدیریت منابع آب»، مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولیک ایران، شهریور (۱۳۷۶).
۲۱. کارآموز، محمد، «سیستم پشتیبانی در تصمیم گیری برای سد زاینده رود و مدیریت خشکسالی»، پروژه ی تحقیقات کاربردی در دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۰).
22. Karamouz, M., Araghi-Nejad, Sh. and Zahraie, B. "A decision support system for hydropower reservoirs with application to karoon and dez system in Iran", *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress (ASCE)*, Orlando, Florida, (May 20-24, 2001).
۲۳. مهندسین مشاور جاماب، راهنمای استفاده از سیستم پشتیبانی در تصمیم گیری بهره برداری از سد بوکان، (۱۳۷۶).