نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال چهارم، شماره اول، پاییز ۱۳۹۳

ISSN 2251-7480

توسعه یک سامانه چندمخزنه چندمنظوره به عنوان مورد مطالعاتی نمونه در مدیریت سامانه مخازن

سمانه سیف‌اللهی آغمیونی[۱*] و امید بزرگ‌حداد[۲]

۱*) دانشجوی دکتری؛ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: seifollahi@ut.ac.ir

۲) دانشیار؛ گروه مهندسی آبیاری و آبادانی؛ دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی؛ پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران؛ کرج؛ ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰٤/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۲

چکیده

سامانه‌های منابع آب، مجموعه‌ای از سازه‌ها و تجهیزات می‌باشند که با هدف تأمین آب برای رسیدن به یک حالت مطلوب و حفاظت و استفاده بهینه از منابع آب احداث می‌شوند و نیازمند یک برنامه‌ریزی مناسب هستند. سامانه مخازن به عنوان پرکاربردترین سامانه‌های منابع آب در تأمین نیازهای جوامع مطرح می‌باشند که عدم مدیریت صحیح و کاربردی آنها می‌تواند منجر به عدم حفاظت از منابع آب و ایجاد خسارات مالی فراوانی شود. تقریباً در تمام مسائلی که در زمینه طراحی، بهره‌برداری و مدیریت این سامانه‌ها وجود دارند، نمونه‌های واقعی از سامانه مخازن مورد مطالعه قرار گرفته و به ازای شرایط و اهداف مورد نظر تحلیل شده‌اند. در حالی که تعریف یک سامانه مخازن نمونه به گونه‌ای که به ازای تمام حالات و برای تمام اهداف متداول قابل بررسی باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در تحقیق حاضر، برای اولین بار یک سامانه سه‌مخزنه نمونه با در نظر گرفتن تمام اطلاعات فیزیکی و هیدرولوژیکی و لحاظ کردن سه هدف کلی تولید انرژی برق‌آبی، تأمین تقاضاهای پایین‌دست (کشاورزی، شهری و صنعتی) و کنترل سیلاب ارائه شده است. نتایج نشان داده‌اند که اطلاعات تعیین شده برای این سامانه، کاملاً به صورت منطقی و با روند واقعی تعریف شده‌اند و می‌توانند عملکرد سامانه مخازن را در حالت‌های مختلف تک‌مخزنه یا چندمخزنه و تک‌هدفه یا چندهدفه به خوبی نمایان سازند. به این ترتیب می‌توان از سامانه مخازن تعریف شده به عنوان یک سامانه نمونه در ارائه و توسعه روش‌های مختلف و اثبات مبانی آنها در حل مسائل سامانه مخازن استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: مورد مطالعاتی؛ سامانه چندمخزنه؛ بهینه‌سازی چندهدفه؛ بهره‌برداری

مقدمه

طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های منابع آب از فعالیت‌ها و مطالعات عمده‌ای هستند که در بررسی منابع آب صورت می‌گیرند (حسینی موغاری و بنی حبیب، ۱۳۹۳). هدف نهایی از این بررسی‌ها، دست‌یابی به شرایط مطلوب در بهره‌برداری و حفاظت از منابع آب است. بنابراین، مسائل مربوط به سامانه‌های منابع آب عمدتاً دارای مفهوم بهینه‌سازی هستند و بهینه‌سازی نیز نیازمند مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه است. برای این منظور روش‌ها و مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مختلفی توسعه یافته‌اند. مدل‌های شبیه‌سازی HEC-3 (مرکز مهندسی هیدرولوژی[۱]، ۱۹۷۱)، HEC-5 (مرکز مهندسی هیدرولوژی، ۱۹۷۹)، IQQM (سازمان حفاظت آب و زمین[۲]، ۱۹۹۹)، RiverWare (Zagona *et al.*, 2001)، MODSIM (Labadie *et al.*, 1986)، WASP (Kuczera and Diment, 1988)، REALM (Perera and James,

[1] Hydrologic Engineering Center
[2] Department of Land and Water Conservation

2003) و غیره روش‌هایی هستند که بر اساس اهداف تعریف شده از طرف کاربر هدایت می‌شوند یا از یک برنامه ریاضی، معمولاً یک برنامه خطی با جریمه‌های قابل تعیین توسط کاربر، استفاده می‌کنند. اساس کلی این روش‌ها بر ارزیابی و بررسی بیلان آب‌های ورودی و خروجی به سامانه منابع آب استوار است. روش‌های بهینه‌سازی بسیار وسیع‌تر بوده و از روش‌های ریاضی ساده مانند ترسیمی، مضارب لاگرانژ، سادک[1]، برنامه‌ریزی پویا[2] (*DP*) و غیره تا الگوریتم‌های تکاملی و فراکاوشی متنوع مانند الگوریتم ژنتیک[3] (*GA*) (Holland, 1975)، الگوریتم بهینه‌سازی مجموعه ذرات[4] (*PSO*) (Kennedy and Eberhart, 1998)، الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورهای عسل[5] (*HBMO*) (Abbass, 2001) و غیره گسترده می‌باشند. ارزیابی نحوه عملکرد هر یک از روش‌ها و توسعه و کاربرد بسیاری از آنها، با توجه به عدم وجود یک سامانه نمونه در منابع آب به خصوص سامانه مخازن، در مسائل واقعی صورت گرفته است. برای مثال، مدل بهینه‌سازی اقتصادی- مهندسی CALVIN[6] به منظور شبیه‌سازی و تخصیص آب در سامانه تأمین آب کالیفرنیا گسترش یافته و بهینه‌سازی تخصیص منابع آب را به صورت قطعی در مقیاس بزرگ و با در نظر گرفتن تابع هدف‌های اقتصادی بررسی می‌کند (Draper*et al.*, 2003). آنچه مسلم است این است که استفاده از سامانه‌های منابع آب واقعی نمی‌تواند منجر به بررسی جنبه‌های مختلف مدل‌ها و روش‌های توسعه یافته و ارزیابی قابلیت‌ها و توانایی‌های گوناگون آنها شود. به خصوص در سامانه مخازن که اطلاعات، شرایط و اهداف گوناگون مطرح است و ممکن است یک سامانه مخازن واقعی دربرگیرنده تمام جزئیات و اطلاعات نباشد. لذا، قابلیت‌های مدل‌های توسعه یافته به خوبی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. نکته قابل توجه دیگر، موجودیت و میزان دسترسی به اطلاعات و داده‌های مختلف در سامانه‌های واقعی است که می‌تواند تأثیر بسزایی در عملکرد مدل‌ها و روش‌های گوناگون داشته باشد.

عدم وجود یک سامانه مخازن نمونه یک‌پارچه و جامع برای مدل‌سازی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی این سامانه‌ها در حوضه‌های آبریز، بررسی همه‌جانبه این سامانه‌ها را تقریباً غیر ممکن ساخته است. این امر منجر به ارائه مدل‌های مختلف با ساختارهای متفاوت برای بررسی هر یک از انواع سامانه‌های مخازن در حوضه‌های گوناگون با شرایط مختلف گردیده است. از این رو، در این تحقیق برای اولین بار به تعریف یک سامانه نمونه مدیریت منابع آب در زمینه برنامه‌ریزی سامانه مخازن پرداخته شده است. در طراحی ساختار این سامانه سعی شده است که تمام جنبه‌های مدیریت و برنامه‌ریزی به همراه جزئیات در نظر گرفته شوند. به این ترتیب می‌توان عملکرد مدل‌های شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی توسعه یافته را در یک سامانه نمونه مورد بررسی و آزمون قرار داد و نتایج حاصل از آن را تحلیل کرد.

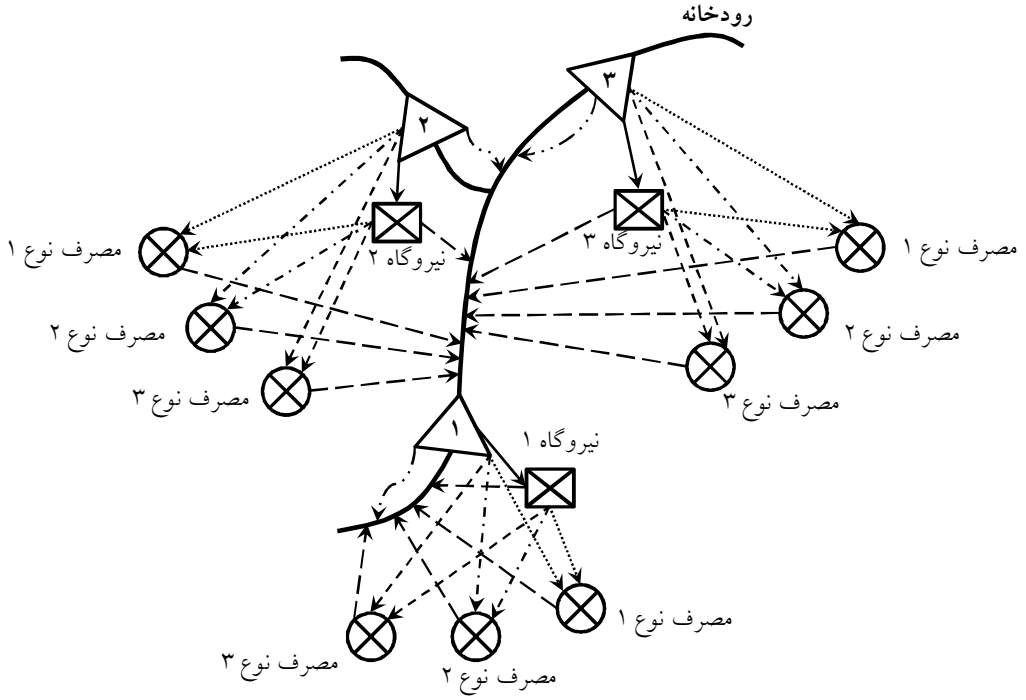
مواد و روش‌ها

معرفی ساختار کلی سامانه نمونه

هر سامانه منابع آب از اجزائی تشکیل شده است و عملکرد این اجزاء در کنار یکدیگر، منجر به شکل‌گیری عملکرد سامانه منابع آب به ازای شرایط حاکم بر آن می‌شود. سامانه نمونه طراحی شده، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در واقع یک سامانه سه‌مخزنه می‌باشد که شبیه‌سازی و مدیریت یک‌پارچه آن مدّ نظر است. در شکل ۱، مثلث‌ها، دایره‌ها و مربع‌ها به ترتیب نمایانگر مخازن، انواع مصارف و نیروگاه‌های تولید برق می‌باشند. در این سامانه سه مخزن به همراه سه نیروگاه تولید برق و سه نوع مصرف عمده (کشاورزی، شهری و

[1] Simplex
[2] Dynamic Programming
[3] Genetic Algorithm
[4] Particle Swarm Optimization
[5] Honey Bee Mating Optimization
[6] California Value Integrated Network

صنعتی) برای هر مخزن به عنوان سامانه نمونه در نظر گرفته شده است. بر اساس منحنی‌های دو نقطه–خط‌چین، که ارتباطات ممکن بین مخازن مختلف را نشان می‌دهند، مخازن ۲ و ۳ به صورت ثقلی با مخزن ۱ ارتباط دارند و ارتباط مخزن ۱ با هر یک از مخازن ۲ یا ۳ و ارتباط مخزن ۲ با ۳ از طریق پمپاژ برقرار می‌باشد (در صورت لزوم). تأمین هر یک از انواع مصارف می‌تواند به طور مستقیم از طریق هر یک از مخازن یا آب خروجی از نیروگاه‌ها (یا ترکیبی از آنها) صورت گیرد. پاره‌خط‌های نقطه‌چین بیان‌گر منابع تأمین ممکن برای مصرف نوع ۱ (کشاورزی)، پاره‌خط‌های نقطه–خط‌چین بیان‌گر منابع تأمین ممکن برای مصرف نوع ۲ (شهری) و پاره‌خط‌های خط‌چین بیان‌گر منابع تأمین ممکن برای مصرف نوع ۳ (صنعتی) در هر مخزن می‌باشند. هر نوع گره مصرفی دارای آب بازگشتی است که می‌تواند به عنوان یک منبع ورودی برای هر مخزن در سامانه لحاظ شود. پاره‌خط‌های خط‌چین بزرگ بیان‌گر آب‌های بازگشتی انواع مصارف در سامانه است. آب بازگشتی انواع مصارف مربوط به مخازن ۲ و ۳ به عنوان منبع ورودی برای مخزن ۱ می‌باشند و آب بازگشتی انواع مصارف مخزن ۱ نیز به پایین‌دست آن منتقل می‌شود. هر نیروگاه به یک مخزن اختصاص دارد که خروجی آن مخزن می‌تواند به منظور تولید برق وارد آن نیروگاه شود. این ارتباط با یک پاره‌خط ساده با یک پیکان از هر مخزن به نیروگاه متناظر آن نشان داده شده است. با وجود اینکه خروجی هر نیروگاه نیز می‌تواند از طریق پمپاژ به عنوان یک منبع ورودی برای همان مخزن محسوب شود، ولی در سامانه نمونه، خروجی نیروگاه‌های ۲ و ۳ به عنوان منبع ورودی برای مخزن ۱ در نظر گرفته شده و در شکل ۱ با پاره‌خط‌های خط‌چین بزرگ نشان داده شده است. خروجی نیروگاه ۱ نیز به پایین‌دست مخزن ۱ انتقال می‌یابد و نیروگاه‌های مختلف ارتباطی با یکدیگر ندارند.



شکل ۱.نمایش سامانه مخازن نمونه

مدیریت یک‌پارچه سامانه سه‌مخزنه بالا، نیازمند مدل‌سازی، شبیه‌سازی و در نهایت بهینه‌سازی جامع و یک‌پارچه سامانه می‌باشد. در مدیریت یک‌پارچه سامانه، تمام عوامل و منابع در کنار یکدیگر بررسی شده و اثرگذاری و اثرپذیری آنها نسبت به یکدیگر نیز از طریق ارتباطات موجود بین آنها ارزیابی می‌شود. تصمیم‌گیری

برای مدیریت هر سامانه بر اساس سنجش و بررسی اطلاعات و داده‌های در دسترس از آن سامانه صورت می‌گیرد. اطلاعات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی سامانه سه‌مخزنه شکل ۱ در ادامه ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که در سامانه مخازن نمونه، برای هر مخزن، سه هدف کلی تولید انرژی برق‌آبی، تأمین مصارف پایین‌دست (کشاورزی، شهری و صنعتی) و تفریحات و کنترل سیلاب در نظر گرفته شده است.

معرفی اطلاعات سامانه نمونه

اطلاعات و داده‌های مربوط به سامانه نمونه سه‌مخزنه در سه بخش اطلاعات مربوط به مخازن، اطلاعات مربوط به انواع مصارف و اطلاعات مربوط به نیروگاه‌های برق‌آبی، به تفکیک عوامل موجود در سامانه ارائه شده‌اند. در ارزیابی سامانه مخازن، برخی از داده‌ها به صورت یک عدد منفرد و برخی دیگر به صورت سری‌های زمانی قابل تعریف می‌باشند. از آنجا که مدیریت و بهره‌برداری از سامانه مخازن عموماً به ازای بازه‌های زمانی ماهانه صورت می‌گیرد، لذا داده‌ها برای یک سال و به صورت ماهانه تعیین شده‌اند. شایان ذکر است که با توجه به جانمایی مخزن ۱ در پایین‌دست سامانه نمونه سه‌مخزنه، اطلاعات مختلف ارائه شده برای آن به صورت میان حوضه‌ای می‌باشند.

اطلاعات مربوط به مخازن نمونه

مخازن موجود در مسیر رودخانه می‌توانند به صورت موازی یا متوالی با یکدیگر در ارتباط باشند (در سامانه نمونه، مخازن ۱ و ۲ به صورت متوالی، مخازن ۱ و ۳ به صورت متوالی، مخازن ۲ و ۳ به صورت موازی و مجموع مخازن ۲ و ۳ با مخزن ۱ به صورت متوالی ارتباط دارند). صرف‌نظر از نحوه ارتباط مخازن موجود در یک سامانه، هر مخزن دارای خصوصیات و پارامترهایی است که در بهره‌برداری و مدیریت آن استفاده می‌شوند.

پارامترها و خصوصیات ثابت هر مخزن بر اساس جدول ۱ می‌باشند. در این جدول، S^{min} و S^{max} = به ترتیب حجم ذخیره آب کمینه و بیشینه؛ S^{a} = حجم ذخیره فعال[1] که برابر با اختلاف حجم‌های کمینه و بیشینه در هر مخزن است؛ H^{dam} = ارتفاع دیواره سد؛ SF = حجم سیلاب طراحی؛ Se = حجم رسوبات بلندمدت ورودی به هر مخزن و I = درصد نشت و نفوذ آب از بستر دریاچه در هر مخزن هستند.

برآورد ظرفیت سازه سرریز مخازن بر اساس سیلاب طراحی صورت می‌گیرد. سیلاب طراحی، سیلابی است که در شرایط عادی و با ارتفاع آزاد مطمئن، قابل تخلیه از سرریز مخزن باشد. این سیلاب درصدی از بیش‌ترین سیلاب محتمل[2] (PMF) و یا سیلابی با دوره بازگشت مناسب (۱۰۰ ساله، ۱٬۰۰۰ ساله و غیره) است. با این وجود، پیش‌بینی و تعیین زمان دقیق وقوع سیلاب در مناطق مختلف، حتی در طول دوره بازگشت سیلاب نیز امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا در طرح‌های مهندسی، با توجه به اهداف، شرایط و امکانات موجود در طرح مورد نظر، سیلابی با دوره بازگشت مشخص به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود. بر اساس استانداردهای USBR برای تعیین سیلاب طراحی مخازن، سیلاب با دوره بازگشت ۱۰٬۰۰۰ ساله به عنوان سیلاب طراحی در سدهای بزرگ استفاده می‌شود. در سامانه نمونه نیز حجم سیلاب ۱۰٬۰۰۰ ساله به عنوان سیلاب طرح به منظور تأمین هدف کنترل سیلاب در نظر گرفته شده است. حجم SF نیز به عنوان یک جریان ورودی تنظیم نشده برای هر مخزن در سال‌های مختلف بهره‌برداری قابل بررسی است، البته این مقادیر به عنوان حجم آب مازاد بر آورد طبیعی رودخانه در بازه زمانی محتمل برای وقوع سیلاب در نظر گرفته می‌شوند.

[1] Active Storage
[2] Probable Maximum Flood

جدول ۱. پارامترها و خصوصیات ثابت هر مخزن در سامانه

پارامتر	مخزن ۱	مخزن ۲	مخزن ۳
S^{min} ($۱۰^{۶}$ m^3)	۳۰۰	۱۵۰	٤۰۰
S^{max} ($۱۰^{۶}$ m^3)	۳٬۰۰۰	۲٬۵۰۰	۳٬۰۰۰
S^{a} ($۱۰^{۶}$ m^3)	۲٬۷۰۰	۲٬۳۵۰	۲٬٦۰۰
H^{dam} (m)	۱۲۰	۱۰۰	۱۵۰
SF ($۱۰^{۶}$ m^3)	۷۵۰	۱٬۵۰۰	۱٬۷۰۰
Se ($۱۰^{۶}$ m^3)	۲۹۰	۱٤۰	۳۹۰
I (٪)	۱	٤	۲
رقوم محل مخزن از سطح دریا (m)	۷۰۰	۷۵۰	۸۰۰

در بازه‌های زمانی مختلف، علاوه بر حجم قابل توجهی از آب، حجم مشخصی از رسوبات و مواد شسته شده از حوضه بالادست نیز به همراه آورد طبیعی رودخانه یا سیلاب محتمل ورودی به هر مخزن، به دریاچه آن وارد می‌شود. در صورتی که طراحی مخازن به گونه‌ای صورت گرفته باشد که دریچه‌های بهره‌برداری از آب ذخیره شده بالاتر از رقوم ذخیره رسوب بلندمدت پیش‌بینی شده برای آنها باشند، ورود و ته‌نشست رسوبات در طول عمر مفید مخازن، مشکلی برای بهره‌برداری ایجاد نکرده و در روند بهره‌برداری مؤثر نخواهد بود. اما در شرایطی که به دلیل طراحی نامناسب، عدم پیش‌بینی دقیق حجم رسوبات یا مواردی از این دست، ذخیره رسوب در رقومی بالاتر از دریچه‌های بهره‌برداری از آب ذخیره شده صورت گیرد، لازم است برای تخلیه رسوبات مخازن نیز برنامه‌ریزی و مدیریت صورت گیرد. لذا، در چنین شرایطی توزیع ماهانه رسوبات بلندمدت پیش‌بینی شده در طول دوره بهره‌برداری مهم و مؤثر خواهد بود. از آنجا که در مخازن نمونه، دریچه‌های بهره‌برداری بالاتر از سطح رسوبات بلندمدت پیش‌بینی شده برای هر مخزن قرار دارند، لذا توزیع ماهانه رسوبات در طول دوره بهره‌برداری اهمیت نداشته و صرفاً حجم Se به منظور اصلاح مشخصات هندسی مخزن مدّ نظر می‌باشد. بر اساس جدول ۱، حجم کمینه هر مخزن، اندکی بیش‌تر از حجم Se برای آن مخزن می‌باشد تا بهره‌برداری از هر مخزن، از حجم آب ذخیره شده در بالای حجم کمینه صورت می‌گیرد و در طول عمر مفید هر مخزن، هیچ رسوبی بالاتر از حجم کمینه ذخیره نمی‌گردد. حجم نشت و نفوذ آب از بستر دریاچه هر مخزن بر اساس یک درصد تعیین شده (I) از حجم آب موجود (ذخیره شده) در مخزن در بازه‌های زمانی مختلف از سال محاسبه می‌شود.

مشخصات هندسی هر مخزن به صورت رابطه‌های سطح–حجم–ارتفاع[1] (A-S-H) بررسی می‌شوند. برای مخازن سامانه نمونه این روابط به ازای t =۱,۲, ... ,T به صورت روابط (۱) تا (٦) می‌باشند. همچنین، در تعیین این روابط، پارامترهای سطح، حجم و ارتفاع، فقط مربوط به آب ذخیره شده در مخزن (صرف‌نظر از رسوب) هستند و اگر آبی در مخزن ذخیره نشده باشد (S = ۰)، سطح آبی در دریاچه مخزن تشکیل نشده (A = ۰) و ارتفاع آبی هم پشت سد وجود نخواهد داشت (H = ۰).

در این روابط، t = شمارنده بازه‌های زمانی بهره‌برداری از سامانه سه‌مخزنه؛ زیرنویس‌های ۱، ۲ و ۳ = به‌ترتیب مربوط به پارامترهای مخازن ۱، ۲ و ۳، T = تعداد کل بازه‌های زمانی (دوره) بهره‌برداری و R^2 = ضریب تعیین[2] می‌باشند.

[1] Area-Storage-Height
[2] Coefficient of Determination

$$S_1(t) = 0.195H_1^2(t) + 3H_1(t) \qquad R^2 = 1 \qquad (۱)$$

$$A_1(t) = 0.0055H_1^2(t) + 0.5H_1(t) \qquad R^2 = 1 \qquad (۲)$$

$$S_2(t) = 0.195H_2^2(t) + 6.5H_2(t) \qquad R^2 = 1 \qquad (۳)$$

$$A_2(t) = 0.0155H_2^2(t) + 0.055H_2(t) \qquad R^2 = 1 \qquad (٤)$$

$$S_3(t) = 0.095H_3^2(t) + 6.5H_3(t) \qquad R^2 = 1 \qquad (۵)$$

$$A_3(t) = 0.0055H_3^2(t) + 0.055H_3(t) \qquad R^2 = 1 \qquad (٦)$$

در واقعیت، رسوب‌گذاری به صورت توزیعی و با روند تدریجی در طول بازه‌های زمانی مختلف برنامه‌ریزی در هر مخزن صورت می‌گیرد. لذا استفاده از روابط فوق، می‌تواند به دلیل لحاظ نکردن اثر رسوب‌گذاری، منجر به بروز خطا در محاسبات مربوط به طراحی و بهره‌برداری از سامانه مخازن شود. ولی می‌توان با انجام اصلاحاتی در روابط *A-S-H*، اثر رسوب‌گذاری توزیعی و تدریجی را در محاسبات اعمال کرد. برای این منظور، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران (۱۳۸۰) در نشریه شماره ۲۲۱ خود تحت عنوان «تعیین حجم رسوبات و توزیع آن در مخازن سدها»، دو راه‌کار ارائه کرده است: (۱) روش افزایش سطح[1] و (۲) روش کاهش سطح[2]. اساس هر دو روش، بر پایه تعدیل سطح اولیه مخزن در اثر رسوب‌گذاری است. به دلیل سهولت کاربرد روش افزایش سطح، در سامانه نمونه از این روش برای اصلاح توزیع رسوب‌گذاری استفاده شده و روابط برازش داده شده پس از اصلاح، برای هر مخزن به ازای T, ... ,t =۱,۲, در روابط (۷) تا (۱۲) ارائه گردیده‌اند.

آورد طبیعی رودخانه (Q) به عنوان یک ورودی تنظیم نشده به هر مخزن برای ماه‌های مختلف در سال بر اساس جدول ۲ و بر حسب m^3 ۱۰^٦ می‌باشد. در مخازن به واسطه کنترل حجم ذخیره شده در آنها می‌توان هدف تفریحات و کنترل سیلاب را تأمین کرد. به این ترتیب که حجم قابل ذخیره در مخزن باید به گونه‌ای تنظیم شود که مخزن ظرفیت کافی برای ذخیره سیلاب طراحی را داشته باشد و امکان انجام فعالیت‌های تفریحی (ماهی‌گیری، قایق‌رانی و غیره) نیز در آن وجود داشته باشد. در این حالت برای حجم ذخیره در هر مخزن، آستانه کنترلی با عنوان «حجم آستانه تفریحات و کنترل سیلاب» (*ST*) در نظر گرفته می‌شود که مقادیر مربوط به آن در سامانه نمونه بر حسب (m^3 ۱۰^٦) در جدول ۲ ارائه شده‌اند. با توجه به اینکه سطح آب ذخیره شده در دریاچه مخزن در معرض نور خورشید یا بارندگی قرار دارد، لذا برخی از عوامل هواشناسی نظیر تبخیر و بارش باران و برف می‌توانند در حجم آب ذخیره شده در مخزن مؤثر باشند. اطلاعات مربوط به ارتفاع تبخیر (Ev) و بارندگی (P) در دریاچه هر مخزن در سامانه نمونه (mm) به صورت جدول ۲ می‌باشد.

هر مخزن علاوه بر بدنه سد، دارای اجزائی است که به کمک آنها می‌تواند اهداف مورد نظر را تأمین کند. آب ذخیره شده در مخزن هر سد، از طریق دریچه‌های آبگیر برای تأمین اهداف مختلف به پایین‌دست سد منتقل می‌شود. با توجه به اینکه سدها می‌توانند دارای اهداف گوناگون و متعدد باشند، لذا هر سد می‌تواند دارای چندین دریچه آبگیر در رقوم‌های مختلف و با ابعاد گوناگون برای تأمین هر هدف باشد. در سامانه مخازن نمونه، برای تأمین هر هدف دو دریچه آبگیر با شکل، ابعاد و ظرفیت یکسان وجود دارد که اطلاعات آنها در جدول‌های ۳ و ٤ ارائه شده‌اند.

[1] Area Increment Method
[2] Area Reduction Method

$$A_1(t) = -2.682\times10^{-6}S_1^2(t) + 4.846\times10^{-2}S_1(t) \qquad R^2 = 0.999 \qquad (۷)$$

$$H_1(t) = -11.517\times10^{-6}S_1^2(t) + 6.628\times10^{-2}S_1(t) + 20 \qquad R^2 = 0.969 \qquad (۸)$$

$$A_2(t) = 4.128\times10^{-6}S_2^2(t) + 5.372\times10^{-2}S_2(t) \qquad R^2 = 0.999 \qquad (۹)$$

$$H_2(t) = -11.668\times10^{-6}S_2^2(t) + 6.404\times10^{-2}S_2(t) + 10 \qquad R^2 = 0.985 \qquad (۱۰)$$

$$A_3(t) = 2.284\times10^{-6}S_3^2(t) + 3.869\times10^{-2}S_3(t) \qquad R^2 = 0.999 \qquad (۱۱)$$

$$H_3(t) = -10.734\times10^{-6}S_3^2(t) + 7.214\times10^{-2}S_3(t) + 30 \qquad R^2 = 0.989 \qquad (۱۲)$$

جدول ۲. اطلاعات مربوط به *Q*، *ST*، *Ev* و *P* برای مخازن مختلف در سامانه نمونه

پارامتر	شماره ماه	فروردین ۱	اردیبهشت ۲	خرداد ۳	تیر ٤	مرداد ٥	شهریور ٦	مهر ۷	آبان ۸	آذر ۹	دی ۱۰	بهمن ۱۱	اسفند ۱۲
Q	مخزن ۱	۷٦۰	٦۸۰	٤۰۰	۲٤۰	۱٦۰	۱۲۰	۸۰	۱۲۰	۲٤۰	۲۸۰	۳٦۰	٥٦۰
	مخزن ۲	۹٦۰	۷۲۰	٥٤۰	٤۲۰	۲٤۰	٦۰	۱۲۰	۱۸۰	٤۸۰	٥٤۰	٦٦۰	۱۰۸۰
	مخزن ۳	۸٥۰	۱٬۰۳۰	٦۳۰	٤٥۰	۲۸۰	۱۱۰	۱۷۰	۲۳۰	۲۹۰	٤٦۰	٥۷۰	٦۳۰
ST	مخزن ۱	۱٬۹٥۰	۲٬۰۳۰	۲٬۳۱۰	۲٬٤۷۰	۲٬٥٥۰	۲٬٥۹۰	۲٬٦۳۰	۲٬٥۹۰	۲٬٤۷۰	۲٬٤۳۰	۲٬۳٥۰	۲٬۱٥۰
	مخزن ۲	۹۷۰	۱٬۲۱۰	۱٬۳۹۰	۱٬٥۱۰	۱٬٦۹۰	۱٬۸۷۰	۱٬۸۱۰	۱٬۷٥۰	۱٬٤٥۰	۱٬۳۹۰	۱٬۲۷۰	۸٥۰
	مخزن ۳	۱٬۰۸۰	۹۰۰	۱٬۳۰۰	۱٬٤۸۰	۱٬٦٥۰	۱٬۸۲۰	۱٬۷٦۰	۱٬۷۰۰	۱٬٦٤۰	۱٬٤۷۰	۱٬۳٦۰	۱٬۳۰۰
Ev	مخزن ۱	٦۰	۷۰	۸۰	۱۱۰	۱٤۰	۱۰۰	٦۰	٥۰	۳۰	۲۰	۳۰	٥۰
	مخزن ۲	۷۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۱۰	۷۰	٤۰	٤۰	۲۰	۱۰	٤۰	٦۰
	مخزن ۳	٦۰	٦۰	۷۰	۹۰	۸۰	۷۰	٥۰	٤۰	٥	٥	۲۰	٥۰
P	مخزن ۱	٤۰	۳۰	۱۰	۰	۰	۰	٤۰	٥۰	۷۰	۷۰	۸۰	٦۰
	مخزن ۲	٦۰	٤۰	۲۰	۰	۰	۱۰	٦۰	۹۰	۱۱۰	۱۳۰	۱۱۰	۷۰
	مخزن ۳	٦۰	۳۰	۲۰	۰	۰	۱۰	٥۰	۷۰	۹۰	۱۰۰	۹۰	۸۰

جدول ۳. ظرفیت دریچه‌های آبگیر مختلف (10^6 m^3 در ماه) برای مخازن مختلف در سامانه نمونه

مجموع ظرفیت دو دریچه آبگیر برای:	تأمین تقاضای محل‌های مصرف پایین‌دست	تولید انرژی برق‌آبی	تخلیه اضطراری و رسوب
مخزن ۱	۹۸۰	۱٬٥۲۰	۲٬٥۰۰
مخزن ۲	۹۸۰	٦۰۰	۱٬۰٤۰
مخزن ۳	۹۸۰	٦۰۰	۱٬۰۲۰

جدول ٤. رقوم دریچه‌های آبگیر مختلف (m) از سطح دریا برای مخازن مختلف در سامانه

رقوم دریچه‌های آبگیر برای:	تأمین تقاضای محل‌های مصرف پایین‌دست		تولید انرژی برق‌آبی		تخلیه اضطراری و رسوب	
	دریچه اول	دریچه دوم	دریچه اول	دریچه دوم	دریچه اول	دریچه دوم
مخزن ۱	۷۱۸	۷۳٥	۷٦۰	۷۸۰	۷۱٥	۷۲۰
مخزن ۲	۷٥۸	۷۷٥	۷۹۰	۸۱۰	۷٥٥	۷٥۹
مخزن ۳	۸۲۸	۸٥٥	۸۸۰	۹۰٥	۸۲٥	۸۳۰

کم‌ترین ظرفیت مجاز رهاسازی برای هر یک از دریچه‌های آبگیر برابر با صفر است. آب مازاد بر ظرفیت هر مخزن نیز از طریق سرریز (*Sp*) از آن خارج می‌شود. در هر مخزن سامانه نمونه یک سرریز وجود دارد که ظرفیت آن برای تمام مخازن ۱، ۲ و ۳ یکسان و برابر با 10^9 m^3 در ماه می‌باشد.

اطلاعات مربوط به انواع مصارف در سامانه نمونه

در سامانه مخازن نمونه، در هر مخزن تأمین سه نوع تقاضای کشاورزی (l = ۱)، شهری (l = ۲) و صنعتی (l = ۳) مدّ نظر قرار گرفته‌اند. روند تغییرات ماهانه تقاضای کشاورزی و شهری در طول سال تقریباً مشابه بوده و فقط مقدار آنها با یکدیگر متفاوت است. در حالی که روند تغییرات ماهانه تقاضای صنعتی نامحسوس بوده و داده‌های مربوط به آن نسبتاً ثابت می‌باشند، اما این داده‌ها دارای روند تغییرات فصلی محسوس هستند. اطلاعات مربوط به مقدار تقاضای هر یک از انواع مصارف (De) برای هر سه مخزن در جدول ۵ ارائه شده است.

همچنین، درصدهای آب بازگشتی مربوط به هر یک از انواع مصارف در هر مخزن نیز بر اساس مطالعات طرح جامع آب کشور ایران (۱۳۹۰) تعیین و در جدول ٦ ارائه شده‌اند. درصد آب بازگشتی در این جدول نشان می‌دهد که چه مقدار از آب تحویل داده شده برای تأمین هر یک از مصارف، به صورت غیرطبیعی به سامانه بازگردانده می‌شود. مقدار آب بازگشتی می‌تواند به صورت مستقیم وارد آب‌های سطحی شود یا از طریق چاه‌های جذبی به آب‌های زیرزمینی تخلیه گردد. لذا درصدی از آب بازگشتی وارد منابع سطحی و مابقی آن وارد منابع زیرزمینی می‌شود که به صورت مجزا در جدول ٦ نشان داده شده‌اند. از آنجا که سامانه مورد بررسی مربوط به منابع آب سطحی است، لذا اعداد مربوط به آب بازگشتی به منابع آب سطحی در سامانه نمونه مورد توجه می‌باشند.

اطلاعات مربوط به نیروگاه‌های برق‌آبی در سامانه نمونه

بر اساس شکل ۱، برای هر مخزن یک نیروگاه برق‌آبی مجزا در سامانه نمونه در نظر گرفته شده است. هر نیروگاه برق‌آبی از تعدادی واحدهای مستقل تولید انرژی تشکیل شده است که هر واحد، ظرفیت تولید یا ظرفیت نصب[1] (PPC) مشخصی دارد. در سامانه نمونه، هر نیروگاه دارای دو واحد تولید انرژی با خصوصیات و ظرفیت نصب مشابه و یکسان است. همچنین، هر نیروگاه برق‌آبی دارای بازده معینی برای تولید برق است که بیان‌گر نحوه عملکرد و کارآیی نیروگاه می‌باشد. تولید برق در هر نیروگاه بر اساس ضریب کارکرد[2] آن در طول دوره زمانی مشخص صورت می‌گیرد. این ضریب نشان می‌دهد که در چند درصد از مواقع در بازه‌های زمانی مختلف از طول دوره بهره‌برداری، واحدهای نیروگاهی با بیش‌ترین توان خود (ظرفیت نصب) به تولید برق می‌پردازند. در سامانه نمونه، ضریب کارکرد به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که هر نیروگاه در ماه‌های مختلف بهره‌برداری، دست‌کم شش ساعت در هر شبانه‌روز توانی معادل با ظرفیت نصب خود را تولید کند. اطلاعات مربوط به نیروگاه‌ها در سامانه نمونه بر اساس جدول ۷ در نظر گرفته شده است.

از دیگر پارامترهای نیروگاه‌های برق‌آبی، رابطه دبی–اشل (Qw-El) نیروگاه است که با توجه به ویژگی‌های توربین نیروگاه برق‌آبی مشخص می‌شود. به کمک این رابطه می‌توان ارتفاع ستون آب موجود در بالای محور توربین را به ازای هر مقدار دبی آب رها شده از مخزن برای تولید انرژی برق‌آبی تعیین کرد. رابطه دبی–اشل برای هر نیروگاه در سامانه نمونه به صورت روابط (۱۳) تا (۱۵) به ازای t =۱,۲, ... ,T ارائه شده‌اند. در این روابط، $Qw_1(j,t)$، $Qw_2(j,t)$ و $Qw_3(j,t)$ = به ترتیب دبی آب تنظیم شده خروجی از دریچه‌های آبگیر مختلف j در مخازن ۱، ۲ و ۳ برای تولید انرژی برق‌آبی در هر نیروگاه (m^3/s) در طول بازه زمانی t؛ $El_1^{down}(t)$، $El_2^{down}(t)$ و $El_3^{down}(t)$ = به ترتیب ارتفاع متناظر با دبی آب تنظیم شده خروجی در هر نیروگاه (m) در طول بازه زمانی t در پایین‌دست مخازن ۱، ۲ و ۳؛ j = شمارنده تعداد دریچه‌های آبگیر و J = تعداد کل دریچه‌های آبگیر برای تولید انرژی برق‌آبی در هر مخزن می‌باشند.

[1] Installation Capacity

[2] Plant Factor

$$El_1^{down}(t) = -5.5\times10^{-7}\left[\sum_{j=1}^{J} Qw_1(j,t)\right]^2 + 0.3\times10^{-3}\sum_{j=1}^{J} Qw_1(j,t) \quad (۱۳)$$

$$El_2^{down}(t) = -3.3\times10^{-7}\left[\sum_{j=1}^{J} Qw_2(j,t)\right]^2 + 0.25\times10^{-2}\sum_{j=1}^{J} Qw_2(j,t) \quad (۱٤)$$

$$El_3^{down}(t) = -2.2\times10^{-7}\left[\sum_{j=1}^{J} Qw_3(j,t)\right]^2 + 0.2\times10^{-2}\sum_{j=1}^{J} Qw_3(j,t) \quad (۱۵)$$

جدول ۵. اطلاعات مصارف مختلف در سامانه نمونه (10^6 m^3)

شماره ماه	مخزن ۱			مخزن ۲			مخزن ۳		
	کشاورزی	شهری	صنعتی	کشاورزی	شهری	صنعتی	کشاورزی	شهری	صنعتی
فروردین (۱)	۵۱۰	۵۵۰	٤۲۰	٤۸۰	۵۲۰	٤۵۰	۵۵۰	٦۰۰	٤٦۰
اردیبهشت (۲)	۵۷۰	٦۰۰	٤۸۰	٦۰۰	٦٤۰	۵۰۰	٦۲۰	٦٦۰	۵۱۰
خرداد (۳)	٦۸۰	٦٦۰	۵۳۰	۸٤۰	۷۵۰	۵٦۰	۷۹۰	۷۲۰	۵۷۰
تیر(٤)	۷٤۰	۷۲۰	٦٤۰	۸٤۰	۷٦۰	۵٦۰	۸۵۰	۷۸۰	۵۷۰
مرداد (۵)	۸۰۰	۷۲۰	۵۸۰	۷۸۰	۷۰۰	٦۲۰	۸۵۰	۷۸۰	٦۳۰
شهریور (٦)	٦۳۰	۵۵۰	۵۳۰	۷۲۰	۵۸۰	٦۱۰	۷۳۰	٦۰۰	۵۷۰
مهر (۷)	٤٦۰	۳۳۰	٤۲۰	٤۸۰	۳۵۰	۵۰۰	٤۹۰	۳٦۰	٤٦۰
آبان (۸)	۳٤۰	۲۷۰	۳۷۰	۳۰۰	۲۹۰	۳۹۰	۳۰۰	۳۰۰	٤۰۰
آذر (۹)	۱۷۰	۱۷۰	۳۷۰	۱۸۰	۱۷۰	۳٤۰	۱۹۰	۱۸۰	٤۰۰
دی (۱۰)	۱۷۰	۱٦۰	۳۲۰	۱۸۰	۱۷۰	۲۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۳٤۰
بهمن (۱۱)	۲۳۰	۲۷۰	۲٤۰	۲۷۰	۳۵۰	۳٤۰	۱۸۰	۳۰۰	۳٤۰
اسفند (۱۲)	٤۰۰	۵۰۰	۳٦۰	۳۷۰	۵۲۰	٤۵۰	۳۷۰	۵٤۰	٤۵۰
مجموع سالانه	۵٬۷۰۰	۵٬۵۰۰	۵٬۳۰۰	٦٬۰۰۰	۵٬۸۰۰	۵٬٦۰۰	٦٬۱۰۰	٦٬۰۰۰	۵٬۷۰۰

جدول ٦. درصدهای آب بازگشتی مصارف مختلف در سامانه نمونه (٪)

پارامتر	مخزن ۱			مخزن ۲			مخزن ۳		
	کشاورزی	شهری	صنعتی	کشاورزی	شهری	صنعتی	کشاورزی	شهری	صنعتی
آب بازگشتی	۲۵	۷۰	٦۰	۲۰	٦۵	۷۰	۳۰	٦۰	٦۵
آب بازگشتی به منابع سطحی	۳۰	۲۰	۱۰	۳۵	۱۰	۱۵	٤۰	۱۵	۲۰
آب بازگشتی به منابع زیرزمینی	۷۰	۸۰	۹۰	٦۵	۹۰	۸۵	٦۰	۸۵	۸۰

جدول ۷. اطلاعات نیروگاه‌های مختلف در سامانه نمونه

پارامتر	نیروگاه ۱	نیروگاه ۲	نیروگاه ۳
مجموع ظرفیت دو واحد نیروگاهی [مگاوات (10^6 w)]	۱٬۱٦۸	٤٤۰	٦۵۰
بازده تولید انرژی برق‌آبی (٪)	۹۰	۹۰	۹٦
ضریب کارکرد (٪)	۳۰	۲۵	۳۵
رقوم محل توربین نیروگاه از سطح دریا (m)	٦۹۰	۷۳۰	۷۹۰
رقوم کف پایین‌دست نیروگاه از سطح دریا (m)	٦۸۵	۷۲۵	۷۸۵

برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سامانه نمونه

برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سامانه نمونه در چهار حالت بررسی شده است. در حالت اول، هر یک از مخازن این سامانه به ازای در نظر گرفتن هر یک از اهداف به صورت جداگانه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب که هر مخزن صرف‌نظر از وجود سایر مخازن و اجزای سامانه به ازای هر هدف بررسی می‌شود [تک‌مخزنه- تک‌هدفه[1] (*SRSO*)]. در حالت دوم نیز مخازن سامانه به صورت مجزا و به ازای در نظر گرفتن همه اهداف به صورت هم‌زمان بررسی می‌شوند [تک‌مخزنه- چندهدفه[2] (*SRMO*)]. در حالت سوم، مخازن این سامانه به صورت یک‌پارچه و به ازای در نظر گرفتن هر یک از اهداف به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [چندمخزنه- تک‌هدفه[3] (*MRSO*)] و در نهایت در حالت چهارم، سامانه سه‌مخزنه به صورت یک‌پارچه و با در نظر گرفتن همه اهداف تحلیل می‌شود [چندمخزنه- چندهدفه[4] (*MRMO*)].

برای بررسی هر سامانه لازم است ابتدا مدل‌سازی آن انجام شود تا با استفاده از معادلات حاکم بر آن، فرآیند شبیه‌سازی و در صورت لزوم بهینه‌سازی صورت گیرد. با توجه به اینکه روابط مدل‌سازی مربوط به سامانه مخازن (روابط منحنی‌های *A-S-H*، منحنی‌های *Qw-El*، توان تولیدی در نیروگاه‌ها و غیره)، به صورت غیرخطی هستند، در حالت‌های اول و سوم که مسئله بهره‌برداری به صورت تک‌هدفه مطرح است، از روش برنامه‌ریزی غیرخطی[5] (*NLP*) استفاده می‌شود. روش *NLP* یک روش بهینه‌سازی کلاسیک بر پایه مفاهیم و حل ریاضی معادلات است و جواب نهایی حاصل از آن یک جواب بهینه مطلق[6] می‌باشد. همچنین، در حالت‌های دوم و چهارم که مسئله بهره‌برداری به صورت چندهدفه است، الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب نوع دو[7] (*NSGA-II*) به عنوان یک ابزار در دسترس و کارآمد در حل مسائل چندهدفه به کار گرفته می‌شود. این ابزار بر اساس مفاهیم و مبانی موجود در *GA* استوار بوده، دارای پایه و اساس تصادفی است و جواب نهایی حاصل از آن یک جواب نزدیک به بهینه[8] است. بنابراین، نتایج حاصل از یک بار حل مسئله با استفاده از *NSGA-II* قابل اعتماد نبوده و لازم است برآیند چند اجرا به عنوان جواب نهایی در نظر گرفته شود. همچنین، در هر بار اجرای مدل به جای یک جواب بهینه، مجموعه‌ای از جواب‌های نزدیک به بهینه که برتری نسبت به یکدیگر ندارند، حاصل می‌شود. به این نوع جواب‌ها، جواب‌های نامغلوب[9] گفته شده و مجموعه جواب‌های نامغلوب تحت عنوان پرتو[10] نامیده می‌شود. بنابراین، در حالت‌های اول و سوم تحلیل سامانه مخازن، جواب نهایی برای هر مخزن به صورت یک جواب بهینه مطلق و در حالت‌های دوم و چهارم تحلیل سامانه مخازن، جواب نهایی برای کل سامانه به صورت یک پرتو خواهد بود.

در روند بهره‌برداری از سامانه مخازن نمونه، مدل شبیه‌سازی بر اساس سیاست بهره‌برداری استاندارد[11] (*SOP*) و به صورت روابط (۱۶) تا (۳۰) که روابط مربوط به مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه تک‌مخزنه هستند، به ازای $t = 1,2, \ldots, T$ در نظر گرفته می‌شود.

[1] Single Reservoir-Single Objective
[2] Single Reservoir-Multi Objective
[3] Multi Reservoir-Single Objective
[4] Multi Reservoir-Multi Objective
[5] Non-Linear Programming
[6] Global Optimum
[7] Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II
[8] Near Optimum
[9] Nondominant
[10] Pareto
[11] Standard Operation Policy

$$S(t+1)=S(t)+Q(t)+Q'(t)+Se(t)+SF(t)-Loss(t)-I(t) \\ -Sp(t)-\sum_{v=1}^{V}\sum_{j=j(1)}^{J(v)}Rw(j,v,t)-\sum_{l=1}^{C}\sum_{j=j'(1)}^{J'(V')}Rw'(j,l,t) \qquad (۱۶)$$

$$Loss(t)=\left[\frac{A(t)+A(t+1)}{2}\right]\left[Ev(t)-P(t)\right] \qquad (۱۷)$$

$$A(t)=f\left[S(t),h^{up}(t)\right] \qquad (۱۸)$$

$$A(t+1)=f\left[S(t+1),h^{up}(t+1)\right] \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{j=j'(1)}^{J'(V')}Rw'(j,l,t)\Big|_{l=l'}=\begin{cases}De(l,t)\big|_{l=l'} & 0<De(l,t)\big|_{l=l'}<Z(t)\\ Z(t) & 0\le Z(t)\le De(l,t)\big|_{l=l'}\\ 0 & 0>Z(t)\end{cases} \qquad (۲۰)$$

$$PPC=\frac{\gamma\eta DePw(t)\Delta H(t)}{PF(t)} \rightarrow DePw(t)=\frac{PF(t)PPC}{\gamma\eta\Delta H(t)} \qquad (۲۱)$$

$$\Delta H(t)=\left[\frac{h^{up}(t)+h^{up}(t+1)}{2}\right]-h^{down}(t) \qquad (۲۲)$$

$$h^{down}(t)=f''\left[Rw(j,V'',t)\right] \qquad j=j(1),j(2),\ldots,J(V'') \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{j=j(1)}^{J(V'')}Rw(j,V'',t)=\begin{cases}DePw(t) & DePw(t)<Z(t)\\ Z(t) & Z(t)\le DePw(t)\end{cases} \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{j=j(1)}^{J(V''')}Rw(j,V''',t)=\begin{cases}Z(t)-ST(t) & ST(t)<Z(t)\\ 0 & Z(t)\le ST(t)\end{cases} \qquad (۲۵)$$

$$Sp(t)=\begin{cases}Z(t)-S^{\max} & S^{\max}<Z(t)\\ 0 & Z(t)\le S^{\max}\end{cases} \qquad (۲۶)$$

$$0\le S^{\min}\le S(t)\le S^{\max} \qquad (۲۷)$$

$$0\le Rw'^{\min}(j,l)\le Rw'(j,l,t)\le Rw'^{\max}(j,l) \qquad \begin{matrix}l=۱,۲,\ldots,C\\ j=j'(1),j'(2),\ldots,J'(V')\end{matrix} \qquad (۲۸)$$

$$0\le Rw^{\min}(j,v)\le Rw(j,v,t)\le Rw^{\max}(j,v) \qquad \begin{matrix}v=۱,۲,\ldots,V\\ j=j(1),j(2),\ldots,J(v)\end{matrix} \qquad (۲۹)$$

$$0\le Sp^{\min}\le Sp(t)\le Sp^{\max} \qquad (۳۰)$$

که در آن، $S(t)$ و $S(t+1)$ = به ترتیب حجم ذخیره در مخزن در طول بازه زمانی t و ۱+t؛ $Q'(t)$ = جریان ورودی مصنوعی تنظیم شده به هر مخزن در طول بازه زمانی t؛ $Loss(t)$ = حجم تلفات ناشی از تبخیر و بارش در دریاچه مخزن در طول بازه زمانی t؛ $Rw(j,v,t)$ = میزان رهاسازی تنظیم شده از دریچه‌های مختلف j به منظور تأمین هدف v (تولید انرژی برق‌آبی و تفریحات و کنترل سیلاب) در طول بازه زمانی t؛ $Rw'(j,l,t)$ = مقدار رهاسازی تنظیم شده از دریچه‌های مختلف j به منظور تأمین تقاضای پایین‌دست l در طول بازه زمانی t؛ v = شمارنده تعداد اهداف مورد نظر برای مخزن (به استثنای تأمین تقاضای محل‌های مصرف)؛ V = تعداد کل اهداف مخزن (به استثنای تأمین تقاضای محل‌های مصرف)؛ $j(1)$ = شماره اولین دریچه آبگیر در مخزن

برای تأمین هدف v (به استثنای تأمین تقاضای محل‌های مصرف)؛ $J(v)$ = تعداد کل دریچه‌های آبگیر به منظور تأمین هدف v (به استثنای تأمین تقاضای محل‌های مصرف)؛ C = تعداد کل محل‌های مصرف در پایین‌دست مخزن؛ $j'(1)$ = شماره اولین دریچه آبگیر در مخزن برای تأمین هدف V' (تأمین تقاضای محل‌های مصرف)؛ $J'(V')$ = تعداد کل دریچه‌های آبگیر به منظور تأمین تقاضای محل‌های مصرف؛ $A(t)$ و $A(t+1)$ = به ترتیب سطح دریاچه مخزن در ابتدای بازه زمانی t و t+۱ [بر اساس روابط (۱۸) و (۱۹) محاسبه می‌شوند]؛ $f[\ ]$ = رابطه *A-S-H*برای هر مخزن و $h^{up}(t)$ و $h^{up}(t+1)$ = به ترتیب ارتفاع آب در دریاچه مخزن در ابتدای بازه زمانی t و t+۱ می‌باشند. در رابطه (۲۰)، l' = شماره محل مصرفی است که محاسبه حجم رهاسازی برای تأمین تقاضای آن مدّ نظر می‌باشد؛ $De(l,t)$ = حجم تقاضای محل مصرف l در طول بازه زمانی t و $Z(t)$ = حجم ذخیره موجود در مخزن برای محاسبه $Rw(j,v,t)$ و $Rw'(j,l,t)$ بر اساس سیاست *SOP* در طول بازه زمانی t هستند. حالت مطلوب برای تولید انرژی برق‌آبی، تولید توانی معادل با ظرفیت نصب نیروگاه در تمام بازه‌های زمانی بهره‌برداری از سامانه مخازن می‌باشد. در صورت استفاده از سیاست *SOP* برای تعیین حجم رهاسازی تولید انرژی برق‌آبی، لازم است ابتدا حجم آب مورد نیاز برای تأمین توانی برابر با ظرفیت نصب هر نیروگاه تعیین شود. برای این منظور می‌توان از رابطه توان تولیدی [رابطه (۲۱)] استفاده کرد که در آن، γ = وزن مخصوص آب (۹٬۸۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب)؛ η = راندمان نیروگاه برق‌آبی هر مخزن؛ $\Delta H(t)$ = اختلاف ارتفاع بین بالادست و پایین‌دست در نیروگاه برق‌آبی غرق‌آبی یا اختلاف ارتفاع بین بالادست و محور توربین در نیروگاه برق‌آبی آزاد برای هر مخزن در طول بازه زمانی t [رابطه (۲۲)]؛ $PF(t)$ = ضریب کارکرد نیروگاه برق‌آبی در طول بازه زمانی t و $h^{down}(t)$ = ارتفاع آب پایین‌دست در نیروگاه برق‌آبی غرق‌آبی یا ارتفاع محور توربین در پایین‌دست نیروگاه برق‌آبی آزاد برای هر مخزن در طول بازه زمانی t می‌باشند. شایان ذکر است که تولید برق در هر نیروگاه، تنها در شرایطی صورت می‌گیرد که $\Delta H(t)$ نامنفی باشد. پارامتر $h^{down}(t)$ در هر نیروگاه برق‌آبی غرق‌آبی بر اساس حجم آبی که به منظور تولید انرژی برق‌آبی از خروجی‌های مختلف هر مخزن در طول بازه زمانی t رها می‌شود [$Rw(j,V'',t)$]، به صورت رابطه (۲۳) قابل محاسبه است که در آن، $f''[\ ]$ = رابطه دبی–اشل برای نیروگاه برق‌آبی هر مخزن؛ V'' = شماره هدف مربوط به تولید انرژی برق‌آبی در هر مخزن و $J(V'')$ = شماره آخرین دریچه آبگیر برای تولید انرژی برق‌آبی می‌باشند. پس از محاسبه میزان آب مورد نیاز برای تولید *PPC*، می‌توان حجم آب قابل رهاسازی از هر مخزن را بر اساس سیاست *SOP* به صورت رابطه (۲٤) محاسبه کرد.

حجم رهاسازی آب به منظور تفریحات و کنترل سیلاب محتمل در طول هر بازه زمانی t بر اساس سیاست *SOP* از رابطه (۲۵) قابل محاسبه خواهد بود. در این رابطه، V''' = شماره هدف مربوط به تفریحات و کنترل سیلاب در هر مخزن است. به این ترتیب، پس از محاسبه مقادیر مربوط به تمام عوامل ورودی و خروجی از هر مخزن، حجم ذخیره شده در هر مخزن از رابطه (۱٦) و مقدار $Sp(t)$ از رابطه (۲٦) قابل تعیین می‌باشند. رابطه (۲۷) محدودیت مربوط به حجم ذخیره در مخزن است که این حجم ذخیره، شامل حجم فعال مخزن و رسوبات ذخیره شده در مخزن می‌باشد و باید به ازای تمام دوره‌های بهره‌برداری در این رابطه صدق کند. همچنین، هر یک از دریچه‌های آبگیر می‌توانند به شکل کالورت، لوله یا دریچه قابل تنظیم باشند که در هر حالت دارای ظرفیت مشخصی می‌باشند. رابطه (۲۸) مربوط به محدوده مجاز برای حجم رهاسازی آب با هدف تأمین تقاضای محل‌های مصرف موجود در سامانه و رابطه (۲۹) مربوط

به محدوده مجاز برای حجم رهاسازی آب با اهداف گوناگون (به استثنای تأمین تقاضای محل‌های مصرف) هستند. در این روابط، $Rw'^{\min}(j,l)$ و $Rw'^{\max}(j,l)$ = به ترتیب حجم رهاسازی آب کمینه و بیشینه از خروجی j در هر مخزن با هدف تأمین تقاضای محل مصرف l و $Rw^{\min}(j,v)$ و $Rw^{\max}(j,v)$ = به ترتیب حجم رهاسازی آب کمینه و بیشینه از خروجی j در هر مخزن با هدف v (به استثنای تأمین تقاضای محل‌های مصرف) می‌باشند. یکی از سازه‌های مهم سدها، سرریز می‌باشد. سرریز باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با کارآیی بالا انتخاب شود که هر لحظه بتواند برای بهره‌برداری آمادگی داشته باشد. رابطه (۳۰) مربوط به محدوده مجاز حجم سرریز از هر مخزن است که در آن، $Sp^{\min}$ و $Sp^{\max}$ = به ترتیب حجم سرریز کمینه و بیشینه از هر مخزن می‌باشند.

با توجه به اینکه حجم ذخیره در مخزن در طول سال تغییر می‌کند، رقوم آب ذخیره شده در مخزن نیز تغییر خواهد کرد. در طراحی هر مخزن ظرفیت دریچه‌های آبگیر مختلف به صورت ثابت و به گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که همواره بیش‌تر از حجم تقاضای مورد نیاز در تأمین هر هدف در پایین‌دست باشند. به عبارت دیگر، در بررسی سامانه نمونه، هدف مدیریت بهره‌برداری از سامانه بوده و طراحی اجزای سامانه به گونه‌ای لحاظ شده است که در صورت وجود آب کافی، شرایط مناسب جهت رهاسازی آن از هر مخزن (با در نظر گرفتن روابط بین مخازن در سامانه) و مدیریت قانون‌مند اهداف مختلف تا حد قابل قبولی تأمین می‌شوند. ولی آبگیری از هر دریچه تنها زمانی صورت می‌گیرد که رقوم آب ذخیره شده در مخزن در بازه زمانی مورد بررسی بالاتر از رقوم دریچه آبگیر باشد. به این ترتیب بیشینه مقدار رهاسازی از هر مخزن در هر بازه زمانی به رقوم آب ذخیره شده در مخزن وابسته بوده و در طول سال می‌تواند ثابت نباشد. یکی از فرضیات مهم در سیاست *SOP*، عدم ایجاد ذخیره بین دوره‌ای[1] در سامانه است. برای برقراری چنین فرضی، لازم است حجم ذخیره سامانه مخازن در ابتدای دوره بهره‌برداری برابر با حجم ذخیره در انتهای دوره بهره‌برداری باشد. به این ترتیب، الگوی بهره‌برداری از سامانه به صورت پایدار بوده و می‌توان برای کل مدت زمان عمر مفید سامانه به صورت تکراری از این الگو استفاده کرد.

پس از تعیین روابط مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه، در حالت‌های اول و سوم، این روابط توسط نسخه ۱۳ نرم‌افزار لینگو[2] به صورت جستجوی سراسری[3] و در حالت‌های دوم و چهارم توسط ابزار *NSGA-II* در نرم‌افزار متلب[4] حل شده‌اند. در ادامه نتایج حاصل از هر حالت تحلیل سامانه به ازای اهداف گوناگون ارائه می‌شوند.

نتایج و بحث

تحلیل تک‌مخزنه- تک‌هدفه (*SRSO*)

در این حالت، چون هر مخزن به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد، از آنجا که اطلاعات مربوط به مخزن ۱ در بخش‌های قبل به صورت میان‌حوضه‌ای ارائه شده است، به منظور ایجاد یک شرایط واقعی در ارزیابی عملکرد مخزن ۱ به صورت جداگانه، ابتدا مخازن ۲ و ۳ به صورت موازی مورد تحلیل قرار می‌گیرند و آب بازگشتی از هر مخزن به ازای هر یک از اهداف، محاسبه می‌شود. بر اساس شکل ۱ خروجی‌هایی مانند سرریز، میزان آب رها شده برای تولید انرژی برق‌آبی، آب‌های بازگشتی هر یک از انواع مصارف و آب رها شده به منظور کنترل سیلاب در مخازن ۲ و ۳ به عنوان ورودی مخزن ۱ محسوب می‌شوند. لذا، مقادیر این پارامترها پس از تحلیل جداگانه مخازن ۲ و ۳ تعیین شده و جریان ورودی به مخزن ۱ برابر با مجموع آورد طبیعی انشعابی از

[1] Carry Over
[2] Lingo13
[3] Global Search
[4] MATLAB

رودخانه که مخزن ۱ روی آن احداث شده است (میان‌حوضه) و جریانات ورودی به این مخزن از مخازن بالادست در نظر گرفته می‌شود. در بررسی بهره‌برداری با هر هدف، ۱۳ متغیر تصمیم شامل حجم‌های رهاسازی در هر بازه زمانی و حجم ذخیره هر مخزن در ابتدای دوره بهره‌برداری لحاظ شده‌اند.

$$i = ۱,۲,۳ \qquad (۳۱)$$

$$i = ۱,۲,۳ t = ۱,۲, \ldots ,۱۲ \qquad (۳۲)$$

در این روابط، زیرنویس i = شمارنده تعداد مخازن سامانه؛ F_i = تابع هدف بهینه‌سازی در مخزن i؛ $Def_i(t)$ = کمبودهای موجود (10^6 w) در طول بازه زمانی t در مخزن i و $PT_i(t)$ = توان تولیدی نیروگاه هر مخزن iدر طول بازه زمانی t (10^6 w) می‌باشند. با توجه به اینکه هر نیروگاه توانایی تولید توانی معادل با ظرفیت نصب خود را دارد ($PPC_i \geq PT_i(t)$)، لذا حاصل رابطه (۳۲) هرگز منفی نخواهد بود. در شکل ۲ تغییرات حجم رهاسازی آب از مخازن برای تولید انرژی برق‌آبی و در شکل ۳ تغییرات توان تولیدی هر نیروگاه نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، تقریباً در همه مخازن سامانه، کمبودها در فصل تابستان و اوایل فصل پاییز ایجاد شده‌اند و در سایر بازه‌های زمانی سال، کمبودی مشاهده نمی‌شود. دلیل این امر، عامل حجم کم آورد طبیعی رودخانه در هر مخزن در بازه‌های کمبود

تولید انرژی برق‌آبی

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای هر مخزن به صورت بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری (کمینه‌سازی کمبود نسبی) تولید انرژی برق‌آبی به شکل زیر تعریف شده است:

$$\text{Maximize} \qquad F_i = 1 - \sum_{t=1}^{12} \frac{Def_i(t)}{PPC_i}$$

$$Def_i(t) = PPC_i - PT_i(t)$$

است. در واقع نمودارها نشان می‌دهند که کمبودها در بازه‌های زمانی‌ای رخ داده‌اند که حجم آب ذخیره شده در هر مخزن کم‌تر از آب مورد نیاز برای تولید انرژی برق‌آبی بوده است و لذا مخزن توانایی رهاسازی آب را به منظور تولید انرژی برق‌آبی ندارد. همچنین، تغییرات حجم ذخیره در همه مخازن سامانه در بازه مجاز برای حجم ذخیره در هر مخزن (بازه بین حجم‌های ذخیره کمینه و بیشینه) قرار دارد. میزان کمبودها بر حسب توان تولیدی در شکل ۳ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین کمبود در توان تولیدی در مخزن ۱ و به مقدار تقریبی ۱۷٤/۰ مگاوات اتفاق افتاده است. مقدار تابع هدف برای هر مخزن به صورت جدول ۸ به دست آمده است که نشان می‌دهد برای تمام مخازن دست‌کم تا ۸٤٪ اطمینان‌پذیری در تولید بیش‌ترین توان ممکن در نیروگاه‌ها وجود دارد.

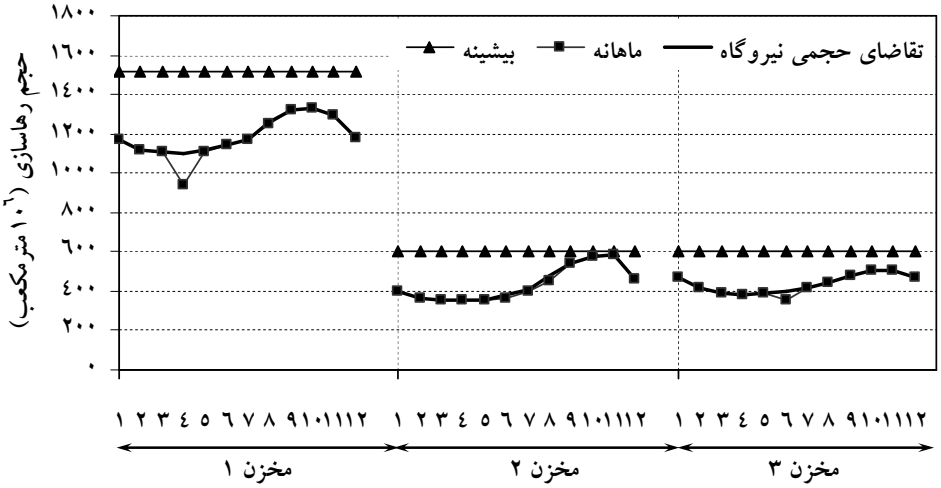
جدول ۸ مقادیر تابع هدف اطمینان‌پذیری تولید انرژی برق‌آبی در نیروگاه‌های مختلف در حالت *SRSO*

پارامتر	نیروگاه ۱	نیروگاه ۲	نیروگاه ۳
اطمینان‌پذیری تولید انرژی برق‌آبی (٪)	۸٤/۸	۸٦/٤	۸۸/٦

تأمین تقاضای مصارف مختلف

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای هر مخزن به صورت بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای مصارف (کمینه‌سازی کمبود نسبی) به شکل روابط (۳۳) و (۳٤) تعریف شده است. با توجه به استفاده از سیاست *SOP* برای بهره‌برداری، حجم رهاسازی هرگز بیش‌تر از حجم تقاضای مورد نیاز در مصارف مختلف نخواهد بود و حاصل رابطه (۳٤) هرگز منفی نمی‌شود. در شکل‌های ٤، ۵ و ٦ تغییرات حجم رهاسازی آب از مخازن به ترتیب برای تأمین تقاضاهای کشاورزی، شهری و صنعتی نشان داده شده‌اند.با توجه به شکل‌های ٤ تا ٦، به دلیل کاهش

حجم آورد طبیعی رودخانه در طول فصل تابستان و ابتدای فصل پاییز امکان رهاسازی آب بیش‌تر وجود نداشته و در نتیجه در این بازه‌های زمانی با وجود اینکه تقریباً تمام آب ذخیره شده در مخازن به منظور تأمین تقاضاهای مختلف رها شده است (حجم ذخیره در مخزن به حجم کمینه مجاز رسیده است)، همچنان کمبود وجود دارد. به دلیل اینکه در سامانه مخازن نمونه، رهاسازی آب برای تأمین هر سه نوع مصرف کشاورزی، شهری و صنعتی از دریچه‌های آبگیری ثابت، یکسان و مشابهی صورت می‌گیرد و به دلیل اینکه حجم تقاضای کشاورزی و شهری بیش‌تر از حجم تقاضای صنعتی در طول سال است، لذا ظرفیت دریچه‌های آبگیر بر اساس تقاضاهای کشاورزی و شهری تعیین شده و در نتیجه همان‌طور که در شکل ٦ مشاهده می‌شود، قابلیت تأمین تقاضای صنعتی در تمام مخازن در طول سال بسیار بیش‌تر از سایر تقاضاها و تقریباً ۱۰۰٪ است.

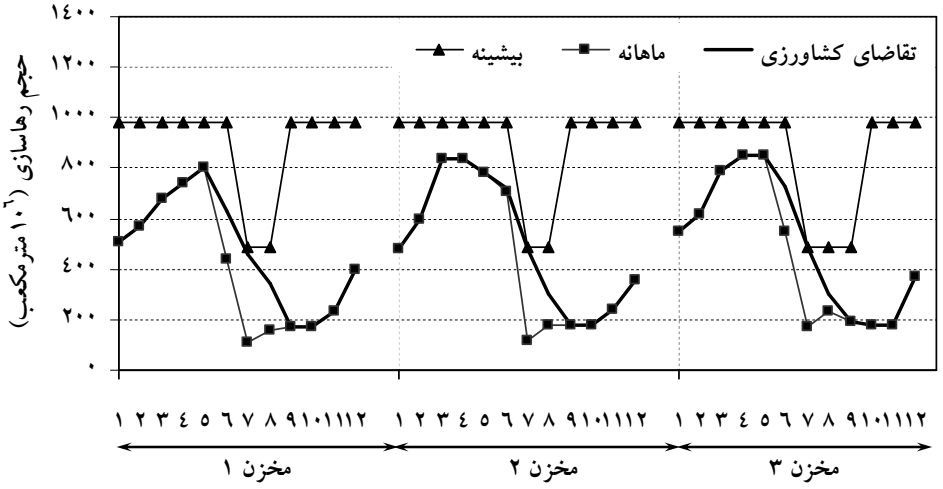


شکل ۲. تغییرات ماهانه حجم رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *SRSO* با هدف تولید انرژی برق‌آبی

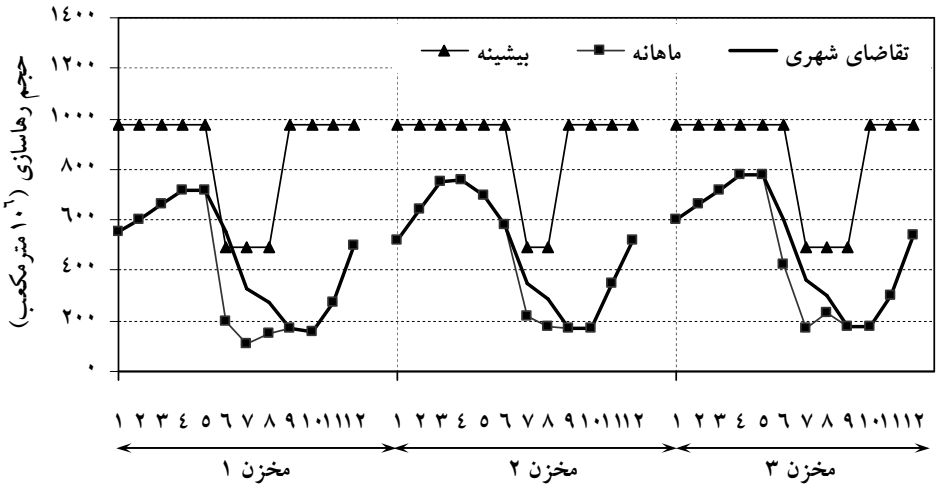
شکل ۳. تغییرات ماهانه توان تولیدی در نیروگاه‌های مختلف در حالت *SRSO* با هدف تولید انرژی برق‌آبی

$$\text{Maximize} \quad F_i = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{12} Def_i(t)}{\sum_{t=1}^{12} De_i(l,t)} \qquad i = ۱,۲,۳ \qquad l = ۱,۲,۳ \qquad (۳۳)$$

$$Def_i(t) = De_i(l,t) - \sum_{j=1}^{J'} Rw'_i(j,l,t) \qquad i = ۱,۲,۳ \quad l = ۱,۲,۳ \quad t = ۱,۲,\ldots,۱۲ \qquad (۳۴)$$



شکل ٤. تغییرات ماهانه حجم تقاضای کشاورزی و رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *SRSO* با هدف تأمین تقاضای کشاورزی



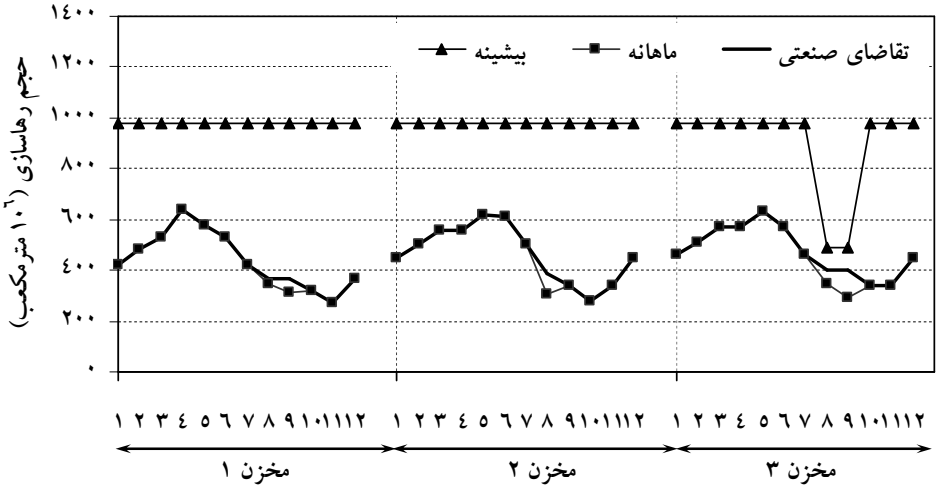
شکل ۵. تغییرات ماهانه حجم تقاضای شهری و رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *SRSO* با هدف تأمین تقاضای شهری

روند تغییرات رهاسازی در همه مخازن نیز در بازه مجاز کنترل شده است. تغییرات حجم ذخیره در همه مخازن سامانه نیز در بازه مجاز برای حجم ذخیره در هر مخزن (بازه بین حجم‌های ذخیره کمینه و بیشینه) قرار دارد. مقادیر تابع هدف برای هر مخزن به تفکیک انواع مصارف به صورت جدول ۹ به دست آمده‌اند که نشان می‌دهند در تمام مخازن دست‌کم تا ۸۷٪ اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضاهای گوناگون وجود دارد.

تفریحات و کنترل سیلاب

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای هر مخزن i به صورت بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری (کمینه‌سازی انحراف از حجم آستانه) تفریحات و کنترل سیلاب به شکل روابط (۳۵) و (۳۶) تعریف شده است. در این روابط، $Def_i(t)$ = بیانگر نرخ انحراف از حجم آستانه کنترل سیلاب در طول بازه زمانی t در مخزن iمی‌باشد. بر اساس رابطه (۳۶) تنها کم کردن حجم ذخیره در مخزن به منظور ذخیره حجم سیلاب احتمالی در هر بازه زمانی t مدّ نظر نمی‌باشد. بلکه حجم ذخیره در مخزن باید در مرز حجم آستانه کنترل شود تا ضمن کنترل حجم سیلاب احتمالی در هر بازه زمانی، رقوم مورد نیاز آب برای فعالیت‌های تفریحی نیز فراهم شود. در شکل ۷ تغییرات حجم رهاسازی آب از مخازن به منظور کنترل سیلاب و در شکل ۸ تغییرات حجم ذخیره مخازن نشان داده شده‌اند.

بر اساس شکل ۷ مشاهده می‌شود که در همه مخازن سامانه، تغییرات حجم رهاسازی مخزن در بازه مجاز قرار داشته و در فصل‌هایی که آورد رودخانه کاهش می‌یابد، روند تغییرات حجم رهاسازی نیز به صورت نزولی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، تغییرات حجم ذخیره در همه مخازن سامانه در بازه مجاز برای حجم ذخیره در هر مخزن (بازه بین حجم‌های ذخیره کمینه و بیشینه) قرار دارد. همچنین، این تغییرات تقریباً در هیچ بازه زمانی از حجم آستانه تفریحات و کنترل سیلاب تخطی نکرده است و منحنی‌های مربوط به حجم ذخیره ماهانه و آستانه بر هم منطبق شده‌اند.



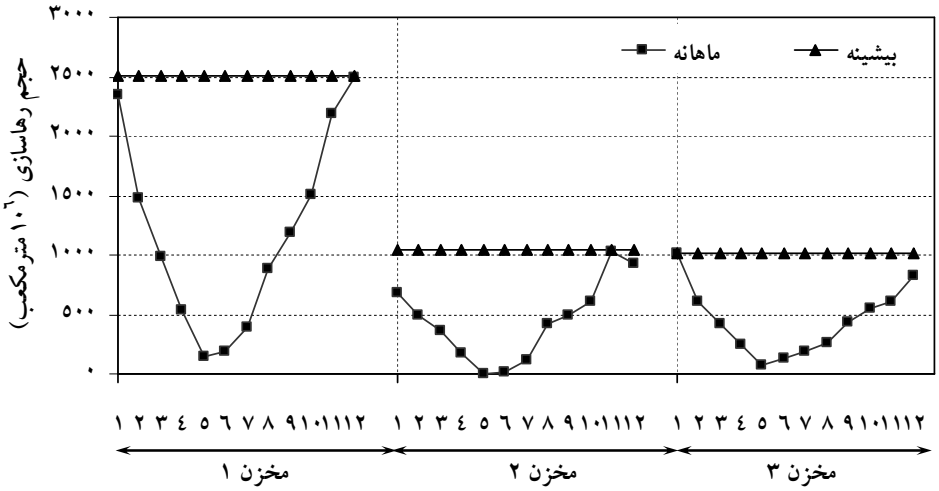
شکل ٦. تغییرات ماهانه حجم تقاضای صنعتی و رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *SRSO* با هدف تأمین تقاضای صنعتی

جدول ۹. مقادیر تابع هدف اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای مصارف گوناگون برای مخازن مختلف در حالت *SRSO*

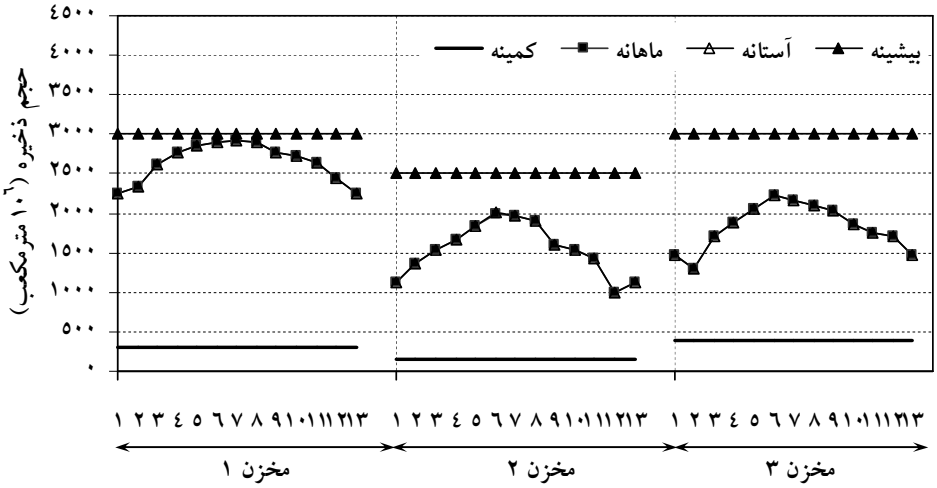
پارامتر	مخزن ۱	مخزن ۲	مخزن ۳
اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای کشاورزی (٪)	۸۷/٤	۹۱/۸	۹۰/٦
اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای شهری (٪)	۸۷/٥	۹٥/۸	۹۲/۷
اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای صنعتی (٪)	۹۸/٤	۹۸/٥	۹۷/۲

$$\text{Maximize} \quad F_i = 1 - \sum_{t=1}^{12} Def_i(t) \qquad i = 1,2,3 \qquad (35)$$

$$Def_i(t)=\begin{cases}\dfrac{S_i(t)-ST_i(t)}{S_i(t)} & S_i(t)\geq ST_i(t)\\ \dfrac{ST_i(t)-S_i(t)}{ST_i(t)} & S_i(t)<ST_i(t)\end{cases} \qquad \begin{matrix} i=۱,۲,۳ \\ t=۱,۲,\ \ldots\ ,۱۲\end{matrix} \qquad (۳۶)$$



شکل ۷. تغییرات ماهانه حجم رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *SRSO* با هدف تفریحات و کنترل سیلاب



شکل ۸. تغییرات ماهانه حجم ذخیره برای مخازن مختلف در حالت *SRSO* با هدف تفریحات و کنترل سیلاب

مقدار تابع هدف برای هر مخزن به صورت جدول ۱۰ به دست آمده است که نشان می‌دهد کنترل سیلاب، به گونه‌ای انجام شده است که برای تمام مخازن دست‌کم تا ۹۹٪ اطمینان‌پذیری در کنترل سیلاب وجود دارد.

تحلیل تک‌مخزنه- چندهدفه (*SRMO*)

در این حالت نیز مشابه حالت *SRSO*، هر مخزن به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرد ولی در تحلیل هر مخزن، تمام اهداف به صورت هم‌زمان مورد توجه و ارزیابی قرار می‌گیرند. لذا، به منظور ایجاد یک شرایط واقعی در ارزیابی عملکرد مخزن ۱ به صورت جداگانه، ابتدا مخازن ۲ و ۳ به صورت موازی تحلیل می‌شوند و پس از محاسبه آب بازگشتی از هر مخزن به ازای هر یک از اهداف و جریان‌های سرریز، جریان ورودی به مخزن ۱ برابر با مجموع آورد طبیعی انشعابی از رودخانه که مخزن

۱ روی آن احداث شده است (میان‌حوضه) و جریانات ورودی به این مخزن از مخازن بالادست در نظر گرفته می‌شود. توابع هدف مختلف در این حالت، به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$\text{Maximize} \quad F_{Power} = \frac{\sum_{t=1}^{12} PT_i(t)}{12 \times PPC_i} \qquad i = ۱,۲,۳ \qquad (۳۷)$$

$$\text{Maximize} \quad F_{Demand} = \frac{1}{3}\sum_{l=1}^{3}\sum_{t=1}^{12}\frac{\sum_{j=1}^{J'} Rw_i'(j,l,t)}{De_i(l,t)} \qquad i = ۱,۲,۳ \qquad (۳۸)$$

$$\text{Minimize} \quad F_{Flood} = \frac{\sum_{t=1}^{12}\left|S_i(t) - ST_i(t)\right|}{\sum_{t=1}^{12} ST_i(t)} \qquad i = ۱,۲,۳ \qquad (۳۹)$$

جدول ۱۰. مقادیر تابع هدف اطمینان‌پذیری تفریحات و کنترل سیلاب برای مخازن مختلف در حالت *SRSO*

پارامتر	مخزن ۱	مخزن ۲	مخزن ۳
اطمینان‌پذیری تفریحات و کنترل سیلاب (٪)	۱۰۰/۰	۹۸/۹	۱۰۰/۰

در این روابط، F_{Power}، F_{Demand} و F_{Flood} = به ترتیب تابع هدف بهینه‌سازی برق‌آبی (بیشینه‌سازی)، تأمین نیاز مصارف مختلف (بیشینه‌سازی) و تفریحات و کنترل سیلاب (کمینه‌سازی) می‌باشند. فرمول‌بندی هر یک از تابع هدف‌ها با هدف بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری انجام شده است. به طور کلی، بهینه‌سازی به صورت سه‌هدفه [روابط (۳۹)-(۳۷)] و با سه نوع متغیر تصمیم، رهاسازی برق‌آبی، رهاسازی تأمین نیاز پایین‌دست و حجم ذخیره اول دوره بهره‌برداری برای هر مخزن انجام شده است. مدل شبیه‌سازی نیز بر اساس سیاست *SOP* استوار بوده و پنج رهاسازی جهت تولید انرژی برق‌آبی، تأمین نیازهای کشاورزی، شرب، صنعت و تفریحات و کنترل سیلاب به گونه‌ای تعیین شده‌اند که از مقدار هر نوع تقاضا تجاوز نکنند. با توجه به چندهدفه بودن مسئله، برای تخصیص حجم ذخیره شده در هر مخزن در بازه‌های زمانی مختلف به اهداف گوناگون، اولویت‌بندی تأمین اهداف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین در این قسمت، اولویت‌بندی اهداف کلی به ترتیب به صورت تأمین هدف برق‌آبی، تأمین نیازهای پایین‌دست و تفریحات و کنترل سیلاب لحاظ شده است. در مورد هدف تأمین نیازهای پایین‌دست، اولویت اول مربوط به تأمین تقاضای شهری، اولویت دوم مربوط به تأمین تقاضای کشاورزی و اولویت سوم مربوط به تأمین تقاضای صنعتی است. بر اساس اولویت‌بندی‌های انجام شده، در هر مخزن به ازای هر بازه زمانی ابتدا مقدار رهاسازی برق‌آبی تخصیص داده می‌شود. حجم این رهاسازی بر اساس ظرفیت نصب هر نیروگاه کنترل شده و از آنجا که آب خروجی از نیروگاه‌های برق‌آبی در مقایسه با آب ورودی به آنها از نظر کمیت و کیفیت دچار تغییر نمی‌شود، لذا می‌توان از آب خروجی از نیروگاه‌ها برای تأمین نیازهای پایین‌دست، با در نظر گرفتن اولویت تأمین هر نیاز، استفاده کرد. در صورتی که تأمین نیازهای پایین‌دست پس از تخصیص آب خروجی از نیروگاه به آنها، همچنان با کمبود مواجه باشد، می‌توان این کمبود را از طریق تخصیص آب از ذخیره موجود در مخزن پس از تخصیص نیاز برق‌آبی تأمین کرد. به این ترتیب رهاسازی‌ها بر اساس میزان نیازهای موجود در پایین‌دست (سیاست *SOP*) تعیین می‌شوند. در نهایت نیز با توجه به حجم ذخیره باقی‌مانده در مخزن و حجم آستانه تفریحات و کنترل سیلاب، می‌توان رهاسازی مربوط به این بخش را نیز تعیین کرد.

با توجه به اینکه مسئله به صورت چندهدفه می‌باشد، از ابزار *NSGA-II* برای حل مسئله مربوط به هر مخزن به ازای ۵'۰۰۰ تکرار (نسل[1])، ۳۵۰ عضو و ۲۵ متغیر تصمیم استفاده شده است و در نهایت، مجموعه‌ای از بهترین جواب‌های نامغلوب حاصل از بین اجراهای مختلف مدل به عنوان پرتوی نهایی مسئله در هر مخزن مدّ نظر قرار گرفته است. هر جواب نامغلوب حاوی یک سری ماهانه از مقادیر متغیرهای مورد بررسی (انواع رهاسازی‌ها، توان تولیدی نیروگاه‌ها، حجم‌های ذخیره در مخزن و غیره) در بهره‌برداری و مدیریت یک‌ساله هر مخزن است. در نتیجه برای هر متغیر به تعداد جواب‌های نامغلوب، سری ماهانه وجود خواهد داشت و از آنجا که ارائه تمام این اطلاعات ممکن نیست، بنابراین در مورد هر متغیر در هر بازه زمانی بیش‌ترین، میانگین و کم‌ترین مقدار به دست آمده از بین سری‌های ماهانه مجموعه جواب نامغلوب استخراج شده است. در شکل‌های ۹ تا ۱۱ به ترتیب نتایج حاصل از تحلیل مخازن ۱، ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

بر اساس شکل‌های ۹ تا ۱۱، با استفاده از مدل *NSGA-II* تمام اهداف در تمام مخازن در یک حد مطلوبی تأمین شده‌اند و مجموعه نقاط پرتو برای هر مخزن در فضای هدف دارای پراکندگی مناسبی هستند. اگر حالت میانگین مقادیر در هر بازه زمانی در نظر گرفته شود، با توجه به اولویت‌بندی تأمین تقاضاهای مختلف در پایین‌دست، مشاهده می‌شود که تقاضای شهری در ماه‌هایی که آورد طبیعی رودخانه کاهش یافته است (انتهای فصل بهار و فصل تابستان)، در بهترین شرایط تقریباً به اندازه ۵۰٪ تأمین شده و هیچ آبی به تقاضاهای کشاورزی و صنعتی اختصاص داده نشده است. اما در انتهای فصل پاییز و فصل زمستان به دلیل وجود آب کافی در سامانه مخازن، تقاضای شهری و کشاورزی به طور ۱۰۰٪ و تقاضای صنعتی نیز دست‌کم تا ۵۰٪ تأمین شده است. به منظور تأمین هدف تفریحات و کنترل سیلاب نیز در طول دوره بهره‌برداری تمام آب در مخزن ذخیره شده و رهاسازی به منظور تنظیم ذخیره مخزن با هدف تفریحات و کنترل سیلاب صورت نگرفته است. تغییرات مقادیر میانگین حجم ذخیره نشان می‌دهد که در بازه‌هایی که آورد طبیعی رودخانه در حال افزایش است (انتهای فصل پاییز تا اوایل فصل بهار) حجم ذخیره مخزن به منظور تأمین اهداف برق‌آبی و تأمین تقاضاهای پایین‌دست با توجه به اولویت هر یک از آنها، کاهش یافته است. چون هدف تفریحات و کنترل سیلاب در اولویت آخر قرار دارد لذا، درصد تأمین این هدف نیز کاهش یافته است. این در حالی است که تمام آب موجود پس از تخصیص به اهداف دیگر در مخزن ذخیره شده است و رهاسازی به این منظور صورت نگرفته است. در حالی که اهداف دیگر در حد مطلوبی (در برخی موارد به طور ۱۰۰٪) تأمین شده‌اند. در بازه‌های زمانی که آورد طبیعی رودخانه کاهش می‌یابد (فصل تابستان و اوایل فصل پاییز) درصد تأمین اهداف مختلف به دلیل کمبود آب در دسترس جهت تخصیص به آنها کاهش می‌یابد. همچنین، تغییرات حجم ذخیره در همه مخازن سامانه در بازه مجاز برای حجم ذخیره در هر مخزن (بازه بین حجم‌های ذخیره کمینه و بیشینه) قرار دارد.

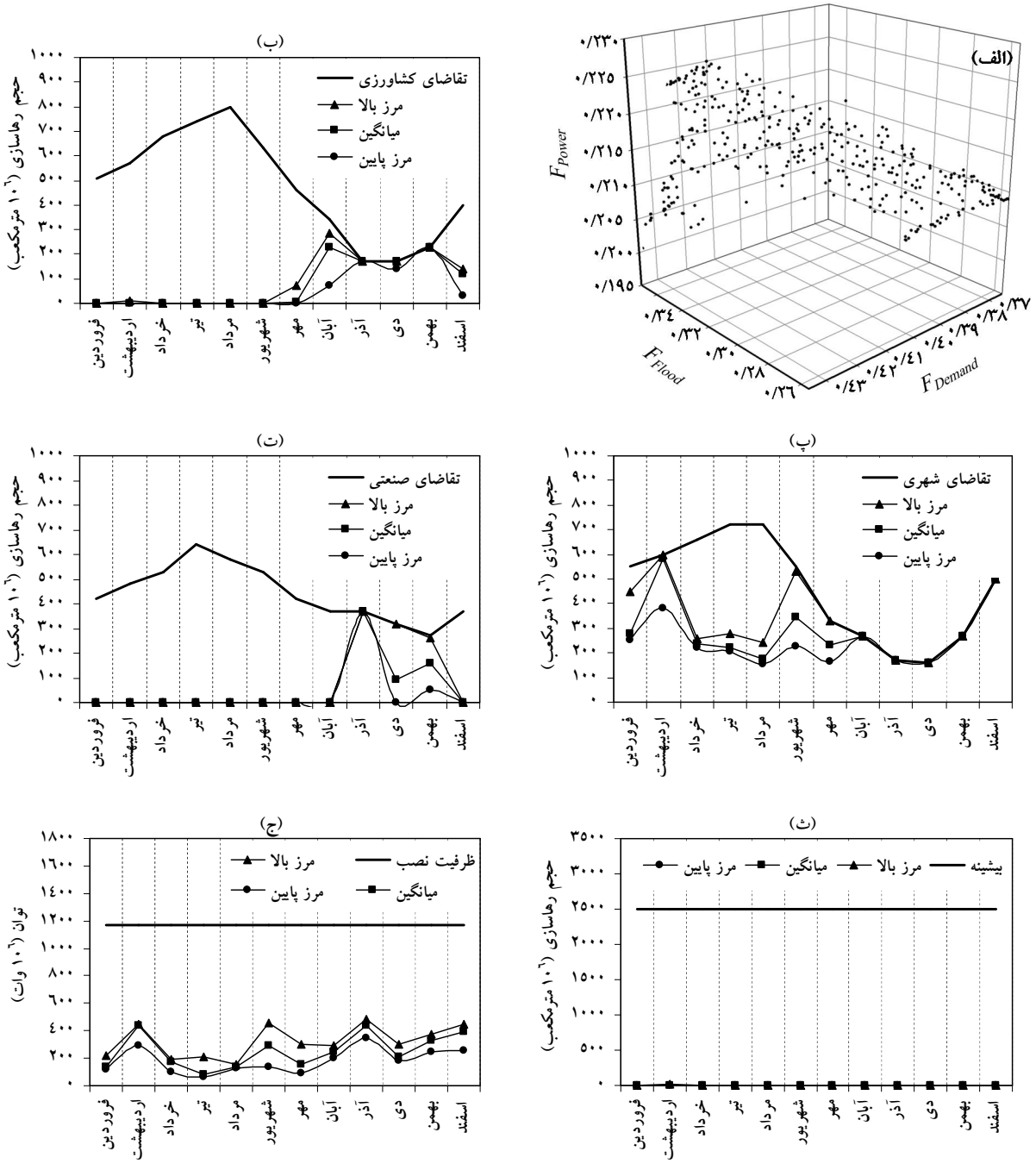
با وجود اینکه تأمین هدف برق‌آبی به عنوان اولویت اول بهره‌برداری بوده است ولی درصد تأمین آن در مخازن مختلف چندان مطلوب نیست. لازم به ذکر است که آب تخصیص داده شده به هر نیروگاه، پس از تولید انرژی برق به منظور تأمین تقاضای پایین‌دست مورد استفاده قرار می‌گیرد و کمبودهای این تأمین نیز مجدداً از ذخیره مخزن قابل جبران است. اما کمبودهای تأمین هدف برق‌آبی از طریق اجزای دیگر موجود در سامانه میسر نبوده و لذا حجم رهاسازی برای اهداف مختلف در مدل بهینه‌سازی به گونه‌ای تعیین شده‌اند که یک توازن منطقی بین تأمین تمام اهداف در مخازن مختلف سامانه برقرار شود. به همین دلیل درصد پایینی از هدف برق‌آبی تأمین شده

[1] Generation

است. بیش‌ترین کمبود در توان تولیدی در مخزن ۱ و به مقدار تقریبی ۱۱۰٤/۰ مگاوات اتفاق افتاده است.

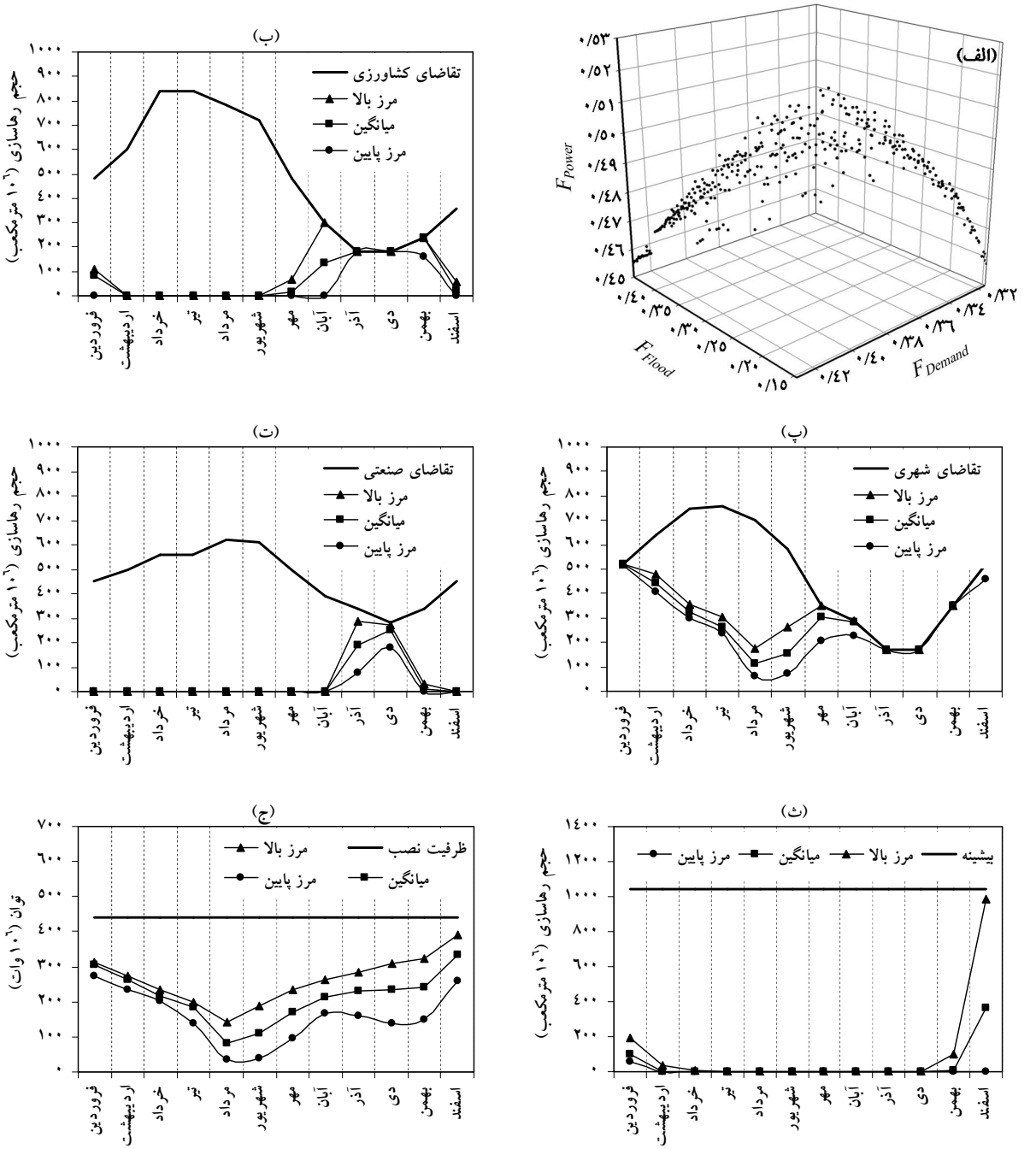
در این حالت، مخازن این سامانه به صورت یک‌پارچه و به ازای در نظر گرفتن هر یک از اهداف به صورت جداگانه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

تحلیل چندمخزنه- تک‌هدفه (*MRSO*)

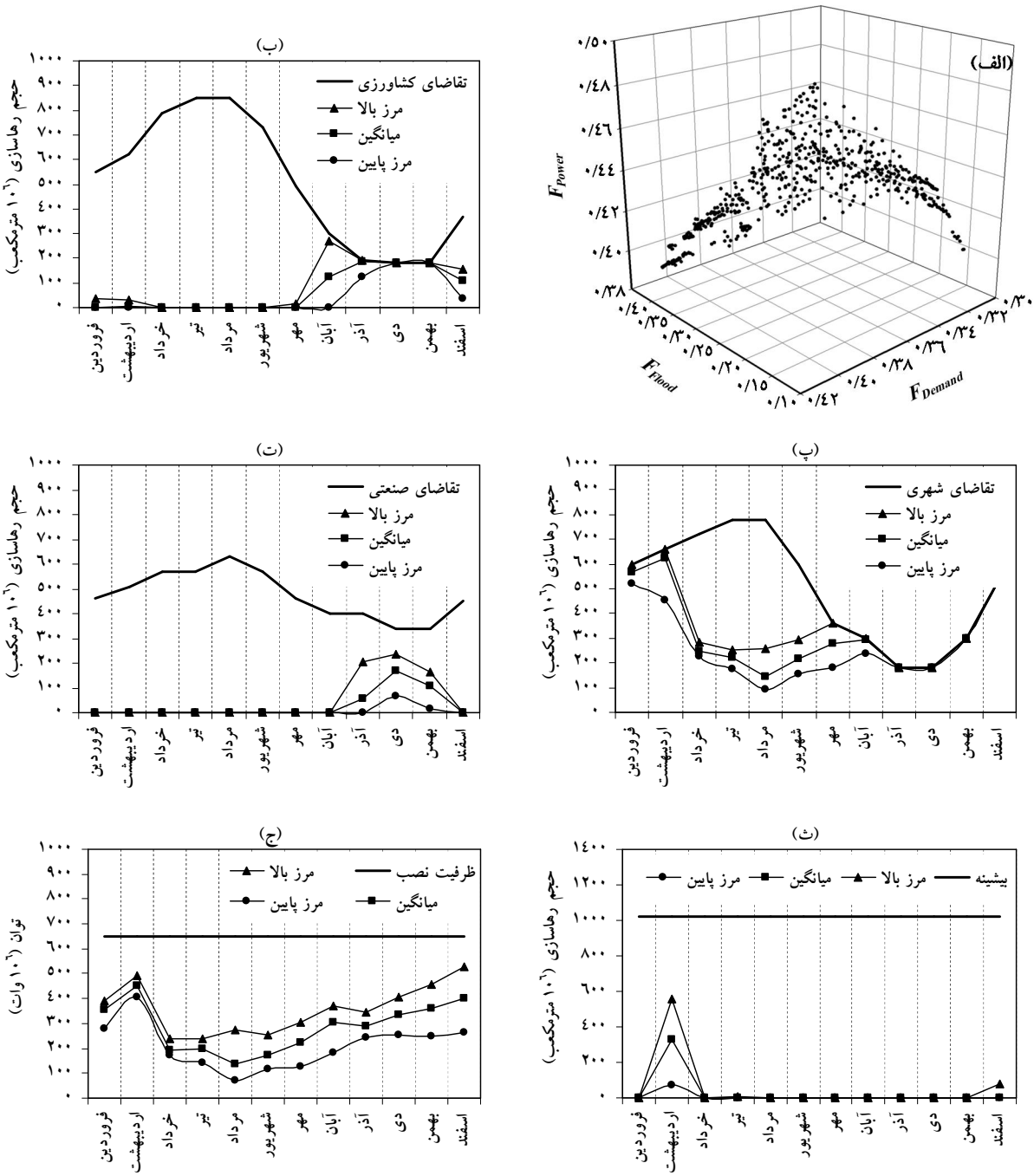


شکل ۹. نتایج تحلیل برای مخزن ۱ در حالت *SRMO*: (الف) مجموعه نقاط پرتو برای تابع هدف‌های مورد بررسی، (ب) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی کشاورزی، (پ) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی شهری، (ت) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی صنعتی، (ث) محدوده تغییرات ماهانه حجم رهاسازی تفریحات و کنترل سیلاب و (ج) محدوده تغییرات ماهانه توان تولیدی

برای این منظور، ارتباط دو مخزن ۲ و ۳ با یکدیگر به صورت موازی در نظر گرفته شده و لذا به صورت مستقل از یکدیگر تحلیل می‌شوند. در نهایت مجموعه دو مخزن ۲ و ۳ با مخزن ۱ به صورت متوالی در نظر گرفته شده و کل سامانه به صورت یک‌پارچه تحلیل می‌شود.



شکل ۱۰. نتایج تحلیل برای مخزن ۲ در حالت *SRMO*: (الف) مجموعه نقاط پرتو برای تابع هدف‌های مورد بررسی، (ب) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی کشاورزی، (پ) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی شهری، (ت) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی صنعتی، (ث) محدوده تغییرات ماهانه حجم رهاسازی تفریحات و کنترل سیلاب و (ج) محدوده تغییرات ماهانه توان تولیدی



شکل ۱۱. نتایج تحلیل برای مخزن ۳ در حالت *SRMO*: (الف) مجموعه نقاط پرتو برای تابع هدف‌های مورد بررسی، (ب) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی کشاورزی، (پ) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی شهری، (ت) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی صنعتی، (ث) محدوده تغییرات ماهانه حجم رهاسازی تفریحات و کنترل سیلاب و (ج) محدوده تغییرات ماهانه توان تولیدی

به عبارت دیگر، در این حالت، خروجی‌های مخازن بالادست به تناسب نوع هر یک از آنها، به عنوان ورودی مخزن پایین‌دست (مخزن ۱) در نظر گرفته می‌شوند. مدل شبیه‌سازی سامانه سه‌مخزنه برای تأمین تقاضای مصارف مختلف توسط مخازن ۲ و ۳ نه بر اساس سیاست *SOP* بلکه با در نظر گرفتن بیشینه مقدار رهاسازی از هر مخزن (بر اساس رقوم آب ذخیره شده و رقوم دریچه‌های آبگیر) به عنوان مرز بالای رهاسازی برای هر هدف تهیه می‌شود. این در حالی است که در مدل شبیه‌سازی سامانه سه‌مخزنه برای تولید انرژی برق‌آبی و تفریحات و کنترل سیلاب

سیاست *SOP* به منظور بهره‌برداری از این دو مخزن در نظر گرفته می‌شود.زیرا در حالت *MRSO*، مدیریت بهره‌برداری و تغییرات رهاسازی‌های مربوط به مخازن ۲ و ۳ به طور مستقیم بر نحوه مدیریت مخزن ۱ اثر دارند و در صورتی که برای تأمین تقاضای مصارف مختلف بر اساس سیاست *SOP* عمل شود و مقدار تقاضای هر مصرف در این مخازن به عنوان مرز بالای قابل قبول رهاسازی در نظر گرفته شود، شرایط و نتایج دقیقاً مشابه با حالت *SRSO* در هر هدف تأمین تقاضا خواهد بود. در این صورت مفهوم مدیریت یک‌پارچه سامانه مخازن نیز در کار لحاظ نمی‌شود. در مورد تولید انرژی برق‌آبی چون میزان تقاضای حجمی هر نیروگاه بر اساس اختلاف ارتفاع آب موجود بین بالادست و پایین‌دست هر مخزن پس از رهاسازی آب و معادل با *PPC* محاسبه می‌شود، در صورتی که رهاسازی از مخازن ۲ و ۳ به منظور بهبود مدیریت بهره‌برداری از مخزن ۱ افزایش یابد، حجم آب ذخیره شده در این مخازن کاهش یافته و اختلاف ارتفاع حاصل کم می‌شود. این حالت منجر به افزایش بسیار زیاد میزان تقاضای حجمی هر نیروگاه معادل با *PPC* آن شده و در نتیجه میزان تقاضا از ظرفیت دریچه‌های آبگیر بیش‌تر می‌شود. در این حالت، کمبودهای ایجاد شده در مخازن ۲ و ۳ ناشی از نقص طراحی خواهند بود و نحوه مدیریت بهره‌برداری تأثیری بر بهبود وضعیت تولید انرژی برق‌آبی در این دو مخزن نخواهد داشت. بنابراین، در بهره‌برداری به منظور تولید انرژی برق‌آبی، لازم است که از سیاست *SOP* استفاده شود. در مورد تفریحات و کنترل سیلاب نیز عملکرد مدیریت بهره‌برداری در داخل هر مخزن و نه در پایین‌دست آن نمود پیدا می‌کند. بنابراین رهاسازی بیش‌تر از مخازن ۲ و ۳ نمی‌تواند وضعیت مخزن ۱ را بهبود بخشد. پس در این حالت نیز سیاست *SOP* برای بهره‌برداری در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن ۱ در مورد تمام اهداف از سیاست *SOP* استفاده می‌شود تا رهاسازی بیش از حد از مخازن بالادست سامانه صورت نگیرد. ولی فرض عدم ایجاد ذخیره بین دوره‌ای در مدل شبیه‌سازی تمام مخازن سامانه سه‌مخزنه در نظر گرفته می‌شود تا الگوی بهره‌برداری نهایی حالت پایدار داشته باشد. در بررسی بهره‌برداری با هر هدف، ۳۹ متغیر تصمیم شامل حجم‌های رهاسازی در هر بازه زمانی و حجم ذخیره در ابتدای دوره بهره‌برداری برای تمام مخازن لحاظ شده‌اند.

تولید انرژی برق‌آبی

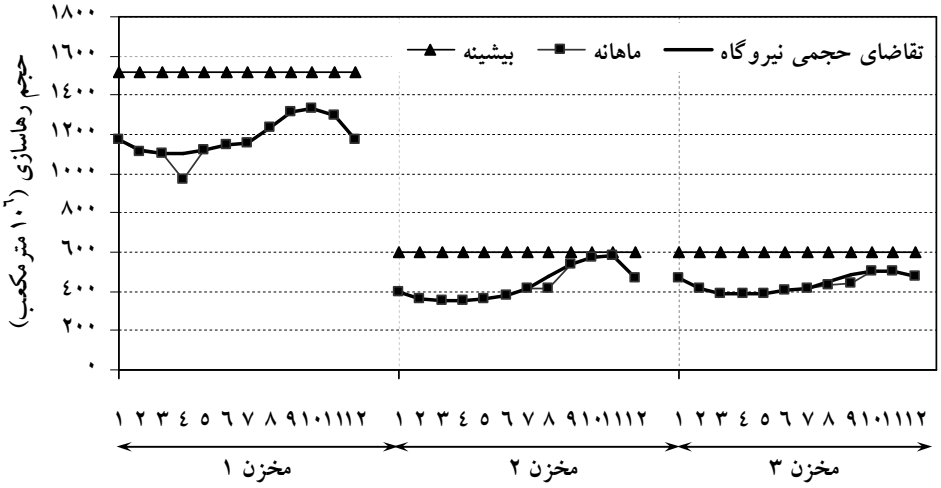
تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای سامانه مخازن به صورت بیشینه‌سازی نسبی توان تولیدی (بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری) به شکل زیر تعریف شده است:

$$\text{Maximize} \qquad F = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\frac{\sum_{t=1}^{12} PT_i(t)}{12 \times PPC_i} \qquad (۴۰)$$

با توجه به اینکه برق تولید شده از سه نیروگاه سامانه وارد شبکه برق سراسری می‌شود، لذا عملکرد هر نیروگاه به صورت مستقل و مستقیم بر عملکرد کل سامانه مؤثر است. بنابراین در رابطه (۴۰) بیشینه‌سازی میانگین اطمینان‌پذیری در نیروگاه‌های مختلف مدّ نظر قرار گرفته است. در شکل ۱۲ تغییرات حجم رهاسازی آب از سامانه مخازن برای تولید انرژی برق‌آبی و در شکل ۱۳ تغییرات توان تولیدی در هر نیروگاه نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در مخزن ۱ کمبود در فصل تابستان و در مخازن ۲ و ۳ کمبودها در فصل پاییز ایجاد شده‌اند و در سایر بازه‌های زمانی سال، کمبودی مشاهده نمی‌شود. این نمودارها نشان می‌دهند که کمبودها در بازه‌های زمانی‌ای رخ داده‌اند که حجم آب ذخیره شده در هر مخزن کم‌تر از آب مورد نیاز برای تولید انرژی برق‌آبی بوده است و لذا مخازن توانایی رهاسازی آب را به منظور تولید انرژی برق‌آبی ندارد. در

مقایسه با حالت *SRSO*، مشاهده می‌شود که در این حالت در هر مخزن تنها در یک بازه زمانی کمبود رخ داده است در حالی که در حالت *SRSO*، کمبود ایجاد شده در مخزن ۲ در چند ماه متوالی صورت گرفته است و این نشان می‌دهد که در تحلیل چندمخزنه می‌توان تعداد بازه‌های کمبود در سامانه مخازن را کاهش داد ولی شدت کمبود در مخازن موازی افزایش و در مخازن متوالی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲. تغییرات ماهانه حجم رهاسازی از مخارن مختلف در حالت *MRSO* با هدف تولید انرژی برق‌آبی

شکل ۱۳. تغییرات ماهانه توان تولیدی در نیروگاه‌های مختلف در حالت *MRSO* با هدف تولید انرژی برق‌آبی

زیرا مخازن متوالی می‌توانند به صورت یک‌پارچه با در نظر گرفتن اثر مستقیم آنها بر یکدیگر مدیریت شوند. همچنین، تغییرات حجم ذخیره در همه مخازن سامانه در بازه مجاز برای حجم ذخیره در هر مخزن (بازه بین حجم‌های ذخیره کمینه و بیشینه) قرار دارد. بر اساس شکل ۱۳، مشابه با حالت *SRSO*همچنان بیش‌ترین کمبود در توان تولیدی در مخزن ۱ و به مقدار تقریبی ۱۳۹/۰ مگاوات اتفاق افتاده است. مقدار تابع هدف برای سامانه مخازن نیز برابر با ۹۸/۹٪ به دست آمده است.

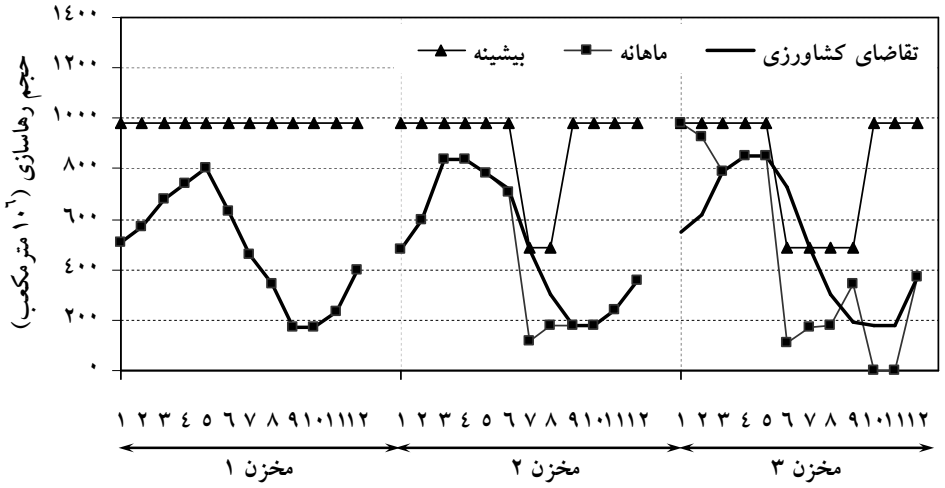
تأمین تقاضای مصارف مختلف

تابع هدف مسئله بهینه‌سازی برای سامانه مخازن به صورت بیشینه‌سازی تأمین نسبی تقاضای مصارف به شکل روابط (۴۱) و (۴۲) تعریف شده است.

در این روابط، $R_i(l,t)$ = کم‌ترین مقدار در مقایسه بین حجم رهاسازی از مخزن i و حجم تقاضای مصرف l در بازه زمانی t است. در این قسمت عملکرد مخازن ۲ و ۳ به صورت مستقل و مستقیم بر عملکرد کل سامانه اثر دارد ولی تأثیر عملکرد مخزن ۱ به صورت غیرمستقیم بوده و متأثر از نحوه عملکرد مخازن ۲ و ۳ است. بنابراین حاصل‌ضرب اطمینان‌پذیری مخزن ۱ در میانگین اطمینان‌پذیری مخازن ۲ و ۳ به عنوان تابع هدف تعریف شده است. با توجه به عدم لحاظ کردن سیاست *SOP* در بهره‌برداری از مخازن ۲ و ۳، امکان بیش‌تر بودن رهاسازی نسبت به تقاضای پایین‌دست در برخی بازه‌های زمانی در این مخازن وجود دارد. به همین دلیل برای محاسبه تابع هدف از رابطه (۴۲) نیز استفاده شده است. بر اساس رابطه (۴۱) می‌توان نتیجه گرفت که بهینه شدن تابع هدف کلی سامانه به طور قابل ملاحظه‌ای به بیشینه شدن اطمینان‌پذیری تأمین تقاضاها در مخزن ۱ وابسته است و تأمین اطمینان‌پذیری مطلوب در مخزن ۱ نیز به طور مستقیم بر نحوه عملکرد مخازن ۲ و ۳ در بالادست و به تبع آن میزان اطمینان‌پذیری تأمین در این مخازن اثر دارد.در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ تغییرات حجم رهاسازی آب از مخازن به ترتیب برای تأمین تقاضاهای کشاورزی، شهری و صنعتی نشان داده شده‌اند.

$$\text{Maximize} \qquad F_l = \left.\frac{\sum_{t=1}^{12} R_i(l,t)}{\sum_{t=1}^{12} De_i(l,t)}\right|_{i=1} \times \left(\frac{1}{2}\sum_{i=2}^{3}\frac{\sum_{t=1}^{12} R_i(l,t)}{\sum_{t=1}^{12} De_i(l,t)}\right) \qquad l = ۱,۲,۳ \qquad (۴۱)$$

$$R_i(l,t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{J'} Rw_i'(j,l,t) & \sum_{j=1}^{J'} Rw_i'(j,l,t) < De_i(l,t) \\ De_i(l,t) & \sum_{j=1}^{J'} Rw_i'(j,l,t) \geq De_i(l,t) \end{cases} \qquad \begin{matrix} i = ۱,۲,۳ \\ l = ۱,۲,۳ \\ t = ۱,۲,\ldots,۱۲ \end{matrix} \qquad (۴۲)$$



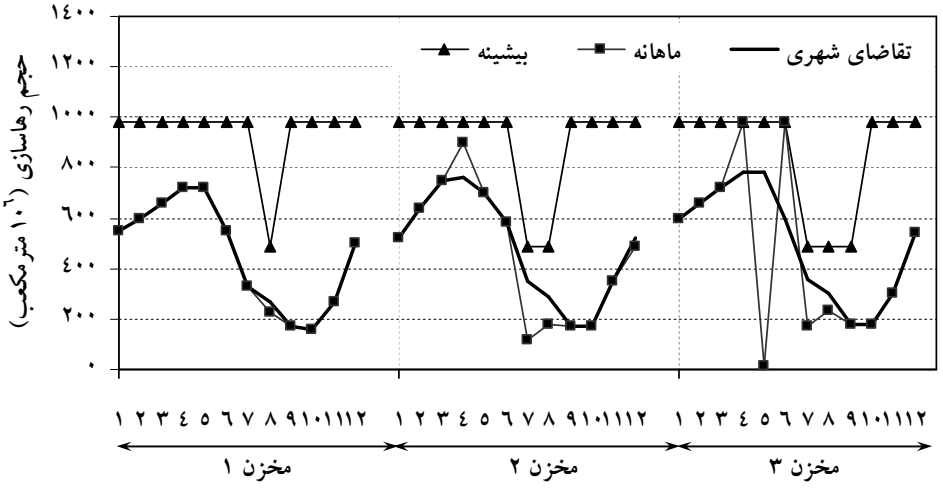
شکل ۱۴. تغییرات ماهانه حجم تقاضای کشاورزی و رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *MRSO* با هدف تأمین تقاضای کشاورزی

بر اساس شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ تقریباً تمام تقاضاها در طول دوره بهره‌برداری در مخزن ۱ به طور کامل تأمین شده است که دلیل این امر، وجود مخازن ۲ و ۳ در بالادست مخزن ۱ و امکان رهاسازی مقادیری بیش‌تر از مقادیر تقاضا در مخازن بالادست می‌باشد. این حالت سبب شده است که علاوه بر تأمین ۱۰۰٪ تقاضاها در پایین‌دست مخزن ۱، تنها در یک ماه از دوره بهره‌برداری (آذر ماه) حجم ذخیره فعال مخزن ۱ به صفر برسد و در

سایر مواقع آب کافی در مخزن ذخیره شود. عمده کمبودها در مخازن ۲ و ۳ در فصل تابستان یا اوایل فصل پاییز صورت گرفته که به دلیل کاهش حجم آورد طبیعی رودخانه در این بازه‌های زمانی است. در نتیجه در این بازه‌های زمانی با وجود اینکه تقریباً تمام آب ذخیره شده در مخازن به منظور تأمین تقاضاهای مختلف رها شده است، همچنان کمبود وجود دارد. در این مخازن در بازه‌های زمانی که آب کافی وجود داشته است، میزان رهاسازی بیش‌تر از مقدار تقاضای پایین‌دست بوده تا در تأمین تقاضاهای مصارف مختلف به مخزن ۱ کمک شود. ولی در بازه‌های زمانی که آب کافی در دسترس نبوده، به طور عمده مخزن ۳ دچار کمبود شده است.

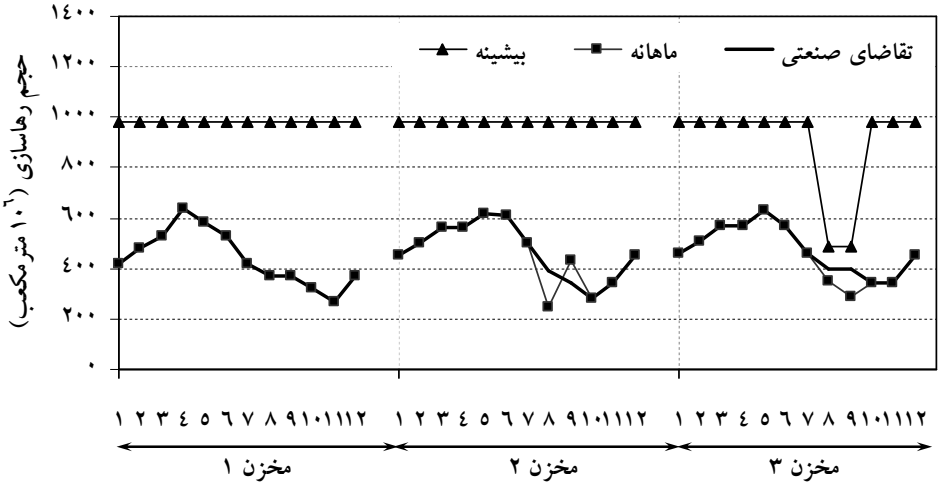
در شکل ١٤ در ماه‌های دی و بهمن، چون آورد طبیعی رودخانه برای مخزن ۳ کم‌تر از مخزن ۲ بوده و مخزن ۲ تمام آب موجود خود را صرف تأمین تقاضای کشاورزی مربوط به خود کرده است، لذا مخزن ۳ تمام آب موجود خود را به مخزن ۱ منتقل کرده و تقاضای کشاورزی مربوط به مخزن ۳ در این ماه‌ها تأمین نشده است. لازم به یادآوری است که مقدار تابع هدف در مخزن ۱ نسبت به مخزن ۳ اثر بیش‌تری در بهینه شدن وضعیت کل سامانه دارد. در سایر بازه‌های زمانی (فصل‌های بهار و زمستان) تمام تقاضاها در همه مخازن به طور کامل تأمین شده است.

به دلیل اینکه در سامانه مخازن نمونه، رهاسازی آب برای تأمین هر سه نوع مصرف کشاورزی، شهری و صنعتی از دریچه‌های آبگیری یکسان و مشابهی صورت می‌گیرد و به دلیل اینکه حجم تقاضای کشاورزی و شهری بیش‌تر از حجم تقاضای صنعتی در طول سال است، لذا ظرفیت دریچه‌های آبگیر بر اساس تقاضاهای کشاورزی و شهری تعیین شده و در نتیجه همان‌طور که در شکل ١٦ مشاهده می‌شود، قابلیت تأمین تقاضای صنعتی در تمام مخازن در طول سال نسبت به تقاضای کشاورزی و شهری بیش‌تر بوده و کمبودهای تأمین تقاضای صنعتی در مخازن مختلف بسیار کم‌تر از تقاضاهای کشاورزی و شهری است. در تأمین هر سه نوع مصرف کشاورزی، شهری و صنعتی، حجم و تعداد بازه‌های کمبود در مقایسه با حالت *SRSO* در مخازن موازی (مخازن ۲ و ۳) افزایش یافته و در مخزن ۱ که به صورت متوالی با مخازن بالادست ارتباط دارد، کاهش قابل توجهی داشته است. این امر اهمیت مدیریت یک‌پارچه سامانه مخازن موازی و متوالی را در بهره‌برداری از آنها نشان می‌دهد.



شکل ۱۵. تغییرات ماهانه حجم تقاضای شهری و رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *MRSO* با هدف تأمین تقاضای شهری

در این حالت نیز تغییرات حجم ذخیره در همه مخازن سامانه در بازه مجاز برای حجم ذخیره در هر مخزن (بازه بین حجم‌های ذخیره کمینه و بیشینه) قرار دارد. مقادیر تابع هدف برای سامانه سه‌مخزنه به تفکیک انواع مصارف به صورت جدول ۱۱ به دست آمده‌اند.



شکل ۱۶. تغییرات ماهانه حجم تقاضای صنعتی و رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *MRSO* با هدف تأمین تقاضای صنعتی

جدول ۱۱. مقادیر تابع هدف اطمینان‌پذیری تأمین تقاضای مصارف گوناگون برای سامانه سه‌مخزنه در حالت *MRSO*

پارامتر	تأمین تقاضای کشاورزی	تأمین تقاضای شهری	تأمین تقاضای صنعتی
اطمینان‌پذیری (٪)	۸۴/۲	۸۷/۵	۹۷/۳

درصد تأمین تقاضای کشاورزی در کل سامانه در مقایسه با حالت *SRSO* کاهش یافته است که دلیل آن بیش‌تر بودن مجموع سالانه تقاضای کشاورزی در مخزن ۳ و کمبودهای بیش‌تر در این مخزن نسبت به مخازن ۱ و ۲ می‌باشد. درصد تأمین تقاضای شهری و صنعتی در کل سامانه در مقایسه با حالت *SRSO* تغییر چندانی نداشته است و این امر بیان‌گر وجود تعادل منطقی بین مقادیر تقاضا و ظرفیت‌های مخازن در کل سامانه است. به طور کلی در سامانه نمونه سه‌مخزنه دست‌کم تا ۸۴٪ اطمینان‌پذیری در تأمین تقاضاهای گوناگون وجود دارد.

تفریحات و کنترل سیلاب

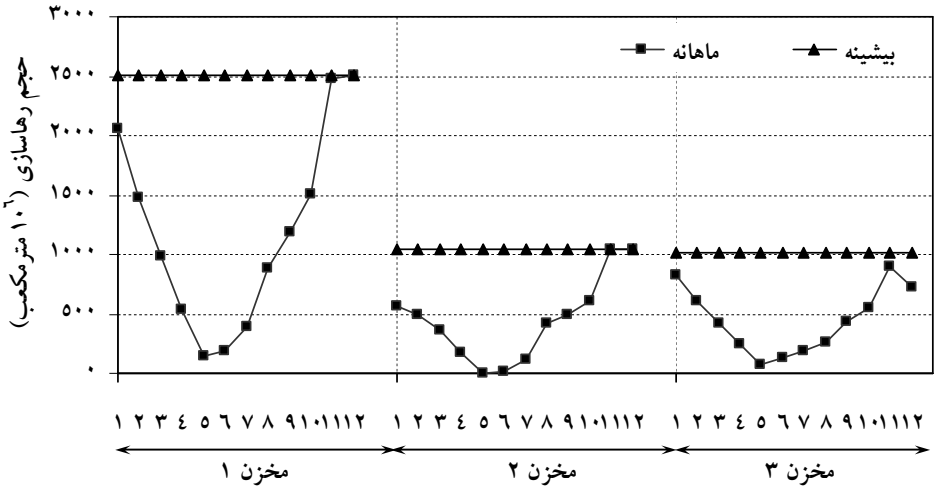
تابع هدف مسئله بهینه‌سازی به صورت بیشینه‌سازی نسبت مجموع حجم‌ها به مجموع حجم‌های آستانه (بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری) تفریحات و کنترل سیلاب به شکل زیر تعریف شده است:

$$\text{Maximize} \qquad F=\left.\frac{\sum_{t=1}^{12}S_i(t)}{\sum_{t=1}^{12}ST_i(t)}\right|_{i=1}\times\left(\frac{1}{2}\sum_{i=2}^{3}\frac{\sum_{t=1}^{12}S_i(t)}{\sum_{t=1}^{12}ST_i(t)}\right) \qquad (۴۳)$$

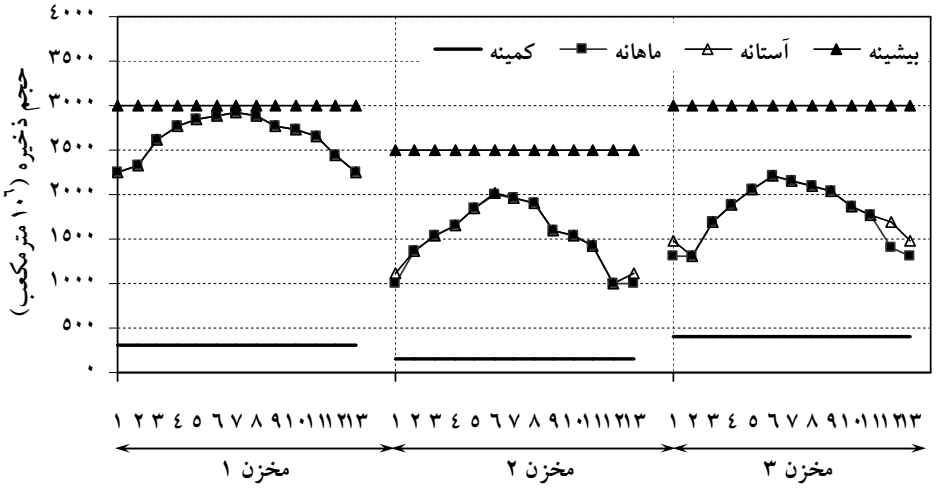
در این قسمت نیز عملکرد مخازن ۲ و ۳ به صورت مستقل و مستقیم بر عملکرد کل سامانه اثر دارد ولی تأثیر عملکرد مخزن ۱ به صورت غیرمستقیم است. بنابراین حاصل‌ضرب اطمینان‌پذیری مخزن ۱ در میانگین اطمینان‌پذیری مخازن ۲ و ۳ به عنوان تابع هدف تعریف شده است. در شکل ۱۷ تغییرات حجم رهاسازی آب از مخازن به منظور تفریحات و کنترل سیلاب و در شکل ۱۸ تغییرات حجم ذخیره مخازن نشان داده شده‌اند.

بر اساس شکل‌های ۱۷ و ۱۸ در همه مخازن، تغییرات حجم رهاسازی و ذخیره در همه مخازن در بازه مجاز

قرار داشته است. در فصل‌هایی که آورد رودخانه کاهش می‌یابد، روند تغییرات حجم رهاسازی نیز به صورت نزولی می‌باشد. همچنین، تغییرات حجم ذخیره در مخازن تقریباً در هیچ بازه زمانی از حجم آستانه کنترل سیلاب تخطی نکرده است. روند تغییرات در این نمودارها تقریباً مشابه با نمودارهای شکل ۸ در حالت *SRSO* می‌باشد.



شکل ۱۷. تغییرات ماهانه حجم رهاسازی از مخازن مختلف در حالت *MRSO* با هدف تفریحات و کنترل سیلاب



شکل ۱۸. تغییرات ماهانه حجم ذخیره برای مخازن مختلف در حالت *MRSO* با هدف تفریحات و کنترل سیلاب

با توجه به اینکه در تأمین هدف تفریحات و کنترل سیلاب، رهاسازی به منظور تنظیم حجم ذخیره در مخازن مختلف صورت می‌گیرد، لذا تحلیل سامانه در حالت *MRSO* نتیجه‌ای تقریباً مشابه با حالت *SRSO* خواهد داشت. زیرا بهره‌برداری از هر مخزن در راستای ذخیره حجم مشخصی از آب در آن مخزن صورت می‌گیرد و اثر متقابل قابل ملاحظه‌ای بین مخازن موازی و متوالی در یک سامانه وجود ندارد. مقدار تابع هدف نیز برای سامانه مخازن در حالت *MRSO* برابر با ۹۸/۲٪ به دست آمده است که اختلاف قابل توجهی با مقدار تابع هدف در حالت *SRSO* در مخازن مختلف ندارد.

تحلیل چندمخزنه- چندهدفه (*MRMO*)

در این حالت، مخازن این سامانه به صورت یک‌پارچه و به ازای در نظر گرفتن همه اهداف به صورت هم‌زمان ارزیابی می‌شوند. مخازن ۲ و ۳ به صورت موازی

با یکدیگر و مجموعه آنها با مخزن ۱ به صورت متوالی در نظر گرفته می‌شود. توابع هدف مختلف در این حالت، مشابه با حالت *SRMO*به صورت روابط (۳۷) تا (۳۹) تعریف شده‌اند.

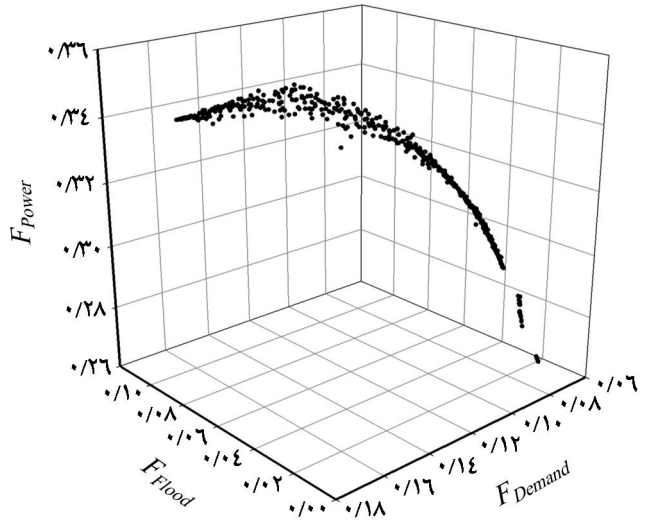
در این حالت نیز بهینه‌سازی به صورت سه‌هدفه و با سه نوع متغیر تصمیم، رهاسازی برق‌آبی، رهاسازی تأمین نیاز پایین‌دست و حجم ذخیره اول دوره بهره‌برداری برای هر مخزن در سامانه انجام شده است. بر اساس توضیحاتی که در حالت *MRSO* بیان شد، به منظور شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخازن ۲ و ۳ برای تأمین تقاضای مصارف مختلف، مرز بالای رهاسازی برابر با بیشینه مقدار رهاسازی از هر مخزن (بر اساس رقوم آب ذخیره شده و رقوم دریچه‌های آبگیر) در نظر گرفته می‌شود. در این حالت برای مخزن ۱ بهره‌برداری بر اساس سیاست *SOP* صورت می‌گیرد. برای بهره‌برداری به منظور تولید انرژی برق‌آبی و تفریحات و کنترل سیلاب در تمام مخازن موجود در سامانه، سیاست *SOP* استفاده می‌شود. اولویت‌بندی برای تخصیص حجم ذخیره شده در مخزن در بازه‌های زمانی مختلف به اهداف گوناگون به صورت مشابه با حالت *SRMO* لحاظ شده است. ابزار *NSGA-II* برای حل مسئله مربوط به سامانه مخازن به ازای ۵٬۰۰۰ تکرار (نسل[1])، ٤٥٠ عضو و ۷۵ متغیر تصمیم به کار گرفته شده است و در نهایت، مجموعه‌ای از بهترین جواب‌های نامغلوب حاصل از بین اجراهای مختلف مدل به عنوان پرتوی نهایی مسئله در سامانه مدّ نظر قرار گرفته است. در این حالت نیز مشابه با حالت *SRMO* در مورد هر متغیر در هر بازه زمانی بیش‌ترین، میانگین و کم‌ترین مقدار به دست آمده از بین سری‌های ماهانه مجموعه جواب نامغلوب استخراج شده است. در شکل ۱۹ مجموعه نقاط پرتو برای تابع هدف‌های مورد بررسی و در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ به ترتیب نتایج تحلیل برای مخازن ۱، ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

بر اساس شکل ۱۹ با استفاده از مدل *NSGA-II* تمام اهداف در یک حد مطلوبی تأمین شده‌اند. نکته قابل توجه عدم پراکندگی زیاد پرتوی حاصل در مقایسه با پرتوهای مخازن در حالت *SRMO* می‌باشد. در حالت *MRMO* مسئله به صورت چندمخزنه و چندهدفه و در حالت *SRMO* مسئله به صورت تک‌مخزنه و چندهدفه بررسی می‌شود. در حالت *MRMO* ابعاد مسئله نسبت به حالت *SRMO* بزرگ‌تر بوده و حل مسئله با پیچیدگی‌های بیش‌تری روبرو است. لذا، ترکیب گزینه‌های تصمیم‌گیری موجود افزایش و گزینه‌های نامغلوب برای مدیریت سامانه کاهش می‌یابد.

با بررسی حالت میانگین مقادیر در هر بازه زمانی و با توجه به اولویت‌بندی تأمین تقاضاهای مختلف در پایین‌دست، مشاهده می‌شود که مشابه با حالت *SRMO* تقاضای شهری در ماه‌هایی که آورد طبیعی رودخانه کاهش یافته است (انتهای فصل بهار و فصل تابستان)، با بیش‌ترین کمبود مواجه می‌باشد. در عین حال، هیچ آبی به تقاضاهای کشاورزی و صنعتی اختصاص داده نشده است. اما در انتهای فصل پاییز و فصل زمستان به دلیل وجود آب کافی در سامانه مخازن، تقاضای شهری و کشاورزی به طور ۱۰۰٪ و تقاضای صنعتی نیز دست‌کم تا ۵۰٪ تأمین شده است. به منظور تأمین هدف تفریحات و کنترل سیلاب در انتهای زمستان و اوایل بهار که احتمال وقوع سیلاب افزایش می‌یابد، درصدی از آب مازاد ذخیره شده در مخزن تخلیه می‌شود تا کم‌ترین اختلاف ممکن با مقدار حجم ذخیره آستانه در هر مخزن ایجاد شود. در بازه‌های زمانی دیگر دوره بهره‌برداری نیز تمام آب در مخزن ذخیره شده و رهاسازی به منظور تنظیم ذخیره مخزن با هدف تفریحات و کنترل سیلاب صورت نگرفته است. این در حالی است که تقریباً در تمام مخازن، درصد تأمین هدف تفریحات و کنترل سیلاب در تحلیل *MRMO* بیش‌تر از تحلیل *SRMO* می‌باشد و روند تغییرات مقادیر بیشینه، میانگین و کمینه حجم ذخیره در تمام مخازن به

[1] Generation

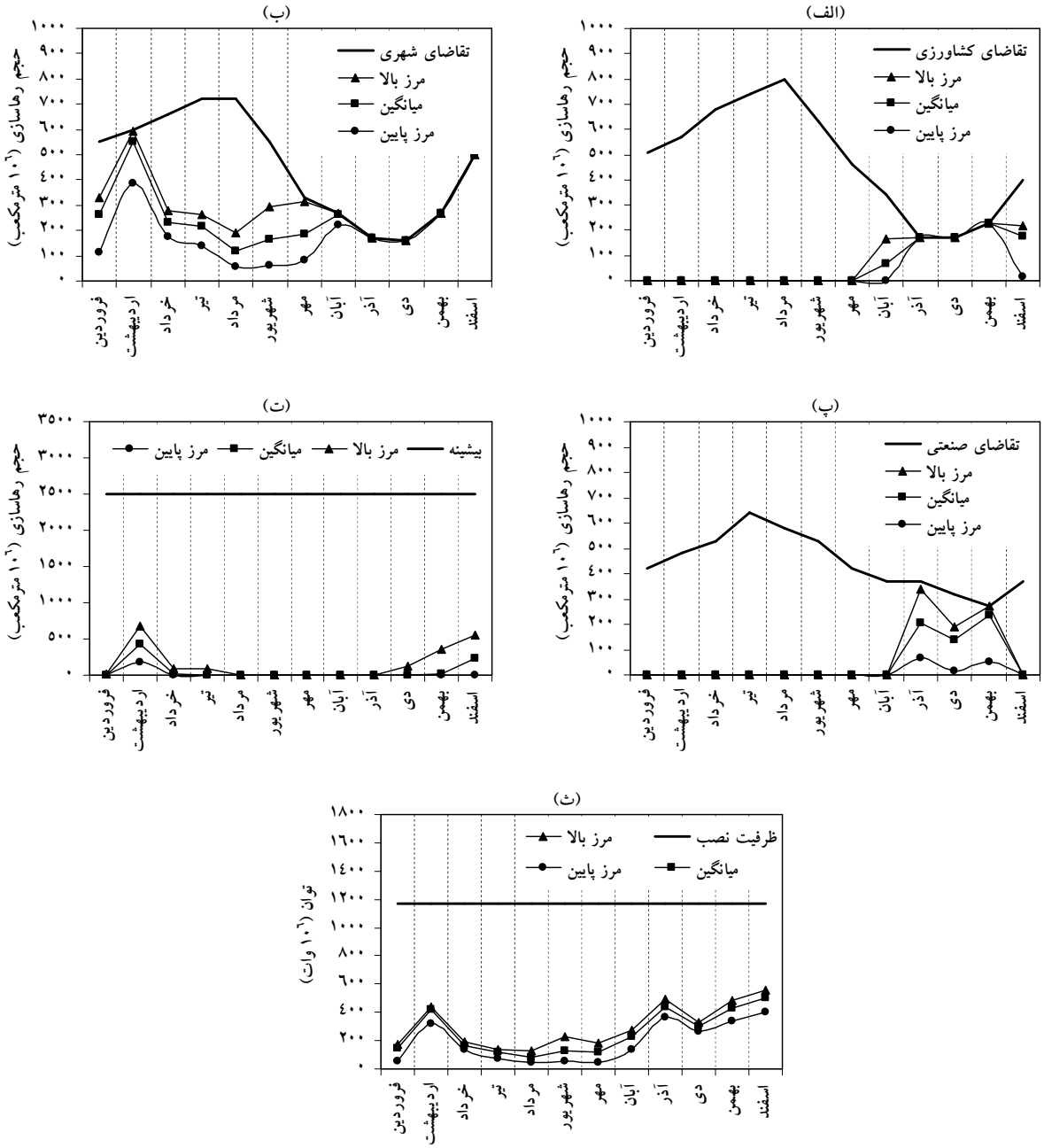
حجم آستانه بسیار نزدیک‌تر است. در بازه‌های زمانی که آورد طبیعی رودخانه کاهش می‌یابد (فصل تابستان و اوایل فصل پاییز) درصد تأمین اهداف مختلف (به استثنای هدف تفریحات و کنترل سیلاب) به دلیل کمبود آب در دسترس جهت تخصیص به آنها کاهش می‌یابد. می‌توان گفت که در فصل‌های پرآب، اهداف تولید انرژی برق‌آبی و تأمین تقاضای پایین‌دست و در فصل‌های کم‌آب، هدف تفریحات و کنترل سیلاب در حد مناسب و متعادلی تأمین شده‌اند. با وجود اینکه تأمین هدف برق‌آبی به عنوان اولویت اول بهره‌برداری بوده است ولی مشابه با حالت *SRMO* درصد تأمین آن در مخازن مختلف چندان مطلوب نیست. در این حالت نیز، آب تخصیص داده شده به هر نیروگاه، پس از تولید انرژی برق به منظور تأمین تقاضای پایین‌دست مورد استفاده قرار می‌گیرد و کمبودهای این تأمین نیز مجدداً از ذخیره مخزن قابل جبران است. اما تأمین کمبودهای هدف برق‌آبی از طریق اجزای دیگر موجود در سامانه میسر نمی‌باشد. به همین دلیل سایر اهداف در سامانه سه‌مخزنه در مقایسه با هدف تولید انرژی برق‌آبی به صورت مطلوب‌تری تأمین شده‌اند. بیش‌ترین کمبود در توان تولیدی در مخزن ۱ و به مقدار تقریبی ۱۰۸۲/۰ مگاوات اتفاق افتاده است.



شکل ۱۹. مجموعه نقاط پرتو برای تابع هدف‌های مورد بررسی در سامانه سه‌مخزنه در حالت *MRMO*

نتیجه‌گیری

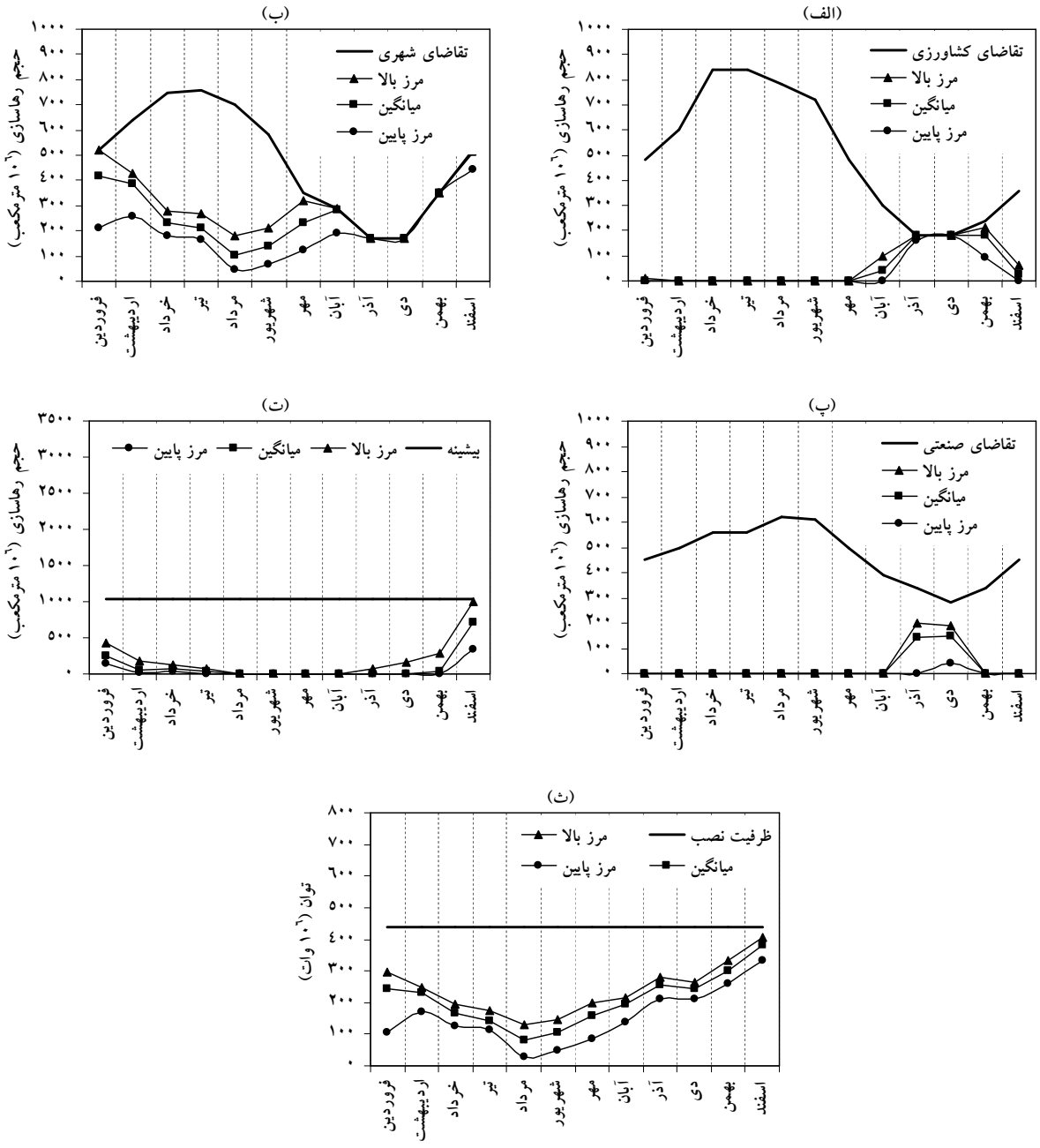
با توجه به اینکه مسائل موجود در زمینه سامانه مخازن عموماً در سامانه‌های واقعی مورد تحلیل قرار می‌گیرند و معمولاً دسترسی به اطلاعات و داده‌های سامانه‌های واقعی مشکل است، لذا توسعه یک سامانه مخازن نمونه امری مهم برای بررسی و ارزیابی هر چه دقیق‌تر این سامانه‌ها می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک سامانه مخازن نمونه برای اولین بار در مسائل مربوط به سامانه‌ها و حفاظت منابع آب بوده است. برای این منظور، سعی شده است که تمام اطلاعات مربوط به سامانه سه‌مخزنه ارائه شده به طور کامل و با روندی طبیعی و واقعی تعیین شوند. همچنین در ارزیابی عملکرد این سامانه نیز دو حالت ارتباط موازی و متوالی و ترکیب آنها بین مخازن مختلف در نظر گرفته شده و سه هدف کلی تولید انرژی برق‌آبی، تأمین سه نوع تقاضا (کشاورزی، شهری و صنعتی) در پایین‌دست هر مخزن به صورت جداگانه و کنترل سیلاب بررسی شده است. این سامانه به چهار حالت *SRSO*، *SRMO*، *MRSO* و *MRMO* تحلیل شده است.همچنین تخطی از حجم آستانه کنترل سیلاب و تفریحات در کل سامانه در حدود ٤٨٪ در حالت چندهدفه کم‌تر از حالت تک‌هدفه بوده است.



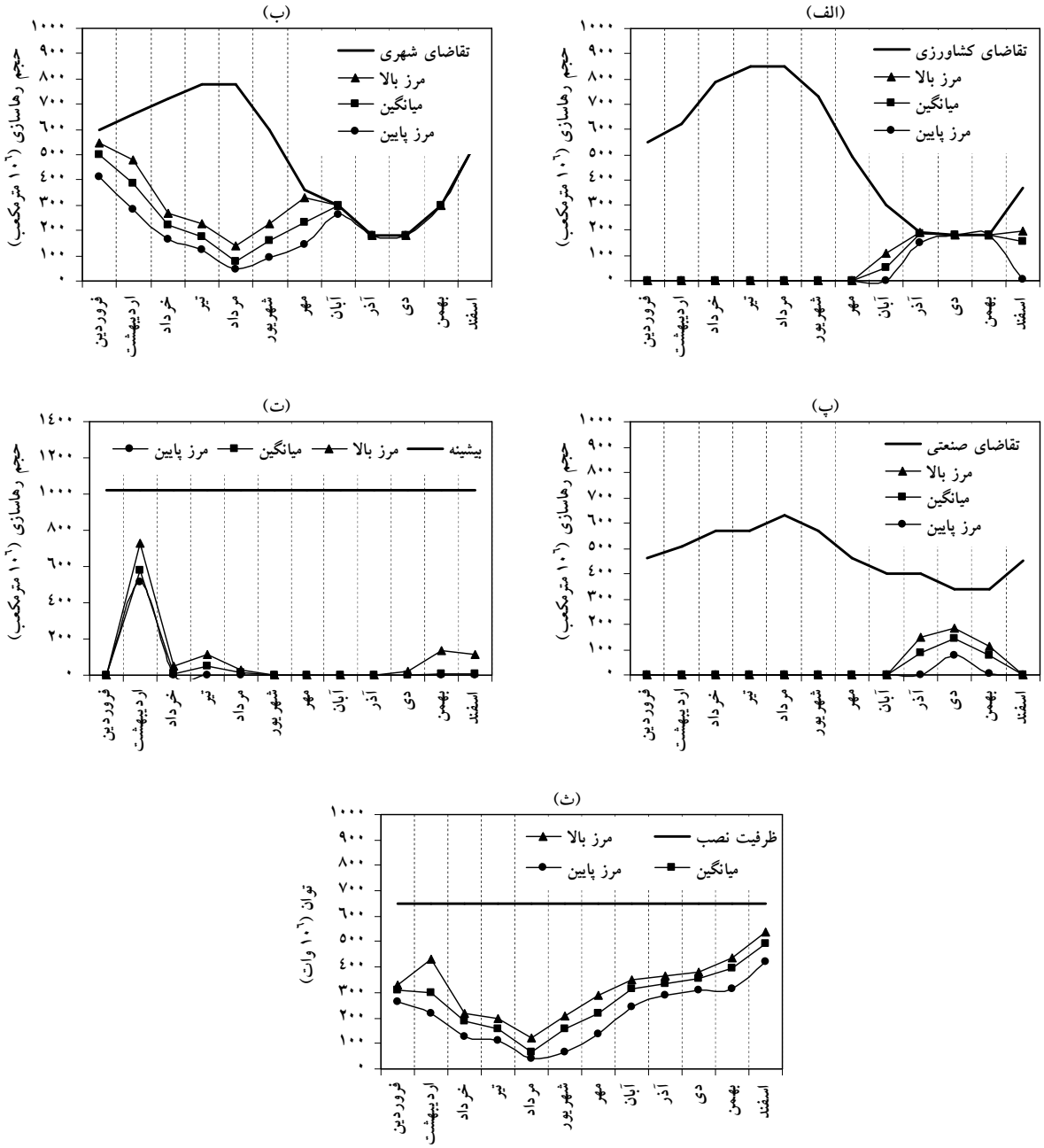
شکل ۲۰. نتایج تحلیل برای مخزن ۱ در حالت *MRMO*: (الف) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی کشاورزی، (ب) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی شهری، (پ) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی صنعتی، (ت) محدوده تغییرات ماهانه حجم رهاسازی تفریحات و کنترل سیلاب و (ث) محدوده تغییرات ماهانه توان تولیدی

در حالت‌هایی که سامانه به صورت تک‌مخزنه بررسی شده است، کمبود تأمین تقاضای کشاورزی، شهری و صنعتی در کل سامانه به ترتیب در حدود ۶۲، ۳۳ و ۹۲٪ در حالت چندهدفه بیش‌تر از حالت تک‌هدفه بوده است. همچنین کمبود تأمین انرژی برق‌آبی و تخطی از حجم آستانه کنترل سیلاب و تفریحات در کل سامانه به ترتیب در حدود ۹۷ و ۹۹٪ در حالت چندهدفه بیش‌تر از حالت تک‌هدفه بوده است. دلیل این امر آن است که عمدتاً مخازن به صورت تک‌هدفه طراحی می‌شوند و در طول دوران بهره‌برداری برای اهداف گوناگون به صورت همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین در بهره‌برداری چندهدفه با کمبود بیش‌تری نسبت به

بهره‌برداری تک‌هدفه روبرو خواهند بود. از طرفی در بهره‌برداری چندهدفه، اولویت‌بندی تأمین اهداف می‌تواند در میزان کمبودها مؤثر باشد. برای مثال، در تحقیق حاضر، برای بهره‌برداری چندهدفه تأمین تقاضای شهری در اولویت اول قرار داشته و کم‌ترین کمبود را متحمل شده است و تأمین هدف کنترل سیلاب و تفریحات در اولویت آخر بوده و بیش‌ترین کمبود را داشته است. در حالت‌هایی که سامانه به صورت چندمخزنه بررسی شده است، کمبود تأمین تقاضای کشاورزی، شهری، صنعتی و تأمین انرژی برق‌آبی در کل سامانه به ترتیب در حدود ۲۱، ۲۵، ۲۹، ۶۰٪ در حالت چندهدفه بیش‌تر از حالت تک‌هدفه بوده است.



شکل ۲۱. نتایج تحلیل برای مخزن ۲ در حالت *MRMO*: (الف) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی کشاورزی، (ب) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی شهری، (پ) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی صنعتی، (ت) محدوده تغییرات ماهانه حجم رهاسازی تفریحات و کنترل سیلاب و (ث) محدوده تغییرات ماهانه توان تولیدی



شکل ۲۲. نتایج تحلیل برای مخزن ۳ در حالت *MRMO*: (الف) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی کشاورزی، (ب) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی شهری، (پ) محدوده تغییرات ماهانه حجم تقاضا و رهاسازی صنعتی، (ت) محدوده تغییرات ماهانه حجم رهاسازی تفریحات و کنترل سیلاب و (ث) محدوده تغییرات ماهانه توان تولیدی

این نتایج نشان می‌دهند که بهره‌برداری یک‌پارچه از سامانه‌های چند مخزنه می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به بهره‌برداری جداگانه از مخازن یک سامانه چندمخزنه داشته باشد. در حالتی که سامانه به صورت تک‌هدفه بررسی شده است، بهره‌برداری تک‌مخزنه نتایج بهتری نسبت به بهره‌برداری از چندمخزنه ارائه داده است. در تحلیل چندهدفه نیز بررسی یک‌پارچه سامانه به صورت چندمخزنه با کمبودهای بیش‌تری مواجه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق، در هر حالت کاملاً منطقی و قابل قبول بوده است. از آنجا هدف اصلی این تحقیق ارائه یک مورد مطالعاتی با داده‌ها و اطلاعات کامل در زمینه‌های مختلف مدیریت منابع آب می‌باشد، لذا در انواع

تحلیل‌های منابع آب، از جمله شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی می‌توان از اجزای مختلف این سامانه به عنوان مورد مطالعاتی نمونه استفاده کرد و نحوه عملکرد روش‌های مختلف تحلیل سامانه‌های منابع آب را ارزیابی کرد.

فهرست منابع

حسینی موغاری، س. م. و بنی حبیب، م. ا. ۱۳۹۳. بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن برای تأمین آب کشاورزی با استفاده از الگوریتم کرم شب‌تاب. حفاظت منابع آب و خاک،۳ (٤): ۱۷-۳۱.

نشریه سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۸۰. تعیین حجم رسوبات و توزیع آن در مخازن سدها. شماره ۲۲۱.

Abbass, H.A. 2001. MBO: marriage in honey bees optimization- A haplometrosis polygynous swarming approach. Proceedings of the 2001 Congress on Evoluationary Computatuin, 1:207-214.

Department of Land and Water Conservation. 1999. Integrated quantity–quality model. Reference Manual, Australia.

Draper, A.J., Jenkins, M.W., Kirby, K.W., Lund, J.R. and Howitt, R.E. 2003. Economic-engineering optimization for California water management. Journal of Water Resources Planning and Management, (ASCE), 129(3):155-164.

Holland, J.H. 1975. Adaptation in neural and artificial systems.University of Michigan Press, First edition.

Hydrologic Engineering Center. 1979. HEC-5 reservoir system operation for flood control and conservation user's manual. Technical Report, US Army Corps of Engineers, Davis, California, USA.

Hydrologic Engineering Center. 1971. HEC-3 reservoir system analysis. Technical Report, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California, USA.

Kennedy, J. and Eberhart, R.C. 1998. Particle swarm optimization. Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Network, 1942-1948.

Kuczera, G. and Diment, G.A. 1988. General water supply system simulation model: WASP. Journal of Water Resources Planning and Management, (ASCE), 114(4):365–382.

Labadie, J.W., Bode, D.A. and Pineda, A.M. 1986. Network model for decision support in municipal water raw water supply. Water Resources Bulletin, 22(6):927–940.

Perera, B.J.C. and James, B. 2003.A generalised water supply simulation computer software package. Hydrology Journal, Institute of Engineers (India), 26(1–2):67–83.

Zagona, E.A., Fulp, T.A., Shane, R., Magee, T. and Goranflo, H.M. 2001. RiverWare: a generalised tool for complex reservoir systems modeling. Journal of the American Water Resources Association, (AWRA), 37(4):913–929.

ISSN 2251-7480

A multi-objective reservoirs system development as a sample case in the reservoir systems management

Samaneh Seifollahi-Aghmiuni[1*] and Omid Bozorg-Haddad[2]

1*) Ph.D. Candidate, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
Corresponding author email: seifollahi@ut.ac.ir
2) Associate Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Tehran, Iran

Received: 30-06-2014 Accepted: 01-02-2015

Abstract

Water resources systems as a set of structures and equipment, strongly need proper operational programming in order to optimally supply demands and perform suitable water conservation. Water reservoirs are the most commonly used water resources systems for supplying domestic demands whose incorrect management may lead to unsuitable water resources protection and huge financial losses. Approximately in all of the reservoir design, operation and management problems, real reservoir system case studies are studied and analyzed according to the existing conditions and their objectives. Under these conditions, it can be very useful to define and introduce a sample reservoir system which can be investigated for all conditions and objectives. In this research, a three-reservoir system is presented for the first time, considering all physical and hydrological parameters beside three general objectives of generating hydropower energy, supplying downstream demands (agricultural, municipal and industrial) and flood control. The obtained results are quite logical, with a natural trend based on the logically defined data for the sample reservoir system. Therefore, this sample case study is capable of showing the performance of reservoir systems in different states of single or multi reservoirs and single or multi objectives. As a result, the presented reservoir system can be used as a sample case study for introducing and developing different methods in solving water reservoir system problems.

Keywords: Case study; Multi-reservoir system; Multi-objective optimization; Operation