

ارزیابی معیارهای تخصیص در مدل‌های مدیریت سیستم مخازن در شرایط کم‌آبی (مطالعه موردی: حوضه کارون)

مهسا فرهنگی^{۱*} و امید بزرگ حداد^۲

چکیده

سدها از جمله سازه‌های زیربنائی تأمین آب به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی هستند. چنانچه بهره‌برداری از مخازن بهینه باشد، اهداف سد به نحو مطلوبی تأمین می‌شود. ولی از آنجاکه بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های بزرگ منابع آبی، وقت‌گیر، پیچیده و بعضاً دست نیافتنی است، استفاده از روش‌های جایگزین مدل‌های بهینه‌سازی که با دقت قابل قبول، امکان رسیدن به جواب مناسب نزدیک به بهینه را داشته باشند، راه حل مناسبی به‌نظر می‌رسد. در این تحقیق عملکرد دو مدل شبیه‌سازی WEAP و MODSIM، با مدل بهینه‌سازی غیرخطی Lingo، برای یک سیستم تک‌مخزنه و سپس یک سیستم چندمخزنه در یک دوره خشک مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی نحوه عملکرد مدل‌ها، از مقایسه چند معیار توسعه یافته جهت بیان کارایی سیستم مخازن استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که در بهره‌برداری تک مخزن چنانچه هدف رسیدن به اعتمادپذیری حجمی مطلوب باشد، می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی به‌جای مدل‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی منجر به افزایش ۳۸ درصدی معیار کمبود نسبی می‌شود، حال آنکه مقدار معیارهای اعتمادپذیری زمانی، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری یک سیستم در مدل‌های شبیه‌سازی اختلاف زیادی (حدود ۲ برابر) با مدل بهینه‌سازی دارند. در بهره‌برداری چند مخزنه نیز، اختلاف اعتمادپذیری حجمی و برگشت‌پذیری مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به ترتیب ۲۵٪ و ۴۰٪ است. در مورد سایر معیارها، اختلاف دو مدل از ۳۰۰ درصد نیز تجاوز می‌کند.

واژه‌های کلیدی: معیارهای کارایی، مدل شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، WEAP، MODSIM، Lingo.

ارجاع: فرهنگی م. و بزرگ حداد ا. ۱۳۸۹. ارزیابی معیارهای تخصیص در مدل‌های مدیریت سیستم مخازن در شرایط کم‌آبی (مطالعه موردی: حوضه کارون). مجله پژوهش آب ایران. ۴(۷): ۳۳-۴۶.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: mfarhangi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۵/۳۱

مقدمه

بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب براساس مدل‌های مختلفی صورت می‌گیرد. این مدل‌ها به دو دسته کلی مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تقسیم می‌شوند. استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، اهداف موردنظر در احداث این سیستم‌ها را به‌طور مطلوب تأمین می‌کند. یکی از بزرگ‌ترین معایب این روش‌ها محدودیت استفاده در سیستم‌های بزرگ منابع آب، به دلیل طولانی بودن زمان اجرای مدل و بعضی مواقع، عدم دستیابی به جواب مناسب است. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، راه حل دیگری برای بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب می‌باشد. مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا^۱، مدل‌های HEC-3 و HEC-5 را به ترتیب در سال‌های ۱۹۷۲ و ۱۹۷۹ طراحی کرده است. این مدل‌ها قابلیت شبیه‌سازی بهره‌برداری بلندمدت از سیستم‌های منابع آب را دارند. مرکز توسعه آب تگزاس^۲، در اوایل دهه ۷۰ مدل‌هایی را طراحی کرده است که قابلیت مدل‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، به روش‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، با بهره‌گیری از تکنیک برنامه‌ریزی خطی^۳ (LP) را دارند (سرچویک، ۲۰۰۳). معروف‌ترین مدل در این گروه مدل SIMYLD-II (۱۹۷۲) است. در این مدل بهره‌برداری در دوره‌های زمانی ماهانه، توسط تکنیک LP انجام می‌شود. به این ترتیب که در هر ماه اطلاعات مربوط به مخازن، نیازهای پایین‌دست و هیدرولوژی منطقه، در نرم‌افزار وارد شده و خروجی‌های آن دوره به‌عنوان ورودی‌های دوره بعد مجدداً وارد مدل می‌شود. به این ترتیب مسئله بهره‌برداری چندساله به مسائل بهره‌برداری ماهانه تبدیل می‌شود. به همین علت است که این مدل در گروه مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی می‌گنجد. در ادامه مدل MODSIM^۴ که عملکردی مشابه مدل SIMYLD-II^۵ دارد، در اواسط دهه ۸۰ در دانشگاه کلرادو پایه‌گذاری شده و شکل نهایی آن توسط لابادیه (۱۹۹۵) ارائه شده است. این مدل، در مقایسه با مدل‌های مشابه، قابلیت‌های گرافیکی وسیعی داشته به‌طوری‌که استفاده از نقشه‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در

محیط آن امکان‌پذیر است. از دیگر امکانات این مدل می‌توان به قابلیت برنامه‌نویسی به زبان‌های C و ویژوال بیسیک^۶، در آن اشاره کرد. این مدل از زمان طراحی تاکنون در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی داشته است. گراهام و همکاران (۱۹۸۶) میزان تخصیص آب با در نظر گرفتن حقایق را در حوضه‌ای در کلرادو، توسط MODSIM به‌دست آوردند. فاکس و همکاران (۱۹۸۶) در حوضه‌ای نسبتاً بزرگ در استرالیا برای برقراری تعادل بین انرژی تولیدی برقایی و مقدار آب آبیاری از این مدل شبیه‌سازی استفاده کردند. مطالعاتی از این قبیل توسط لابادیه و بشری (۱۹۹۴) در حوضه شمالی رود نیل در مصر، انجام شده است. لابادیه (۲۰۰۴) در حوضه‌ای در کره جنوبی و مارکوس و همکاران (۲۰۰۶) در رودخانه‌ای در کالیفرنیا از این مدل برای بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب استفاده کرده‌اند.

یکی دیگر از مدل‌های پرکاربرد شبیه‌سازی (WEAP)^۷، را مؤسسه محیط زیست استکهلم^۸ (۱۹۹۰)، توسعه داده و به بازار عرضه کرده است. WEAP یک نرم‌افزار جامع و پیشرفته شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب است که در مدیریت منابع آب حوضه‌های آبریز، کاربرد زیادی دارد. از این مدل، در کشورهای مختلف در طرح‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی استفاده شده است. به‌عنوان نمونه در بررسی علل کاهش حجم دریاچه آرال (راسکین، ۱۹۹۲) و بررسی سیستم حوضه دریاچه نایواشا (آلفرا، ۲۰۰۴) در کشور کنیا در یک قالب جامع‌نگر از نرم‌افزار WEAP با هدف یافتن علل و نوع مشکلات آتی استفاده شد.

روش‌های بهینه‌سازی در مدیریت و بهره‌برداری از سیستم‌های بزرگ منابع آبی، در طول سه دهه گذشته پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. یه (۱۹۸۵)، سیمونوویچ (۱۹۹۲)، وریز (۱۹۹۳)، روله (۱۹۹۷) و مونوه و همکاران (۱۹۹۹) از روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب استفاده کرده‌اند. روش‌های بهینه‌سازی، مجموعه‌ای از روش‌های متنوعی را دربر می‌گیرند. روش بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی یکی از این روش‌ها است که در آن ابتدا سری‌های زمانی تاریخی طولانی یا سری‌های

^۱- Hydrology engineering center.

^۲- Texas water development board (TWDB)

^۳- Linear programming (LP)

^۴- Modelling and Simulation

^۵- Simulation yield

^۶- Visual Basic

^۷- Water evaluation and planning system (WEAP)

^۸- Stockholm environment institute

لذا، معمولاً برای ارزیابی عملکرد مدل مورد استفاده برای بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب، از معیارهای کارایی سیستم مخزن^۶ استفاده می‌شود. مهم‌ترین و پرکاربردترین این معیارها عبارتند از: اعتمادپذیری^۷، برگشت‌پذیری^۸ و آسیب‌پذیری^۹ (سرچویک ۲۰۰۳). برای هر یک از این معیارها محققین تعاریف مختلفی ارائه کرده‌اند. به‌عنوان مثال می‌توان به تحقیقات آسکو (۱۹۷۴)، فیرینگ (۱۹۸۲)، برن و همکاران (۱۹۹۱) و آزودو و همکاران (۲۰۰۰) اشاره نمود. البته تعاریف هاشیموتو و همکاران (۱۹۸۲) برای این معیارها، کامل و پرکاربرد است و در این تحقیق به‌عنوان معیارهای سیستم تک‌مخزنه مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از محدودیت‌های استفاده از این معیارها، عدم کاربرد آنها در سیستم‌های چندمخزنه منابع آب است. در واقع تاکنون معیارهایی برای سیستم‌های متشکل از چند جزء تعریف نشده است. به همین دلیل از تعمیم روابط تک‌مخزن موجود برای برآورد کارایی سیستم چندمخزنه مورد بررسی در این تحقیق، استفاده شده است.

از آنجاکه روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم بزرگ منابع آب، وقت‌گیر و در بعضی موارد دست‌نیافتنی است، جایگزین کردن روش‌های شبیه‌سازی به‌جای آنها حائز اهمیت است. چنانچه بتوان مدل شبیه‌سازی را یافت که عملکردی مشابه یا نزدیک به مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم بزرگ منابع آب داشته باشد، در این صورت جایگزین کردن آنها به‌جای روش‌های بهینه‌سازی منطقی و مقرون به‌صرفه خواهد بود. در این تحقیق دو مدل شبیه‌سازی MODSIM و WEAP و مدل بهینه‌سازی غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار Lingo ۸/۰، در یک سیستم سه‌مخزنه، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مقایسه نحوه عملکرد مدل‌های مختلف، معیارهایی توسعه داده شده‌اند. برای انتخاب مدل مناسب از مقایسه این معیارها استفاده شده و در نهایت در مورد جایگزینی یا عدم جایگزینی مدل بهینه‌سازی توسط یک مدل شبیه‌سازی بحث شده است.

مصنوعی متعددی که بر مبنای خصوصیات احتمالاتی متغیر تولید شده‌اند، به‌صورت معین بهینه‌سازی می‌شود. سپس با استفاده از نتایج بهینه‌سازی، ارتباط میان تصمیم‌های بهینه با وضعیت‌های مختلف سیستم به‌وسیله روابط ریاضی گسترش می‌یابد. این رابطه به‌عنوان برنامه بهینه فرض می‌شود و با استفاده از آن می‌توان برای بهره‌برداری از مخزن در شرایط نامشخص آینده تصمیم‌گیری کرد (بلوری یزدلی، ۱۳۸۷). از انواع این روش‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی خطی (LP)، برنامه‌ریزی غیرخطی^۱ (NLP)، برنامه‌ریزی پویا^۲ (DP) و مدل آبدی^۳ اشاره کرد. امروزه بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی، اعم از خطی و غیرخطی به کمک نرم‌افزارهای کامپیوتری به سادگی قابل تجزیه و تحلیل‌اند. یکی از این نرم‌افزارها Lingo^۴ است که مزیت‌هایی را نسبت به سایر نرم‌افزارهای موجود به شرح زیر دارد: (۱) قابلیت مدل‌سازی به‌صورت کارا و صحیح، (۲) قابلیت بالای تحلیل مدل، (۳) دارا بودن توابع مختلف ریاضی، آماری و احتمالی و (۴) قابلیت خواندن اطلاعات از سایر فایلها. به این ترتیب Lingo، نرم‌افزاری جامع و فراگیر جهت تسهیل اجرای تمام مدل‌های بهینه‌سازی از مسائل تحقیق در عملیات تا اقتصاد مهندسی، شبیه‌سازی، کنترل کیفیت و کنترل پروژه است. در این تحقیق از مدل Lingo ۸/۰ برای بهینه‌سازی سیستم مورد بررسی، استفاده شده است (راهنمای نرم‌افزار Lingo).

در بسیاری از مطالعات، نحوه عملکرد سیستم‌های منابع آب را می‌توان به صورت‌های رضایت‌بخش یا نارضايت‌بخش^۵ توصیف کرد. بدین‌منظور مشخصه‌های مختلفی جهت تشریح کارایی این سیستم‌ها به‌کار برده می‌شود. ساده‌ترین معیارهای کارایی سیستم عبارتند از میانگین و واریانس خروجی‌های سیستم. اگرچه این معیارها در بسیاری از موارد مفید هستند اما اغلب کافی نیستند. به‌ویژه اینکه میانگین و واریانس به‌ترتیب سطح متوسط و متوسط مربع انحراف از میانگین یک پارامتر را نشان می‌دهند و این آمارها یک توصیف مبهم از رفتار سیستم در هنگام وقوع یک شکست بحرانی عرضه می‌کنند (بلوری یزدلی، ۱۳۸۷).

^۶- Performance indices of reservoir system

^۷- Reliability

^۸- Resiliency

^۹- Vulnerability

^۱- Non linear programming (NLP)

^۲- Dynamic programming

^۳- Yield model

^۴- Language for iNteractive general optimization

^۵- Satisfactory or unsatisfactory

انتقال مقادیر سرریز مخازن بالادست به مخازن پایین دست، که مشابه ماتریس C است، ولی درایه‌های غیر قطر اصلی تنها مقادیر صفر و یا یک را به خود اختصاص می‌دهند. رابطه (۲) ماتریس روندیابی کلی سیستم نشان داده شده در شکل ۱ را ارائه می‌دهد. $Sp_{i,t}$ مقدار سرریز از مخزن i ام در دوره t ام و $L_{i,t}$ مقدار تلفات موجود از مخزن i ام در طول دوره t ام است.

$$C = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,j} & \dots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,j} & \dots & a_{2,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \dots & a_{i,j} & \dots & a_{i,N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{N,1} & a_{N,2} & \dots & a_{N,j} & \dots & a_{N,N} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} 0 \leq a_{i,j} \leq 1 & \quad \text{if } i \neq j \\ a_{i,j} = -1 & \quad \text{if } i = j \end{aligned} \quad (2)$$

سرریز از مخزن نیز قیوداتی را در محاسبات اعمال می‌کند. برای محاسبه مقدار سرریز، استفاده از رابطه زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\left(1 - \frac{S_{i,t+1}}{S_{max_i}}\right) Sp_{i,t} = 0 \quad (3)$$

که در آن: S_{max_i} حجم حداکثر مخزن i ام است. محدوده‌های بالایی و پایینی حجم ذخیره باید به گونه‌ای باشند که تفریحات و مقاصد تجدیدپذیری حجم کنترل سیلاب را فراهم آورده و نیز حداقل تراز برای حجم مرده مخزن و بهره‌برداری از نیروگاه را فراهم آورند (لابادیه، ۲۰۰۴).

$$S_{min_i} \leq S_{i,t} \leq S_{max_i} \quad (\text{for } t=1, \dots, T+1 \ \& \ \text{for } i=1, \dots, N) \quad (4)$$

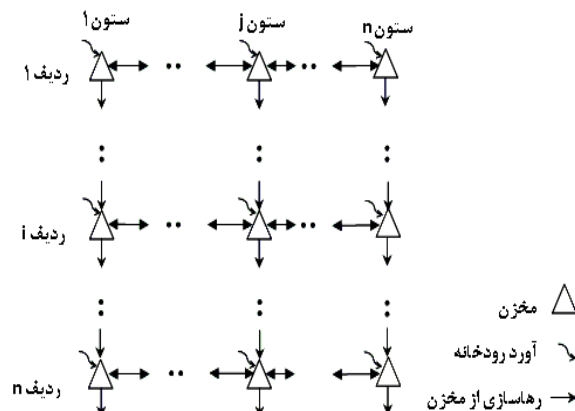
که در آن: S_{min_i} حجم حداقل مخزن i ام می‌باشد. محدوده‌های خروجی از مخزن نیز به گونه‌ای تعیین می‌شوند که از یک طرف حداقل میزان آب ورودی به پایین دست را جهت نیاز زیست محیطی فراهم آورد و از طرف دیگر پایین دست را از خطر سیل در امان نگاهدارند (لابادیه، ۲۰۰۴).

$$Re_{min} \leq Re_{i,t} \leq Re_{max} \quad (\text{for } t=1, \dots, T \ \& \ \text{for } i=1, \dots, N) \quad (5)$$

مواد و روش‌ها

بهره‌برداری از یک سیستم چند مخزنه

یک سیستم چند مخزنه می‌تواند به شکل شبکه‌ای از گره‌ها و رابط بین آنها ارائه شود. گره‌ها نقاط ذخیره یا غیرذخیره‌اند و رابط‌های آنها بیانگر جریان‌های عبوری از مسیرها است. در شکل ۱ نحوه ارتباط یک سیستم چند مخزنه ارائه شده است.



شکل ۱- شکل کلی نحوه ارتباط سیستم چند مخزنی

معادله پیوستگی بر اساس حفظ پایایی جرم در سیستم به عنوان یک رابطه اساسی مطرح می‌باشد که عبارتست از (لابادیه، ۲۰۰۴):

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + Q_{i,t} + C.Re_{i,t} + C'.Sp_{i,t} - L_{i,t} \quad (1)$$

(for $t=1, \dots, T$ & for $i=1, \dots, N$)

که در آن: اندیس i شاخص شماره مخزن مورد بهره‌برداری، t شماره دوره مورد نظر، T تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری، N تعداد مخازن موجود در سیستم، $S_{i,t}$ حجم ذخیره مخزن i ام در ابتدای دوره t ام، $S_{i,t+1}$ حجم ذخیره مخزن i ام در انتهای دوره t ام، $Q_{i,t}$ جریان ورودی رودخانه به مخزن i ام در طول دوره زمانی t ام، $Re_{i,t}$ مقدار رهاسازی از مخزن i ام و در دوره t ام (متغیر تصمیم)، C ماتریس ارتباط یا روندیابی^۱ سیستم که جریان خروجی از هر مخزن را به مخازن دیگر ارتباط می‌دهد. مؤلفه‌های قطر اصلی این ماتریس برابر ۱- می‌باشد و سایر مؤلفه‌ها با توجه به میزان آب برگشتی به مخازن پایین دست بین صفر تا یک متغیر می‌باشند. C' ماتریس ارتباط یا روندیابی سیستم جهت

^۱ - Connectivity or routing matrix

خطی تفاوت مقدار رهاسازی و نیاز است. در این تحقیق از معادله درجه دو، به صورت معادله ۷ استفاده شده است و علت آن یکسان سازی مبنای مقایسه کمبود ناشی از مدل های شبیه سازی و بهینه سازی است. لازم به ذکر است که تابع هدف کمبود به شکل خطی در مدل بهینه سازی غیرخطی جواب های چندگانه ارائه می کند. بدیهی است که هر چه این مقدار کمتر باشد، بهره برداری مناسب تر است. مقدار اعتماد پذیری حجمی عبارتست از مقدار حجم آب رهاسازی در کل دوره، نسبت به مقدار کل نیاز مخازن. برای محاسبه این شاخص از معادله ۸ استفاده می شود.

$$\alpha_V = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T Re_{i,t}}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T De_{i,t}} \times 100 \quad (8)$$

که در آن: α_V اعتماد پذیری حجمی سیستم در طول دوره بهره برداری است. هر چه مقدار اعتماد پذیری حجمی بیشتر باشد، قابلیت اطمینان سیستم بیشتر است.

منظور از اعتماد پذیری زمانی، درصد دوره هایی است که سیستم به طور کامل نیازهای موجود را تأمین کند و با شکست مواجه نمی شود. مقدار این پارامتر از رابطه (۹) محاسبه می شود.

$$\alpha_T = \left(1 - \frac{NDef}{T}\right) \times 100 \quad (9)$$

$$NDef = \text{تعداد } (De_{i,t} > Re_{i,t}) \quad (10)$$

که در آن: $NDef$ تعداد کل شکست های رخ داده در طول دوره بهره برداری در کل مخازن است، α_T اعتماد پذیری زمانی سیستم در طول دوره بهره برداری است. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، قابلیت اطمینان زمانی سیستم بیشتر است.

در بهره برداری از سیستم های منابع آب، معمولاً شکست های رخ داده در یک سیستم، مقدار و اهمیت یکسانی ندارند. به عنوان مثال کمبود ۱ میلیون متر مکعب در یک سیستم با نیاز ۱۰ میلیون متر مکعب، نسبت به کمبود ۵ میلیون متر مکعب، با همین مقدار نیاز، اهمیت کمتری دارد (سرچویک، ۲۰۰۳). بنابراین، معیاری به نام آسیب پذیری تعریف می شود که عبارتست از نسبت حداکثر شدت شکست

که در آن: Re_{min_i} حداقل حجم رهاسازی از مخزن i ام و Re_{max_i} حداکثر حجم رهاسازی از مخزن i ام هستند (لابادیه، ۲۰۰۴).

مقدار حجم مخازن در ابتدای اولین دوره بهره برداری معادل حجم متوسط مفید مخازن در نظر گرفته شده است:

$$S_{i,1} = S_{average_i} \quad (\text{for } i=1, \dots, N) \quad (6)$$

در این رابطه $S_{i,1}$ حجم مخزن i ام در ابتدای دوره بهره برداری و $S_{average_i}$ متوسط حجم مفید مخزن i ام می باشند.

چنانچه مدل بهره برداری مورد استفاده، یک مدل شبیه سازی باشد، فرآیند شبیه سازی با استفاده از معادله های ۱ تا ۶ و با در نظر گرفتن یک قاعده از پیش تعیین شده اجرا می شود و اگر از مدل بهینه سازی برای بهره برداری استفاده شود، از این روابط برای بهینه کردن یک تابع هدف^۱ استفاده می شود. در هر دو حالت، متغیرهای تصمیم مسئله، که عموماً مقادیر رهاسازی^۲ از مخازن در دوره های بهره برداری است، محاسبه می شود.

معیارهای کارآیی در سیستم مخازن

از آنجا که مقایسه بین مقادیر رهاسازی استخراج شده، از روش ها و مدل های مختلف، برای انتخاب مدل مناسب بهره برداری حائز اهمیت است، در ادامه معیارهایی تعریف شده است که این مقایسه را آسان و منطقی تر کند. لازم به توضیح است که این معیارها، تعمیم معیارهای ارائه شده توسط هاشیموتو (۱۹۸۲) برای سیستم چند مخزنه است. شاخص کمبود^۳ نسبی از معادله زیر به دست می آید:

$$Def = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left(\frac{Re_{i,t} - De_{i,t}}{De_{i,t}} \right)^2 \quad (7)$$

که در آن: Def مقدار کمبود کل سیستم و $De_{i,t}$ مقدار نیاز مخزن i ام در طول دوره t ام است.

در دوره هایی که آب کافی برای تأمین کامل نیازهای پایین دست منبع آب وجود نداشته باشد، سیستم با کمبود یا شکست مواجه می شود. برای این شاخص می توان از روابط مختلفی استفاده کرد. معمول ترین نوع آن استفاده از رابطه

¹- Objective function

²- Release

³- Deficit

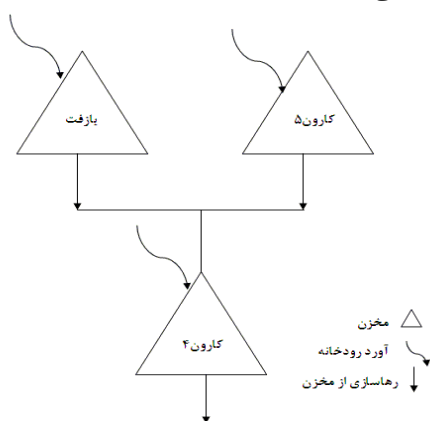
⁴- Number of deficits

است. مثلاً، یک واحد کمبود، در منطقه‌ای که نیاز کمتری دارد، نسبت به منطقه‌ای که نیاز بیشتری دارد، اهمیت بیشتری خواهد داشت. یا یک دوره شکست، در منطقه‌ای با نیاز بیشتر، خسارات بیشتری را نسبت به منطقه‌ای که نیاز کمتری دارد، ایجاد می‌کند. لذا، چنانچه روابطی ارائه شود که اهمیت هر معیار با توجه به نیاز موجود در آن گنجانده شده باشد، نتایج قابل استنادتری به دست خواهد آمد.

همچنین برای استفاده از مدل بهینه‌سازی لازم است توابع هدفی تعریف شود و از آن‌جا که در این تحقیق از معیارهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف استفاده می‌شود، بنابراین لازم است عملیات بهینه‌سازی نیز توسط توابع هدف مختلف و متناسب با معیارهای ارزیابی، انجام شود. بنابراین ۵ تابع هدف متناسب با معیارهای کارایی سیستم مخازن، به شرح زیر تعریف شده است: (۱) حداقل کردن کمبود نسبی، (۲) حداکثر کردن اعتمادپذیری حجمی، (۳) حداکثر کردن اعتمادپذیری زمانی، (۴) حداقل کردن آسیب‌پذیری و (۵) حداکثر کردن برگشت‌پذیری کل سیستم.

معرفی منطقه مطالعاتی

در این تحقیق و به منظور بررسی عملکرد دو مدل شبیه‌سازی MODSIM و WEAP از سیستم سه مخزنه بازفت، کارون ۵ و کارون ۴ که به صورت سری و موازی قرار گرفته و در شکل ۲ نشان داده شده‌اند، استفاده شده است (بلوری یزدلی، ۱۳۸۷).



شکل ۲- شماتیکی از سیستم سه مخزنه بازفت، کارون ۵ و

کارون ۴

چنانچه ضریب آب برگشتی از نیاز مخزن بازفت برابر φ_1 و از نیاز مخزن کارون ۵ برابر φ_2 در نظر گرفته شود، ماتریس

ایجاد شده در طول دوره بهره‌برداری در یک سیستم منابع آب و مقدار آن از معادله ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \text{Max}_{i=1}^N (\text{Max}_{t=1}^T (\frac{De_{i,t} - Re_{i,t}}{De_{i,t}})) \quad (11)$$

که در آن: λ آسیب‌پذیری سیستم در طول دوره بهره‌برداری است و هرچه مقدار آن بیشتر باشد، آسیب‌پذیری سیستم بیشتر است. مدلی مناسب‌تر است که آسیب‌پذیری آن کمتر باشد.

این شاخص، نشان‌دهنده این است که سیستم در صورت مواجه شدن با شکست، با چه سرعتی از آن خارج می‌شود. مثلاً اگر در یک دوره بهره‌برداری ۱۲ ماهه، در چهار دوره سیستم با شکست روبه‌رو شود، توالی دوره‌های شکست بروی عملکرد سیستم اثرگذار است. یعنی چهار دوره متوالی شکست، تأثیری متفاوت نسبت به حالتی دارد که هر دوره شکست، با یک دوره عدم شکست همراه باشد. مقدار برگشت‌پذیری یک سیستم تک عضوی از معادله ۱۲ محاسبه می‌شود. برای محاسبه برگشت‌پذیری سیستم چندعضوی معادله ۱۳ استفاده می‌شود.

$$\gamma_i = \frac{f_{s_i}}{F_i} \quad (12)$$

$$\gamma = \text{Min}_{i=1}^N \gamma_i \quad (13)$$

که در آن: γ_i برگشت‌پذیری مخزن i ام، در طول دوره بهره‌برداری، f_{s_i} تعداد سری شکست‌های ایجاد شده در مخزن i ام در طول دوره بهره‌برداری، F_i تعداد دوره‌های شکست‌های ایجاد شده در مخزن i ام در طول دوره بهره‌برداری و γ برگشت‌پذیری کل سیستم در کل دوره بهره‌برداری است. هرچه مقدار γ بیشتر باشد، سیستم برگشت‌پذیرتر است. به عبارت دیگر مدلی مناسب‌تر است که برگشت‌پذیری بیشتری داشته باشد.

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، این معیارها برای سیستم‌های متشکل از یک مخزن ارائه شده‌اند و در این تحقیق از تعمیم آنها برای سیستم‌های چندمخزنه استفاده شده است. به نظر می‌رسد که یک راه مناسب برای محاسبه شاخص‌های سیستم‌های چند عضوی، استفاده از میانگین وزنی بین معیارهای تک‌تک اعضا است. منظور از میانگین وزنی، دادن اهمیت به هریک از معیارها با توجه به نیاز مورد

کارون ۵ رابطه دارد. در این تحقیق مقدار φ_1 و φ_2 مساوی و برابر ۵۰ درصد (ضریب ۰/۵)، در نظر گرفته شده‌اند. دوره آماری مورد مطالعه دوره ۵ ساله نسبتاً خشک (سالهای ۴۲-۱۳۳۷) در نظر گرفته شده است. برای انتخاب سال‌های خشک، متوسط آبدهی سالانه دوره ۳۷ ساله آماری موجود (سالهای ۷۶-۱۳۳۴) را برای هر یک از مخازن محاسبه و ۵ سال متوالی که متوسط آبدهی همزمان آنها، از متوسط آبدهی سالانه کمتر بود، به‌عنوان دوره خشک در نظر گرفته شد. جدول ۱ مقادیر متوسط ۵ ساله جریان‌های ورودی به مخازن و جدول ۲ مقادیر نیاز هر یک از مخازن را در ماه‌های مختلف سال ارائه می‌دهد. لازم به توضیح است که در این تحقیق مقدار تلفات از مخازن نادیده گرفته شده است. خلاصه اطلاعات سیستم سه‌مخزنه موجود در جدول ۳ ارائه شده است.

ارتباط سیستم به‌صورت ماتریس C خواهد بود. ماتریس C' ارتباط بین سرریز مخازن بالادست و پایین‌دست را نشان می‌دهد. در حالت کلی، کل آب سرریز شده از مخازن بالادست به مخازن پایین‌دست منتقل می‌شود، به‌همین دلیل ضرایب این ماتریس برابر یک در نظر گرفته شده‌اند.

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ \varphi_1 & \varphi_2 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ +1 & +1 & -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

همان‌طور که در ماتریس C ملاحظه می‌شود، مخازن بازفت و کارون ۵ که در بالادست قرار دارند، ارتباطی با یکدیگر ندارند، درحالی‌که مخزن کارون ۴ که در پایین‌دست قرار دارد، با ضریب φ_1 با مخزن بازفت و با ضریب φ_2 با مخزن

جدول ۱- متوسط آورد ورودی به مخازن در ماه‌های مختلف ۵ سال آماری خشک (میلیون متر مکعب)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
کارون ۴	۹/۲۲	۷/۰۲	۵/۴۹	۶/۰۳	۳۲/۱۸	۷۶/۲۵	۶۵/۰۶	۲۸/۱۹	۲۶/۴۳	۳۳/۹۸	۲۷/۹۳	۱۱/۵۸
کارون ۵	۶۰/۷۰	۵۵/۱۰	۸۵/۰۰	۹۴/۳۰	۱۵۲/۴۰	۱۱۹/۸۰	۳۰۲/۴۰	۳۳۸/۰۰	۱۶۰/۳۰	۸۷/۷۰	۶۳/۸۰	۷۰/۷۰
بازفت	۴۳/۷۰	۳۲/۹۰	۶۰/۷۰	۴۸/۸۰	۹۱/۹۰	۱۵۵/۸۰	۲۹۳/۴۰	۲۲۰/۳۰	۱۴۲/۴۰	۹۱/۴۰	۶۵/۹۰	۴۹/۲۰

جدول ۲- متوسط نیاز ماهانه مخازن (میلیون متر مکعب)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
کارون ۴	۴۰۳/۶۰	۲۴۹/۹۰	۱۷۶/۰۰	۱۴۸/۶۰	۱۶۹/۷۰	۲۹۳/۰۰	۴۳۷/۲۰	۵۶۲/۲۰	۶۴۵/۴۰	۶۹۸/۸۰	۶۶۶/۰۰	۵۷۴/۲۰
کارون ۵	۱۸۲/۰۰	۱۴۷/۵۰	۱۰۵/۴۰	۱۰۸/۲۰	۹۹/۲۰	۱۶۹/۵۰	۲۳۹/۴۰	۲۴۸/۵۰	۲۲۰/۱۰	۲۶۶/۴۰	۲۶۹/۳۰	۲۴۷/۴۰
بازفت	۱۰۶/۱۰	۱۱۲/۸۰	۱۰۱/۴۰	۸۶/۷۰	۸۵/۴۰	۱۷۴/۸۰	۲۱۱/۴۰	۱۸۸/۸۰	۱۶۰/۲۰	۲۰۰/۴۰	۱۸۷/۷۰	۱۴۹/۲۰

جدول ۳- خلاصه اطلاعات سیستم سه‌مخزنه مورد بررسی

نام مخزن	مجموع نیاز سالانه (میلیون مترمکعب)	میانگین جریان سالانه ورودی (میلیون مترمکعب)	حجم مخزن در رقوم حداقل (میلیون مترمکعب)	حجم مخزن در رقوم حداکثر (میلیون مترمکعب)
کارون ۴	۶۹۸/۸۲	۵۴۰/۲۰	۱۴۴۱/۲۹	۲۱۹۰/۰۰
کارون ۵	۲۶۹/۳۴	۲۴۶۹/۱۹	۱۲۲۰/۸۱	۲۰۱۳/۱۵
بازفت	۲۱۱/۴۲	۲۰۱۲/۶۰	۱۴۲/۱۵	۴۵۰/۳۰

جریان‌های ورودی به مخازن کارون ۵ و بازفت و جریان میان‌حوضه‌ای در نظر گرفته شده است. حجم اولیه مخزن برابر حجم متوسط آن در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نشان‌دهنده مقادیر رهاسازی مخزن کارون ۴، استخراج شده از دو مدل شبیه‌سازی WEAP و MODSIM و نرم‌افزار بهینه‌سازی غیرخطی Lingo ۸/۰، با تابع هدف

نتایج و بحث

بررسی نحوه عملکرد مدل‌ها در سیستم تک مخزنه در ابتدا برای مقایسه نحوه عملکرد دو مدل شبیه‌سازی WEAP و MODSIM، بهره‌برداری از یک مخزن و بدون بررسی اثر مخازن دیگر بر آن، بررسی شد. برای این منظور مقدار جریان ورودی به مخزن کارون ۴ برابر مجموع

جدول ۴- مقایسه معیارهای کارآیی مخزن کارون ۴ در بهره

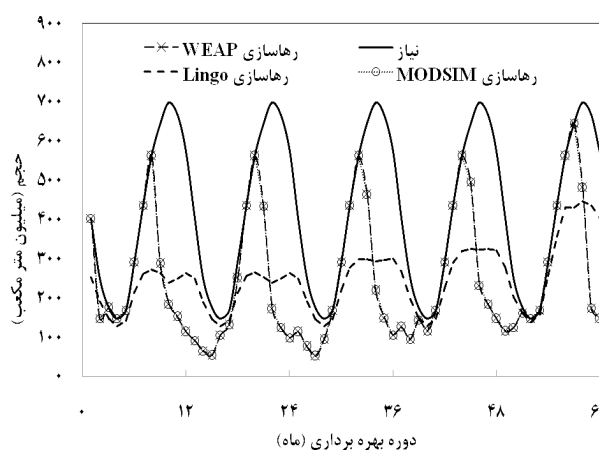
بردارای به روش‌های مختلف			
Lingo	MODISM & WEAP	برتری مدل Lingo	
۸/۵۷	۱۳/۹۳	۳۸	شاخص کمبود نسبی
۵۸/۹۹	۵۸/۹۹	۰	اعتمادپذیری حجمی
۷۰/۰۰	۳۸/۳۳	۸۳	اعتمادپذیری زمانی
۰/۵۱	۰/۸۳	۳۹	آسیب‌پذیری
۰/۳۲	۰/۱۶	۱۰۰	برگشت‌پذیری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار اعتمادپذیری حجمی سیستم تک مخزنه کارون ۴ دقیقاً برابر با مقدار این شاخص حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی است. در صورتی که تفاوت اعتمادپذیری زمانی بهینه با اعتمادپذیری زمانی مدل شبیه‌سازی بسیار زیاد است (اختلاف ۸۳٪ است). تفاوت شاخص‌های کمبود و آسیب‌پذیری در دو حالت حدود ۳۸٪ است. همچنین اختلاف برگشت‌پذیری در دو حالت ۱۰۰٪ است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که در دوره‌های خشک، چنانچه هدف رسیدن به اعتمادپذیری مناسب باشد، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های بهینه‌سازی باشد. ولی اگر هدف، بهره‌برداری سیستم با مقدار مناسب برگشت‌پذیری، آسیب‌پذیری، اعتمادپذیری زمانی و یا کمبود باشد، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، مقداری خطا در پی خواهد داشت، که این خطا در شاخص برگشت‌پذیری کمتر از سایر معیارها است.

بررسی نحوه عملکرد مدل‌ها در سیستم چند مخزنه

برای بررسی عملکرد این مدل‌ها در سیستم‌های چند مخزنه، از سیستم سه مخزنه بازفت، کارون ۵ و کارون ۴ استفاده شده است. تفاوت اصلی در نحوه عملکرد دو مدل شبیه‌سازی WEAP و MODSIM در سیستم‌های متشکل از چند عضو، در نحوه تخصیص آب به نیازهای با اولویت‌های^۲ متفاوت است. به این ترتیب که در MODSIM، اگر اولویت‌ها یکسان باشد ابتدا تخصیص^۳ به نیازهای بالادست و از چپ به راست، صورت می‌گیرد و مازاد آب (در صورت موجود بودن) به نیازهای پایین‌دست تخصیص می‌یابد. ولی در صورتی که

حداقل کردن کمبود در طول کل دوره است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر رهاسازی حاصل از دو مدل شبیه‌سازی یکسان هستند. در بررسی مشاهده شد که برنامه بهره‌برداری مدل‌های شبیه‌سازی فوق‌الذکر، همان سیاست بهره‌برداری استاندارد^۱ (SOP) است. در سیستم مخزن، ساده‌ترین قاعده بهره‌برداری، SOP (لاکس و استدینجر، ۱۹۸۱) است. در این سیاست رهاسازی از مخزن فقط براساس نیاز هر دوره انجام می‌پذیرد. اگر آب کافی برای رفع نیاز موجود نباشد، مخزن خالی می‌شود و اگر آب بیش از نیاز موجود باشد، در مخزن ذخیره شده و سپس سرریز خواهد کرد. این روش فاقد آینده‌نگری لازم برای مدیریت کارا در بهره‌برداری از مخزن است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هر چند که در برخی دوره‌ها مقدار رهاسازی تا حدی به مقدار نیاز نزدیک شده است، اما این خود موجب شده که برخی دیگر از دوره‌ها با کمبودهای شدید مواجه شوند.



شکل ۳- مقدار رهاسازی از مخزن کارون ۴ با استفاده از مدل‌های WEAP، MODSIM و Lingo

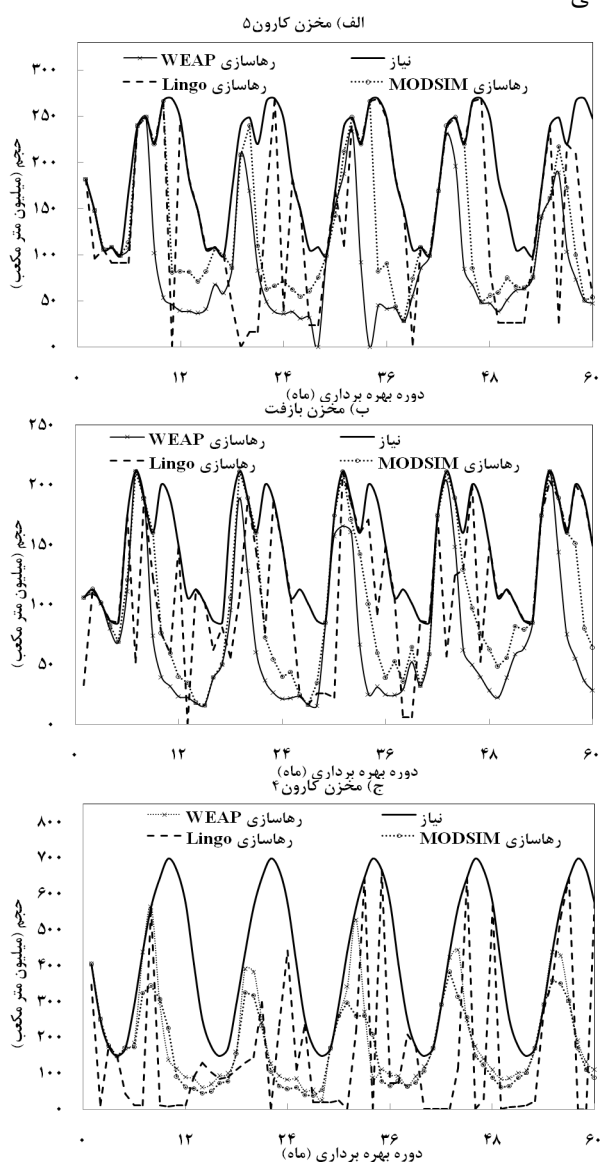
در اکثر دوره‌ها، اختلاف فاحشی بین مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی وجود دارد که این امر با توجه به تفاوت عملکرد روش‌های مختلف، بدیهی است. مدل بهینه‌سازی برای این مثال، با توابع هدف مختلف، اجرا شده و بهترین مقادیر ممکن برای هر یک از معیارهای فوق‌الذکر محاسبه شده است. در جدول ۴، این مقادیر ارائه شده‌اند.

^۲- Priorities

^۳- Allocation

^۱- Standard operation policy

ندارد، مدل MODSIM آب بیشتری به نیازهای مخازن بازفت و کارون ۵ تخصیص می‌دهد درحالی‌که آب تخصیص یافته به مخزن کارون ۴ کمتر از مدل WEAP است. در مدل بهینه‌سازی در اکثر دوره‌ها (۴۲ دوره) مقدار آب رهاسازی شده مخازن بالادست بیشتر از مدل‌های شبیه‌سازی است در صورتی‌که در مخزن پایین دست در ۳۵ دوره مدل‌های شبیه‌سازی مقدار آب بیشتری را رهاسازی می‌کنند.



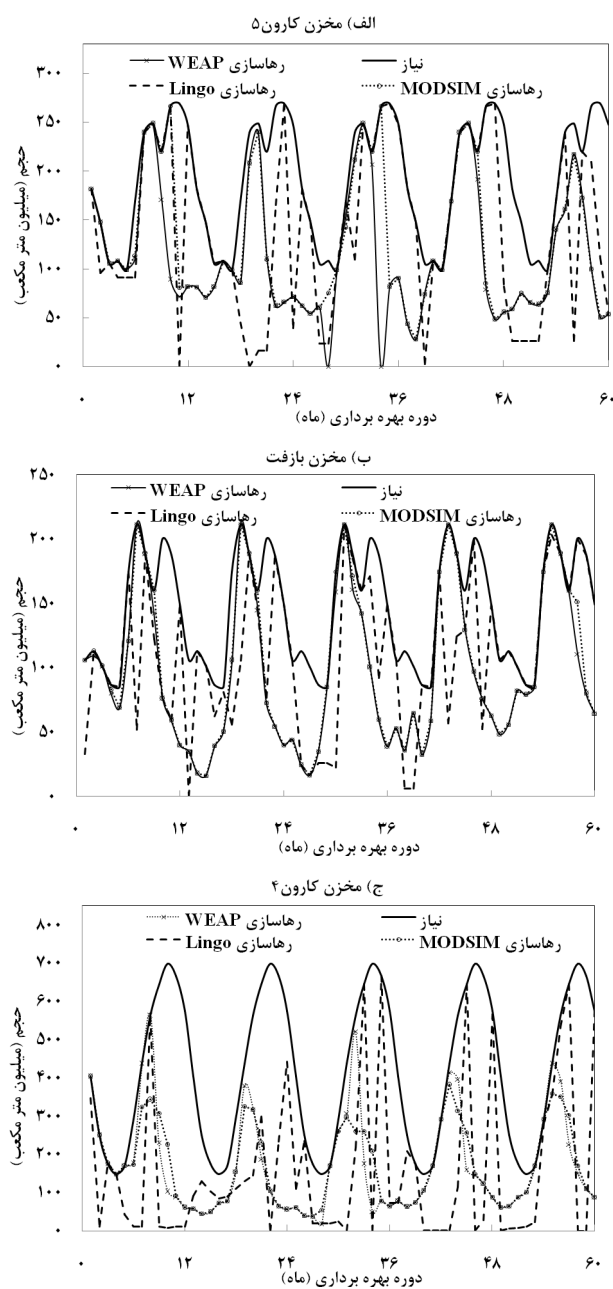
شکل ۴- مقادیر آب رهاسازی از سیستم سه مخزنه با اولویتهای یکسان برای هر سه مخزن=۱

با مقایسه شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که مقادیر رهاسازی مدل MODSIM با تغییر اولویت‌بندی، تغییر

اولویت‌ها متفاوت باشد، تخصیص منابع آبی به ترتیب اولویت‌بندی صورت می‌گیرد. به این ترتیب نیازی که اهمیت بیشتری (عدد اولویت کوچکتری) داشته باشد و کمبود آن مشکلات بیشتری ایجاد کند، اولویت بیشتری برای تخصیص دارد و عدد اولویت آن کوچکتر است. اما، در مدل WEAP نحوه عملکرد کمی متفاوت است. به طوری‌که اگر اولویت‌های یکسان بین نیازهای مختلف وجود داشته باشد، درصد تأمین نیاز همه نیازهای مختلف یکسان است و اگر اولویت‌ها متفاوت باشد، همانند مدل MODSIM نیاز با عدد اولویت کوچکتر مقدار بیشتری آب را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین در این تحقیق مبنای کار را بررسی نحوه عملکرد دو مدل شبیه‌سازی با در نظر گرفتن اولویت‌های مختلف برای مخازن موجود در سیستم قرار داده و هر سناریو با در نظر گرفتن مقدار ضریب آب برگشتی^۱ ۵۰ درصد (ضریب ۰/۵) بررسی شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ و ۶، مقدار آب رهاسازی شده از سه مخزن بازفت، کارون ۵ و کارون ۴ با اولویت‌های مختلف و همچنین مقدار آب رهاسازی شده بهینه با تابع هدف حداکثر کردن اعتمادپذیری حجمی کل سیستم نشان داده شده است. از آنجا که اختلاف مقدار اعتمادپذیری حجمی ناشی از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی اندک است، مقادیر رهاسازی شده مدل بهینه‌سازی با این تابع هدف جهت مقایسه در شکل استفاده شده است.

در شکل ۴، ملاحظه می‌شود که در مخازن بازفت و کارون ۵ که در بالادست قرار دارند و ارتباطی با یکدیگر و مخزن پایین دست ندارند، مقادیر رهاسازی حاصل از نرم‌افزار MODSIM نسبت به مدل WEAP بیشتر است. در حالی‌که در مورد مخزن کارون ۴، در اکثر دوره‌ها، مقدار رهاسازی مدل MODSIM کمتر است. علت آن این است که در این اولویت‌بندی (اولویت یکسان برای هر سه مخزن)، در مدل MODSIM ابتدا آب به مخازن بالادست تخصیص داده شده و مازاد آب به مخزن پایین دست انتقال داده شده است. در صورتی‌که در مدل WEAP، هدف تخصیص درصدهای یکسانی از آب موردنیاز است. بنابراین مقدار آب تخصیص یافته به مخازن بالادست در صورت کمبود، کاهش می‌یابد. به این ترتیب در دوره‌هایی که آب کافی جهت تخصیص وجود

^۱- Return Flow



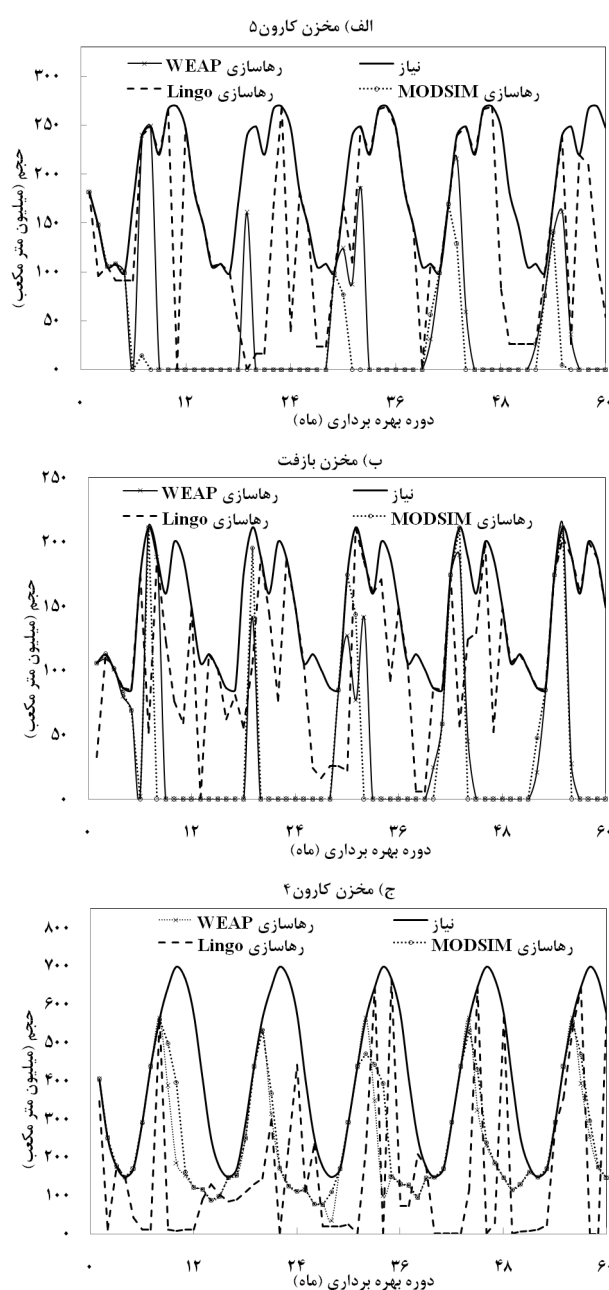
شکل ۵- مقادیر آب رهاسازی شده از سیستم سه مخزنه با اولویت‌های یکسان مخازن بالادست = ۱ و اولویت مخزن پایین دست = ۲

نکرده است. بنابراین تعیین اولویت ۱ برای هر سه مخزن یا تعیین اولویت ۱ برای مخازن بالادست و اولویت ۲ برای مخزن پایین دست، نتایج یکسانی در پی خواهد داشت. در این اولویت‌بندی نیز مطالبی که در حالت اولویت‌بندی یکسان برای هر سه مخزن ذکر شد، صادق است. با مقایسه مقادیر رهاسازی ناشی از مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مشخص می‌شود که مدل بهینه‌سازی برای مخازن بالادست در اکثر دوره‌ها (۱۳ دوره) مقدار بیشتری را نتیجه می‌دهد در صورتی که برای مخزن پایین دست مقدار آب رهاسازی شده توسط مدل‌های شبیه‌سازی در ۳۴ دوره بیشتر از مدل بهینه‌سازی است.

در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که با اختصاص اولویت بالاتر به مخزن پایین دست (مخزن کارون ۴)، مقادیر رهاسازی این مخزن، با استفاده از مدل‌های WEAP و MODSIM جواب‌های تقریباً یکسان می‌دهد. از آنجاکه به مخزن کارون ۴ اولویت بیشتری اختصاص یافته است، بنابراین ابتدا آب موجود در کل سیستم، برای تأمین نیاز این مخزن استفاده می‌شود. در مدل WEAP، آب به گونه‌ای تخصیص می‌یابد که درصد یکسانی از آب ذخیره شده در مخازن بالادست جهت تأمین نیاز مخزن پایین دست استفاده شود. در صورتی که در مدل MODSIM، آب موجود ابتدا برای تأمین نیاز مخزن سمت چپ (مخزن بازفت) استفاده شده و مازاد آن به مخزن کارون ۵ منتقل می‌شود. به همین دلیل مقادیر آب تخصیص یافته به مخازن بالادست که اولویت کمتری دارند در این دو مدل متفاوت است. همچنین در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که تعداد دوره‌های شکست و مقدار کمبود ناشی از مدل MODSIM بیشتر از مدل WEAP است. در صورت استفاده از مدل بهینه‌سازی مقدار رهاسازی مخازن بالادست در همه دوره‌ها بیشتر از مدل‌های بهینه‌سازی خواهد بود در صورتی که برای مخزن پایین دست، مدل‌های شبیه‌سازی در ۴۰ دوره مقدار آب رهاسازی شده بیشتری را نسبت به مدل بهینه‌سازی نتیجه می‌دهند.

یکسان مدل MODSIM در این دو حالت اولویت بندی است. در واقع این مدل حتی زمانی که اولویت همه اجزاء سیستم یکسان باشد، با توجه به مکان قرارگیری مخزن، تخصیص را انجام می دهد. استفاده از هر دو مدل، در صورتی که اولویت مخزن پایین دست بیشتر باشد، کمبود بسیار بیشتری (حدود ۳۰٪) را برای کل سیستم نتیجه می دهد. مشاهده می شود که در حالتی که یک تابع هدف برای حداقل کردن کمبود نسبی کل سیستم، در نظر گرفته می شود در مقایسه با زمانی که مقدار کمبود بهینه تک تک مخازن (بدون در نظر گرفتن اثر سایر مخازن) محاسبه می شود، مقدار کمبود مخازن بالادست تقریباً ثابت می ماند. در صورتی که کمبود مخزن پایین دست که حجم بیشتری دارد، بیشتر می شود. علت این امر این است که مخزن پایین دست حجم مخزن بزرگتری داشته و وظیفه تأمین نیاز بیشتری را برعهده دارد. زمانی که بهره برداری از کل سیستم برای تأمین نیاز این مخزن صورت گیرد، مقدار کمبود کمتری نتیجه می شود. در صورتی که اگر هدف کاهش میزان کمبود نسبی کل سیستم باشد چون آب موجود در سیستم برای تأمین کلیه نیازها مورد استفاده قرار می گیرد، کمبود نسبی مخزن پایین دست افزایش نسبتاً زیادی می یابد. بنابراین اگر هدف از بهره برداری تأمین نیاز مخزن پایین دست باشد، بهتر است بهینه سازی تک مخزن اجرا شود یا با در نظر گرفتن خطای ۴۰٪ از نرم افزارهای شبیه سازی با در نظر گرفتن اولویت کمتر مخزن پایین دست استفاده شود. در صورتی که بهینه سازی برای کل سیستم صورت گیرد، مقدار کمبود مخزن پایین دست بیشتر از دو برابر می شود.

بهینه سازی آسیب پذیری کل سیستم نسبت به بهینه سازی آسیب پذیری هر یک از اجزا به صورت جداگانه منجر به حصول مقادیر بهتری برای تک تک اجزای بالادست سیستم می شود. درباره این شاخص نیز می توان استنباط کرد که مخزن پایین دست به دلیل اهمیت بیشتر، اگر جداگانه بررسی شود، آسیب پذیری کمتری می دهد. در صورت استفاده از مدل های شبیه سازی میزان آسیب پذیری کل و هر یک از اجزای سیستم نسبت به مقدار بهینه اختلاف زیادی دارد (۲ برابر). بنابراین در صورتی که هدف از بهره برداری رسیدن به آسیب پذیری مناسب برای سیستم باشد، استفاده از روش های شبیه سازی توصیه نمی شود.



شکل ۶- مقادیر آب رهاسازی شده از سیستم سه مخزنه با اولویت های یکسان مخازن بالادست = ۲ و اولویت مخزن پایین دست = ۱

در جدول ۵، کلیه پارامترهای محاسبه شده برای تک تک مخازن و کل سیستم آورده شده است. از این جدول برای مقایسه عملکرد روش ها و نتیجه گیری نهایی استفاده شده است. نتایج مربوط به مدل MODSIM، در حالتی که اولویت هر سه مخزن برابر و حالتی که اولویت مخازن بالادست ۱ و مخزن پایین دست برابر ۲ است، یکسان است و علت آن عملکرد

جدول ۵- مقایسه معیارهای کارآیی مختلف برای سیستم سه مخزنه

شاخص کمبود		اعتمادپذیری حجمی (%)	اعتمادپذیری زمانی (%)	آسیب‌پذیری	برگشت‌پذیری		
تک مخزن بررسی	بازفت	۱۰/۳۸	۷۵/۲۰	۲۸/۳۳	۰/۸۴	۰/۱۶	WEAP & MODSIM
	کارون ۵	۹/۳۴	۷۲/۴۹	۳۰/۰۰	۰/۸۱	۰/۲۱	
	کارون ۴	۱۳/۹۳	۵۸/۹۹	۳۸/۳۳	۰/۸۳	۰/۱۶	
تک مخزن بررسی	بازفت	۴/۱۲	۷۵/۲۰	۲۳/۶۷	۰/۳۲	۰/۱۵	Lingo 8.0
	کارون ۵	۴/۲۲	۷۲/۴۹	۱۵/۰۰	۰/۲۹	۰/۱۳	
	کارون ۴	۸/۵۷	۵۸/۹۹	۷۰/۰۰	۰/۵۱	۰/۳۲	
سیستم مخازن بررسی کل	بازفت	۴/۳۴	۷۵/۲۰	۲۲/۵۰	۰/۵۳	۰/۱۴	Lingo 8.0
	کارون ۵	۴/۲۲	۷۲/۴۹	۱۱/۶۷	۰/۵۳	۰/۱۲	
	کارون ۴	۱۸/۹۸	۳۷/۸۶	۲۰/۶۳	۰/۵۳	۰/۰۷	
	کل سیستم	۲۷/۵۴	۵۳/۸۸	۲۱/۵۰	۰/۵۳	۰/۰۷	
اولویت هر سه مخزن = ۱	بازفت	۱۲/۳۷	۶۷/۹۲	۲۱/۶۷	۰/۸۴	۰/۱۳	MODSIM
	کارون ۵	۱۱/۸۶	۶۴/۶۶	۲۵/۰۰	۰/۸۲	۰/۲۰	
	کارون ۴	۲۱/۸۸	۴۰/۹۳	۸/۳۳	۰/۹۰	۰/۰۵	
	کل سیستم	۴۶/۱۱	۵۲/۱۸	۱۸/۳۳	۰/۹۰	۰/۰۵	
اولویت مخازن بالادست = ۱ و مخزن پایین دست = ۲	بازفت	۱۲/۳۷	۶۷/۹۲	۲۱/۶۷	۰/۸۴	۰/۱۳	MODSIM
	کارون ۵	۱۱/۸۶	۶۴/۶۶	۲۵/۰۰	۰/۸۲	۰/۲۰	
	کارون ۴	۲۱/۸۸	۴۰/۹۳	۸/۳۳	۰/۹۰	۰/۰۵	
	کل سیستم	۴۶/۱۱	۵۲/۱۸	۱۸/۳۳	۰/۹۰	۰/۰۵	
اولویت مخازن بالادست = ۲ و مخزن پایین دست = ۱	بازفت	۴۳/۴۴	۲۵/۴۸	۶/۶۷	۱/۰۰	۰/۰۷	MODSIM
	کارون ۵	۴۷/۶۸	۱۳/۰۸	۱۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۹	
	کارون ۴	۱۲/۲۹	۶۰/۲۱	۱۸/۳۳	۰/۸۱	۰/۱۲	
	کل سیستم	۱۰۳/۴۰	۴۱/۵۳	۱۱/۶۷	۱/۰۰	۰/۰۷	
اولویت هر سه مخزن = ۱	بازفت	۲۰/۶۳	۵۱/۵۱	۱۰/۰۰	۰/۸۷	۰/۰۹	WEAP
	کارون ۵	۲۰/۳۶	۴۸/۱۷	۱۱/۶۷	۱/۰۰	۰/۰۹	
	کارون ۴	۱۹/۲۸	۴۶/۸۲	۲۱/۶۷	۰/۸۷	۰/۱۱	
	کل سیستم	۶۰/۲۷	۴۸/۰۷	۱۴/۴۴	۱/۰۰	۰/۰۹	
اولویت مخازن بالادست = ۱ و مخزن پایین دست = ۲	بازفت	۱۲/۵۶	۶۶/۷۰	۲۱/۶۷	۰/۸۴	۰/۱۷	WEAP
	کارون ۵	۱۴/۳۶	۵۹/۲۹	۱۸/۳۳	۱/۰۰	۰/۱۶	
	کارون ۴	۲۲/۹۴	۴۱/۶۰	۲۱/۶۷	۰/۹۳	۰/۱۱	
	کل سیستم	۴۹/۸۶	۵۰/۹۵	۲۰/۵۶	۱/۰۰	۰/۱۱	
اولویت مخازن بالادست = ۲ و مخزن پایین دست = ۱	بازفت	۴۱/۱۶	۲۷/۸۲	۱۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۹	WEAP
	کارون ۵	۴۱/۲۲	۲۴/۳۴	۱۱/۶۷	۱/۰۰	۰/۰۹	
	کارون ۴	۱۴/۲۹	۵۶/۴۴	۳۸/۳۳	۰/۸۶	۰/۱۴	
	کل سیستم	۹۶/۶۷	۴۲/۷۵	۲۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۹	

اگر بهینه‌سازی بدون در نظر گرفتن اثر مخازن بالادست اجرا شود اعتمادپذیری زمانی مخزن پایین دست به اندازه زیادی افزایش می‌یابد. توجه این مسئله مانند موارد قبلی است.

در صورتی که هدف افزایش اعتمادپذیری کل سیستم باشد، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مقداری خطا، قابل جایگزینی است (حداکثر خطا ۰.۴٪ است). با

بازده کلی طرح. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه تهران.

- 2- Amani A. 2004. Modelling Water Resource Management in Lake Naivasha. M.Sc. Desertation, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- 3- Askew A. J. 1974. Optimum reservoir operating policies and the imposition of a reliability Constraint. *Water Resources Research* 10(1): 51-56.
- 4- Azevedo L.G.T. Gates T.K. Fontane D.G. Labadie J. and Porto R.L. 2000. Integration of water quantity and quality in strategic river Basin planning. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 126: 85-97.
- 5- Burn D.H. Venema H.D. and Simonovic S.P. 1991. Risk-based performance criteria for realtime reservoir operation. *Canadian J. of Civil Engineering* 18: 36-42.
- 6- Campbell S. Hanna R. Flug M. and Scott J. 2001. Modeling Klamath River system operations for quantity and quality. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 127(5): 284-294.
- 7- El-Beshri M. and Labadie J. 1994. Optimal conjunctive use of surface and groundwater resources in Egypt. *Proceedings of the VIII IWRA World Congress on Water Resources*, Ministry of Public Works and Water Resources, Cairo, Egypt.
- 8- 8-Faux J. Labadie J. and Lazaro R. 1986. Improving performance of irrigation/hydro projects. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 112(2): 205-224.
- 9- Fiering M.B. 1982. Alternative indices of resilience. *Water Resources Research* 18(1):33-39.
- 10- Graham L. Labadie J. Hutchison I. and Ferguson K. 1986. Allocation of augmented water supply under a priority water rights system. *Water Resources Research* 22(7): 1083-1094.
- 11- Hashimoto T. Stedinger J. R. and Loucks D. P. 1982. *Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation*. *Water Resources Research* 18(1): 14 - 20.
- 12- HEC, 1972. HEC-3 –Reservoir System Operation, Documentation and User Manual. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- 13- HEC, 1979. HEC-5 – Simulation of Flood Control and Conservation Systems, Documentation and User Manual. Hydrologic

ملاحظه مقادیر اعتمادپذیری حجمی کل سیستم ملاحظه می شود که اختلاف معنی داری بین این معیار در روش های بهینه سازی و شبیه سازی مورد استفاده وجود ندارد (حداکثر اختلاف ۲۵٪ است). ولی نکته قابل توجه افزایش اعتمادپذیری مخزن پایین دست، به خصوص در حالاتی که اولویت بیشتری به این مخزن داده شده است، می باشد. این اختلاف به علت در نظر گرفتن اهمیت بیشتر برای این مخزن، با در نظر گرفتن اولویت بندی در مدل های شبیه سازی می باشد.

مقدار شاخص کمبود مربوط به مخزن پایین دست نیز در سناریوهایی که این مخزن اولویت بیشتری داشته است، از مقدار بهینه آن کمتر شده است و در سایر حالات، اختلاف معنی داری ندارد. از آنجاکه مخزن پایین دست بزرگترین مخزن این سیستم است، و تأمین نیاز آن از اهمیت زیادی برخوردار است، استفاده از مدل های شبیه سازی برای کل سیستم، نسبت به مدل بهینه سازی، معیارهای این مخزن را بهبود می بخشد. به این ترتیب، با در نظر گرفتن مقداری خطا، استفاده از مدل های شبیه سازی MODSIM و WEAP، به جای مدل های بهینه سازی وجود دارد.

نتیجه گیری

نتایج حاکی از آن است که چنانچه تأمین نیاز مخزن پایین دست اولویت بیشتری داشته باشد، استفاده از هر یک از دو مدل شبیه سازی مورد بررسی، نتایج بهتری را در پی دارد. اما اگر اولویت هر سه مخزن یکسان باشد، استفاده از مدل های شبیه سازی کمبود بسیار بیشتری را نسبت به مدل بهینه سازی نتیجه می دهد. بنابراین بهتر است جهت بهره برداری در این حالت، از مدل بهینه سازی استفاده شود. چنانچه در بهره برداری، هدف بالابردن اطمینان پذیری و یا افزایش برگشت پذیری کل سیستم باشد، استفاده از مدل های شبیه سازی و بهینه سازی اختلاف معنی داری با یکدیگر نداشته و می توان از مدل های شبیه سازی استفاده کرد.

منابع

- ۱- بلوری یزدلی ی. ۱۳۸۷. تأثیر استخراج منحنی فرمان سیستم های چندمخزنی با اهداف مختلف در

- 21- ReVelle C. 1997. Chapter 1: Water resources: Surface water systems. Design and operation of civil and environmental engineering systems, C. ReVelle and A. E. McGarity, eds., Wiley, New York 1-39.
- 22- Simonovic S.P. 1992. Reservoir systems analysis: Closing gap between theory and practice. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 118(3): 262-280.
- 23- Srdjevic B. 1987. Identification of the Control Strategies in Water Resources Systems with Reservoirs by Use of Network Models, Ph.D, University of Novi Sad, Yugoslavia.
- 24- Srdjevic B. Medeiros Y.D.P. and Faria A.S. 2004. An objective multi-criteria evaluation of water management scenario. *Water Resources Management* 18: 35-54.
- 25- TWDB, 1972. SIMYLD-II-River Basin Simulation Program. Program Documentation. Texas Water Development Board, U.S.A.
- 26- SEI, 2001. WEAP (Water Evaluation and Planning): User Guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute, Boston, USA.
- 27- Wurbs R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 119(4):455-47.
- 28- Yeh W.W.G. 1985. Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. *Water Resources Research* 21(12):1797-1818.
- Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- 14- Labadie J. 2007. MODSIM 8.1: River Basin Management Decision Support System. Documentation and User Manual, Colorado State University, U.S.A.
- 15- Labadie J. 2004. Optimal operation of multi-reservoir systems: State of the art review. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 130(2): 93-111.
- 16- Loucks D.P. Stedinger J.R. and Haith J.H. 1981. *Water resources system planning and analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York.
- 17- Marques M. Lund J. Leu M. Jenkins M. Howitt R. Harter T. Hatchett S. Ruud N. and Burke S. 2006. Economically driven simulation of regional water systems. *J. of Water Resources Planning and Management*, ASCE 132(6): 468-479.
- 18- Momoh J.A. El-Hawary M.E. and Adapa R. 1999. A review of selected optimal power flow literature to 1993, Part II: Newton, linear programming and interior point methods. *IEEE Transaction System* 14: 105-111.
- 19- Moy W-S. Cohon J.L. and ReVelle C.S. 1986. A programming model for analysis of the reliability, resiliency and vulnerability of a water supply reservoir. *Water Resources Research* 22 (4): 489-498.
- 20- Raskin P. Hansen E. Zhu J. and Iwra M. 1992. Simulation of Water Supply and Demand in the Aral Sea Region. *Water International* 17: 55-67.