رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری ماهانه زمان حقیقی در مخازن

یاسمن بلوری‌یزدلی*[۱]، امید بزرگ‌حداد[۲]، نوید قاجارنیا[۳]، الهه فلاح مهدی‌پور[۳] و مجید خیاط‌خلقی[٤]

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران

[۲] دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

[۳] دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

[۴] دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۷/۱۱/۲۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۹/۱۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۹/۲۱)

چکیده

در این تحقیق، کاربرد برخی روش‌های بهره‌برداری زمان حقیقی بر روی سامانه تک‌مخزنی کارون ۴، به منظور کاهش کمبود مجموع نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی بررسی شده است. این روش‌ها شامل سیاست بهره‌برداری استاندارد[۱] (SOP)، برنامه‌ریزی پویای تصادفی[۲] (SDP) و انواع منحنی‌های فرمان بهره‌برداری با درجه‌های توانی مختلفی از آورد و حجم ذخیره مخزن می‌باشند. جهت رتبه‌بندی روش‌های مزبور از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه الکتر ۱ [۳] (ELECTRE I) با ترکیب شاخص‌های تابع هدف و معیارهای عملکرد کارآیی مخزن (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) استفاده شده است. این رتبه‌بندی در دو حالت مختلف با درنظر گرفتن: (۱) معیارهای کارآیی و (۲) تابع هدف و معیارهای کارآیی و با وزن‌های یکسان برای کلیهٔ شاخصها صورت گرفته‌است. بدین طریق پس از مقایسات صورت گرفته منحنی‌های فرمان مطرح شده به عنوان سیاست مناسب در بهره‌برداری به‌هنگام برگزیده شده‌اند که با آزمون منحنی برگزیده برای سال‌های آماری خشک، نرمال و مرطوب، اعتبار این مدل‌ها اثبات شده‌است.

واژه‌های کلیدی: بهره‌برداری به‌هنگام، معیارهای عملکرد مخزن، الکتر ۱، منحنی فرمان بهره‌برداری.

مقدمه

محدودیت منابع آب و ثابت بودن مقدار کل آن، افزایش جمعیت و رشد اقتصاد، روند صنعتی شدن شهرها و متعاقب آن روند روزافزون رشد تقاضا در زمینه‌های مختلف، مجموعه‌ای از عوامل مرتبط بهم را بوجود می‌آورد که مسئله بحران آب در آینده‌ای نه‌چندان دور را در ذهن متبلور می‌سازد. در این راستا مدیریت کارا و بهره‌برداری از امکانات موجود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یک سیاست بهره‌برداری شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره‌برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی گردد، تعیین می‌نماید[۱].

بسیاری از قواعد بهره‌برداری مخزن را می‌توان در مطالعات کلی باور و همکاران یافت. آنها در این مطالعه قاعده جیره‌بندی را تعریف نموده و با استفاده از روابط ریاضی تحلیل نمودند[۲]. ریول و همکاران اولین قاعده تصمیم‌گیری خطی[۴] (LDR) جهت طراحی و بهره‌برداری از مخزن را ارائه نمودند که در این رابطه حجم رهاسازی به صورت تابعی از حجم ذخیره مخزن می‌باشد[۳].

همچنین لاکس LDR دیگری مشابه با LDR ارائه شده توسط ریول و همکاران ارائه نمود که در این رابطه حجم رهاسازی از مخزن علاوه بر حجم ذخیره، تابعی از مقدار جریان ورودی به مخزن نیز می‌باشد[۴]. کلمز یکسری روابط جیره‌بندی[۵] در طراحی مخزن را مطرح نمود. وی دریافت در بهینه‌سازی جیره‌بندی نه تنها لازم است که تابع تلفات محدب و غیرخطی باشد، بلکه از نظر هیدرولوژی نیز بایستی دارای احتمال دوره‌های خشکسالی باشد[۵]. هاشیموتو و همکاران روابط جیره‌بندی در طراحی و بهره‌برداری مخزن را بیان کردند و شاخص‌های کارآیی اندازه‌گیری تأثیر عملکرد مخزن شامل اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری را ارائه نمودند[۶]. پررا و کدنر برخی از انواع قواعد بهره‌برداری در طراحی و بهره‌برداری از سامانه تأمین آب را بیان نمودند که شامل قواعد محدودیت، منحنی‌های ذخیره مطلوب، منحنی‌های فرمان، رهاسازی به عنوان تابعی از حجم ذخیره و جریان ورودی در مخازن و همچنین رهاسازی به

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۳۷۵۰۴۲۱۸۱ فاکس: ۰۲۶۳۲۲۴۱۱۱۹ Email: y_boulori@yahoo.com

عنوان تابعی از جریان‌های محیطی می‌باشد[۷]. نیلاکانتان و همکاران به برخی از قواعد بهره‌برداری مخازن از قبیل SOP، LDR، Pack Rule، Space Rule و قاعده جیره‌بندی اشاره نمودند[۸]. لابادیه استراتژی‌های حل مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه مخازن را در چهار دسته بهینه‌سازی استوکستیک ضمنی[۶] (ISO)، بهینه‌سازی استوکستیک صریح[۷] (ESO)، کنترل بهینه زمان واقعی[۸] و روش‌های برنامه‌ریزی کاوشی[۹] مورد بررسی قرار داده‌است[۹].

در این مطالعه، روش‌های مختلف سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن شامل SOP، SDP و انواع Rule-Curve با درجه‌های توانی مختلفی از آورد و حجم ذخیره مخزن استخراج گردیده‌است. جهت سنجش کارآیی مدل‌ها از معیارهای ارزیابی کارآیی مخزن که شامل اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری می‌باشد، استفاده گردیده و به‌منظور مقایسه آنها و انتخاب روش مناسب، از روش الکتر ۱ که از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد، استفاده شده‌است. بدین‌طریق پس از مقایسهٔ کلیه روش‌ها برای شاخص‌های مختلف، منحنی‌های فرمان بهره‌برداری پیشنهادی در این مطالعه، به عنوان روش مناسب ارائه گردیده‌است. این منحنی‌ها، میزان حجم رهاسازی ماهانه را به عنوان تابعی از حجم ذخیره اولیه و آورد رودخانه با درجه‌های توانی مختلفی از هر یک بیان می‌کنند.

سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن

به‌طورکلی بهره‌برداری از مخزن بر دو اساس صورت می‌گیرد: بهره‌برداری بلندمدت و بهره‌برداری زمان حقیقی (به‌هنگام). در بهره‌برداری بلندمدت، از یک سری تاریخی طولانی‌مدت داده‌ها جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری‌ها استفاده می‌گردد. به‌بیان دیگر، با به‌کارگیری یک آمار تاریخی طولانی‌مدت و فرض تکرار آن در آینده، بهینه‌سازی انجام می‌شود، در حالیکه در بهره‌برداری زمان حقیقی تصمیم‌گیری به صورت لحظه‌ای می‌باشد، یعنی با توجه به ورودی‌ها، نیاز و حجم ذخیره ابتدای دوره، تصمیم‌گیری برای آن دوره انجام می‌گیرد. بهره‌برداری کوتاه مدت (برای مثال در زمان سیلاب) از جمله انواع بهره‌برداری زمان حقیقی است که در آن رهاسازی با توجه به شرایط دوره حاضر و در بازه زمانی کوتاه و در جهت کنترل سیلاب بر اساس میزان ورودی به مخزن و میزان حجم ذخیره آب موجود در آن، صورت می‌پذیرد. حالت دوم دارای دقت کمتری نسبت به اولی می‌باشد، در حالیکه دارای این مزیت است که می‌توان در هر لحظه تصمیم‌گیری مناسب را ارائه نمود. بنابراین رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی می‌تواند به‌عنوان تابعی از برخی پارامترها از قبیل حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره جاری یا انتهای دوره قبل، آورد رودخانه در طول دوره جاری یا دوره‌های قبل، نیاز پایین‌دست دوره حاضر یا دوره قبل ذکر گردد. انتخاب هر یک از این پارامترها به اهداف مورد نظر و اهمیت هر یک در تعیین مقدار رهاسازی‌ها بستگی دارد. به‌طور کلی چند جمله‌ای عمومی زیر بیانگر رابطه بین حجم رهاسازی از مخزن و پارامترهایی است که در تعیین آن مؤثر می‌باشند.

$$R_t = a_i + b1_i \times S_t^1 + ... + bn_i \times S_t^n + c1_i \times Q_t^1 + ... + cn_i \times Q_t^n + d1_i \times D_t^1 + ... + dn_i \times D_t^n \quad (۱)$$

در این رابطه R_t = مجموعه‌ای از متغیرهای تصمیم (یعنی رهاسازی از مخزن) در طول دوره t، S_t = بردار حالت (حجم ذخیره) مخزن در آغاز دوره t، D_t = مقدار نیاز در طول دوره زمانی t و a_i، $b1_i$ ،...، bn_i ، $c1_i$ ،...، cn_i ، $d1_i$ ،...و dn_i = ضرایب ثابتی که می‌توانند به‌صورت هفتگی، ماهانه و یا فصلی تعریف شوند و در واقع متغیرهای تصمیم می‌باشند[۱۰].

روش‌های استخراج سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن

جهت استخراج سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن دو روش اساسی وجود دارد: شبیه‌سازی[۱۰] و بهینه‌سازی[۱۱]. مبنای شبیه‌سازی بر آزمون و خطا برای شناسایی جوابهای نزدیک به بهینه می‌باشد. مقدار هر یک از متغیرهای تصمیم انتخاب و مقادیر هدف حاصل ارزیابی می‌شود. اعتبار این روش‌ها در توانایی آنها برای حل مدلهای دارای روابط و قیدهای کاملاً غیرخطی می‌باشد. این مدلها به طور گسترده‌ای در طراحی و بهره‌برداری از مخازن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از شناخته‌شده‌ترین این مدل‌ها SOP می‌باشد. مدل‌های بهینه‌سازی، تصمیم بهینه برای بهره‌برداری از سامانه در برخورد با کلیه قیودات را به گونه‌ای تعیین می‌کنند که اهداف مورد نظر کمینه و یا بیشینه گردد. این مدلها معمولاً نیازمند فرضیاتی در

ساختار و قیودات مدل می‌باشند. به‌طورکلی بهینه‌سازی، همه گزینه‌های تصمیم‌گیری ممکن را جستجو می‌کند در حالیکه شبیه‌سازی به تعداد محدودی از گزینه‌های تصمیم ورودی محدود می‌شود[۱۱]. روش‌های بهینه‌سازی در بهره‌برداری مخازن، مجموعه‌ای از روش‌های متنوعی را در بر می‌گیرند که در چهار گروه کلی تقسیم‌بندی می‌گردد: مدل‌های ISO، مدل‌های ESO، کنترل بهینه زمان واقعی و روش‌های برنامه‌ریزی تکاملی[۹].

۱- *مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی ضمنی*: در این روش ابتدا سری‌های زمانی تاریخی طولانی یا سری‌های مصنوعی متعددی که بر مبنای خصوصیات احتمالاتی متغیر تولید شده‌اند، به صورت معین بهینه‌سازی می‌شود. سپس با استفاده از نتایج بهینه‌سازی، ارتباط میان تصمیم‌های بهینه با وضعیت‌های مختلف سامانه بوسیله روابط ریاضی گسترش می‌یابد. این رابطه به عنوان سیاست بهینه فرض می‌گردد و با استفاده از آن می‌توان برای بهره‌برداری از مخزن در شرایط نامشخص آینده تصمیم‌گیری نمود. از انواع این مدل‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی خطی اشاره نمود.

بسیاری از مسائل بهینه‌سازی سامانه مخازن، به‌طور واقعی نمیتوانند با استفاده از مدل‌های خطی یا استفاده از روش‌های خطی‌سازی حل شوند و بایستی مستقیماً به حل مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی پرداخت. این روش امکانات بسیار مناسبی برای تعریف مسئله در اختیار مدلساز قرار می‌دهد و امکان فرمول‌بندی ریاضی مسئله بدون نیاز به اغلب فرضیات محدود کننده در روش‌های دیگر می‌باشد و می‌تواند توابع هدف تفکیک‌ناپذیر و غیرخطی را به‌طور موثر مورد تحلیل قرار دهد. از معایب آن می‌توان به حجم محاسباتی بسیار بالا و در برخی موارد توقف نمودن در یک بهینه موضعی اشاره نمود[۱۲]. الگوریتم‌های حل بسیار قوی که در حل این مسائل مطرح شده‌اند، عبارتند از: برنامه‌ریزی خطی متوالی[۱۲] (SLP)، برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی[۱۳] (SQP) (یا روش لاگرانژین مصور[۱۴](PLM))، روش لاگرانژین تکاملی[۱۵] (یا روش مضارب[۱۶] (MOM)) و روش گرادیان کاهشی[۱۷] (GRG)[۹].

۲- *مدل‌های بهینه‌سازی تصادفی صریح*: این روش جهت بهره‌برداری، از توصیفات احتمالاتی جریان‌های رودخانه‌ای استفاده می‌کند. یعنی تصادفی بودن متغیرهای حالت مسئله به صورت مستقیم و با استفاده از توزیع‌های احتمالی آنها در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه اینکه سیاست‌های بهینه بدون نیاز به استخراج قواعد بهره‌برداری از نتایج بهینه‌سازی بدست می‌آیند. از انواع این مدل‌ها SDP می‌باشد.

بررسی داده‌های تاریخی رودخانه‌ها نشان‌دهنده آنست که معمولاً در دوره‌های هفتگی تا ماهانه، بین این داده‌ها رابطه‌ای به‌صورت فرآیند زنجیره مارکف مرتبه اول وجود دارد. در مدل‌های برنامه‌ریزی پویای تصادفی از این خاصیت استفاده شده و مقدار امید ریاضی تابع هدف، بر مبنای آن بهینه‌سازی می‌شود. در این روش فرض بر آنست که شرایط آینده با استفاده از یک فرآیند مارکف از نوع مانا و پایدار به‌صورت نامحدود قابل تعیین باشد. به‌عبارت دیگر دوازده تابع توزیع احتمالاتی جریان ماهانه مورد استفاده در این فرآیند در سال‌های متوالی به‌صورت ثابت استفاده میگردند تا پس از رسیدن به حالت پایدار، نتایج بدست آمده به‌عنوان سیاست‌های بهینه به‌کار گرفته شوند[۱۳].

۳- *کنترل بهینه زمان واقعی*: دو روش قبلی (ISO و ESO) می‌توانند جهت تعیین راهکارهای طولانی مدت هفتگی، ماهانه یا سالانه به‌کار گرفته شوند، در حالیکه مدل‌های بهینه‌سازی زمان حقیقی جهت دنبال نمودن راهکارهای طولانی‌مدت در افق‌های زمانی کوتاه‌تر ساعتی (یا کمتر) یا روزانه طراحی می‌شوند[۹].

۴- *روش‌های برنامه‌ریزی تکاملی و فراکاوشی*: بدلیل پیچیدگی‌ها و مشکلات مختلف در حل برخی مسائل بهینه‌سازی، تلاش‌های گسترده‌ای جهت استفاده از الگوریتم‌های تصادفی و تقریبی صورت گرفته است. هر چند این الگوریتم‌ها تضمینی جهت دستیابی به بهینه مطلق ندارند، اما عموماً می‌توان به کسب پاسخ نزدیک به بهینه امیدوار بود. هدف اصلی این الگوریتم‌های حل تقریبی، کاوش مؤثر و کارا در فضای جستجو به جای یافتن جواب‌های بهینه (نزدیک به بهینه) می‌باشد. این الگوریتم‌ها اغلب تقریبی و غیرقطعی می‌باشند، اما ممکن است با استفاده از تمهیداتی، از گیر افتادن در محدوده‌ای محصور در قسمت‌هایی از جستجو رهایی یابند. این روش‌ها با الهام از طبیعت و با مشارکت مفاهیم متفاوتی از حوزه‌های مختلف از جمله ژنتیک، هوش مصنوعی و... ابداع شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک[۱۸] (GA) اشاره نمود[۹]. بر اساس تحقیقاتی که در

خصوص استخراج منحنی‌های فرمان نظیر چنگ و چنگ، چنگ و همکاران و بزرگ‌حداد و همکاران صورت گرفته است، یک قالب کلی خطی درجه یک که رهاسازی را تابعی از حجم ذخیره مخزن و آبدهی ورودی به آن می‌نماید، درنظر گرفته شده است [۱۴، ۱۵ و ۱۶]. در حالی‌که ممکن است کارآیی انواع دیگر منحنی فرمان بیش از روش خطی اشاره شده باشد.

در تحقیق حاضر، جهت استخراج منحنی‌های فرمان بهره‌برداری پیشنهادی رابطهٔ (۱) شامل انواع منحنی‌های خطی و غیرخطی با درجات توانی یک، دو و سه از روش برنامه‌ریزی غیرخطی استفاده شده‌است. با توجه به اینکه این رابطه، بهره‌برداری به‌هنگام را ارائه می‌دهد، از دو روش بهره‌برداری به‌هنگام SDP و SOP نیز جهت مقایسه استفاده شده است.

رتبه‌بندی سیاست‌های بهره‌برداری

به‌منظور سنجش کارآیی روش‌های مختلف بهره‌برداری علاوه بر تابع هدف، از معیارهای کارآیی مخزن استفاده می‌گردد. معیارهای ارزیابی کارآیی روش‌های بهره‌برداری از مخزن عبارتند از:

۱- اعتمادپذیری: احتمال اینکه شکستی در بهره‌برداری از سامانه در مدت زمان مشخص رخ ندهد.

۲- برگشت‌پذیری: یعنی سامانه پس از وقوع یک شکست با چه سرعتی به وضعیت رضایت‌بخش خود باز می‌گردد.

۳- آسیب‌پذیری: یعنی شکست‌های محتمل سامانه، دارای چه وسعتی است. به‌بیان دیگر میانگین کمبودهای بیشینه که در هر سری شکست پیوسته اتفاق می‌افتد[۶].

به‌منظور مقایسه و انتخاب روش بهره‌برداری بهینه می‌توان از فرآیند تصمیم‌گیری استفاده نمود. در مطالعه حاضر از روش تصمیم‌گیری چندشاخصه الکترا۱ که کارآیی خود را در انواع مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، اثبات کرده، استفاده شده است. این روش اولین بار توسط بنایون و همکاران (۱۹۶۶) گسترش پیدا کرد. در این روش به جای رتبه‌بندی گزینه‌ها از مفهومی بنام مفهوم غیررتبه‌ای استفاده می‌شود. بدین‌صورت‌که مثلاً $A_k \to A_l$ بیانگر آنست که اگرچه گزینه‌های k و l هیچ ارجحیتی از نظر ریاضی بر یکدیگر ندارند، اما تصمیم‌گیرنده ریسک بهتر بودن A_k را بر A_l می‌پذیرد. در این روش کلیه گزینه‌ها با استفاده از مقایسات غیررتبه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و بدین‌طریق گزینه‌های غیرمؤثر حذف می‌شوند. مقایسات زوجی براساس درجه توافق از وزن‌ها و درجه اختلاف از مقادیر ارزیابی استوار بوده و تواماً برای ارزیابی گزینه‌ها مورد آزمون قرار می‌گیرند. بردار اهمیت شاخص‌ها، توسط تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود[۱۷]. در این روش بردار اهمیت شاخص‌ها ($\vec{w}$) توسط تصمیم‌گیرنده معرفی می‌گردد. این بردار در ماتریسی با m سطر و n ستون (m گزینه و n شاخص) ضرب می‌گردد. در ادامه محاسبات، با استفاده از اعداد ماتریس حاضر انجام پذیرفته و به عنوان ماتریس w نمایش داده می‌شود. در روش الکترا۱ مجموعه‌هایی با نام هماهنگ و ناهماهنگ در قالب ماتریسهایی با همین نام استفاده می‌گردد. جهت تشکیل ماتریس هماهنگ، هر عضو از آن با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$c_{ij} = \frac{w^{+} + 0.5w^{=}}{w^{+} + w^{=} + w^{-}} \qquad (۲)$$
$$i, j = 1,2,...,m$$

که در آن c_{ij} نمایانگر میزان برتری گزینه i بر j می‌باشد. w^{+} و $w^{=}$ به ترتیب مجموع وزنهایی است که گزینه i بر j برتری داشته و مساوی بوده است و w^{-} مجموع وزنهایی است که گزینه j بر i برتری داشته است. m نیز تعداد گزینه‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد.

جهت تشکیل ماتریس ناهماهنگ نیز، هر عضو از آن با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$d_{ij} = \frac{Max.(Interval \quad Where \quad j > i)}{k^{*}} \qquad (۳)$$
$$i, j = 1,2,...,m$$

که صورت کسر فوق بیشینه فاصله‌ای (اختلافی) که بین شاخصهای گزینه i و j، در صورتیکه شاخص مورد نظر j بر i برتری داشته است، می‌باشد. k^{*} بیشینه فاصله بین شاخص‌های گزینه‌های i و j بدون توجه به برتری شاخصهای مختلف آنها می‌باشد.

دو سطح p و q که به عنوان حدود آستانه بوده و اعدادی بین صفر و یک می‌باشند، توسط تصمیم‌گیرنده جهت مقایسه میزان تمایل به هماهنگی و ناهماهنگی مجموعه‌ها استفاده می‌گردد. به این ترتیب چنانچه $p=1$ درنظر گرفته شود، انتخاب فقط با توجه به هماهنگی گزینه‌ها و شاخصها خواهد بود. در نهایت نمودار تصمیم‌گیری بر اساس ماتریسهای هماهنگی و ناهماهنگی و مقادیر p و q بدست می‌آید. به این ترتیب چنانچه $c_{ij} \geq p$ و $d_{ij} \leq q$ باشد، گزینه i بر j برتری داشته و در نمودار تصمیم‌گیری ارتباطی از i به سمت j برقرار می‌شود. رتبه‌بندی گزینه‌ها، بر اساس بیشینه تعداد برتری (ارتباط) هر گزینه بدست آمده و گزینه‌ای (نقطه‌ای) که بیشترین ارتباط را داشته رتبه اول و برعکس گزینه‌ای که کمینه ارتباط را داشته رتبه آخر را کسب می‌نماید.

بهره‌برداری از مخزن کارون ۴

به‌منظور مقایسه روش‌های مختلف بهره‌برداری از مخزن، مسئله بهره‌برداری بهینه از مخزن بر روی سد کارون ۴ بررسی گردیده است. حوضه آبریز رودخانه کارون در غرب کشور ایران قرار گرفته که از ارتفاعات زاگرس سرچشمه می‌گیرد. این حوضه از شمال محدود به حوضه‌های آبریز گلپایگان و زاینده‌رود، از غرب به حوضه‌های کرخه و دز، از شرق به زاینده‌رود و کر و از جنوب به حوضه‌های آبریز رودخانه‌های مارون، زهره و جراحی محدود می‌شود. موقعیت سد کارون ۴ در بخش علیای رودخانه کارون و قبل از تلاقی این رودخانه به خرسان واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی در مختصات '۳۵ °۳۱ عرض شمالی و'۲۴ °۵۰ طول شرقی قرار دارد. متوسط جریان سالانه ورودی به مخزن ۵'۴۰۰/۲ میلیون‌مترمکعب تخمین زده شده و حجم کمینه سد ۱'۴۴۱/۲۹ و حجم بیشینه آن ۲'۱۹۰ میلیون‌مترمکعب است. اطلاعات آماری موجود در این حوضه ۴۳ سال می‌باشد که در این مطالعه ۴ سال آماری خشک انتخاب و بررسی گردیده است. میزان آبدهی متوسط ۴۳ ساله رودخانه و متوسط آبدهی ۴ سال آماری مورد بررسی و همچنین مقادیر نیاز ماهانه در جدول (۱) ارائه شده است. مقادیر نیاز ماهانه از مجموع نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی در منطقه حاصل شده است.

هدف در این مسئله کمینه‌سازی مجموع مجذور تفاضل (TSD) رهاسازی‌ها از نیاز (D_t) (مجموع نیاز شرب، صنعت و کشاورزی) در کل دوره در نظر گرفته شده است. با توجه به مفهوم اشاره شده، در رابطه (۴) رهاسازی هر دوره از نیاز آن کسر و به منظور استانداردسازی آن بر بر بیشینه نیاز موجود در کل دوره‌های بهره‌برداری تقسیم شده است.

جدول ۱: آبدهی و نیاز در محل مخزن کارون ۴ بر حسب میلیون‌مترمکعب

Month	Average Inflow		D_t
	4 years	43 Years	
Faravardin	660.2	986.7	437.2
Ordibehesht	651.3	830.6	562.2
Khordad	389.7	515.8	6545.4
Tir	274.1	337.5	698.8
Mordad	198.4	231.5	666
Shahrivar	146.2	169.2	574.2
Mehr	125.2	143.1	403.6
Aban	146.5	188.3	249.9
Azar	157.4	290.6	176
Day	162.3	254.7	148.6
Bahman	279.7	360.8	169.7
Esfand	535.1	673.2	292.9

$$\text{Min TSD} = \sum_{t=1}^{T}((R_t - D_t)/D_{\max})^2 \qquad (۴)$$

S.T.:

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - L_t(S_t, S_{t+1}) - SP_t \quad (for \quad t=1,...,T) \qquad (۵)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (for \quad t=1,...,T) \qquad (۶)$$

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad (for \quad t=1,...,T) \qquad (۷)$$

$$SP_t = \begin{cases} S_t + Q_t - R_t - S_{\max} & if \quad S_t + Q_t - R_t > S_{\max} \\ 0 & if \quad S_t + Q_t - R_t < S_{\max} \end{cases} \qquad (۸)$$

$$S_1 = S_T \qquad (۹)$$

که در آن TSD= مجموع مجذور تفاضل رهاسازی از نیاز در کل دوره، T= طول دوره بهره‌برداری، R_t= حجم

رهاسازی در طول دوره t برحسب میلیون‌مترمکعب، D_t= نیاز در طول دوره t برحسب میلیون‌مترمکعب، D_{max}= بیشینه نیازها، S_t= حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t برحسب میلیون‌مترمکعب، Q_t= جریان ورودی به مخزن در طول دوره t برحسب میلیون‌مترمکعب، L_t = تلفات مخزن شامل تبخیر، نشت و سایر افتهای موجود که مجموعه‌ای از معادلات ضمنی غیرخطی را در محاسبه ایجاد می‌نماید، SP_t= سرریز از بالای مخزن در طول دوره t برحسب میلیون‌مترمکعب، S_{min} = حجم کمینه مخزن جهت فراهم آوردن حجم مرده مخزن، S_{max}= حجم بیشینه مخزن به منظور درنظر گرفتن حجم کنترل سیلاب، R_{min} و R_{max}= بترتیب کمینه و بیشینه حجم خروجی از مخزن به منظور کنترل کیفیت آب و جلوگیری از بروز سیل در پایین‌دست مخزن می‌باشند. S_1= حجم ذخیره در ابتدای دورهٔ بهره‌برداری و S_T= حجم ذخیره در انتهای دورهٔ بهره‌برداری می‌باشد.

همچنین به منظور محاسبه تلفات مخزن منحنی حجم-سطح مخزن به صورت یک رابطه توانی درجه سه برازش یافته است که قابلیت تبدیل حجم مخزن به سطح مخزن متناظر با آن را در محدوده سطوح و احجام کمینه تا بیشینه مخزن دارا می‌باشد.

$$A_t = a_0 + a_1 \times S_t + a_2 \times S_t^2 + a_3 \times S_t^3 \quad (۱۰)$$

که A_t = سطح مخزن در دوره t ، a_0 ، a_1 ، a_2 و a_3 ضرایب ثابت تبدیل حجم ذخیره مخزن به سطح متناظر آن در دوره t می‌باشند.

مدل حاصل برای روش‌های SOP، SDP و ۱۵ منحنی فرمان با درجه‌های توانی مختلفی از آورد و حجم ذخیره مخزن مطابق با رابطه (۱) به‌عنوان بهره‌برداری به‌هنگام استخراج گردیده است. همچنین مقدار تابع هدف NLP نیز مطابق رابطه (۴) جهت تعیین مقدار بهینهٔ مطلق با استفاده از نرم‌افزار Lingo11 [۱۸] استخراج شده است که مقدار بهینهٔ سراسری را برابر ۲/۳۲۸ ارائه می‌دهد.

روش SDP، در چهار حالت متفاوت بررسی شده است که در همه حالتها، طبقه‌بندی حجم ذخیره براساس روش موران و طبقه‌بندی جریان ورودی براساس روش فراوانی مساوی می‌باشد: (الف) ۲۰ کلاس حجم ذخیره و ۵ کلاس آورد، به‌طوری‌که جهت استخراج ماتریس احتمال انتقال جریان، از ۴۸ ماه آمار مورد بررسی استفاده شده است و مقدار تابع هدف ۴/۰۶۴ می‌باشد. (ب) ۲۰ کلاس حجم ذخیره و ۲۰ کلاس جریان ورودی که ماتریس احتمال انتقال جریان مشابه حالت قبل در نظر گرفته شده است و مقدار تابع هدف ۴/۲۸۴ می‌باشد. (ج) ۲۰ کلاس حجم ذخیره و ۵ کلاس جریان ورودی، به‌طوری‌که در استخراج ماتریس احتمال انتقال جریان، از کل داده‌های آماری موجود که ۵۱۶ ماه (۴۳ سال) می‌باشد، استفاده شده و مقدار تابع هدف ۶/۰۸۴ شده است. (د) ۲۰ کلاس حجم ذخیره و ۲۰ کلاس جریان ورودی که ماتریس احتمال انتقال جریان مشابه حالت (ج) در نظر گرفته شده و مقدار تابع هدف ۴/۰۲۲ می‌باشد. نتایج حاصل به‌طور مختصر در جدول (۲) ارائه شده‌است.

جدول ۲: مقادیر تابع هدف برای حالت‌های مختلف SDP

Number of Months for Transferring Matrix	Number of Storage Classification	Number of Inflow Classification	TSD
48	20	5	4.064
48	20	20	4.284
516	20	5	6.084
516	20	20	4.022

منحنی‌های فرمان پیشنهادی در این مطالعه، مطابق با رابطهٔ (۱)، تا درجهٔ توانی سه برای کلیه حالت‌های ممکن استخراج شده است که رابطه (۱۱) نمونه‌ای از منحنی‌های مزبور می‌باشد.

$$R_t = a_i + b1_i \times S_t^1 + b2_i \times S_t^2 + b3_i \times S_t^3 + c1_i \times Q_t^1 + c2_i \times Q_t^2 + c3_i \times Q_t^3 \quad (۱۱)$$

در استخراج منحنی‌های فرمان، مشابه روش NLP از نرم‌افزار Lingo11 استفاده شده است. مقادیر تابع هدف حاصل از اجرای منحنی‌های فرمان بین مقادیر ۲/۳۸۲ برای قاعده Q3S3 تا ۲/۷۷۵ برای قاعده S1 متغیر می‌باشد. مقادیر تابع هدف و معیارهای کارآیی مخزن روش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برخی از این معیارها با نوع مثبت و برخی دیگر با منفی معرفی شده‌اند، که به ترتیب نشان‌دهنده معیارهایی هستند که مقادیر بیش‌تر و کم‌تر مقدار آن‌ها مطلوب می‌باشد.

با توجه به جدول مزبور، کمترین (بهترین) مقدار تابع هدف به منحنی Q3S2 اختصاص یافته و بیشترین مقدار

آن به SOP اختصاص یافته است که ساده‌ترین سیاست بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. به‌طور کلی مقادیر تابع هدف بدست آمده از منحنی‌های فرمان کمتر از سیاست SOP و SDP می‌باشد. با افزایش درجه توانی حجم ذخیره و یا آورد در منحنی‌های فرمان، مقدار تابع هدف به بهینه سراسری بدست آمده از NLP نزدیکتر می‌شود. به‌طوری‌که کمترین مقدار تابع هدف به‌ترتیب به منحنی‌های Q3S2، Q2S2، Q2S1 و Q3S3 اختصاص یافته است که نسبت به سایر روش‌ها در حدود رقم سوم اعشار متفاوت از یکدیگرند. اعتمادپذیری SOP از همه روش‌ها بیشتر (بهتر) می‌باشد و پس از آن منحنی S1 قرار گرفته است. منحنی‌های فرمان Q2S3 و Q3S3 اعتمادپذیری یکسانی با SDP داشته و در رده‌های بعدی واقع شده‌اند. همچنین برگشت‌پذیری منحنی Q2S3 بیشترین (بهترین) مقدار می‌باشد و منحنی Q1S3 و سیاست‌های SOP و SDP در رده‌های بعدی واقع شده‌اند.

جدول ۳: مقادیر تابع هدف و معیارهای کارآیی مخزن در روش‌های مختلف بهره‌برداری

Method	TSD	Reliability	Resiliency	Vulnerability
Criteria	Negative	Positive	Positive	Negative
SOP	6.324	0.417	0.179	0.745
SDP	4.022	0.229	0.163	0.639
S1-Rule	2.775	0.271	0.143	0.615
S2-Rule	2.600	0.188	0.154	0.567
S3-Rule	2.517	0.208	0.158	0.394
Q1-Rule	2.650	0.146	0.122	0.478
Q1S1-Rule	2.426	0.188	0.128	0.488
Q1S2-Rule	2.453	0.125	0.143	0.399
Q1S3-Rule	2.613	0.188	0.179	0.527
Q2-Rule	2.451	0.167	0.125	0.507
Q2S1-Rule	2.389	0.188	0.128	0.506
Q2S2-Rule	2.384	0.188	0.128	0.436
Q2S3-Rule	2.405	0.229	0.216	0.362
Q3-Rule	2.428	0.167	0.125	0.487
Q3S1-Rule	2.692	0.208	0.158	0.529
Q3S2-Rule	2.382	0.208	0.105	0.536
Q3S3-Rule	2.398	0.229	0.135	0.570

آسیب‌پذیری حاصل از منحنی‌های فرمان تقریباً مقادیر کمتری (بهتری) را نسبت به دو روش SOP و SDP ارائه می‌دهند، به‌طوری‌که منحنی Q2S3 کمترین (بهترین) مقدار این پارامتر را ارائه می‌دهد.

با توجه به منحنی‌های فرمان برگشت‌پذیری بیشتر (بهتر) و آسیب‌پذیری کمتری (بهتری) را ارائه می‌دهند، این مطلب نشان‌دهندهٔ اینست که این منحنی‌ها از شدّت کمبودهای بحرانی کاسته و تعداد دوره‌های کمبود را افزایش می‌دهند. در واقع بدین‌طریق نوعی جیره‌بندی صورت می‌گیرد که با ایجاد کمبودهای متوالی کوچک از ایجاد کمبودهای بحرانی جلوگیری می‌نماید.

با جمع‌بندی مطالب فوق می‌توان منحنی‌های فرمان و بویژه منحنی Q2S3 که در اکثر موارد بهتر از سایر منحنی‌ها ظاهر شده‌اند، را نسبت به دو سیاست دیگر بهتر دانست.

به‌منظور رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام، از تصمیم‌گیری چندشاخصهٔ الکتر یک، در دو حالت استفاده شده است. به این منظور روابط مربوط به الکتر۱، در نرم‌افزار Matlab برنامه‌نویسی شده و بر اساس آن خروجی‌ها مطابق جدول ۴ بدست آمده است.

الف- رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام براساس معیارهای عملکرد: در این حالت وزن کلیه شاخص‌ها یکسان و برابر ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در جدول (۴) ارائه شده است.

در این حالت SOP بهترین رتبه را کسب نموده است و منحنی‌های فرمان بهره‌برداری عموماً بین دو سیاست SOP و SDP قرار گرفته‌اند. همچنین می‌توان گفت تقریباً منحنی‌هایی که به حجم ذخیره مخزن وابستگی بیشتری دارند رتبه‌های بهتری داشته و قبل از SDP واقع شده‌اند.

جدول ۴: رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام براساس معیارهای عملکرد مخزن

Method	SOP	Q2S3	S3	S1	Q1S3	Q3S1
Rank	1	2	3	4	5	6
Method	Q2S2	Q3S3	Q1S1	S2	Q2S1	SDP
Rank	7	8	9	10	11	11
Method	Q3S2	Q3	Q1S2	Q2	Q1	
Rank	12	13	14	14	15	

برخی از روش‌ها رتبه‌های یکسانی کسب نموده‌اند که این بدلیل نزدیکی بسیار زیاد مقادیر شاخص‌ها در روش‌های مزبور به یکدیگر می‌باشد. SOP بدلیل تفاوت

بسیار زیاد شاخص اعتمادپذیری‌اش نسبت به سایر روش‌ها، برتری خود را بدست آورده است، برخلاف دو شاخص دیگر که در اکثر روش‌ها اختلافات ناچیزی را نشان می‌دهند. منحنی Q2S3 پس از SOP بهترین مقدار اعتمادپذیری را داشته و شاخص برگشت‌پذیری بهتر و همچنین آسیب‌پذیری کمتری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه می‌دهد. بنابراین بعد از SOP، در رتبه بهتری نسبت به سایر منحنی‌ها قرار گرفته است. SDP رتبه یکسانی با منحنی Q2S1 دارد.

ب- رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام براساس تابع هدف و معیارهای عملکرد: در این حالت وزن شاخصها برابر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل در جدول (۵) نمایش داده شده است، که در این قسمت با توجه به وارد شدن شاخص تابع هدف و با توجه به اختلاف بسیار زیاد مقدار این پارامتر برای سیاست SOP مشاهده می‌شود که این روش بدترین رتبه را به خود اختصاص داده است. SDP نیز که بعد از SOP بیشترین مقدار تابع هدف را داراست، در انتهای رتبه‌بندی‌ها قرار گرفته است. منحنی‌های فرمان تغییرات چندانی نداشته و بهترین رتبه به Q2S3 اختصاص یافته است. تقریباً می‌توان گفت که با کاهش درجه توانی حجم ذخیره نسبت به آورد رودخانه، پیشروی به سمت رتبه‌های نامناسب صورت می‌گیرد.

جدول ۵: رتبه‌بندی روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام براساس تابع هدف و معیارهای عملکرد مخزن

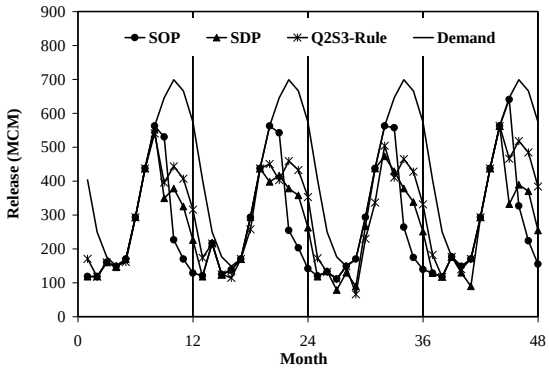
Method	Q2 S3	S3	S1	Q1 S3	Q3 S1	Q2 S2
Rank	1	2	3	4	5	6
Method	Q3 S3	Q1 S1	S2	Q2 S1	Q3 S2	Q3
Rank	7	8	8	9	10	11
Method	Q2	Q1 S2	Q1	SOP	SDP	
Rank	12	13	13	13	14	

بنابراین براساس نتایج بدست آمده از دو حالت مزبور، Q2S3 بهترین قاعده بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. پس از آن منحنی‌های دارای درجه توانی فرد، در رده‌های بعدی واقع شده‌اند. علّت وابستگی این منحنی‌ها به حجم ذخیره را می‌توان به خشک بودن دورهٔ آماری مورد بررسی وابسته دانست که وابستگی به حجم ذخیره را بیشتر از جریان ورودی می‌نماید. در جدول (۶) ضرایب ثابت ماهانه بدست آمده از منحنی Q2S3 ارائه شده است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته و جهت درک بهتر روند تغییرات حجم رهاسازی، نیاز و حجم ذخیره مخزن، نمودارهای هر یک برای برخی روش‌ها ترسیم شده است. این روش‌ها شامل SOP، SDP و Q2S3-Rule می‌باشند. شکل (۱) منحنی تغییرات حجم رهاسازی ماهانه و نیاز برای دوره‌های مورد مطالعه را نمایش می‌دهد که SOP کمترین مقدار حجم رهاسازی را در اکثر ماه‌های کمبود ارائه نموده است. SDP نیز مابین منحنی فرمان و SOP واقع شده است.

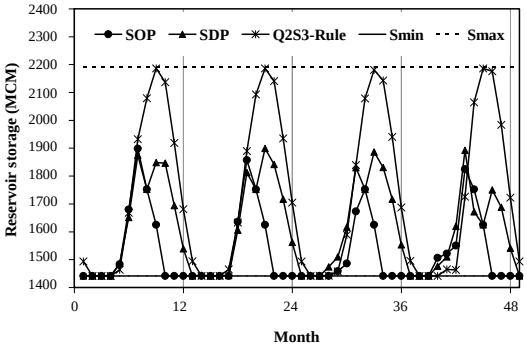
جدول ۶: متغیرهای تصمیم (ضرایب ثابت) بدست آمده از Q2S3-Rule

Coefficients	Q		
	a	c_1	c_2
Faravardin	0.00E+00	8.23E-01	0.00E+00
Ordibehesht	0.00E+00	0.00E+00	9.17E-04
Khordad	0.00E+00	4.71E-01	0.00E+00
Tir	0.00E+00	6.40E-01	0.00E+00
Mordad	0.00E+00	7.79E-01	5.89E-05
Shahrivar	0.00E+00	0.00E+00	6.53E-04
Mehr	0.00E+00	1.61E-01	6.65E-04
Aban	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Azar	0.00E+00	6.90E-01	1.11E-03
Day	1.44E+00	1.00E+00	0.00E+00
Bahman	3.05E-01	9.80E-01	7.45E-05
Esfand	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Coefficients	S		
	b_1	b_2	b_3
Faravardin	3.36E-01	9.37E-04	0.00E+00
Ordibehesht	7.56E-01	0.00E+00	1.65E-07
Khordad	2.75E-01	2.95E-04	0.00E+00
Tir	8.00E-03	1.97E-04	0.00E+00
Mordad	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Shahrivar	0.00E+00	0.00E+00	1.89E-07
Mehr	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Aban	0.00E+00	0.00E+00	1.49E-02
Azar	1.00E+01	5.00E+00	1.00E+00
Day	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Bahman	1.00E+01	0.00E+00	4.92E-01
Esfand	2.25E-01	5.86E-02	0.00E+00

همچنین در شکل (۲) منحنی تغییرات حجم ذخیره مخزن برای روش‌های نامبرده ارائه شده‌است.



شکل ۱: مقدار رهاسازی ماهانهٔ حاصل از روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام



شکل ۲: مقدار حجم ذخیرهٔ ماهانهٔ حاصل از روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام

همان‌طورکه در شکل مشاهده می‌شود، حجم ذخیره حاصل از SOP در اکثر ماه‌ها برابر حجم کمینه مخزن می‌باشد و پس از آن SDP کمترین حجم ذخیره را داراست. منحنی فرمان در اکثر ماه‌ها حجم ذخیره بیشتری داشته به‌طوری‌که به حجم بیشینه مخزن نزدیک می‌گردد.

آزمون مدل

در این بخش به‌منظور آزمون منحنی‌های فرمان استخراج شده، ضرایب ثابت ماهانه بدست آمده برای منحنی برگزیده (Q2S3) که در جدول (۶) ارائه شده است و همچنین منحنی‌های Q3S3، Q3S2 و Q2S2 برای یک سال آماری خشک (۵۰-۱۳۴۹)، نرمال (۷۵-۱۳۷۴) و مرطوب (۶۷-۱۳۶۶) آزمون شده و نتایج حاصل با مقادیر NLP، SOP و SDP مقایسه شده است. این نتایج در جدول (۷) نمایان می‌باشد.

جدول ۷: مقادیر تابع هدف حاصل از آزمون مدل با به‌کارگیری منحنی‌های فرمان،NLP، SOP و SDP

		TSD		
		Dry Year	Normal Year	Wet Year
	NLP	0.677	0.209	0.135
	SOP	1.575	0.892	0.712
	SDP	1.116	0.733	0.553
Rule curve	Q3S3-Rule	0.761	0.248	0.169
	Q3S2-Rule	0.762	0.226	0.124
	Q2S3-Rule	0.723	0.263	0.208
	Q2S2-Rule	0.737	0.301	0.219

همان‌طورکه مشاهده می‌شود، منحنی‌های فرمان نتایج مناسبی را ارائه نموده‌اند که برای هر سه سال پس از مقادیر بهینهٔ مطلق NLP واقع شده‌اند و پس از آن SDP کمبودهای مناسبی را ارائه نموده است. همچنین در کلیهٔ روش‌ها از سال خشک به سال مرطوب، میزان کمبودهای حاصل در کلیهٔ روش‌ها کاهش یافته است. بنابراین نتایج حاصل از آزمون مدل نیز کارآمدی منحنی‌های فرمان در بهره‌برداری به‌هنگام را نمایان می‌سازد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برخی روش‌های بهره‌برداری به‌هنگام جهت تأمین مجموع نیاز شرب، صنعت و کشاورزی بر روی مخزن کارون ۴ به کار گرفته شده است. این روش‌ها شامل SOP، SDP و انواع منحنی‌های فرمان بهره‌برداری با درجه‌های توانی مختلفی از آورد و حجم ذخیره مخزن می‌باشند. جهت استخراج منحنی‌های فرمان مطرح شده در این مطالعه از نرم‌افزار Lingo11 استفاده شده است. به‌منظور مقایسه مدلها، از چهار سال آماری نسبتاً خشک از ۴۳ سال آمار موجود در حوضه استفاده شده است. همچنین جهت رتبه‌بندی و مقایسه روش‌های مزبور، از روش چندشاخصه الکتر ۱ با به‌کارگیری شاخصهای تابع هدف و معیارهای عملکرد مخزن (اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری) استفاده شده‌است.

رتبه‌بندی روش‌ها ابتدا براساس معیارهای عملکرد مخزن به عبارتی سه شاخصه صورت گرفته و سپس با اضافه نمودن تابع هدف به صورت چهار شاخصه صورت پذیرفته است. تقریباً در هر دو حالت منحنی‌های فرمان مطرح شده، رتبه‌های مناسب و برتری را نسبت به روش‌های SDP و SOP بدست آورده‌اند. همچنین

منحنی‌هایی که وابستگی بیشتری به حجم ذخیره مخزن دارند، رتبه‌های برتری را کسب نموده‌اند.

همچنین با توجه به شاخصهای برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری بدست آمده، مشاهده گردید که تقریباً منحنی‌های فرمان مطرح شده بیشترین (بهترین) برگشت‌پذیری و کمترین (بهترین) آسیب‌پذیری را ارائه نموده‌اند که این مطلب بیانگر اینست که این منحنی‌ها با ایجاد کمبودهای کوچک در طول دوره بهره‌برداری از بروز کمبودهای بحرانی جلوگیری نموده‌اند.

در واقع منحنی‌های فرمان مطرح شده که بعنوان روابط شبیه‌ساز به‌کارگرفته شده‌اند، یکسری ضرایب ثابت ماهانه در طول دوره بهره‌برداری ارائه می‌دهند که بهره‌بردار می‌تواند با به‌کارگیری این ضرایب و همچنین پیش‌بینی جریان‌های آتی، تصمیم‌گیری مناسب را اتخاذ نماید. در مخزن مورد مطالعه منحنی Q2S3-Rule بعنوان منحنی مناسب انتخاب شده است که حجم مخزن به صورت رابطه توانی درجه سه و آورد رودخانه به صورت رابطه درجه دوم مطرح می‌باشد. آزمون منحنی برگزیده نیز بر روی یک سال آماری خشک، نرمال و مرطوب نتایج مناسبی را نسبت به روش‌های SOP و SDP ارائه نموده است که اعتبار این مدل را نمایان می‌سازد.

مراجع

1. Wurbs, R. A. (1993). “Reservoir-System Simulation and Optimization Models.” ASCE, *J. of Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 119(4), 455-472.
2. Bower, B.T., Hufschmidt, M.M. and Reedy, W.W. (1962). *Operating procedures: Their role in the design of water- resource systems by simulation analyses. Design of water resources systems*. A. Maass. M. M. Hufschmidt, R. Dorfman, H. A. Thomas Jr., S. A. Marglin, And G. M. Fair, eds., Harvard University Press. Cambridge. Mass.
3. Revelle, C., Joeres, E. and Kirby, W. (1969). “The linear decision rule in reservoir management and design. 1. Development of the stochastic model.” *Water Resour. Res.*, 5(4), 767-777.
4. Loucks, D.P., Stedinger, J.R. and Haith, D.A.H. (1981). “Water resources systems planning and analysis.” Prentice-Hall. Englewood Cliffs. N.J. *Hydrol. Sci.*, 41(5), 697-713.
5. Klemes, V. (1977). “Value of information in reservoir optimization.” *Water Resour. Res.*, Vol. 13, No. 5, PP. 850-857.
6. Hashimoto, T., Stedinger, J.R. and Loucks, D.P. (1982). “Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation.” *Water Resour. Res.*, 18 (1), 14-20.
7. Perera, J.C. and Conder, G.P. (1998). “Computational Improvement for stochastic dynamic programming models of urban water supply reservoirs.” *J. of the Am. Water Resour. Assoc.*, 34(2), 267-278.
8. Neelakantan, T.R. and Pundrikanthan, N.V. (1999). “Hedging rule optimization for water supply reservoir system.” *Water Resour. Mgmt.*, 13 (6), 409-426.
9. Labadie, J.W. (2004). “Optimal operation of multireservoir systems: State of the art review.” ASCE, *J. of Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 130 (2), 93-111.
10. Bolouri, Y. (2009). *Effects of Extracting Multi-Reservoir Systemes Operational Rule Curves for Different Reservoires in System Efficiency*. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture and Natural Resource. Soil and Water Department. Tehran University. Karaj. Iran. (In Farsi).
11. Loucks, D.P., Stedinger, J.R. and Haith, D.A.H. (1981). “Water resources systems planning and analysis.” Prentice-Hall. Englewood Cliffs. N.J. *Hydrol. Sci.*, 41 (5), 697-713.
12. Mays, L.W. and Tung, Y.K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. McGraw-Hill Book Company. New York, N.Y.
13. Momtahen, Sh. (2006). “Optimal policies for operating multi-reservoir systems.” Ph.D. Thesis. Civil Engeneering. K.N.Toosi University of Technology. Tehran. Iran. (In Farsi)
14. Chang, L.-C. and Chang, F.-J. (2001), “Intelligent control for modeling of real-time reservoir operation.” *Hydrol. Process.*, 15 (9), 1621-1634.
15. Chang, F.-J., Chen, L., and Chang, L.-C. (2005). “Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms.” *Hydrol. Process.*, 19 (11), 2277-2289.
16. Bozorg Haddad, O., Afshar, A. and Mariño, M. A. (2008). **“**Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs.**”** *J. of Hydroinformatics*, 10 (3), 257-264.

17. Bogardi, J.J. and Nachtnebel, H.P. (1991). *Multicriteria decision analysis in water resources management*. Organaized by the International Training Centre (PHLO) and the Department of Water Resources of the Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
18. LINDO Systems Inc. (2010). *LINDO API 6.0 user manual.*, http://www.lindo.com/.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Standard Operation Policy (SOP)
2- Stochastic Dynamic Programming (SDP)
3- Elimination Et Choix Traduissant la REalite I (ELECTRE I)
4- Linear Decision Rules (LDR)
5- Hedging
6- Implicit Stochastic Optimization (ISO)
7- Explicit Stochastic Optimization (ESO)
8- Real Time Control
9- Heuristic Programming
10- Simulation
11- Optimization
12- Successive Linear Programming (SLP)
13- Successive Quadratic Programming (SQP)
14- Projected Lagrangian Method (PLM)
15- Augmented Lagrangian Method (ALM)
16- Method Of Multipliers (MOM)
17- Generalized Reduced Gradient (GRG)
18- Genetic Algorithm (GA)