



A Primal-Dual Algorithm for Optimal Operation of Multi-reservoir Systems

K. Moghaddam¹, A. Seifi², S. J. Mousavi³

Abstract

A long-term planning model is presented in this study for optimizing Karoon-Dez reservoir system operation in Iran with hydropower generation, water supply, and environmental objectives. The matrix implementation of the large-scale resulting optimization model has been solved using dual-primal interior-point methods (DPIPMs) and multiobjective programming. These algorithms have shown to be promising especially when they take the advantage of sparsity structure of associated matrix formulation of the optimization problem with linear and quadratic functions. The computational time required for solving the Karoon-Dez reservoir system studied was less than 45 minutes. This is promising especially knowing that handling such an optimization model is very difficult using other techniques such as generalized reduced gradient (GRG) algorithm of nonlinear programming and discrete dynamic programming with adequate fine representation of state variables of the model.

Keywords: Optimization, Multi-reservoir systems, Interior-point methods

یک الگوریتم مبتنی بر نظریه دوگانگی در بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه

کامران شکرورد مقدم^۱، عباس سیفی^۲، سید جمشید موسوی^۳

چکیده

در این مطالعه یک مدل برنامه‌ریزی بلندمدت برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم سدهای مخزنی کارون و دز با اهداف تولید انرژی برق - آبی، تأمین تقاضای آب و زیست‌محیطی ارائه شده است. ساختار ماتریسی مدل بهینه‌سازی پیاده‌سازی شده و در ادامه حل مدل با استفاده از الگوریتم‌های اولیه-ثانویه نقاط داخلی و روش‌های برنامه‌ریزی چند هدفه انجام شده است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهند که الگوریتم‌های مذکور، که در آنها از ساختار خالی یا تنگ بودن ماتریس ضرایب مدل بهینه‌سازی استفاده می‌شود، می‌تواند ابزاری مناسب در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه با توابع خطی و مجزوری باشد. در این راستا مدل شش مخزنه غیر خطی توسعه یافته برای سیستم مخازن کارون و دز با استفاده از قابلیت الگوریتم‌های اولیه-ثانویه از روش‌های نقاط داخلی در زمانی کمتر از ۴۵ دقیقه اجرا و جواب‌های بهینه حاصل گردید. با توجه به اینکه حل مدل فوق با استفاده از الگوریتم‌های معمول برنامه‌ریزی غیر خطی مانند الگوریتم‌های گرادیان کاهش یافته مقدر نیست و نیز عدم امکان حل مسأله با روش برنامه‌ریزی پویا (DP) با شبکه‌بندی به اندازه کافی ریز از متغیرهای حالت، قابلیت روش‌های نقاط داخلی در بهینه‌سازی مسائل بزرگ مقیاس بهره‌برداری از مخازن سدها حائز اهمیت می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، سیستم‌های چند مخزنه و روش‌های اولیه-ثانویه.

1- M.Sc, Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, kamranshokrvand@yahoo.com
2-Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, aseifi@aut.ac.ir
3-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, jmosavi@aut.ac.ir

۱- کارشناس ارشد مهندسی صنایع (سیستم‌های اقتصادی - اجتماعی)
kamranshokrvand@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (aseifi@cic.aut.ac.ir)

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (jmosavi@aut.ac.ir)

هدف و محدودیت‌ها می‌باشد در صورتی که خطی‌سازی متوالی به این فرض نیازی ندارد، (Grygier and Stendinger, 1985). بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهند که مسأله برنامه‌ریزی عملکرد سدهای مخزنی در حقیقت یک مسأله برنامه‌ریزی غیرخطی با متغیرهای تصادفی است؛ به ویژه اگر تابع هدف مسأله تابع تولید انرژی برقی باشد. Rosenthal (1983) یک متدولوژی کلی برای برنامه‌ریزی غیرخطی به منظور بهره‌برداری بهینه از سدهای مخزنی ارائه کرده‌است که در حقیقت تعمیمی از روش جستجوی نیوتن برای استفاده در این گونه سیستم‌ها می‌باشد. در مطالعه‌ای که توسط Diaz and Fontane (1989) بر روی تابع تولید انرژی برقی صورت گرفته، مشخص شده است که با تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در پشت سد، این تابع تقریب به طور خطی تغییر می‌کند و منحنی تغییرات تابع تولید انرژی به ازای تغییرات رهاسازی که در توربین‌ها انجام می‌شود، به صورت یک تابع مقعر است. این مشاهدات همچنین این نکته را متذکر می‌شوند که تغییرات تابع تولید انرژی برقی را می‌توان بوسیله یک تابع مجذوری^۳ تخمین زد.

تئوری کنترل بهینه (OCT)^۴ و روش جستجوی جهت موجه (FDM)^۵ از دیگر روش‌هایی هستند که در بهینه‌سازی مسایل با توابع تولید انرژی برقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تئوری کنترل بهینه و روش جستجوی جهت موجه بر اساس الگوریتم‌ها و تکنیک‌های مشابهی در زمینه برنامه‌ریزی غیرخطی بنا شده‌اند. اصول کلی در الگوریتم‌های برنامه‌ریزی غیرخطی مبتنی بر یافتن جهت جستجو و محاسبه طول گام در هر تکرار است. تئوری کنترل بهینه مسایل تجزیه شده تک دوره‌ای را به صورت متوالی حل می‌کند و جهت‌های جستجو را در امتداد بردار گرادیان تابع لاگرانژ بدست می‌آورد. مشکل اصلی در استفاده از تکنیک کنترل بهینه، تعیین ضرایب لاگرانژ در هر تکرار است. روش جستجوی جهت موجه، مسأله ثانویه‌ای را به منظور یافتن بهترین جهت جستجو که کمترین میزان انحرافات از بردار گرادیان تابع هدف داشته باشد را در هر تکرار حل می‌کند، (Gomez and Lasdon, 1982).

رابطه نزدیکی بین الگوریتم‌های اولیه - ثانویه نقاط داخلی^۶ با الگوریتم‌های تئوری کنترل بهینه و جستجوی جهت موجه و جستجوی جهت نیوتن که جزء تکنیک‌ها و روش‌های کاربردی برنامه‌ریزی غیرخطی در بهینه‌سازی سیستم‌های تولید انرژی برقی در سدها به شمار می‌روند، وجود دارد. در یکی از تحقیقات که در آن الگوریتم‌های نقاط داخلی بر روی دو سد فرضی اجرا شده، نتایج محاسباتی بدست آمده با نتایجی که از اجرای الگوریتم‌های کنترل بهینه و جستجوی جهت موجه در نرم‌افزار MINOS 5.0 بدست آمده بود، مقایسه شد (Murtagh and Saunders, 1983). از دیگر

گسترش جوانب مدل‌سازی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم سدهای مخزنی به وسیله مطالعات و تحقیقات گسترده نشان‌دهنده لزوم ادامه و توسعه متدولوژی حل مسائل برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه است. علیرغم این توسعه و پیشرفت در مدل‌سازی هنوز مدلی که بتواند به طور کامل تمام ویژگی‌ها و خصوصیات این نوع مسائل را دربرداشته و تمام محدودیت‌های فیزیکی و قراردادی را لحاظ نماید، ارائه نشده است. به طور کلی، در این مدل‌ها بیشترین توجه به ماهیت تصادفی جریان‌های آب و تفکیک‌ناپذیر بودن توابع هدف بوده است.

Labadie (2004) به مرور انواع روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه پرداخته است. از روش‌های استفاده شده در سابقه موضوع، روش برنامه‌ریزی پویا و نیز نسخه تصادفی آن است که بر اساس محاسبه و استفاده از ماتریس احتمال انتقال حالت و توزیع احتمال گسسته شرطی جریان‌های ورودی بنا می‌شود. برنامه‌ریزی پویای تصادفی (SDP)^۱ یکی از قدیمی‌ترین روش‌هایی است که در مدل‌سازی با متغیرهای تصادفی سیستم‌های ذخیره آب مورد استفاده قرار گرفته است. حل معادلات و روابط بازگشتی در روش برنامه‌ریزی پویای تصادفی معمول احتیاج به گسسته کردن وضعیت و حالت متغیرها دارد. این گسسته‌سازی منجر به افزایش ناگهانی در تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری و به طور کلی در ابعاد مسأله می‌شود. برای مثال (Periera and Pinto (1991) متذکر می‌شوند اگر متغیرهای حجم مخزن و رهاسازی در سیستمی با ۵ سد مخزنی به ۲۰ فاصله تفکیک شوند، مدل شامل بیش از ۱۰ تریلیون (۲۰^{۱۱}) متغیر تصمیم‌گیری خواهد شد. افزایش چشمگیر سرعت کامپیوترهای فعلی نیز نمی‌تواند مشکل فوق را حل کنند و موانع موجود برای استفاده از این روش همچنان باقی هستند. بنابراین علیرغم استفاده گسترده از برنامه‌ریزی پویا در مسأله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن، کاربرد این روش در مورد سیستم‌های چند مخزنه به شدت تحت تاثیر محدودیت‌های ابعادی است. البته به منظور حل مشکل فوق نسخه‌های مختلفی از روش‌های برنامه‌ریزی پویا ارائه شده‌اند که هریک از آنها تحت فرضیات و شرایط معینی توسعه یافته‌اند.

برنامه‌ریزی خطی در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مسائل چندمخزنه به طور گسترده‌ای مورد استفاده واقع شده است. از آنجا که ممکن است توابع هدف و تعدادی از محدودیت‌ها غیرخطی باشند، تکنیک‌های خطی‌سازی تکه‌تکه^۲ مانند تقریب زدن به وسیله سری‌های تیلور برای خطی‌سازی توابع هدف و محدودیت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برنامه‌ریزی خطی تکه‌تکه وابسته به قابلیت تفکیک‌پذیری تابع

مزایای استفاده از روش‌های نقاط داخلی می‌توان به امکان پیاده‌سازی ساختار ماتریس‌های T_{nk}^y اشاره کرد. (Ponnambalam et al. (1989) از روش برنامه‌ریزی خطی کارمارکار در بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه بهره گرفتند. (Seifi and Hipel (2001) کاربرد مؤثر الگوریتم‌های نقاط داخلی را در امکان پیاده‌سازی ساختار ماتریس‌های T_{nk}^y در برنامه‌ریزی عملکرد سیستم سدهای مخزنی دریاچه‌های پنج‌گانه کانادا و آمریکا با در نظر گرفتن جریان‌های تصادفی آب ارائه کرده‌اند.

در این مقاله با استفاده از قابلیت الگوریتم‌های اولیه-ثانویه از روش‌های نقاط داخلی در امکان استفاده از ساختار ماتریس‌های T_{nk}^y در مجموعه محدودیت‌ها و توابع هدف و در نتیجه کارایی بالای این روش‌ها از نظر زمان انجام محاسبات، بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنه مد نظر قرار گرفته و از آن در بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم ۶ مخزنه واقع در حوضه‌های رودخانه‌های دز و کارون در ایران استفاده شده است. در این راستا، مطالعه موردی انجام شده در بخش ۲ مطرح می‌شود. در بخش ۳، مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مجموعه سدهای مخزنی کارون و دز ارائه می‌شود. در بخش ۴، پیاده‌سازی ساختار ماتریسی مدل بهینه‌سازی و در ادامه این بخش الگوریتم‌های اولیه-ثانویه ارائه می‌شود. در بخش ۵، ابتدا به مرور مختصر روش‌های چندهدفه پرداخته می‌شود و سپس با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی چند-هدفه مدل مذکور تحلیل و به یک مدل تک-هدفه تبدیل می‌شود. در بخش ۶ نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد به منظور ادامه مطالعات در این زمینه مطرح می‌شود.

۲- سیستم مخازن کارون-دز

حوضه آبریز رودخانه‌های کارون و دز در جنوب غربی ایران واقع است که بیش از یک پنجم از مساحت مجموع حوضه‌های آبریز کشور را شامل می‌شود. مجموع مساحت حوضه‌های آبریز این دو رودخانه در حدود ۴۵۰۰۰ کیلومتر مربع است. در این حوضه و بر روی رودخانه‌های کارون و دز سدهای مخزنی متعددی در حال بهره‌برداری، ساخت و یا در حال مطالعه می‌باشند. از مجموعه فوق یک سیستم ۶ مخزنه شامل سدهای ساخته شده و یا در حال ساخت انتخاب شده است. این سیستم شامل ۵ سد بر روی رودخانه کارون به صورت متوالی و یک سد نیز بر روی رودخانه دز که با مجموعه سدهای کارون موازی است، می‌باشد. شکل (۱) موقعیت سدها در سیستم مذکور را به طور شماتیک نشان می‌دهد. دو رودخانه کارون و دز در محل بندقیق در شمال شهر اهواز به هم متصل و رودخانه کارون بزرگ را تشکیل داده که به خلیج فارس منتهی می‌شود.

همان طور که ذکر شد سدهای بیشتری نیز در سر شاخه‌های حوضه‌های کارون و دز در مراحل مختلف مطالعاتی می‌باشند که در بین سدهایی که در آینده نزدیک به بهره‌برداری خواهند رسید نمی‌باشند. در این مطالعه فقط سیستم سدهای موجود و در حال ساخت مدل‌سازی شده است.

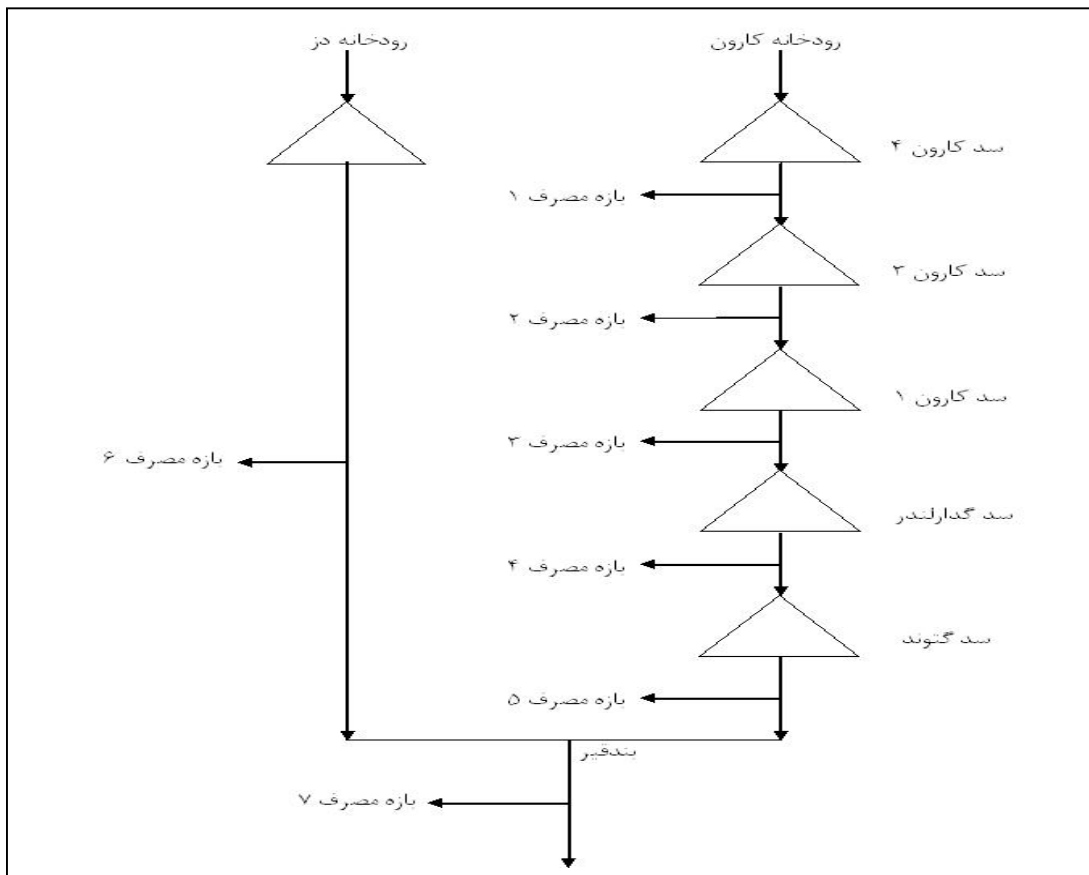
از نقطه نظر نیازهای آبی فوق باید اشاره کرد که مجموع مساحت اراضی کشاورزی در این منطقه در حدود ۲۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع است. آب ذخیره شده در این سیستم صرف مصارف کشاورزی، صنعتی و آشامیدنی می‌شود. علاوه بر مصارف فوق به منظور تولید انرژی برق - آبی بر روی هریک از سدها توربین‌های مولد برق نصب شده است. در حقیقت مهمترین اهداف احداث و توسعه این مجموعه از سدهای مخزنی را می‌توان تولید انرژی برق - آبی، تأمین نیازهای مصرفی کشاورزی و صنعتی و کنترل سیلاب‌های فصلی و تأمین حداقل جریان زیست محیطی نام برد.

۳- معادلات حاکم در بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه کارون-دز

عامل اصلی در تعیین عملکرد بهینه سیستم یک سد مخزنی، اعم از منفرد و چندگانه، وجود ارتباط غیرخطی بین تولید انرژی برقی و میزان آب رها شده از توربین‌ها در شرایط عدم قطعیت جریان‌های ورودی و میزان تقاضا برای انرژی الکتریکی است. مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی عملکرد سیستم‌های چند مخزنه باید بازتابی از تعامل بین منافع حاصل از ذخیره و نگهداری آب و منافع حاصل از رهاسازی آب باشد. از سوی دیگر تعاملی نیز بین منافع ذخیره آب در سطوح بالا و زیان‌های حاصل از سرریز آب وجود دارد. هدف این پژوهش ایجاد و گسترش یک مدل عمومی و انعطاف‌پذیر است که تا حد امکان بتواند ساختار و ویژگی‌های اصلی مسأله را در برداشته باشد. توابع هدف در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارت‌اند از:

- ۱- حداقل کردن انحرافات تخصیص از تقاضای آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی و
- ۲- حداکثر کردن تولید انرژی برقی.

متغیرهایی که ساختار و وضعیت سیستم را مشخص می‌کنند عبارت‌اند از: حجم آب ذخیره شده در هر سد، حجم آب عبوری از توربین‌ها، میزان آب سرریزی که از سرریزها خارج می‌شود و درصد تأمین تقاضای آب در هر دوره در بازه‌های مصرف. ارتباط بین این متغیرهای مستقل و میزان جریان‌های ورودی به هر سد در هر دوره به وسیله معادلات پیوستگی جریان تبیین می‌شود. متغیرهای



شکل ۱- ارتباط سدهای مخزنی در سیستم کارون - دز

به همراه جریان‌های طبیعی حوضه میانی، پس از کسر آب تخصیص یافته به نیازهای آب در حوضه میانی برابر جریان ورودی به مخزن سد پایین دست خواهد بود.

بین متغیرهای تصمیم‌گیری در یک سیستم سد مخزنی علاوه بر معادلات جریان، روابطی تحت عنوان نامعادلات جریان نیز برقرار است. چون حجم آب تخصیص داده شده برای مصارف در هر حوضه میانی نمی‌تواند از مجموع جریان‌های خروجی از سد بالا دست و جریان‌های طبیعی ورودی به حوضه میانی (بازه مصرف) بیشتر باشد، نامعادله زیر باید بین متغیرهای تصمیم‌گیری در سیستم برقرار باشد

$$- [Rpower(t) + Spill(t)] + dem(t) \cdot \alpha(t) \leq B(t) \quad (2)$$

که در آن $\alpha(t)$ کسری از آب تخصیص داده شده به حوضه میانی در دوره t ، $dem(t)$ میزان تقاضا در حوضه میانی در دوره t و $B(t)$ حجم جریان‌های آب بین راهی حوضه میانی در دوره t می‌باشند.

به طور کلی در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی، دو نوع متغیر تصمیم‌گیری وجود دارد، یکی متغیرهایی که محدودیت‌های خاصی

تصمیم‌گیری مسأله میزان آب عبوری از توربین‌ها و میزان آب سرریز شده در هر یک از سدهای مخزنی در هر دوره زمانی است.

به طور کلی در یک سیستم سد مخزنی و در یک فاصله زمانی t می‌توان معادله زیر را تحت عنوان معادله پیوستگی جریان در نظر گرفت

$$S(t) = S(t-1) - [Rpower(t) + Spill(t)] + I(t) - L(t) \quad (1)$$

که در آن $t = 1, \dots, T$ دوره زمانی، $S(t)$ حجم آب ذخیره شده در انتهای دوره فعلی، $S(t-1)$ حجم آب ذخیره شده در انتهای دوره قبل، $Rpower(t)$ حجم آب عبوری از توربین‌ها در دوره t ، $Spill(t)$ حجم آب سرریزی در دوره t ، $I(t)$ حجم جریان ورودی به سد در دوره t و $L(t)$ حجم آب تلف شده خالص ناشی از تبخیر و نشست در دوره t می‌باشند.

در ادامه و به جهت سهولت، از تأثیر متغیرهای تلفات تبخیر صرف نظر شده است. در یک سیستم که سدهای مخزنی به طور سری قرار دارند، جریان‌های آب خروجی از توربین‌ها و آب سرریز شده از هر سد

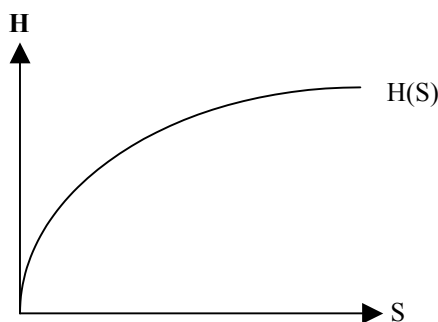
توربین‌ها است. این رابطه غیرخطی را می‌توان به صورت زیر ارائه کرد

$$Power(t) = C \times e \times \bar{H}_e(t) \times Rpower(t) \quad (۸)$$

در رابطه فوق $Power(t)$ انرژی تولید شده بر حسب مگاوات ساعت (MWh) در دوره t ، $\bar{H}_e(t)$ متوسط ارتفاع آب خالص روی توربین در دوره t ، $Rpower(t)$ حجم آب عبوری از توربین‌ها در دوره t ، e راندمان نیروگاه و C ضریب تبدیل انرژی می‌باشند. متغیر $\bar{H}_e(t)$ که متوسط ارتفاع خالص آب ذخیره شده در پشت سد بین دو دوره متوالی t و $t+1$ است به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\bar{H}_e(t) = \frac{H_e(t) + H_e(t+1)}{2}$$

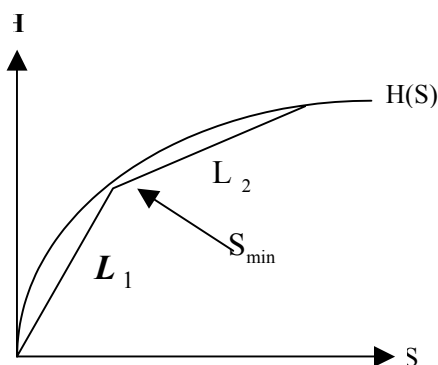
تغییرات ارتفاع آب ذخیره شده در مقابل تغییرات حجم آب ذخیره شده در پشت سد را می‌توان به شکل زیر در نظر گرفت



که بر آن یک تابع درجه دوم قابل برازش است. یعنی

$$H(S) = a + bS + cS^2$$

از طرف دیگر این ارتباط را می‌توان به صورت یک ترکیب خطی از دو پاره خط L_1 و L_2 تقریب زد



بر روی آنها اعمال نشده است و دیگری متغیرهایی که نمی‌توانند بیشتر یا کمتر از مقادیر مشخصی، مقدار بگیرند. نوع اول را متغیرهای نامحدود و نوع دوم را متغیرهای کراندار می‌نامند. این کران ممکن است به صورت کران بالا یا پایین و یا به هر دو صورت در مدل لحاظ شود. محدودیت‌های مربوط به کران‌های بالا و پایین متغیرهای مسأله را می‌توان به شکل زیر نوشت

$$S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \quad (۳)$$

$$Rpower_{\min} \leq Rpower(t) \leq Rpower_{\max} \quad (۴)$$

$$Spill_{\min} \leq Spill(t) \leq Spill_{\max} \quad (۵)$$

که در آن، S_{\max} حداکثر ظرفیت مخزن سد، S_{\min} حجم حداقل مخزن متناظر با رقوم حداقل بهره برداری، $Rpower_{\max}$ حداکثر ظرفیت تونل‌های آب‌بر نیروگاه، $Rpower_{\min}$ حداقل جریان مبتنی بر حداقل دبی طراحی توربین‌ها، $Spill_{\max}$ حداکثر ظرفیت سرریز سد و $Spill_{\min}$ برابر صفر در نظر گرفته شده است. علاوه بر محدودیت‌های فوق در مجموعه معادلات جریان، به منظور تأمین نیاز آب در بازه‌های مصرف پایین دست هر سد، متغیر درصد میزان تقاضای تأمین شده در هر بازه مصرف برای دوره‌های مختلف تعریف شده است. از حاصلضرب این متغیر در میزان تقاضای هر حوضه، میزان تخصیص آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی در هر دوره مشخص می‌شود. در نتیجه کران‌های بالا و پایین برای این متغیر به صورت زیر تعریف می‌شوند

$$\alpha_{\min} \leq \alpha(t) \leq 1 \quad (۶)$$

در راستای تأمین تقاضای آب در هر بازه مصرف، تابع هدف تعریف شده باید به گونه‌ای باشد که تخصیص آب برای مصارف به شکل مطلوب صورت پذیرد. در حقیقت مجموع انحرافات تقاضا از تخصیص باید حداقل شود. با توجه به نحوه تعریف متغیر α که درصد تأمین تقاضای آب است و همچنین با در نظر گرفتن دوره‌های زمانی مختلف در هر بازه مصرف، مفهوم فوق را می‌توان برای یک بازه نیاز مفروض و در طول یک دوره برنامه‌ریزی شامل T بازه زمانی به شکل زیر ارائه کرد

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T (dem(t) - dem(t) \cdot \alpha(t)) \quad (۷)$$

که متغیرهای آمده در رابطه (۷) قبلاً تعریف شده‌اند.

تابع تولید انرژی برقابی در یک سد مخزنی یک تابع غیرخطی از متوسط ارتفاع آب ذخیره شده در پشت سد و میزان رهاسازی از

یک مدل برنامه‌ریزی برای سیستم ۶ مخزنه کارون و دز ارایه می‌گردد.

با توجه به روابط (۱) تا (۱۲)، ساختار مدل بهینه‌سازی سیستم فوق به صورت زیر در نظر گرفته شده است

$$\begin{aligned} \text{Max } F_1 &= \sum_{i=1}^6 \sum_{t=1}^T C_i \times e_i \times [(a_i - c_i) \cdot Rpower_i(t) + \\ & b_i \cdot S_i(t) \times Rpower_i(t) - d_i \cdot (Rpower_i(t))^2 - H_{f,i}] \\ \text{Max } F_2 &= \sum_{j=1}^7 \sum_{t=1}^T (dem_j(t) \alpha_j(t) - dem_j(t)) \end{aligned}$$

S.t.:

$$\begin{aligned} S_1(t) - S_1(t-1) + [Rpower_1(t) + Spill_1(t)] &= I_1(t) \\ S_2(t) - S_2(t-1) + [Rpower_2(t) + Spill_2(t)] \\ - [Rpower_1(t) + Spill_1(t)] + dem_1(t) \alpha_1(t) &= I_2(t) \\ S_3(t) - S_3(t-1) + [Rpower_3(t) + Spill_3(t)] \\ - [Rpower_2(t) + Spill_2(t)] + dem_2(t) \alpha_2(t) &= I_3(t) \\ S_4(t) - S_4(t-1) + [Rpower_4(t) + Spill_4(t)] \\ - [Rpower_3(t) + Spill_3(t)] + dem_3(t) \alpha_3(t) &= I_4(t) \\ S_5(t) - S_5(t-1) + [Rpower_5(t) + Spill_5(t)] \\ - [Rpower_4(t) + Spill_4(t)] + dem_4(t) \alpha_4(t) &= I_5(t) \\ S_6(t) - S_6(t-1) + [Rpower_6(t) + Spill_6(t)] \\ R_7(t) - [Rpower_5(t) + Spill_5(t)] - [Rpower_6(t) + Spill_6(t)] \\ + [dem_5(t) \alpha_5(t) + dem_6(t) \alpha_6(t) + dem_7(t) \alpha_7(t)] &= I_7(t) \\ - [Rpower_7(t) + Spill_7(t)] + dem_7(t) \alpha_7(t) &\leq B_1(t) \\ - [Rpower_2(t) + Spill_2(t)] + dem_2(t) \alpha_2(t) &\leq B_2(t) \\ - [Rpower_3(t) + Spill_3(t)] + dem_3(t) \alpha_3(t) &\leq B_3(t) \\ - [Rpower_4(t) + Spill_4(t)] + dem_4(t) \alpha_4(t) &\leq B_4(t) \\ - [Rpower_5(t) + Spill_5(t)] + dem_5(t) \alpha_5(t) &\leq B_5(t) \\ - [Rpower_6(t) + Spill_6(t)] + dem_6(t) \alpha_6(t) &\leq B_6(t) \\ - [Rpower_5(t) + Spill_5(t)] + dem_5(t) \alpha_5(t) - \\ [Rpower_6(t) + Spill_6(t)] \\ + dem_6(t) \alpha_6(t) + dem_7(t) \alpha_7(t) & \\ (t) \leq B_5(t) + B_6(t) + B_7(t) & \\ S_i^{\min} \leq S_i(t) \leq S_i^{\max} & \\ Rpower_i^{\min} \leq Rpower_i(t) \leq Rpower_i^{\max} & \\ Spill_i^{\min} \leq Spill_i(t) \leq Spill_i^{\max} & \\ R_7^{\min} \leq R_7(t) & \\ \alpha_j^{\min} \leq \alpha_j(t) \leq 1 & \\ S_i(I) = S_i(T) & \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن $t = 1, \dots, T$ دوره زمانی برنامه‌ریزی، $S_i(t)$ حجم آب ذخیره شده در انتهای دوره t در سد i ام، $S_i(t-1)$ حجم آب ذخیره

$$H(S) = \lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2$$

که در آن L_1 معادله سطح اول، L_2 معادله سطح دوم و λ_1, λ_2 ضرایب ثابت می‌باشند. نقطه S_{\min} حجم حداقل بهره‌برداری است که همان کران پایین تعریف شده در متغیر حجم ذخیره مخزن است. بنابراین اصولاً تولید انرژی در سطح دوم انجام می‌شود و خواهیم داشت

$$H(S) = L_2 = a + b \cdot S, \quad S \geq S_{\min}, \quad a, b > 0$$

در سدهای مخزنی با افزایش میزان رهاسازی، ارتفاع آب در پایین سد (پایاب) افزایش پیدا کرده که این افزایش باعث کاهش در تولید انرژی برقایی می‌شود. ارتفاع خالص آب روی توربین از تفاوت تراز آب (H_{total}) در مخزن و ارتفاع آب پایاب (H_{tail}) و ارتفاع ناشی از تلفات موضعی و کلی در طول مسیر تونل آب $H_f(t)$ بدست می‌آید. بنابراین

$$\begin{aligned} Power(t) &= C \times e \times (H_{total}(t) - H_{tail}(t) - H_f(t)) \\ &\times Rpower(t) \end{aligned}$$

به سادگی می‌توان میزان بلندای افت انرژی $H_f(t)$ را با توجه به ابعاد تونل آببر نیروگاه هر سد و سرعت جریان در آن با یک عدد ثابت (H_f) جایگزین کرد. از طرف دیگر ارتفاع آب پشت سد تابعی از حجم مخزن است که در قالب رابطه حجم-ارتفاع تعریف می‌شود. همچنین تراز پایاب تابعی از میزان جریان عبوری از توربین است. روابط فوق را می‌توان در قالب معادلات خطی و به شکل زیر تقریب زد

$$H_{total}(S) = a + b \cdot S, \quad S \geq S_{\min}, \quad a, b > 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} H_{tail}(Rpower) &= c + d \cdot Rpower, \\ Rpower &\geq Rpower_{\min}, \quad c, d > 0 \end{aligned} \quad (11)$$

با جایگزینی روابط (۱۰) و (۱۱) در رابطه (۹) خواهیم داشت

$$\begin{aligned} Power(t) &= C \times e \times ((a - c) \cdot Rpower(t) + b \cdot S(t) \times \\ & Rpower(t) - d \cdot (Rpower(t))^2 - H_f) \end{aligned} \quad (12)$$

بنابراین ملاحظه می‌شود که تحت فرضیات فوق، معادله تولید انرژی در یک دوره زمانی دلخواه t هر یک از سدها به یک معادله غیر خطی درجه دوم^۹ تبدیل خواهد شد. در ادامه، معادلات فوق در قالب

c_2 بردار ضرایب تابع تأمین تقاضای آب، Aeq ماتریس معادلات جریان، beq بردار سمت راست معادلات جریان، $Aineq$ ماتریس نامعادلات جریان، $bineq$ بردار سمت راست نامعادلات جریان، u_b بردار کران‌های بالا و L_b بردار کران‌های پایین متغیرهای تصمیم‌گیری می‌باشند. بردار تصمیم‌گیری x شامل متغیرهای تصمیم‌گیری را می‌توان به صورت زیر نشان داد

$$x = \begin{bmatrix} S \\ Rpower \\ Spill \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (15)$$

حال با توجه به مجموعه معادلات ارائه شده می‌توان ماتریس Aeq را به صورت زیر در نظر گرفت

$$Aeq = [ASeq, ARpower, ASpilleq, Aalphaeq] \quad (16)$$

به طور مشابه نامعادلات جریان را نیز می‌توان به صورت ماتریسی ارائه کرد

(17)

$$Aineq = [ASineq, ARpowerineq, ASpillineq, Aalphaineq]$$

تابع هدف تولید انرژی برق - آبی ارائه شده در (۱۲) دارای دو قسمت خطی و غیرخطی است. با توجه به نحوه تعریف بردار تصمیم‌گیری x بردار ضرایب قسمت خطی این تابع به صورت زیر در نظر گرفته شده است

(18)

$$c_1^T = [(Zero)_{6 \times 1}, a_1 - c_1, a_2 - c_2, a_3 - c_3, a_4 - c_3, a_4 - c_4, a_5 - c_5, a_6 - c_6, (Zero)_{7 \times 1}, (Zero)_{7 \times 1}]$$

قسمت غیرخطی تابع تولید انرژی برق - آبی را نیز می‌توان به صورت یک ماتریس هشین ارائه کرد. ساختار ماتریس هشین تابع هدف که به صورت یک ماتریس بلوکی است به صورت زیر در نظر گرفته شده است

شده در انتهای دوره $t-1$ در سد i ام، $Rpower_i(t)$ حجم آب عبوری از توربین‌ها در دوره t در سد i ام، $Spill_i(t)$ حجم آب سرریزی در دوره t در سد i ام، $\alpha_j(t)$ درصد آب تخصیص داده شده در دوره t به حوضه میانی j ام، $dem_j(t)$ میزان تقاضا در دوره t در بازه مصرف j ام، $I_j(t)$ حجم جریان‌های طبیعی وارد شده در دوره t به سد i ام و $B_j(t)$ حجم جریان‌های آب بین راهی در دوره t در حوضه میانی j ام می‌باشند. همچنین با توجه به لزوم برقراری حداقل شرایط زیست محیطی در حوضه میانی هفتم میزان دبی عبوری در این حوضه باید به صورت $R_7^{min} \leq R_7(t)$ تعریف شود. در این مطالعه $t = 1, \dots, T$ که در آن $T = 480$ (بر اساس داده‌های ماهانه آبدی در طی یک دوره زمانی ۴۰ ساله) در نظر گرفته شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود در متغیرهای استفاده شده در روابط فوق که قبلاً تعریف شده بودند صرفاً آندیس سد یا بازه مصرف مورد نظر اضافه شده است. آندیس i مربوط به شماره سدها ($i = 1, \dots, 6$) و آندیس j مربوط به شماره بازه مصرف ($j = 1, \dots, 7$) می‌باشد.

۴- پیاده‌سازی ساختار ماتریسی و روش‌های اولیه -

ثانویه نقاط داخلی

برای حل مدل ارائه شده در بخش قبل با روش‌های نقاط داخلی لازم است ساختار ماتریسی مدل مذکور پیاده شود. به منظور پیاده‌سازی ساختار ماتریسی مدل برنامه‌ریزی عملکرد سدهای کارون و دز، مدل ماتریسی مجموعه محدودیت‌ها و توابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته شده است

$$Max \quad F_1 = c_1^T .x + \frac{1}{2} .x^T .H_1 .x$$

$$Max \quad F_2 = c_2^T .x$$

$$S.t.: \quad Aeq.x = beq$$

$$Aineq.x \leq bineq$$

$$L_b \leq x \leq u_b$$

(14)

که در آن، x بردار تصمیم‌گیری، c_1 بردار ضرایب قسمت خطی تابع تولید انرژی، H_1 ماتریس هشین قسمت غیرخطی تابع تولید انرژی،

سطری کامل است. با توجه به مسأله اولیه، می‌توان مسأله ثانویه زیر را در نظر گرفت

$$(D) \text{ Min } b^T \cdot y - u^T \cdot w$$

$$\text{s.t.}: A^T \cdot y - w + s = c$$

$$w \geq 0, s \geq 0$$

با نوشتن شرایط کان - تاکر (KKT)^{۱۴} برای بهینه‌گی مدل‌های (۲۰) و (۲۱) الگوریتم‌های نقاط داخلی از یک نقطه درون فضای شدنی شروع شده و با محاسبه جهت جستجوی نیوتن و طول گام در هر تکرار با محاسبه نقاط جدید بر روی مسیر مرکزی در داخل فضای شدنی به سمت جواب بهینه همگرا می‌شوند، (Mehrotra, 1992). حل مدل ارائه شده در این بخش با استفاده از الگوریتم اولیه - ثانویه مورد توجه می‌باشد. همچنین نظر به اینکه مدل فوق شامل دو تابع هدف تأمین نیازهای آبی و تولید انرژی برقایی است، حل مدل بزرگ مقیاس فوق با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی چند هدفه مد نظر قرار گرفته است. بنابراین در بخش بعد نتایج حل مدل با روش نقاط داخلی در شرایط استفاده از دو روش برنامه‌ریزی چند هدفه یعنی روش‌های وزن‌دهی و حدی ارائه می‌شود.

۵- برنامه‌ریزی چند هدفه^{۱۵}

در روش‌های برنامه‌ریزی چند هدفه با استفاده از الگوریتم‌های روش وزن‌دهی و حدی، مجموعه جواب‌های غیر پست^{۱۶} مسأله چند هدفه محاسبه می‌شود. در یک مسئله حداکثرسازی یک جواب قابل قبول، یک جواب غیرپست خواهد بود، اگر جواب قابل قبول دیگری وجود نداشته باشد که حداقل یکی از توابع هدف را بهبود دهد، در حالی که هیچ تقلیلی در دیگر توابع هدف ایجاد نکند. در ادامه دو روش رایج از دسته روش‌های برنامه‌ریزی چند هدفه که در این مطالعه استفاده شده‌اند به طور خلاصه ارائه می‌شود.

۱-۵ - الگوریتم روش وزن‌دهی^{۱۷}

روش وزن‌دهی که برخی آن را روش پارامتری نیز نامیده‌اند، یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌های حل مسائل چند معیاره است. این روش بر اساس عملکرد طبیعی انسان در تصمیم‌گیری چند معیاره بنا شده است و با در نظر گرفتن وزن برای اهداف مختلف، آنها را به یک مسأله تک‌هدفه تبدیل می‌نماید (Hwang and Masud, 1981) و (Hwang and Yoon, 1983). در این روش برای پیدا کردن جواب‌های غیرپست مسأله برنامه‌ریزی چندهدفه

$$\text{Max } Z(x) = [Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x), \dots, Z_p(x)]$$

$$\text{s.t. } x \in F_d$$

جواب بهینه مسأله تک‌هدفه زیر مشخص می‌شود

$$\text{Max } Z(x) = \sum_{k=1}^p W_k Z_k(x)$$

$$\text{s.t. } x \in F_d$$

در این روش، وزن توابع یعنی W_k ها باید یک مقدار مثبت (غیرصفر و غیرمنفی) باشند. در نهایت می‌توان گفت که X^* یک جواب غیرپست برای مسأله است اگر یک جواب بهینه برای مسأله تک‌هدفه فوق بوده و W_i ها همگی مثبت باشند.

در مدل سیستم کارون - دز، مسأله برنامه‌ریزی دو هدفه زیر نوشته می‌شود

$$\text{Max } F_1 = \sum_{i=1}^6 \sum_{t=1}^T \text{power}_i(t)$$

$$\text{Max } F_2 = \sum_{j=1}^7 \sum_{t=1}^T (\text{dem}_j(t) \alpha_j(t) - \text{dem}_j(t))$$

$$\text{s.t. } : F_d \leq 0$$

که در آن F_1 و F_2 توابع هدف و F_d مجموعه محدودیت‌های ارائه شده در روابط (۱۳) می‌باشند. این مسئله دوهدفه با استفاده از روش وزن‌دهی به یک مسأله برنامه‌ریزی تک هدفه تبدیل می‌شود

$$\text{Max } F = u \cdot \tilde{F}_1 + v \cdot \tilde{F}_2 =$$

$$u \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \sum_{t=1}^T \frac{\text{power}_i(t)}{\text{maxpower}_i} \right) +$$

$$v \cdot \left(\sum_{j=1}^7 \sum_{t=1}^T \frac{(\text{dem}_j(t) \alpha_j(t) - \text{dem}_j(t))}{\text{dem}_j(t)} \right)$$

$$\text{s.t. } : F_d \leq 0$$

که \tilde{F}_1 و \tilde{F}_2 توابع هدف نرمال شده و maxpower_i حداکثر انرژی قابل تولید در سد i ام می‌باشد که برابر با حاصل ضرب ظرفیت نصب نیروگاه در تعداد ساعات موجود در یک ماه است. به ازای ضرایب وزنی u و v در بازه $[0, 1]$ ، جواب‌های بهینه مدل (۲۳) تعیین می‌شوند. جواب‌های بهینه این مسأله همان جواب‌های غیرپست مدل (۲۲) هستند.

۲-۵ - الگوریتم روش حدی^{۱۸}

در روش حدی، همه توابع هدف به جز یکی از آنها به صورت محدودیت در نظر گرفته شده و مسأله با یک تابع هدف بهینه‌سازی

می‌شود. در مدل بهینه‌سازی عملکرد مجموعه سدهای مخزنی کارون و دز، تابع هدف تأمین تقاضای آب به عنوان محدودیت وارد مجموعه محدودیت‌ها می‌شود و سپس مدل با تابع هدف تولید انرژی برقابی بهینه‌سازی می‌شود. با تغییر کران‌های پایین تابع تأمین نیازهای آبی، مجموعه جواب‌های غیرپست مسأله تعیین می‌شوند.

با توجه به توضیحات فوق، مدل (۲۲) با استفاده از روش حدی به یک مسأله برنامه‌ریزی تک هدفه تبدیل می‌شود

$$\begin{aligned} \text{Max } F_1 &= \sum_{i=1}^6 \sum_{t=1}^T \text{power}_i(t) \\ \text{s.t. } : F_d &\leq 0 \\ \sum_{j=1}^7 \sum_{t=1}^T (dem_j(t) \cdot a_j(t) - dem_j(t)) &\leq \\ \sum_{j=1}^7 \sum_{t=1}^T (dem_j(t) \alpha_j(t) - dem_j(t)) & \end{aligned}$$

در مدل (۲۴) و به منظور اجرای الگوریتم روش حدی، محدوده تغییرات کران‌های پایین برای تابع هدف تأمین نیازهای آبی به صورت زیر در نظر گرفته شد

$$0 \leq a_j(t) \leq 1 \quad (25)$$

با اجرای الگوریتم روش حدی ابتدا دو مسأله برنامه‌ریزی تک هدفه بهینه‌سازی شد و مقادیر هریک از توابع هدف به ازای مقدار بهینه تابع هدف دیگر محاسبه شد. طول گام نیز برای تغییرات کران‌های پایین برابر $k = 0.1$ اختیار شد و در نهایت برای مدل (۲۲) مجموعه جواب‌های غیرپست تعیین شد. با بررسی نتایج حاصل مشخص است که اگر کران‌های پایین تابع هدف تأمین تقاضای آب، به سمت عدد ۱ نزدیک شوند، دبی عبوری از توربین‌ها کاهش یافته و حجم آب ذخیره شده در مخازن افزایش می‌یابد. همچنین اگر این کران‌ها به سمت صفر میل کنند، دبی عبوری از توربین‌ها افزایش خواهد یافت. با کوچکتر کردن محدوده تغییرات برای کران‌های پایین و کاهش طول گام برای این تغییرات، ملاحظه شد که اگر $0.75 \leq a_j(t) \leq 0.90$ باشد علاوه بر درصد تولید انرژی الکتریکی قابل قبول نسبت به حداکثر آن، می‌توان درصد بالایی از نیازهای آبی در بازه‌های مصرف را نیز تأمین نمود.

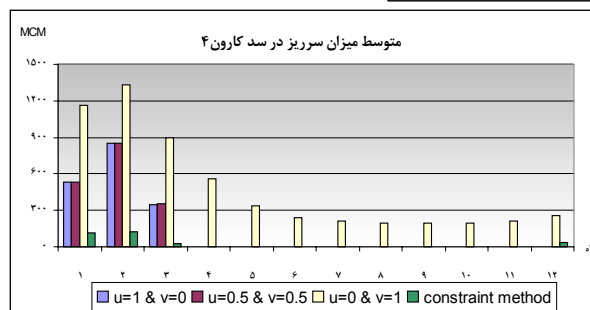
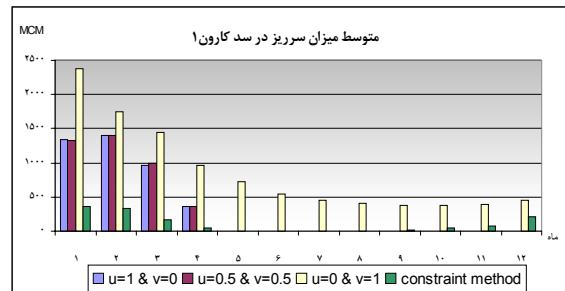
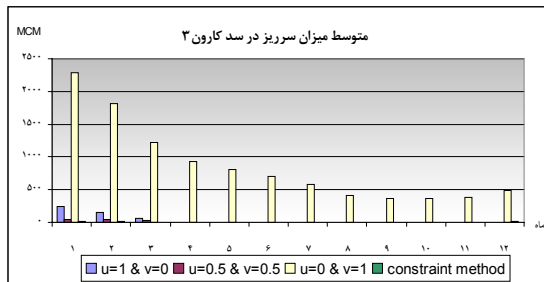
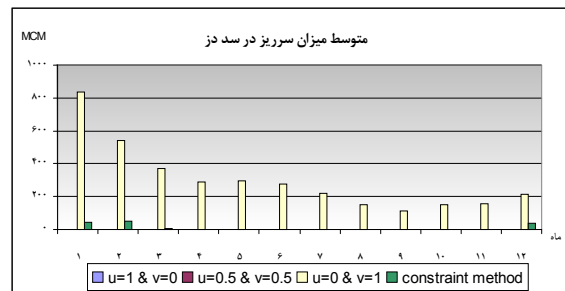
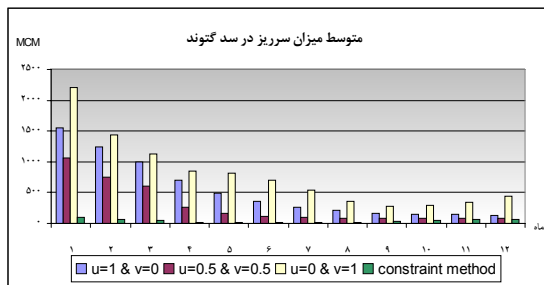
۶- نتایج

مقایسه بین برخی از نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل با اجرای سناریوهای مختلف روش وزن‌دهی و حدی در شکل‌های (۲) و (۳)

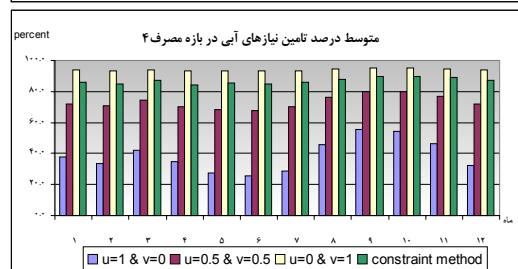
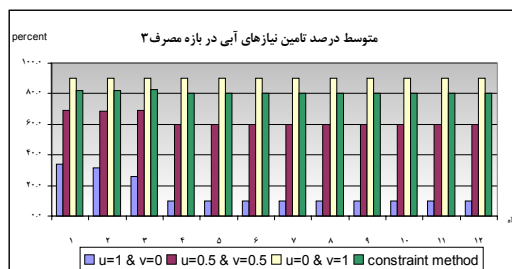
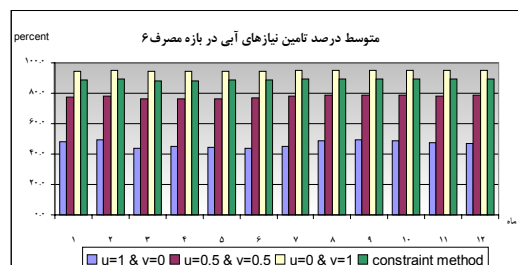
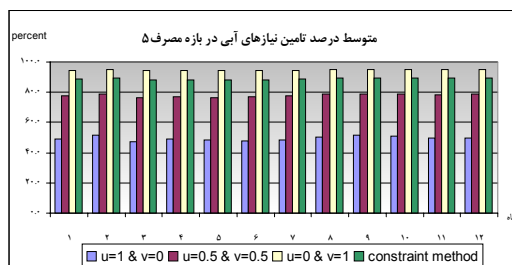
برای تمامی سدها به غیر از نیروگاه جریان‌ی گذارلندر با ظرفیت ذخیره کوچک ارائه شده است. در شکل (۲) ملاحظه می‌شود که فقط در فصل بهار که حجم سیلاب‌های فصلی افزایش می‌یابد، میزان سرریزی به خصوص در شرایطی که تابع هدف فقط تأمین نیازهای آبی باشد قابل ملاحظه است و در دیگر ماه‌ها ناچیز است. همچنین میزان سرریزی در فصل بهار در شرایطی که تابع هدف حداکثر کردن تولید انرژی برقابی باشد ($u=1, v=0$) بسیار کمتر از شرایطی است که هدف مسأله تأمین نیازهای آبی است ($u=0, v=1$). به عبارت دیگر حداکثر کردن تولید انرژی به نوعی هم جهت با حداقل کردن حجم سرریزی است. در شکل (۳) ملاحظه می‌شود که در مدل با تابع هدف غالب تولید انرژی، درصد تأمین نیاز در بازه‌های مصرف در پایین دست سد کارون ۱ (بازه مصرف ۳) نیز در حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد است که کمترین مقدار آن در مرداد ماه به ۱۲ درصد و بیشترین مقدار آن در فروردین ماه به ۳۳/۷ درصد می‌رسد. در حالتی که تابع هدف فقط شامل عبارت مربوط به تأمین نیازهای آبی باشد، درصد تأمین در تمام ماه‌ها بیش از ۹۰ درصد است. در این شرایط، بیشترین و کمترین میزان تولید انرژی برقابی نیز به ترتیب در فصل بهار و پاییز بدست می‌آید.

با کاهش وزن تابع هدف تولید انرژی برقابی و افزایش وزن تابع هدف تأمین نیازهای مصرفی، از میزان تولید انرژی کاسته و درصد تأمین تقاضای آب افزایش می‌یابد. اما در سناریویی که وزن تابع هدف تولید انرژی برقابی صفر و وزن تابع تأمین تقاضای آب برابر یک است، آب ذخیره شده در پشت سد در برخی ماه‌ها به منظور تأمین نیاز بازه‌های مصرف، کاملاً تخلیه می‌شود. میزان تخلیه آب در ماه‌های مختلف به صورتی تنظیم می‌شود که همواره امکان تأمین نیاز بازه‌های مصرف در ماه‌های خشک وجود داشته باشد. در دوره‌هایی که به علت طغیان سیلاب‌های فصلی و افزایش حجم آب ذخیره شده امکان سرریز وجود دارد، مقادیر زیادی از جریان‌های ورودی به سد به صورت سرریز خارج می‌شود.

با اجرای این سناریو ملاحظه می‌شود که درصد تأمین نیازها افزایش چشمگیری می‌یابد و در حدود ۹۰ درصد از نیازها برآورده می‌شود. در این حالت متوسط تولید انرژی برقابی در حدود نصف انرژی تولید شده حاصل از اجرای سناریوی اول (سناریویی که در آن وزن تابع انرژی برابر یک و وزن تابع تأمین تقاضای آب برابر صفر است) در هر ماه است. بیشترین و کمترین میزان تولید انرژی به ترتیب در ماه‌های اردیبهشت و دی صورت می‌گیرد.



شکل ۲- متوسط میزان سرریز در سدهای مخزنی سیستم کارون و دز



شکل ۳- متوسط درصد تامین نیازهای آبی در بازه‌های مصرف سیستم کارون و دز

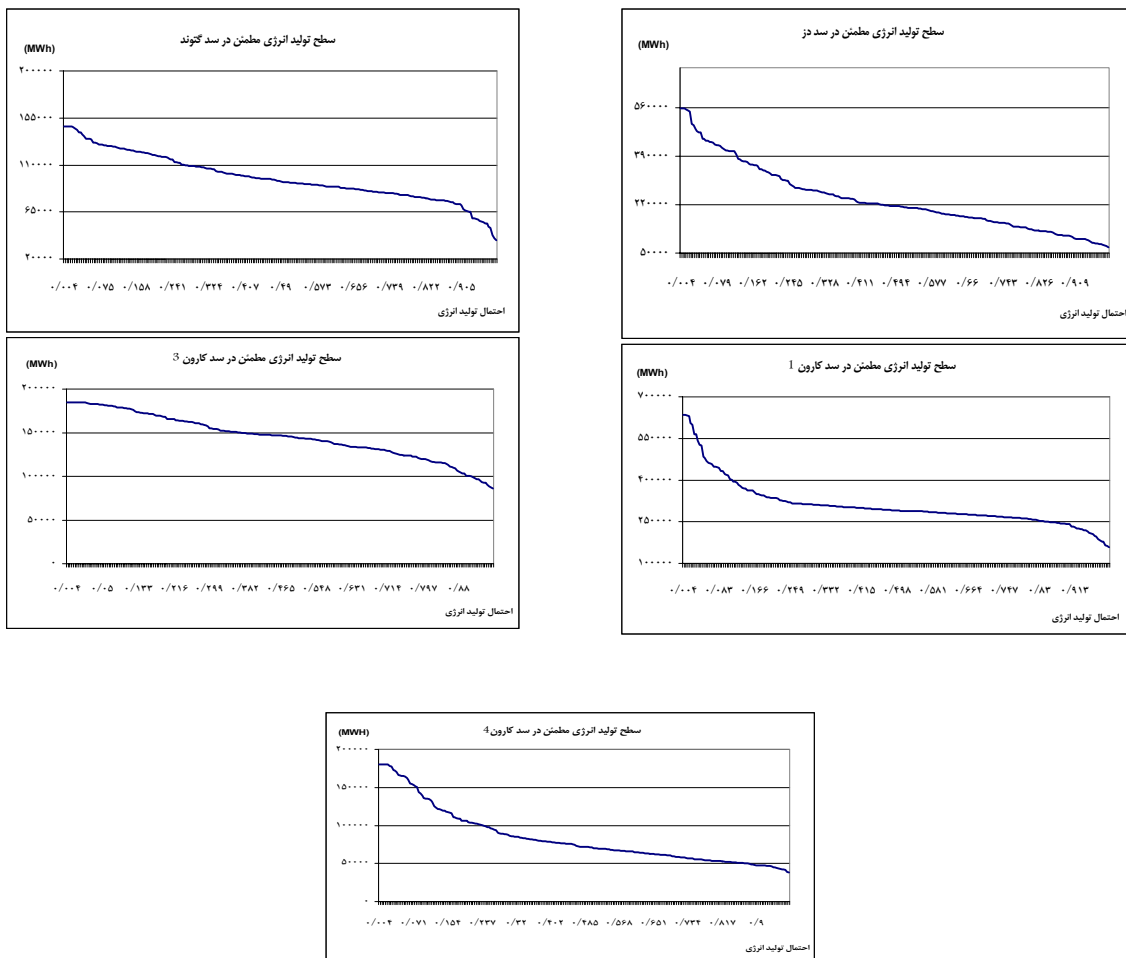
انرژی تولید شده حاصل از اجرای این سناریو نسبت به انرژی تولید شده حاصل از اجرای سناریوی اول روش وزن‌دهی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر چون تأمین حداقل ۷۵ درصد از نیازهای آبی به عنوان محدودیت در مدل در نظر گرفته شده است، لذا در ماه‌های مختلف

همچنین بررسی نتایج حاصل از روش حدی نشان می‌دهد که در این روش نیز حجم آب ذخیره شده در مخازن زیاد است و طبیعتاً میزان دبی عبوری از توربین‌ها در این روش کمتر از میزان رهاسازی آب حاصل از اجرای سناریوهای روش وزن‌دهی است. در نتیجه میزان

است. در انتها و از نقطه نظر تلاش‌های محاسباتی و زمان محاسبات این مدل بهینه‌سازی، باید متذکر شد که نتایج حاصله مزیت‌های استفاده از ساختار ماتریس‌های تَنک و الگوریتم‌های نقاط داخلی را در بهینه‌سازی مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی با ابعاد بزرگ نشان می‌دهد. بهینه‌سازی مدل برنامه‌ریزی ریاضی مجموعه سدهای مخزنی کارون و دز با استفاده از یک کامپیوتر شخصی از نوع AMD/Athlon XP 2400 MHz در مدت زمان حدود ۴۰ دقیقه انجام شد. با توجه به ابعاد بالای این مدل، زمان مذکور برای محاسبات مناسب تشخیص داده شد. زمان مذکور امکان اجرای سناریوهای مختلف به منظور برآورده کردن اهداف سیستم را در اختیار می‌گذارد. این در حالی است که با استفاده از روش‌های معمول برنامه‌ریزی غیرخطی نظیر الگوریتم‌های بزرگترین شیب^{۱۹} و الگوریتم‌های گرادیان کاهش یافته^{۲۰} در نرم‌افزار LINGO فقط امکان حل مدل فوق با افق برنامه‌ریزی یک ساله میسر گردید و بهینه‌سازی این مدل برای دوره‌های برنامه‌ریزی بیشتر از یک سال در آن به هیچ وجه امکان‌پذیر نبود.

(حتی ماه‌های خشک و کم باران) می‌توان به طور متوسط ۸۵ درصد از نیازهای حوضه‌های مصرف را برآورده نمود. از نتایج دیگر می‌توان به کاهش چشمگیر متوسط حجم آب سرریز در ماه‌های پرآب اشاره کرد. بیشترین میزان انرژی تولید شده در این حالت در خرداد ماه و کمترین آن در دی ماه انجام می‌شود. با اجرای الگوریتم روش حدی هم می‌توان تولید انرژی برقایی را افزایش داد و هم درصد بالایی از نیازهای آبی را تأمین نمود.

در شکل (۴)، احتمال تولید سطوح مختلف انرژی برقایی (منحنی پایداری انرژی) در هریک از سدهای مخزنی کارون - دز حاصل از اجرای سیاست فوق ارائه شده است. سدهایی که کمترین میزان تغییرات را در تولید انرژی دارند، برای تولید یکنواخت انرژی از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار هستند. از این قابلیت اطمینان در محاسبه سطح تولید انرژی مطمئن در نیروگاه‌های برقایی استفاده می‌شود. انرژی مطمئن به مقداری از انرژی گفته می‌شود که در ۹۰ درصد مواقع قابل تولید و دسترسی است. با بررسی این نمودارها مشخص می‌شود که قابلیت اطمینان در تولید انرژی برقایی و تأمین انرژی مطمئن در سدهای کارون^۳ و گتوند نسبت به سدهای دیگر بیشتر



شکل ۴- منحنی پایداری انرژی در سدهای مخزنی سیستم کارون و دز

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش‌های نقاط داخلی و برنامه‌ریزی چند هدفه، عملکرد مجموعه سدهای مخزنی کارون و دز که مهم‌ترین سیستم سدهای مخزنی ایران است، با اهداف حداکثرسازی تولید انرژی برق - آبی و تأمین آب برای نیازهای آبی، مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد. پیاده‌سازی این مدل با استفاده از ساختار ماتریس‌های تَنک صورت پذیرفت. ارزیابی زمان بهینه‌سازی مدل با توجه به ابعاد بالای آن از نظر تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم‌گیری در یک دوره ۴۰ ساله این نکته را مشخص کرد که پیاده‌سازی ساختار ماتریسی و استفاده از الگوریتم‌های نقاط داخلی ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی مدل‌های خطی و غیرخطی با ابعاد بزرگ هستند. در ادامه نتایج محاسباتی حاصل از حل مدل با سناریوهای مختلف برای ترکیب توابع هدف با استفاده از الگوریتم‌های روش وزن‌دهی و حدی مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی نتایج حاصل از اجرای روش وزن‌دهی مشخص شد که میزان تأثیر تابع تولید انرژی برق - آبی نسبت به تابع تأمین نیازهای آبی در تعیین جواب‌های بهینه چشمگیر است. همچنین ملاحظه شد که با اجرای روش حدی می‌توان با کاهش میزان سرریز، درصد بالایی از اهداف سیستم را به طور همزمان برآورده کرد. با استفاده از نتایج محاسباتی این مدل بهینه‌سازی و بر اساس میزان بهینه دبی عبوری از توربین‌ها، میزان سرریز آب و برآورد میزان تأمین آب برای مصارف مختلف، می‌توان قوانین بهره‌برداری به منظور برنامه‌ریزی بهره‌برداری سدهای مخزنی در دوره‌های بلندمدت و کوتاهمدت را توسعه داد. این قوانین بهره‌برداری، ابزار مناسبی در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران در تعیین سیاست‌های بهره‌برداری بهینه قرار می‌دهند.

پی‌نوشت‌ها:

- 1- Stochastic Dynamic Programming (SDP)
- 2-Piece-wise Linearization
- 3- Quadratic Function
- 4-Optimal Control Theory
- 5-Feasible Direction Method
- 6-Primal-Dual Interior Point Method
- 7-Sparse matrices
- 8-Tailwater
- 9-Quadratic
- 10-www.mathworks.com
- 11-Sparse
- 12-www.tomlab.biz
- 13-Interior Point Methods
- 14-Karush-Kuhn-Tucker
- 15-Multi Objective Programming
- 16-Noninferior Solutions
- 17-Weighing Method
- 18-Constraint Method
- 19-Steepest Discend Algorithms
- 20-Reduced Gradient Algorithms

تاریخ دریافت مقاله : ۱۹ مرداد ۱۳۸۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۲ آبان ۱۳۸۴

۸- مراجع

- Diaz, G. E., and Fontane, D. G., (1989), "Hydropower optimization via sequential quadratic programming", *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(6), pp. 715-731.
- Hwang, C. L., and Masud, A. S., (1981), "Multiple objective decision making methods and applications: A State-of- The Art Survey", Springer-Verlag, Berlin.
- Hwang, C. L., and Yoon, K. (1983), "Multiple attribute decision making methods and applications: A State-of- the art Survey", Springer-Verlag, Berlin.
- Grygier, J. C., and Stedinger, J. R., (1985), "Algorithms for optimizing hydropower system operation", *Water Resources Research*, 21(1), pp. 1-10.
- Mehrotra (1992), "On the implementation of a primal-dual interior point method", *SIAM Journal on Optimization*, 2, pp. 575-601.
- Labadie, J. W., (2004), "Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review", *ASCE Journal of Water Resources Planning And Management*, 130(2), pp. 93-111.
- Murtagh, B. A., and Saunders, M. A. (1983), "MINOS 5.0 User's Guide", Technical Report SOL 83-20, Stanford University, Stanford, California.
- Palacios-Gomez, F., Lasdon, L., and Engquist, M. (1982), "Nonlinear optimization by successive linear programming", *Management Science*, 2(10), pp. 1106-1120.
- Pereira, M. V. F. and Pinto, L. M. V. G. (1991), "Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning", *Mathematical Programming*, 52, pp. 359-375.
- Ponnambalam, K., Vannelli, A., and Unny, T. E. (1989), "An application of Karmarkar's interior point linear programming algorithm for multireservoir operations optimization", *Stochastic Hydrol and Hydraul.*, 3(1), pp. 17-29.
- Potra, F. A. (1994), "A quadratically convergence predictor-corrector method for solving linear programs from infeasible starting points", *Mathematical Programming*, 67, pp. 383-406.
- Rosenthal, R. E. (1983), "Nonlinear programming methods in reservoir system management," Tennessee Water Resources Center, Knoxville, Research Report RR-93, PB87-218-228, April.
- Seifi, A. and Hipel, K. W., (2001), "Interior-point method for reservoir operation with stochastic inflows," *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(1), pp. 1-10.