

## Derivation of Simultaneous Operational Rules of Multi-Reservoir Systems in Low- flow Condition

Y. Bolouri Yazdeli<sup>1\*</sup>, O. Bozorg Haddad<sup>2</sup>  
and S. Alimohammadi<sup>3</sup>

### Abstract

In this study, optimal operation of multi-reservoir systems has been compared with the results of the related single-reservoir operation. In fact, in optimal simultaneous operation of reservoirs considering the effects of upstream reservoirs on downstream ones, the macro operation is preferred. A three-reservoir system of KaroonV-Bazoft-KaroonIV dams is studied for different objectives of supplying downstream demands and generating hydropower. The Results have been obtained for three methods; nonlinear programming (NLP); standard operational policy (SOP) and rule curves, for a 48 month period. The rule curves which present release volume as a function of the reservoir storage volume and the river discharge, has been selected as the preferable operational policy for both objectives in the system. Validation of the suggested curves has been tested in a dry period.

**Keywords:** Simultaneous operational, Multi-reservoir system, Rule curve, Low flow condition.

Received: February 9, 2009  
Accepted: January 23, 2011

## استخراج قواعد بهره‌برداری همزمان سیستم‌های چندمخزنه در شرایط کم‌آبی

یاسمن بلوری یزدلی<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ حداد<sup>۲</sup>  
و سعید علیمحمدی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مطالعه، بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنی با نتایج بهره‌برداری مجزای تک‌مخزنی متناظر مقایسه شده است. در حقیقت در بهره‌برداری همزمان، با در نظر گرفتن اثرات مخازن بالادست بر مخزن پایین‌دست، بهره‌برداری کلان صورت می‌پذیرد که برتری بیشتری نسبت به بهره‌برداری خرد در حالت تک‌مخزنی دارد. بدین‌منظور، سیستم سه‌مخزنی کارون پنج-بازفت-کارون چهار، با اهداف مختلف تأمین نیاز پایین‌دست و تأمین نیاز برق‌آبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل با به کارگیری سه روش برنامه‌ریزی غیرخطی، سیاست بهره‌برداری استاندارد و منحنی فرمان برای یک دوره آماری ۴۸ ماه نسبتاً خشک استخراج شده است. همچنین منحنی فرمان که حجم رهاسازی را به‌عنوان تابعی از حجم ذخیره مخزن و آورد رودخانه ارائه می‌کند، بعنوان سیاست بهره‌برداری مناسب برای هر دو هدف در سیستم مزبور انتخاب شده است. آزمون منحنی مزبور برای دوره‌های آماری خشک، اعتبار این منحنی را نمایان می‌سازد.

**کلمات کلیدی:** بهره‌برداری همزمان، سیستم چندمخزنی، منحنی فرمان، شرایط کم‌آبی.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۱ بهمن ۱۳۸۷  
تاریخ پذیرش مقاله: ۳ اسفند ۱۳۸۹

1- M.Sc of Water Resources, Tehran University, Karaj- Iran, Email: y.bolouri@gmail.com

2- Assistant Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj- Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Water Engineering, University of Water & Electrical Industry Shahid Abbaspour, Tehran- Iran.

\*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد منابع آب، دانشگاه تهران، کرج- ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج- ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران- ایران

\*- نویسنده مسئول

## ۱- مقدمه

بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبورهای عسل (HBMO)، توسط Afshar et al. (2010) گسترش یافت که اهداف مورد مطالعه آن‌ها تأمین نیاز و تولید برق‌آبی بر روی یک سیستم دو مخزنی موازی بود.

در حوضه‌های بزرگ، جهت کنترل جریان رودخانه، در بخش‌های مختلف آن می‌توان چندین مخزن احداث نمود که بایستی به‌منظور تأمین اهداف مختلف مدیریت شوند. اهداف مختلف در مدیریت مخازن می‌توانند تأمین نیازهای کشاورزی، تأمین آب شرب، مصارف شهری و صنعتی، نیروگاه برق‌آبی، کنترل سیلاب، جنبه‌های تفریحی و... باشند. در چنین شرایطی می‌توان تأمین هدف مورد نظر را برای هر یک از مخازن به صورت جداگانه بررسی نمود و تنها از نیازهای تعریف شده در محدوده هر مخزن برای بهره‌برداری از آن استفاده کرده و حالت بهینه بهره‌برداری از هر مخزن را استخراج نمود. در این حالت اثرات مخازن بالادست بر پایین‌دست در نظر گرفته نمی‌شود که در واقع یک مدیریت خرد بر سیستم اعمال می‌شود. حال اگر قرار باشد این اثرات در نظر گرفته شوند، بایستی سیستم مخازن به‌طور همزمان و هماهنگ با هم بررسی گردد، آنگاه یک مدیریت جامع و کلان صورت پذیرد و بدین‌طریق می‌توان یک سری قواعد بهره‌برداری مخزن برای کل سیستم چندمخزنی موجود استخراج نموده و سیستم موجود را به‌صورت جامع و یکپارچه مدیریت نمود.

در این مطالعه، تأثیر بهره‌برداری چندمخزنی برای اهداف تأمین نیاز پایین‌دست و تولید انرژی برق‌آبی بر روی سیستم سه‌مخزنی کارون پنج-بازفت-کارون چهار نسبت به مجموع متناظر بهره‌برداری تک‌مخزنی هر یک از مخازن بررسی شده است. بدین‌ترتیب تفاوت مدیریت خرد و جامع سیستم‌های چندمخزنی با اهداف مختلف نمایان می‌شود. این تفاوت بهره‌برداری برای سه روش برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)، منحنی فرمان (Rule-Curve) و سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) بررسی شده است.

## ۲- بهره‌برداری از سیستم چندمخزنه

در بهره‌برداری از مخزن سدها، آب یا می‌تواند برای مصارف سودمند رهاسازی شود یا جهت استفاده‌های آینده در مخزن باقی بماند. انتخاب نازآمده این دو گزینه در هنگام وقوع جریان‌های آتی نامعلوم، منافع اقتصادی نامناسبی را در پی خواهد داشت. تابع هدف معمول جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\text{Max (or Min)} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T f_{i,t}(S_{i,t}, R_{i,t}, D_{i,t}) \quad (1)$$

مخازن، سازه‌هایی هستند که توسط بشر برای کنترل جریان رودخانه جهت تأمین نیازهای آبی ساخته می‌شوند. بهره‌برداری بهینه از مخازن بدین جهت که مقاصد چندگانه‌ای را از لحاظ اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی با خود به همراه دارند از اولویت‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد. سیاست بهره‌برداری شامل مجموعه‌ای از قوانین است که در شرایط مختلف بهره‌برداری، مقدار آبی را که بایستی ذخیره یا رهاسازی گردد، تعیین می‌نماید.

بسیاری از قواعد بهره‌برداری مخزن را می‌توان در مطالعات Bower et al. (1962) همچنین مطالعات جامعی از روش‌های بهینه‌سازی قواعد بهره‌برداری مخزن توسط Loucks et al. (1981) و این روش‌ها را در سه گروه برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا تقسیم‌بندی نمودند. روابط جیره‌بندی در طراحی بهره‌برداری مخزن را Hashimoto et al. (1982) بیان کردند و همچنین شاخص‌های کارایی اندازه‌گیری تأثیر عملکرد مخزن شامل اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری را ارائه نمودند. در ادامه Yeh (1985) مطالعات پیشرفته‌ای در زمینه مدیریت مخزن و مدل‌های بهره‌برداری داشته است. قواعد بهره‌برداری برای یک سیستم چندمخزنه را Oliveira and Loucks (1997) بیان نموده و از الگوریتم ژنتیک برای استخراج منحنی‌های فرمان این سیستم استفاده کردند. قواعد بهره‌برداری چندمخزنی را Lund and Guzman (1999) برای حالت‌های مجزای سری و موازی و به صورت تک‌هدفه بررسی نمودند. روش‌های بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنی را Labadie (2004) در مطالعه‌ای جامع بررسی نمود. انواع جیره‌بندی و ذخیره بهینه در بهره‌برداری بهینه از مخازن را Draper and Lund (2004) به طور کامل و با بررسی روابط آنها تشریح نمودند و نشان دادند که سیاست جیره‌بندی بهینه جهت بهره‌برداری مخازن ذخیره آب به توازن بین رهاسازی و مقدار حجم ذخیره سالانه بستگی دارد. برای سیستم دو مخزنی سری در شمال تابوان و با هدف برق‌آبی Lin et al. (2005) منحنی‌های فرمان بهره‌برداری را به منظور کاهش مقدار و مدت کمبودها و افزایش بازدهی برق‌آبی به کار گرفتند. جعفری (۱۳۸۳) منحنی‌های فرمان احتمالی برای دو سیستم تک‌مخزنی در تایلند را با طول دوره ۴۸ سال تدوین نموده است و سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) نیز در شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن استفاده گردیده تا تأثیر تدوین منحنی‌های فرمان احتمالی به خوبی مشاهده شود. قواعد بهره‌برداری برای سیستم چندمخزنی با استفاده از الگوریتم بهبود یافته

$$R \min_i \leq R_{i,t} \leq R \max_i \quad (4)$$

for  $t = 1, \dots, T$ , for  $i = 1, \dots, N$

که  $R \min_i =$  حداقل حجم رهاسازی از مخزن  $i$  و  $R \max_i =$  حداکثر حجم رهاسازی از مخزن  $i$  می‌باشند.

سرریز از مخزن نیز قیوداتی را در محاسبات اعمال می‌نماید به طوری که:

$$SP_{i,t} = \begin{cases} S_{i,t} + Q_{i,t} - R_{i,t} - S \max_i & \text{if } S_{i,t} + Q_{i,t} - R_{i,t} > S \max_i \\ 0 & \text{if } S_{i,t} + Q_{i,t} - R_{i,t} < S \max_i \end{cases} \quad (5)$$

محاسبات دقیق تبخیر و سایر افت‌های موجود در عبارت  $L_{i,t}$  مجموعه‌ای از معادلات ضمنی خطی یا غیرخطی را ایجاد می‌نمایند که می‌تواند محاسبات را مشکل سازد. سطح آزاد آب دریاچه در ابتدای هر دوره زمانی به عنوان تابعی از حجم ذخیره در ابتدای همان دوره در نظر گرفته می‌شود که از منحنی حجم-سطح مخزن استخراج می‌شود. این رابطه در تحقیق حاضر به صورت یک تابع توانی درجه سه بیان شده است:

$$L_{i,t} = Ev_{i,t} \times \overline{A_{i,t}} / 1000 \quad (6)$$

$$\overline{A_{i,t}} = (A_{i,t} + A_{i,t+1}) / 2 \quad (7)$$

$$A_{i,t} = a0_i + a1_i \times S_{i,t} + a2_i \times S_{i,t}^2 + a3_i \times S_{i,t}^3 \quad (8)$$

که در آن  $Ev_{i,t} =$  تبخیر از سطح مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  برحسب میلی‌متر،  $\overline{A_{i,t}} =$  متوسط سطح مخزن  $i$  در ابتدا و انتهای دوره  $t$   $A_{i,t}$  = سطح مخزن  $i$  در ابتدای دوره  $t$   $a0_i$ ،  $a1_i$ ،  $a2_i$  و  $a3_i$  = ضرایب ثابت تبدیل حجم ذخیره مخزن  $i$  به سطح متناظر آن در ابتدای دوره  $t$  می‌باشند.

رابطه (۹) نیز بعنوان یک قید دیگر جهت یکسان‌سازی حجم ذخیره هر مخزن در ابتدا و انتهای طول دوره بهره‌برداری در نظر گرفته شده است. به طوری که استفاده از آن در مواقع در نظر گرفتن طول دوره آماری کوتاه توصیه می‌شود.

$$S_{i,1} = S_{i,T+1} \quad (9)$$

محدودیت‌هایی که بیان شد در هر سیستم مخازن برای اهداف مختلف ثابت می‌باشد. اغلب، مخازن جهت تأمین نیازهای آبی گوناگونی ساخته می‌شوند که در محاسبات بهره‌برداری از مخزن بسته به اهداف مورد بررسی، تابع هدف‌های مختلف و قیودات دیگری علاوه بر قیودات ذکر شده مورد نیاز می‌باشد. در تحقیق

که در آن اندیس  $i =$  شماره مخزن،  $t =$  دوره مورد نظر،  $N =$  تعداد مخازن،  $T =$  تعداد دوره‌های بهره‌برداری،  $f_{i,t}(\dots) =$  هدفی است که باید بیشینه و یا کمینه شود،  $S_{i,t} =$  بردار حالت (حجم ذخیره) مخزن  $i$  در آغاز دوره  $t$  برحسب میلیون مترمکعب،  $R_{i,t} =$  حجم رهاسازی (متغیر تصمیم) مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  برحسب میلیون مترمکعب و  $D_{i,t} =$  نیاز مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  برحسب میلیون مترمکعب می‌باشد. گام زمانی مورد استفاده در این رابطه ممکن است ساعتی، روزانه، هفتگی، ماهانه و یا فصلی باشد که به طبیعت و هدف مسئله بهینه‌سازی بستگی دارد. معادله پیوستگی براساس حفظ پایایی جرم در سیستم به عنوان یک رابطه اساسی می‌باشد که عبارت است از:

$$S_{i,t+1} = S_{i,t} + Q_{i,t} + C.R_{i,t} + C'.SP_{i,t} - L_{i,t} \quad (2)$$

که  $Q_{i,t} =$  بردار جریان ورودی رودخانه به مخزن  $i$  در طول دوره زمانی  $t$  برحسب میلیون مترمکعب،  $C =$  ماتریس ارتباط یا روندیابی سیستم که جریان خروجی از هر مخزن را به مخازن دیگر ارتباط می‌دهد و ارتباط مکانی شبکه مخازن را تعریف می‌نماید. مؤلفه‌های قطر اصلی این ماتریس برابر  $-1$  می‌باشد و سایر مؤلفه‌ها بین صفر تا یک متغیر می‌باشند که بستگی به میزان آب برگشتی اهداف مختلف که به مخزن پایین دست منتقل می‌شود، دارد.  $C' =$  ماتریس ارتباط یا روندیابی سیستم جهت انتقال مقادیر سرریز مخازن بالادست به مخازن پایین دست، که مشابه ماتریس  $C$  می‌باشد ولی درایه‌های غیر قطر اصلی صفر و یا یک می‌باشند. در تحقیق حاضر بدلیل در نظر گرفتن آب بازگشتی ۱۰۰ درصد برای کلیه اهداف، دو ماتریس مزبور یکسان می‌باشند.  $SP_{i,t} =$  سرریز از مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  برحسب میلیون مترمکعب،  $L_{i,t} =$  برداری است که نمایانگر تبخیر و دیگر افت‌های موجود از مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  می‌باشد.

محدوده‌های بالایی و پایینی حجم ذخیره می‌بایست به گونه‌ای باشد 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 آورد:

$$S \min_i \leq S_{i,t} \leq S \max_i \quad (3)$$

for  $t = 1, \dots, T$ , for  $i = 1, \dots, N$

که  $S \min_i =$  حجم حداقل مخزن  $i$  و  $S \max_i =$  حجم حداکثر مخزن  $i$  می‌باشند. محدوده‌های خروجی از مخزن نیز به گونه‌ای تعیین می‌شود که از یک طرف حداقل میزان آب ورودی به پایین دست را جهت کنترل کیفیت آب و حفظ بقای موجودات زنده و ماهیان فراهم آورده و از طرف دیگر پایین دست را از خطر سیل در امان سازد.

حاضر بهره‌برداری برای دو هدف تأمین نیاز پایین‌دست (مجموع شرب، کشاورزی، صنعت و محیط زیست) و تأمین انرژی برقایی صورت گرفته است.

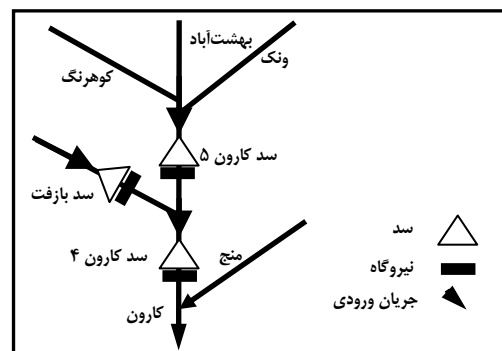
در بهره‌برداری واقعی از سیستم مخازن، بهره‌برداران معمولاً از دستورالعمل‌هایی پیروی می‌کنند که با استفاده از آن‌ها می‌توان تصمیم نسبتاً صحیحی را برای بهره‌برداری از سیستم اتخاذ نمود. برای تعریف سیاست‌های بهره‌برداری مخزن، رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی می‌تواند به عنوان تابعی از برخی پارامترها از قبیل حجم ذخیره مخزن، آورد رودخانه و یا نیاز پایین‌دست ذکر شود. انتخاب هر یک از این پارامترها به اهداف مورد نظر و اهمیت هر یک در تعیین مقدار رهاسازی‌ها بستگی دارد. لذا چند جمله‌ای عمومی زیر بیانگر رابطه بین حجم رهاسازی از مخزن و پارامترهای مؤثر در تعیین آن می‌باشد.

$$R_{i,t} = a_{i,j} + b_{i,j} \times S_{i,t} + c_{i,j} \times Q_{i,t} \quad (10)$$

که در آن  $a_{i,j}$ ،  $b_{i,j}$  و  $c_{i,j}$  ضرایب ثابت مخزن نام برای دوره زام می‌باشد، که می‌تواند به صورت هفتگی، ماهانه و یا فصلی تعریف شوند. در تحقیق حاضر از رابطه مزبور جهت استخراج منحنی فرمان بهره‌برداری ماهانه استفاده شده است.

### ۳- بهره‌برداری از سیستم سه مخزنی کارون پنج- بازفت- کارون چهار

به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن و به عنوان یک مطالعه موردی از سیستم سه مخزنی بازفت، کارون پنج و کارون چهار که به صورت سری و موازی قرار گرفته‌اند، استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱- سیستم سه مخزنی کارون ۵-بازفت- کارون ۴

حوضه آبریز رودخانه کارون در غرب کشور قرار گرفته که از ارتفاعات زاگرس سرچشمه می‌گیرد. این حوضه از شمال 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.

رودخانه بازفت از سرشاخه‌های اصلی این رودخانه کارون و دومین رودخانه پرآب آن می‌باشد. محل سد بازفت بر روی این شاخه می‌باشد. موقعیت جغرافیایی این رودخانه در  $50^{\circ} 50'$ :  $31^{\circ}$  عرض شمالی و  $19^{\circ} 50'$ :  $50^{\circ}$  طول شرقی می‌باشد. متوسط جریان سالانه ورودی به این مخزن  $2,012/6$  میلیون متر مکعب برآورد شده است. حجم حداقل سد  $142/15$  و حجم حداکثر آن  $450/3$  میلیون متر مکعب و ظرفیت نصب نیروگاه آن  $290$  مگاوات می‌باشد. مخزن کارون پنج بر روی سرشاخه رود کارون بوده و مختصات جغرافیایی آن در  $39^{\circ} 39'$ :  $31^{\circ}$  عرض شمالی و  $43^{\circ} 43'$ :  $50^{\circ}$  طول شرقی می‌باشد. متوسط جریان سالانه ورودی به این مخزن  $2,469/2$  میلیون متر مکعب تخمین زده شده و حجم حداقل و حداکثر آن به ترتیب برابر  $1,220/81$  و  $2,013/15$  میلیون متر مکعب و ظرفیت نصب نیروگاه آن  $500$  مگاوات در نظر گرفته شده است. موقعیت سد کارون چهار در بخش علیای رودخانه کارون و قبل از تلاقی این رودخانه به خرسان واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی در مختصات  $35^{\circ} 35'$ :  $31^{\circ}$  عرض شمالی و  $24^{\circ} 24'$ :  $50^{\circ}$  طول شرقی قرار دارد. متوسط جریان سالانه میان حوضه‌های ورودی به این مخزن  $645/64$  میلیون متر مکعب تخمین زده شده و حجم حداقل سد  $1,441/29$  و حجم حداکثر آن  $2,190$  میلیون متر مکعب و ظرفیت نصب نیروگاه آن  $1,000$  مگاوات است. براین اساس ماتریس ارتباط  $C$  و  $C'$  که در این مطالعه یکسان در نظر گرفته شده‌اند، به صورت زیر می‌باشد:

$$C = C' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ +1 & +1 & -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

دوره آماری مورد مطالعه چهار سال آماری نسبتاً خشک (۱۳۴۶-۱۳۴۳) از ۴۳ سال آمار موجود می‌باشد.

#### الف) بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز پایین‌دست

مجموع نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست به عنوان مجموعه نیازهای پایین‌دست در نظر گرفته شده‌اند. در تحقیق حاضر، این هدف به صورت کمینه‌سازی مجموع مجذور انحراف رهاسازی از نیاز در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مقادیر تابع هدف بهره‌برداری از سیستم‌های تک‌مخزنی

روش			کارون پنج	تک‌مخزنی
SOP	Rule-Curve	NLP		
۳/۶۵۳	۱/۴۵۷	۱/۱۹۵		
۳/۰۸۹	۰/۷۸۳	۰/۶۵۳	بازفت	
۳/۸۰۳	۱/۲۵۳	۱/۲۴۰	کارون چهار	
۱۰/۵۴۵	۳/۴۹۳	۳/۰۸۸	مجموع	

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر سه روش، مقدار تابع هدف سیستم سه‌مخزنی کمتر (بهتر) از مجموع مقادیر متناظر سیستم‌های تک‌مخزنی می‌باشد. به طوری که روش NLP، ۰/۱ درصد و روش SOP، ۳/۸۷ درصد بهبود یافته است و منحنی فرمان بهره‌برداری نیز با ۵/۱۰ درصد، بهبود بیشتری در مقایسه با دو روش دیگر ارائه نموده است. همچنین منحنی فرمان در این بخش نیز، نتایجی ما بین دو روش دیگر اما نزدیک به NLP ارائه نموده است.

جدول ۲- مقایسه تابع هدف تأمین نیاز مصرفی در سیستم سه‌مخزنی

روش	سیستم سه‌مخزنی	مجموع سیستم‌های تک‌مخزنی	میزان بهبود تابع هدف برحسب درصد
NLP	۳/۰۸۵	۳/۰۸۸	۰/۱۰
Rule-Curve	۳/۳۱۵	۳/۴۹۳	۵/۱۰
SOP	۱۰/۱۳۷	۱۰/۵۴۵	۳/۸۷

منحنی نیاز و حجم رهاسازی بهره‌برداری سیستم سه‌مخزنی در شکل ۲ و منحنی تغییرات حجم ذخیره مخزن برای سه روش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در شکل ۲ منحنی فرمان، مقادیر رهاسازی را بین دو روش NLP و SOP ارائه نموده است. در شکل ۳ نیز، نتایج منحنی فرمان نزدیک به حجم ذخیره حاصل از NLP بوده و مقادیر حجم ذخیره حاصل از SOP برای هر سه مخزن در اکثر دوره‌ها نزدیک به حجم ذخیره حداقل می‌باشد. همچنین در جدول ۳ ضرایب ثابت بدست آمده از منحنی فرمان ارائه شده است.

در این جدول ضریب ثابت ( $a$ ) برای مخزن کارون پنج، برای کلیه دوره‌ها وجود داشته درحالی‌که دو مخزن دیگر برای بسیاری از دوره‌ها جریان ثابت نداشته و بویژه در مورد کارون چهار در اکثر ماه‌ها برابر صفر و یا نزدیک به صفر می‌باشد. به‌طور کلی ضرایب وابسته به آورد

$$\text{Min } TSD = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left( \frac{D_{i,t} - R_{i,t}}{D \max_i} \right)^2 \quad (12)$$

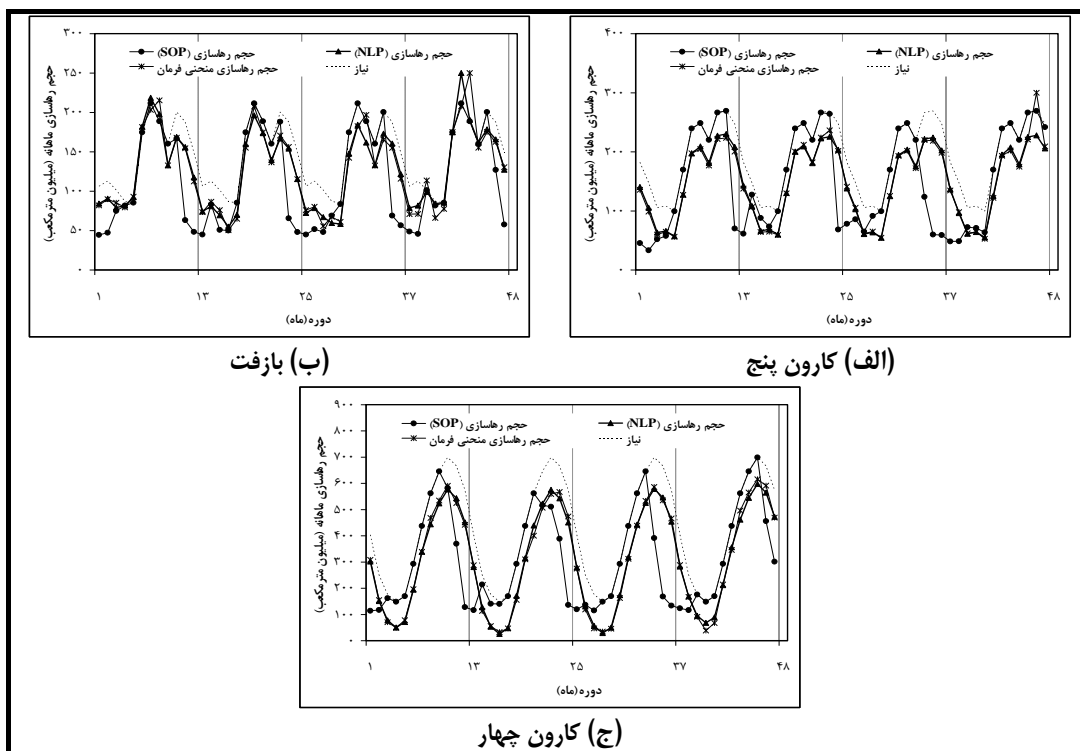
که در آن  $TSD$  = تابع هدف و  $D \max_i$  = حداکثر نیاز مخزن  $i$  در طول دوره‌های بهره‌برداری می‌باشد. قیودات مسئله نیز روابط (۲) تا (۹) می‌باشد.

ابتدا بهره‌برداری از مخازن به صورت مجزا صورت گرفته و شامل بهره‌برداری از سه سیستم تک‌مخزنی می‌باشد. به عبارت دیگر، هر یک از مخازن کارون پنج، بازفت و کارون چهار به صورت تک‌مخزنی بهره‌برداری شده و منحنی فرمان رابطه (۱۰)، به‌همراه مقادیر بهینه مطلق حاصل از NLP و نیز سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) ارائه شده‌اند.

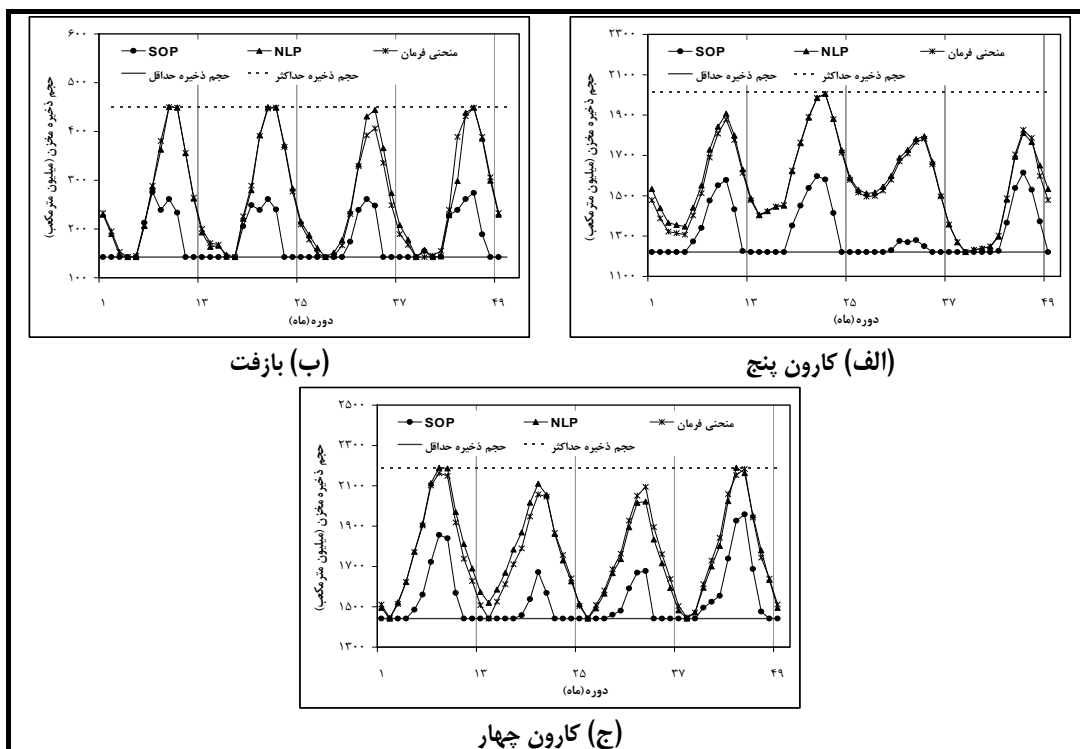
مخازن کارون پنج و بازفت ورودی‌های خود را به‌صورت جریان تنظیم نشده از جریان رودخانه دریافت می‌نمایند، در حالیکه مخزن کارون چهار به صورت مجموع جریان‌های تنظیم شده خروجی از دو مخزن کارون پنج و بازفت و جریان میان حوضه‌ای دریافت می‌نماید. در جدول ۱ مقادیر تابع هدف (معادله ۱۲) و اجرای مستقل آن برای سیستم‌های تک‌مخزنی سه روش ارائه شده است.

بهینه‌سازی NLP و استخراج منحنی فرمان با استفاده از نرم‌افزار Lingo11 انجام شده‌اند. روش NLP مقدار بهینه مطلق را برای بهره‌برداری بلندمدت ارائه می‌دهد و دو روش شامل قواعد بهره‌برداری می‌باشد که SOP به عنوان ساده‌ترین سیاست بهره‌برداری و منحنی فرمان به عنوان یک سیاست کارآمد ارائه شده است. در روش SOP با توجه به اینکه هدف تأمین نیاز دوره حاضر است و به دوره‌های آتی توجهی نمی‌شود، چنانچه در یک دوره خاصی، نیاز مخازن بالادست تأمین شده و حجم ذخیره مخزن بیشتر از حجم حداقل آن باشد، از طرفی مخزن پایین‌دست نتواند نیاز خود را تأمین نماید، از ذخایر مخازن بالادست جهت رفع نیاز مخازن پایین‌دست استفاده می‌شود. اما در منحنی‌های فرمان پیشنهادی این رویه به کار نمی‌رود. به طوری که منحنی فرمان نتایجی مابین دو روش و بسیار نزدیک به NLP برای هر سه مخزن ارائه نموده است.

در جدول ۲ نتایج بهره‌برداری سیستم سه‌مخزنی و مجموع تابع هدف بهره‌برداری سیستم‌های تک‌مخزنی که از جدول ۱ بدست آمده‌اند، به‌همراه میزان بهبود بهره‌برداری سیستم سه‌مخزنی نسبت به سیستم‌های متناظر تک‌مخزنی، ارائه شده است.



شکل ۲- حجم رهاسازی سیستم سه مخزنی



شکل ۳- تغییرات حجم ذخیره سیستم سه مخزنی

### جدول ۳- متغیرهای تصمیم (ضرایب ثابت) بدست آمده از منحنی فرمان

مخزن									
کارون چهار			بازفت			کارون پنج			ضرایب ثابت
c	b	a	c	b	a	c	b	a	
۰/۴۴۲	۰/۲۴۵	۰	۰/۲۹۸	۰/۲۸۳	۷۲/۶۴۷	۰/۰۵۵	۰/۰۲۱	۱۷۰/۴۶۸	فروردین
۰/۴۳۵	۰/۳۷۲	۳/۵۷۶	۰/۷۵۵	۰	۰	۰/۰۵۸	۰/۰۴۰	۱۶۶/۶۰۷	اردیبهشت
۰/۷۳۰	۰/۴۳۶	۰	۰/۶۲۲	۰/۱۶۲	۰	۰/۰۴۷	۰/۰۴۱	۱۴۰/۵۸۱	خرداد
۰/۳۸۸	۰/۹۰۰	۰	۰/۱۷۸	۰/۱۳۸	۱۱۲/۱۱۳	۰	۰/۰۲۰	۲۰۸/۷۵۱	تیر
۰/۸۷۶	۰/۵۲۸	۰	۰/۳۳۴	۰/۰۷۴	۱۱۷/۱۸۹	۱/۵۴۴	۰	۱۱۷/۱۳۳	مرداد
۰	۲/۳۶۹	۰/۷۹۲	۰/۸۴۵	۰/۲۴۰	۴۱/۷۰۵	۰/۳۵۵	۰	۱۷۵/۵۰۵	شهریور
۰/۷۷۲	۱/۷۱۹	۰	۰	۰/۲۵۸	۵۸/۵۸۷	۰/۱۳۴	۰/۰۱۲	۱۲۵/۸۲۵	مهر
۰/۵۵۵	۱۰/۰۰۰	۰/۲۶۲	۰/۳۵۳	۰/۶۵۴	۳۸/۳۰۵	۰/۰۷۸	۰/۰۱۸	۹۳/۰۳۲	آبان
۰/۳۹۵	۰	۰	۱/۰۰۲	۰/۹۹۴	۰	۰/۱۱۵	۰/۰۰۲	۵۳/۸۰۸	آذر
۰/۲۵۲	۰	۰	۰/۹۵۷	۱۰/۰۰۰	۰	۰	۰/۰۰۱	۶۴/۴۶۷	دی
۰/۳۷۷	۰	۰	۰/۳۲۵	۱۰/۰۰۰	۱۶/۷۸۴	۰/۰۴۰	۰	۵۰/۳۰۳	بهمن
۰/۴۹۸	۰	۱/۰۳۱	۰/۶۳۸	۰/۰۹۱	۸/۵۰۵	۰/۰۸۲	۰	۱۰۷/۸۰۷	اسفند

#### ب) بهره‌برداری با هدف تأمین نیاز برقی

چنانچه هدف، تأمین نیاز برقی در نظر گرفته شود، می‌توان تابع هدف را به صورت کمینه‌سازی اختلاف توان تولیدی نیروگاه از حداکثر توان تولیدی آن در نظر گرفت.

$$\text{Min Def} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \left( 1 - \frac{P_{i,t}}{PPC_i} \right) \quad (13)$$

که در آن  $\text{Def}$  = شاخص کمبود کل،  $P_{i,t}$  = توان تولیدی نیروگاه  $i$  در طول دوره  $t$  برحسب مگاوات و  $PPC_i$  = ظرفیت نصب نیروگاه  $i$  برحسب مگاوات می‌باشد. توان تولیدی نیروگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{i,t} = g \times e_{i,t} \times RP_{i,t} / PF_{i,t} / Mul_t \times (\overline{H_{i,t}} - TW_{i,t}) / 1000 \quad (14)$$

که در آن  $g$  = شتاب جاذبه زمین و برابر  $9/81$ ،  $e_{i,t}$  = بازده نیروگاه  $i$  در طول دوره  $t$  می‌باشد، که مجموع بازده توربین و ژنراتور است. بازده ژنراتور معمولاً ثابت فرض می‌شود ولی بازده توربین با توجه به پارامترهای بهره‌برداری نظیر هد و دبی تغییر می‌کند. معمولاً این تغییرات در پروژه‌های بزرگ با دقت بسیار بالا در نظر گرفته می‌شود و در این مطالعه مقدار بازده ثابت فرض شده است.  $RP_{i,t}$  = مقدار آب ورودی به نیروگاه  $i$  در دوره  $t$  بر حسب میلیون متر مکعب که از روی حاصل از رابطه پیوستگی محاسبه می‌شود و مقادیر اضافی آن مطابق رابطه (۱۵) سرریز می‌شود.  $PF_{i,t}$  = ضریب کارکرد نیروگاه  $i$  در طول دوره  $t$  می‌باشد که براساس ساعات پیک مصرف تعریف می‌شود. بنابراین با توجه به اینکه بار پیک معمولاً کمتر از هشت ساعت در روز می‌باشد و از طرفی با توجه به اینکه ضریب کارکرد از نسبت ساعات بار پیک به ۲۴ ساعت روزانه حاصل می‌شود، بنابراین

در هر دوره از ضریب وابسته به حجم ذخیره همان دوره بزرگتر می‌باشد، بویژه در مورد کارون چهار که ضرایب وابسته به حجم ذخیره برای فصل زمستان صفر می‌باشد و کل نیاز از جریان ورودی به مخزن تأمین می‌شود. با توجه به اینکه، منحنی فرمان هم برای سیستم‌های تک‌مخزنی و هم برای سیستم سه‌مخزنی، نتایجی مابین دو روش و نزدیک به NLP ارائه نموده است، آزمون مدل به منظور سنجش ضرایب استخراج شده، اعتبار آن را به‌عنوان بهره‌برداری بهنگام نمایان می‌سازد. پس از به‌کارگیری ضرایب جدول ۳، نتایج آزمون سال‌های آماری خشک (۵۰-۱۳۴۹) و نرمال (۷۵-۱۳۷۴) برای سه روش در جدول ۴ ارائه شده است.

#### جدول ۴- مقادیر تابع هدف آزمون سیستم سه‌مخزنی

تابع هدف		NLP	روش
سال خشک	سال نرمال		
۰/۹۷۰	۰/۰۶۵	Rule-Curve	
۲/۶۸۶	۰/۴۱۳	SOP	

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان کمبود از سال خشک به سال نرمال روند نزولی داشته و منحنی فرمان برای هر دو سال نتایجی ما بین مقادیر بهینه مطلق NLP و SOP ارائه نموده است. حال به منظور بررسی بیشتر، بهره‌برداری‌های انجام شده با هدف تأمین نیاز برقی نیز صورت گرفته تا میزان اعتبار منحنی فرمان بعنوان سیاست بهره‌برداری همزمان نمایان شود.

تک‌مخزنی ارائه نموده است. همچنین منحنی فرمان نتایجی مابین دو روش و بسیار نزدیک به NLP ارائه نموده است.

جدول ۵- مقادیر تابع هدف بهره‌برداری از سیستم‌های تک‌مخزنی

روش	تک‌مخزنی		
	SOP	Rule-Curve	NLP
کارون پنج	۱۴/۲۴۲	۱۰/۶۰۹	۹/۹۳۱
تک‌مخزنی	۹/۹۹۰	۲/۲۲۵	۱/۸۲۸
کارون چهار	۱۱/۶۶۲	۷/۲۹۰	۶/۵۵۳
مجموع	۳۵/۸۹۴	۲۰/۱۲۴	۱۸/۳۱۲

جدول ۶- مقایسهٔ تابع هدف تأمین نیاز برق‌آبی در سیستم سه‌مخزنی

روش	سیستم سه‌مخزنی	مجموع سیستم‌های تک‌مخزنی	میزان بهبود تابع هدف بر حسب درصد
NLP	۱۷/۳۷۷	۱۸/۳۱۲	۵/۱۱
Rule-Curve	۱۹/۰۴۴	۲۰/۱۲۴	۵/۳۷
SOP	۳۵/۵۱۷	۳۵/۸۹۴	۱/۰۵

در شکل ۴ منحنی تغییرات توان تولیدی نیروگاه برای سیستم سه‌مخزنی ترسیم شده است که در آن، توان تولیدی در روش SOP در اکثر دوره‌ها کمتر از دو روش دیگر بوده و تغییرات آن برای روش NLP و منحنی فرمان بسیار نزدیک بهم می‌باشد. همچنین در شکل ۵ منحنی تغییرات حجم ذخیره مخزن نمایش داده شده است که حجم ذخیره SOP در اکثر دوره‌ها نزدیک به حجم ذخیره حداقل مخزن می‌باشد و دو روش دیگر نتایجی تقریباً منطبق بر هم ارائه نموده و به حجم حداکثر مخزن نزدیکتر می‌باشند.

در این بخش نیز مشابه هدف تأمین نیاز پایین‌دست، منحنی فرمان به عنوان سیاست بهره‌برداری همزمان مناسب می‌باشد که ضرایب ثابت حاصل از آن در جدول ۷ ارائه شده است. ضریب ثابت ( $a$ ) برای مخزن کارون چهار در کلیه ماه‌ها صفر می‌باشد و به عبارت دیگر برای کلیه ماه‌ها وابستگی تنها به حجم ذخیره و یا جریان ورودی صورت گرفته است. در مخزن کارون پنج برای ماه‌های مهر و آبان فقط ضریب ثابت در نظر گرفته است.

پس از به‌کارگیری ضرایب جدول ۷ برای سال‌های آماری خشک و نرمال که در بخش قبلی نیز به کار گرفته شدند، نتایج جدول ۸ بدست آمده است.

همواره کمتر از ۰/۳۳ می‌باشد که در این مطالعه به صورت ثابت و برابر با ۰/۲ برای کل دوره‌ها در نظر گرفته شده است.  $Mul_i =$  ضریب تبدیل میلیون متر مکعب در دوره  $t$  به متر مکعب بر ثانیه،  $\overline{H}_{i,t} =$  متوسط تراز آب مخزن  $i$  در طول دوره  $t$  بر حسب متر از سطح دریا،  $TW_{i,t} =$  تراز آب پایاب در طول دوره  $t$  در مخزن  $i$  بر حسب متر از سطح دریا می‌باشد. بنابراین روابط به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شوند:

$$RPS_{i,t} = R_{i,t} - RP_{i,t} \quad (15)$$

$$\overline{H}_{i,t} = (H_{i,t} + H_{i,t+1})/2 \quad (16)$$

$$H_{i,t} = b0_i + b1_i \times S_{i,t} + b2_i \times S_{i,t}^2 + b3_i \times S_{i,t}^3 \quad (17)$$

$$TW_{i,t} = c0_i + c1_i \times R_{i,t} + c2_i \times R_{i,t}^2 \quad (18)$$

که  $RPS_{i,t}$  = سرریز از خروجی نیروگاه  $i$  در طول دوره  $t$  بر حسب میلیون مترمکعب،  $H_{i,t}$  = تراز آب مخزن  $i$  در ابتدای دوره  $t$ ،  $b0_i$ ،  $b1_i$ ،  $b2_i$ ،  $b3_i$  = ضرایب ثابت تبدیل حجم ذخیره مخزن  $i$  به ارتفاع متناظر آن در ابتدای دوره  $t$  که از منحنی حجم-ارتفاع مخزن استخراج می‌گردد و  $c0_i$ ،  $c1_i$ ،  $c2_i$  = ضرایب ثابت تبدیل آب خروجی از نیروگاه  $i$  به تراز پایاب در دوره  $t$  می‌باشد که از منحنی دبی-اشل پایاب نیروگاه بدست می‌آید. همچنین توان تولیدی بایستی بین دو حد زیر محدود شود:

$$P \min_i \leq P_{i,t} \leq PPC_i \quad (19)$$

$P \min_i$  = حداقل توان تولیدی نیروگاه  $i$  که در این مطالعه برای کلیه مخازن صفر در نظر گرفته شده است. روابط (۲) - (۹) نیز به عنوان سایر قیودات این مدل می‌باشند.

در این بخش نیز مشابه هدف تأمین نیاز، ابتدا بهره‌برداری سیستم‌های تک‌مخزنی برای سه روش مزبور در جدول ۵ ارائه شده است.

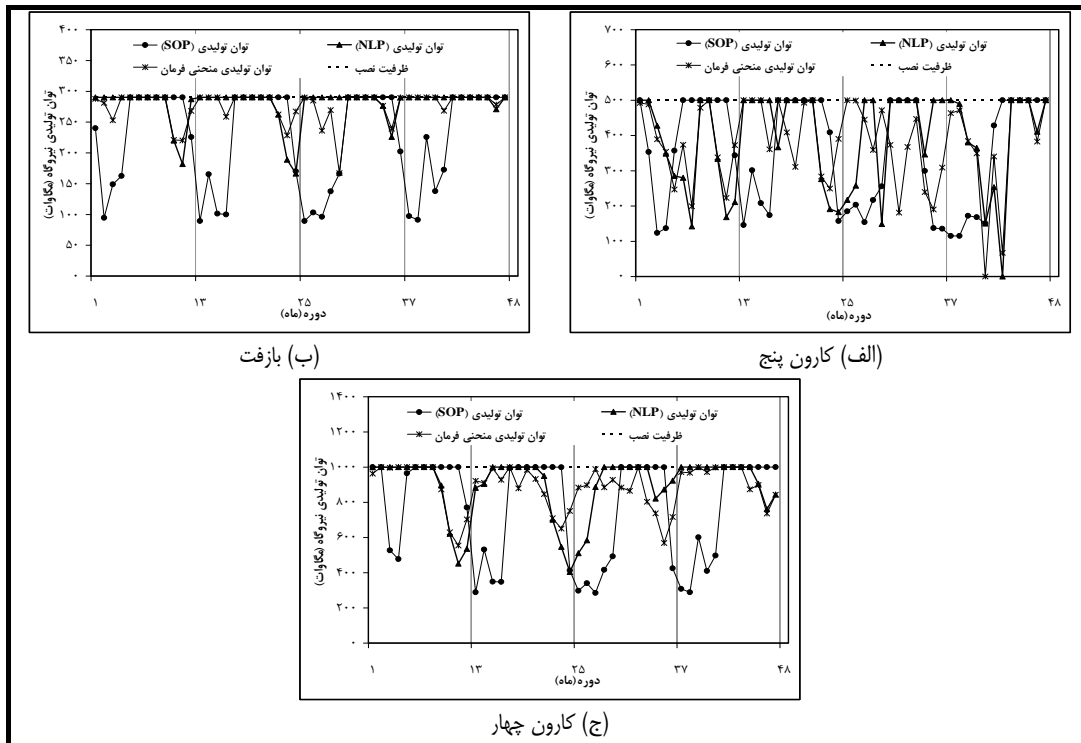
در این حالت نیز مقادیر تابع هدف منحنی فرمان برای هر سه مخزن ما بین دو روش NLP و SOP ولی نزدیکتر به مقدار NLP می‌باشد. در جدول ۶ نیز نتایج بهره‌برداری سیستم سه‌مخزنی و مجموع بهره‌برداری‌های تک‌مخزنی و نیز میزان بهبود تابع هدف ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج این جدول نیز مشابه جدول ۲ بوده و مقدار تابع هدف سیستم سه‌مخزنی برای روش NLP، ۵/۱۱ درصد و برای SOP، ۱/۰۵ درصد بهتر از مجموع متناظر سیستم‌های تک‌مخزنی می‌باشد. منحنی فرمان پیشنهادی نیز برای سیستم سه‌مخزنی ۵/۳۷ درصد بهبود نسبت به مجموع سیستم‌های متناظر

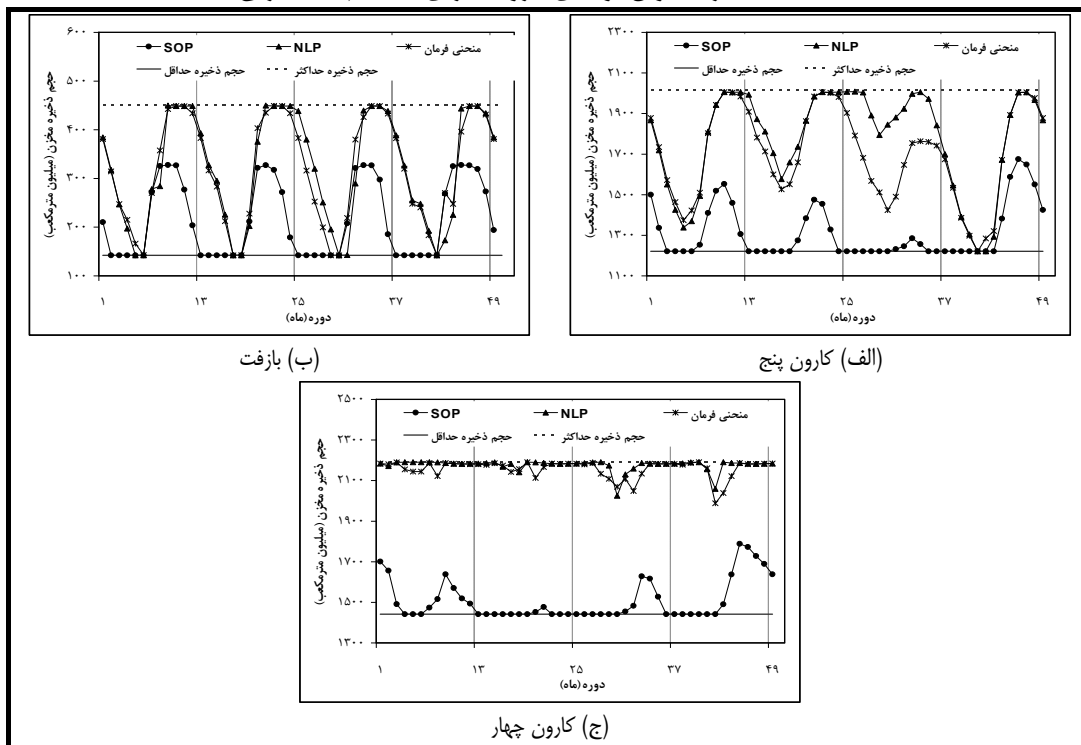


خشک و نرمال می‌باشد. همان طور که در بخش‌های (الف) و (ب) بیان شد، برای اهداف مختلف، چنانچه سیستم مخازن به صورت همزمان بهره‌برداری شود، مقادیر تابع هدف بهتر از زمانی است که مخازن به صورت مجزا بهره‌برداری می‌شوند.

در این سیستم نیز مقدار تابع هدف از سال خشک به سال نرمال برای هر سه روش روند نزولی داشته و همچنین منحنی فرمان برای هر دو دوره نتایج مابین SOP و NLP ارائه نموده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب ضرایب بدست آمده برای سال‌های



شکل ۴- تغییرات توان تولیدی نیروگاه برای سیستم سه مخزنی



شکل ۵- تغییرات حجم ذخیره سیستم سه مخزنی

جدول ۷- متغیرهای تصمیم بدست آمده از منحنی فرمان

مخزن									
کارون چهار			بازفت			کارون پنج			ضرایب ثابت
c	b	a	c	b	a	c	b	a	
۰/۳۷۵	۰/۳۲۸	۰	۰/۲۵-۸	۱/۵۶۶	۰	۰	۰/۲۸۳	۰	فروردین
۰/۶۳۱	۰/۱۲۸	۰	۰/۲۳۵	۰/۲۶۰	۷۶/۸۹۹	۰/۲۸۲	۰/۰۹۵	۳۶/۲۳۳	اردیبهشت
۰	۰/۴۰۸	۰	۰/۲۳۱	۰/۳۱۵	۰	۰/۰۴۷	۰	۱۷۰/۵۷۶	خرداد
۰/۹۷۳	۰	۰	۰/۹۸۴	۰	۰	۰/۹۵۰	۰	۰	تیر
۰/۹۶۶	۰	۰	۱/۱۹۷	۰	۰	۱/۱۶۸	۰	۰	مرداد
۰/۹۷۵	۰	۰	۰/۹۷۲	۰/۱۷۵	۰	۱/۹۷۵	۰	۰	شهریور
۰/۹۹۷	۰	۰	۰	۰/۳۰۰	۳۸/۹۱۰	۰	۰	۱۸۷/۹۸۲	مهر
۰/۹۷۳	۰	۰	۰/۰۲۱	۰/۶۱۰	۸/۲۴۹	۰	۰	۱۹۵/۵۵۸	آبان
۰	۰/۴۵۱	۰	۰/۳۵۴	۰/۶۴۰	۱۳/۴۵۶	۰/۷۸۰	۰/۰۸۲	۹۰/۷۲۵	آذر
۰/۶۳۳	۰/۱۸۸	۰	۰/۳۲۸	۰	۱۰۳/۹۶۱	۰	۰	۱۴۷/۴۵۳	دی
۰	۰/۴۸۸	۰	۰/۹۹۵	۱/۰۰۱	۰/۶۵۴	۰	۰/۶۷۳	۰	بهمن
۰/۸۴۳	۰/۰۲۵	۰	۰/۰۳۴	۷/۴۸۱	۱۲۲/۸۰۴	۰	۰/۰۸۲	۱۳۳/۳۴۳	اسفند

در حقیقت، در یک حوضه می‌توان کل نیازها و همچنین کلیه منابع برطرف کننده نیاز (مخازن) را مشخص نموده و با اعمال یک مدیریت جامع و یکپارچه، سیستم‌های مزبور را طراحی و بهره‌برداری نمود. در این حالت، اثر کلیه عوامل بر یکدیگر سنجیده می‌شود. همچنین با توجه به مزیت بهره‌برداری بهنگام در ارائه قواعد ثابت و مشخص، جهت تسهیل تصمیم‌گیری‌های آتی و عملکرد مناسبی که منحنی‌های فرمان پیشنهادی به عنوان قواعد بهره‌برداری همزمان ارائه نمودند، به کارگیری منحنی‌های مزبور در استخراج قواعد بهره‌برداری سیستم‌های چندمخزنی نمایان می‌شود.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی برای اهداف مختلف تأمین نیاز پایین دست (مجموع نیاز شرب، صنعت، کشاورزی و محیط زیست) و تأمین انرژی برقآبی پرداخته شد. بدین منظور از بهره‌برداری بلندمدت NLP جهت دستیابی به بهینه مطلق و SOP به عنوان ساده‌ترین سیاست بهره‌برداری در کنار منحنی‌های فرمان بهره‌برداری استفاده شد. همچنین جهت بررسی تفاوت میان بهره‌برداری خرد و کلان، بهره‌برداری مجزای سیستم‌های تک‌مخزنی نیز برای اهداف مختلف صورت گرفت. سپس مقادیر تابع هدف سیستم سه مخزنی کارون پنج-بازفت-کارون چهار که به صورت سری-موازی می‌باشند، با مقادیر تابع هدف متناظر هر سیستم در حالت تک‌مخزنی مقایسه شد که برای سه روش NLP، SOP و منحنی فرمان، مقادیر تابع هدف بهره‌برداری سه‌مخزنی بهتر از مقادیر تابع هدف مجموع متناظر

جدول ۸- مقادیر تابع هدف برقآبی در آزمون سیستم سه‌مخزنی

تابع هدف			
سال خشک	سال نرمال		
۵/۸۵۴	۰/۱۰۰	NLP	روش
۶/۶۴۸	۱/۴۸۸	Rule-Curve	
۱۰/۳۳۸	۲/۴۱۷	SOP	

به بیان دیگر زمانی که به سیستم به صورت جامع نگریسته می‌شود، ورودی، خروجی و نیازهای مخازن به طور همزمان بررسی شده و تصمیم‌گیری برای کل سیستم اتخاذ می‌شود. در این مطالعه، به علت انتخاب دوره آماری کوتاه مدت، اختلاف این مقادیر کوچک می‌باشد. چنانچه تعداد دوره‌های مورد بررسی افزایش یابد و بهره‌برداری برای دوره‌های آماری میان مدت و یا بلندمدت صورت گیرد، این اختلاف نمایان تر می‌شود.

در این مطالعه هدف از بررسی سیستم چندمخزنی، اعمال مدیریت جامع بر روی سیستم‌های مزبور براساس روش‌های مختلفی نظیر NLP، SOP و بویژه به کارگیری منحنی فرمان جهت تعیین قواعد ثابت و مشخص در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی می‌باشد. بدین ترتیب علاوه بر استخراج یکسری قواعد ثابت و مشخص برای سیستم مخازن که در این مطالعه به صورت ضرایب ثابت ماهانه بدست آمده‌اند، می‌توان مدیریت جامع بر روی سیستم‌های چندمخزنی را بررسی نمود.

- Maass, M. M. Hufschmidt, R. Dorfman, H. A. Thomas, Jr., S. A. Marglin, and G. M. Fair, eds., Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Draper, A. J. and Lund, J. R., (2004), "Optimal hedging and carryover storage value," *Journal of Water Resource Planning and Management*, 130(1), pp. 83-87.
- Hashimoto, T. and Stedinger, J. R. and Loucks, D. P., (1982), "Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation," *Water Resource Research*, 18(1), pp. 14-20.
- Labadie, J. W., (2004), "Optimal operation of multi-reservoir systems: State of the art review," *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 130(2), pp. 93-111.
- Lin, S. C., Wu, R. S. and Chen, S. W., (2005), "Study on optimal operating rule curves including hydropower purpose in parallel multi-reservoir systems," *River Basin Management Basin III*, pp. 672-682.
- Loucks, D. P. and Stedinger, J. R. and Haith, D. A. H., (1981), "Water Resources Systems Planning and Analysis," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J
- Lund, J. R. and Guzman, J., (1999), "Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel," *Journal of Water Resource Planning and Management*, 125(3), pp. 143-153.
- Oliveira, R. and Loucks, D. P., (1997), "Operating Rules for Multi-reservoir Systems," *Water Resource Research*, 33(4), pp. 839-852.
- Shih, J.-S., and Revelle, C., (1994), "Water Supply Operation during Drought: Continuous Hedging Rule," *Journal of Water Resource Planning and Management*, 120(5), pp. 613-629.
- Wurbs, R. A., (1993), "Reservoir-System Simulation and Optimization Models," *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, 119(4), pp. 455-472.
- Yeh, W. W. G., (1985), "Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review," *Water Resource Research*, 21(12), pp. 1797-1818.

تک‌مخزنی شد. همچنین برای هر دو هدف تأمین نیاز پایین‌دست و تأمین نیاز برآبی، میزان بهبود توابع برای منحنی‌های فرمان بیشتر از دو روش دیگر بود که به ترتیب ۵/۱ و ۵/۳۷ درصد بهبود را نسبت به سیستم متناظر تک‌مخزنی ارائه نمودند.

به طور کلی، منحنی‌های فرمان پیشنهادی که به صورت ضریبی از میزان آب موجود در هر دوره بیان می‌شوند، سیاست مناسبی را جهت بهره‌برداری در دوره‌های نسبتاً خشک ارائه می‌دهند. به طوری که از کمبودهای بحرانی برخی دوره‌ها که در روش‌های SOP و یا NLP اتفاق می‌افتد، جلوگیری می‌نمایند. این سیاست، زمانی برتری خود را اثبات نموده که در بهره‌برداری همزمان سیستم‌های چندمخزنی سری - موازی نیز نتایج برتری نسبت به بهره‌برداری سیستم‌های مجزای تک‌مخزنی ارائه نموده است. بنابراین در مطالعه حاضر، قاعده بهره‌برداری مناسبی به صورت استخراج ضرایب ثابت ماهانه ارائه شد که در بهره‌برداری همزمان سیستم‌های چندمخزنی نیز برتری خود را اثبات نمود.

در انتها جهت آزمون منحنی فرمان، ضرایب ثابت بدست آمده بر روی یک سال آماری خشک و نرمال تست گردید که در همه موارد برای سال خشک و نرمال نتایج مناسبی ارائه شد که مقادیر تابع هدف بین بهینه مطلق NLP و SOP قرار گرفته و نزدیکتر به مقدار NLP می‌باشد.

## ۵- مراجع

- جعفری، ب. (۱۳۸۳)، "تدوین منحنی‌های فرمان احتمالی برای یک مخزن"، *مجله فنی و مهندسی*، ش. ۲۸، ص. ۵۶-۶۳
- Afshar, A. and Shafi0i, M. and Bozorg Haddad, O., (2010), "Optimizing Multi-Reservoir Operation Rules: an Improved HBMO Approach," *Journal of Hydro informatics* in Press, doi:10.2166/hydro.2010.012.
- Bower, B. T. and 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.