نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۲، جلد۱۹، تابستان ۱۳۸۷، صفحه ۲۴-۱۵
ویژه‌نامه مهندسی عمـــران

تاثیر سیاست بهره‌برداری از مخزن بر شاخص‌های طراحی یک سد برقابی

رهام بختیار و سید جمشید موسوی

چکیده: عموما در طراحی سدهای برقابی و در سطح مهندسین مشاور برای تعیین پتانسیل برقابی یک مخزن، تحلیل بر اساس یک مدل شبیه‌سازی بهره برداری از مخزن سد بر مبنای اعتمادپذیری (RBS) با سیاست بهره‌برداری معلوم انجام می‌شود. در این تحقیق هدف بررسی نقش بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری از مخزن به جای استفاده از یک سیاست معلوم و ثابت بر شاخصهای برقابی می‌باشد. به منظور ارزیابی نقش بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری از مخزن بر شاخصهای طراحی یک طرح برقابی یک مدل بهینه‌سازی از نوع DP توسعه یافته است. با توجه به اینکه یک مدل بهینه‌سازی کلاسیک قادر به لحاظ کردن قیدهای کنترل کننده معیار اعتمادپذیری به صورت صریح نمی‌باشد و از طرف دیگر مدل RBS یک مدل بر مبنای اعتمادپذیری است، سنجش تاثیر سیاست بهره‌برداری از طریق مقایسه دو مدل RBS وDP کلاسیک جز در حالت خاص سطح اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد ممکن نیست. بنابراین با انتخاب سیستم سد کارون ۵ به عنوان مطالعه موردی در ابتدا مقایسه و تحلیل دو روش برای این حالت مرزی انجام گردیده و سپس مدل DP با افزودن یک عبارت پارامتریک جریمه به تابع هدف مدل به یک مدل برنامه‌ریزی اعتمادپذیری تعمیم یافته است. مقایسه نتایج مدل RBS و مدل بهینه‌سازی DP در سطوح یکسان از اعتمادپذیری تامین نیاز انرژی نشان می‌دهد که درصد بهبود نتایج ناشی از بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری با کاهش سطح اعتمادپذیری افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر هر چه سطح اعتمادپذیری تامین نیاز انرژی بالاتر باشد، پتانسیل بهبود در نتایج مدل شبیه‌سازی RBS ناشی از بهینه‌کردن سیاست بهره‌برداری کمتر خواهد بود.

واژه های کلیدی: بهینه‌سازی، اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری، بهره‌برداری از مخزن، ظرفیت نصب و انرژی

۱. مقدمه

در طراحی سدهای برقابی و برای تعیین پتانسیل برقابی یک مخزن عموما از یک مدل شبیه‌سازی با سیاست بهره‌برداری معلوم و ثابت استفاده می‌شود. از طرف دیگر مدلهای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن اجازه می‌دهند تا عملکرد مخزن و نتیجتا متغیرهای طراحی نیز در شرایط بهره‌برداری بهینه از مخزن تعیین شوند. علیرغم اینکه مدلهای شبیه‌سازی در ارزیابی عملکرد مخازن در شرایط گوناگون و با سیاست‌های بهره‌برداری معلوم مدل‌های کارآیی می‌باشند، این مدل‌ها در زمینه‌های انتخاب و تعریف بهترین ترکیب ظرفیت‌ها، اهداف و سیاست‌ها مناسب نیستند. بنابراین در این تحقیق و به منظور تعیین شاخصهای طراحی یک سد برقابی نظیر ظرفیت نصب، رقوم نرمال و غیره به جای اعمال سیاست بهره‌برداری ثابت، از یک مدل بهینه‌سازی در تعیین بهترین سیاست بهره‌برداری کمک گرفته می‌شود و نتایج شاخصهای طراحی حاصل از آن با نتایج یک مدل شبیه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری[۲] (RBS) مقایسه می‌شود.

این مقاله در تاریخ ۸۳/۴/۶ دریافت و در تاریخ ۸۴/۸/۱۴ به تصویب نهایی رسیده است.

رهام بختیار، کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، rbakhtyar@iust.ac.ir.
دکتر سید جمشید موسوی دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، jmosavi@aut.ac.ir.

[2]. *Reliability Based Simulation*

محققان، تکنیکهای مختلفی را برای بهینه‌سازی سیستم‌های برقابی به کار برده‌اند. از اولین مطالعات در این زمینه می‌توان به توسعه یک مدل از نوع برنامه‌ریزی پویای تصادفی[1] (SDP) برای بهینه‌سازی بهره‌برداری یک سیستم برقابی تک مخزنه توسط Masse [۱] اشاره کرد. روش برنامه‌ریزی پویا بعدها توسط Little [۲] و Young [۳] و تعداد زیادی دیگر استفاده شد. Loucks et al [۴] انواع روشهای تحلیل سیستم‌های منابع آب را بررسی نموده‌اند. Simonovic [۵] از یک مدل استوکستیک برای بهینه سازی بهره‌برداری از مخزن استفاده نموده است.

Hall et al. [۶] و Roefs and Bodin [۷] شرایط عملکرد بهینهٔ مخزن را در ارتباط با سیاستهای بهره‌برداری مورد مطالعه قرار دادند. Paudyal and Bogardi [۸] برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم چند واحده برقابی، از یک مدل بهره‌برداری بلند مدت استفاده کردند.

Askew [۹] سیاست بهینه بهره برداری از مخزن با اعمال قید اعتمادپذیری، Hashimoto et al. [۱۰] معیارهای اعتمادپذیری، شکست‌پذیری و آسیب‌پذیری سیستمهای منابع آب، Simonovic [۱۱و۱۲و۱۳] و Strycharczyk [۱۴] برنامه‌ریزی همراه با اعتمادپذیری برای مدیریت مخزن، Reznicek [۱۵] الگوریتمهای بهینه‌سازی عملکرد نیروگاههای برقابی و Lund [۱۶] قوانین بهره برداری مخازن موازی و سری را بررسی نموده‌اند. مدل ریاضی مورد استفاده در این تحقیق نیز از نوع برنامه‌ریزی پویا (DP) می‌باشد. از طرف دیگر مدل شبیه‌سازی رایج در طراحی مخازن برقابی (RBS) یک مدل بر مبنای قید اعتمادپذیری است. لذا سنجش تاثیر سیاست بهره‌برداری از طریق مقایسه دو مدل RBS و DP کلاسیک بدون کنترل روی اعتمادپذیری جز در حالت خاص سطح اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد ممکن نیست.

بنابراین پس از مقایسه و تحلیل دو روش در این حالت خاص، اقدام به تکمیل و توسعه مدل DP به یک مدل برنامه‌ریزی اعتمادپذیری می‌گردد تا پس از یکسان کردن فرضیات و شرایط دو مدل RBS و DP نتایج دو مدل مذکور مقایسه شوند.

۲. فرمولبندی مدل برنامه‌ریزی پویا با اهداف برقابی

در این تحقیق بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از یک مخزن با هدف تولید انرژی برقابی مد نظر می‌باشد. تابع هدف مدل، بیشینه کردن میزان انرژی تولیدی کل تعریف شده است. هدف این است که از یک مخزن منفرد در طی T بازه زمانی به گونه‌ای بهره‌برداری شود تا مجموع انرژی تولیدی بیشینه شود. تابع هدف این مدل به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Max \qquad Z = \sum_{t=1}^{T} Etotal(t) \qquad (۱)$$

که در آن $Etotal(t)$ انرژی تولیدی در ماه t می‌باشد که تابعی از دبی خروجی و بلندای آب است. برای حل این مساله از یک مدل برنامه‌ریزی پویای گسسته استفاده می‌شود. متغیر حالت، حجم ذخیره مخزن و مرحله، بازه‌های زمانی می‌باشند. بنابراین فرمولبندی مدل DP به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
& f_t(S_t) = Max[Etotal(t) + f_{t+1}(S_{t+1})] \\
& S.t: \\
& R_t = S_t - S_{t+1} + I_t - RS_t - E_t \\
& R_t^{\min} \le R_t \le R_t^{\max} \\
& S_{\min} \le S_t \le S_{\max} \\
& \Pr[Etotal(t) \ge demand(t)] \ge \alpha
\end{aligned} \qquad (۲)$$

I_t: جریان ورودی در طی بازه زمانی بر حسب میلیون مترمکعب

S_t: حجم ذخیره در شروع بازه زمانی بر حسب میلیون متر مکعب

E_t: تبخیر برحسب میلیون متر مکعب

RS_t: حجم سرریزی بر حسب میلیون متر مکعب

R_t: جریان خروجی بر حسب میلیون متر مکعب

شاخص اعتمادپذیری : α

$Demand(t)$: مقدار بده مطلوب انرژی در ماه t

$\Pr$: عملگر احتمال

اولین محدودیت مدل مذکور همان معادله بالانس حجمی آب به ازای تمام دوره‌های زمانی و محدودیتهای دوم و سوم محدودیتهای مربوط به مقادیر حداقل و حداکثر ممکن از جریانهای خروجی از مخزن و حجم ذخیره آن می‌باشد. محدودیت آخر مربوط به ارضای نیاز انرژی در سطح اعتمادپذیری α درصد می‌باشد به طوریکه از طریق اعمال آن مبنای تحلیل در هر دو مدل شبیه‌سازی و بهینه-سازی یکسان و همسنگ گردد. اصطلاحا به مدلهای بهینه‌سازی از نوع مذکور، مدلهای بهینه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری و یا اصطلاحا برنامه‌ریزی اعتمادپذیری[2] گویند. مدل فوق با استفاده از برنامه‌ریزی پویا به صورت پسرو حل می شود.

پس از حل معادله بازگشتی به روش پسرو تا مرحله آخر (اولین گام زمانی) لازم است با برگشت رو به جلو مسیر بهینه تعیین شود. به منظور احتساب صریح قید اعتمادپذیری تولید انرژی در ساختار مدل DP توسعه داده شده از یک فرآیند تکراری مطابق زیر استفاده شده است.

۳. مدل بهینه‌سازی DP بر مبنای اعتمادپذیری

مدل برنامه‌ریزی پویا می‌تواند برای بدست آوردن سیاستهای بهره‌برداری بهینه به منظور بیشینه‌کردن انرژی در سیستمهای منابع آب استفاده شود. شبیه‌سازی این سیاستها باعث مشخص

[1]. *Stochastic Dynamic Programming*

[2]. *Reliability Programming*

شدن احتمال شکست سیستم می‌شود. استفاده همزمان از برنامه‌ریزی پویا و شبیه‌سازی باعث ایجاد یک سیاست بهره‌برداری خواهد شد که در ضمن حداکثر سازی انرژی تولیدی، قیود مربوط به احتمالات شکست سیستم را نیز برآورده می‌نماید. قید مربوط به احتمال شکست می‌تواند از طریق اعمال یک تابع جریمه در تابع هدف، هنگامی که سیستم شکست می‌خورد، به شکل غیر مستقیم کنترل شود. این امر موجب اصلاح سیاست بهره‌برداری به گونه‌ای می‌شود که سطح اعتمادپذیری مورد نیاز تامین گردد.

لازم به ذکر است که منظور از اعتمادپذیری نسبت تعداد ماههایی که نیاز انرژی مطمئن تأمین شده است به تعداد کل ماههای دوره مورد مطالعه می‌باشد.

بدین منظور و برای کنترل تعداد شکست در مدل برنامه‌ریزی پویا یک عبارت جریمه در زمان وقوع شکست در مدل اعمال گردیده است که مقدار این جریمه از تابع هدف از نوع بیشینه‌سازی کم می‌شود. یعنی هنگامی که سیستم شکست خورد (مقدار انرژی قابل تولید از انرژی مورد نیاز ماهانه کمتر شود)، یک جریمه W در نظر گرفته می‌شود. مقدار W به صورت تابعی از مقدار نقصان انرژی در هر ماه تعریف می‌شود. در این تحقیق W به شکل زیر منظور شده است:

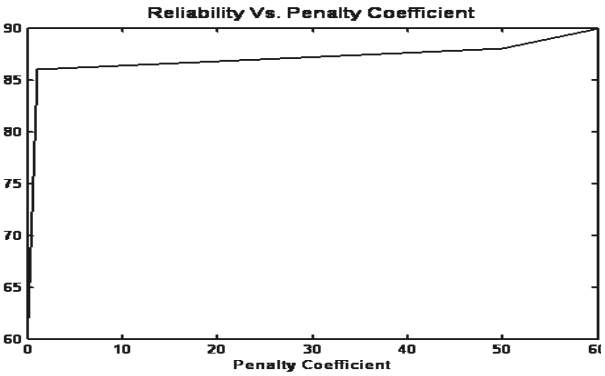
$$W = b \times (Demand(t) - Etotal(t)) \qquad (۳)$$

که $Etotal(t)$ مقدار انرژی تولیدی در ماه t و $Demand(t)$ مقدار نیاز انرژی ماهانه در ماه t و b ضریبی است که برای رسیدن به اعتمادپذیری مشخص تغییر می‌کند. چنانچه مقدار این پارامتر خیلی بزرگ باشد، حالت حدی با قید اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد و اگر برابر صفر باشد، مدل DP بدون اعمال محدودیت اعتمادپذیری نتیجه خواهد شد. برای اصلاح مدل برنامه‌ریزی پویا مطابق زیر عمل می‌شود:

اگر مقدار انرژی تولیدی در ماه از مقدار انرژی مورد نیاز ماهانه بیشتر باشد، تابع انرژی کل در معادله برگشتی تغییر نمی‌کند. اگر مقدار انرژی تولیدی در ماه از مقدار انرژی مورد نیاز ماهانه کمتر باشد، $(E(t) < Demand(t))$، آنگاه معادله برگشتی به صورت زیر خواهد بود:

$$f_t(S_t) = Max[Etotal(t) + f_{t+1}(S_{t+1}) - W] \qquad (۴)$$

احتمال واقعی شکست بستگی به مقدار W دارد و ماکزیمم این احتمال در حالت W=0 بدست می‌آید. اگر تعداد ماههایی که سیستم دچار شکست شده را با N نشان دهیم، نمودار (۱) تغییرات مقادیر ضریب تابع جریمه (b) را در مقابل اعتمادپذیری نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که با افزایش ضریب تابع جریمه شکست، احتمال شکست سیستم کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱. تغییرات ضریب تابع جریمه (b) در برابر اعتمادپذیری

۴. مدل شبیه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری (RBS)

در این روش ظرفیت نصب نیروگاه و شاخصهای تولید انرژی به ازای یک مقدار معلوم از رقوم نرمال مخزن با استفاده از یک تحلیل تکراری تعیین می‌شود. مطابق توصیه انجمن مهندسین آمریکا[1] [۱۷]، در ابتدا تخمینی از بلندای طراحی اولیه (ترازی از مخزن که ۲۵ درصد از ذخیره تولید انرژی خالی شده است) محاسبه می‌شود. دبی طراحی اولیه نیز با توجه به رابطه اصلی توان در نیروگاههای برقابی بدست می‌آید.

برای تعیین پتانسیل انرژی قابل تولید در مقادیر مذکور از ظرفیت نصب و سایر شاخصهای طراحی روندیابی متوالی جریان[2] (SSR) در طول دوره برنامه‌ریزی انجام می‌پذیرد. عموما در طراحی مخازن برقابی و درافق بلندمدت از دوره‌های ماهانه استفاده می‌شود. هدف در هر دوره ماهانه این است که ذخیره مخزن طوری تنظیم شود که تقاضای ماهانه انرژی تأمین گردد. لازم به ذکر است که نیاز انرژی ماهانه چنانچه به طور مشخص و بر اساس مطالعات بازار برق موجود نباشد، برابر حاصلضرب ظرفیت نصب در ضریب کارکرد نیروگاه در تعداد ساعات هر ماه در نظر گرفته می‌شود. در دوره‌هایی که جریان ورودی از دبی مورد نیاز برای تولید انرژی بیشتر است، در صورت امکان، این آب اضافی ذخیره می‌گردد تا در دوره‌هایی که جریان ورودی به مخزن پایین است، کمبود بوسیله ذخیره مخزن جبران شود. در هر گام زمانی و به منظور ارضای معادله پیوستگی در اولین تکرار، ذخیره انتهای ماه نیز برابر ذخیره ابتدای ماه در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که بلندا در طول یک گام متغیر است، بنابراین محاسبات انرژی بر اساس بلندای میانگین در هر دوره انجام می‌شود. با استفاده از حجم ذخیره در ابتدا و انتهای هر ماه، حجم میانگین بدست آمده و متناظر با این حجم‌ها، میانگین بلندا و مساحت دریاچه با آنها محاسبه می‌شود. با استفاده از بلندا و مساحت میانگین، حجم تبخیر و دبی تولید انرژی بدست می‌آید.

---

[1]. *Corps of Engineers*
[2]. *Sequential Streamflow Routing*

اگر دبی بدست آمده از حداقل دبی کمتر بود، آن را برابر دبی حداقل و اگر از دبی ماکزیمم بیشتر بود، آن را برابر با ماکزیمم دبی در نظر می‌گیرند. حال با استفاده از معادله پیوستگی، حجم مخزن در انتهای دوره محاسبه شده و متناظر با این حجم ذخیره، بلندا و مساحت دریاچه در انتهای ماه و نتیجتا مقادیر متوسط ماهانه بدست می‌آید. اگر تفاوت بلندای بدست آمده با بلندای فرضی ناچیز بود، فرض انجام شده صحیح و در غیر اینصورت محاسبات بالا مجدداً تکرار می‌شود. با توجه به نوسانات حجم ذخیره مخزن، محاسبه انواع انرژی مطابق دستورالعمل زیر می‌باشد:

اگر حجم مخزن بین حجم بیشینه و کمینه مخزن قرار داشت، میزان انرژی کل را برابر نیاز انرژی در ماه مورد نظر گرفته می‌شود. اگر حجم مخزن از حجم کمینه مخزن کمتر باشد، در ماه مورد نظر به اندازهٔ اختلاف دو حجم، کمبود وجود خواهد داشت. اگر حجم مخزن از حجم بیشینه مخزن بیشتر شد، مقدار حجم آب اضافی در ابتدا صرف تولید انرژی ثانویه و در صورت رسیدن به حداکثر تولید ممکن با توجه به ظرفیت نصب نیروگاه، جریان اضافی سرریز خواهد شد. در این شرایط مقدار انرژی ثانویه تولیدی برابر با تفاوت انرژی مطمئن و کل می‌باشد. پس از اینکه محاسبات مراحل قبل برای تمام دوره‌های افق برنامه‌ریزی متناسب با انرژی و بلندای ماهانه، بلندای طراحی جدید تعیین می‌شود.

دبی طراحی جدید نیز با توجه به رابطه اصلی توان در نیروگاههای برقابی بدست می‌آید. سپس بلندای طراحی بدست آمده با بلندای طراحی اولیه مقایسه می‌شود و چنانچه تفاوت این دو قابل ملاحظه باشد، مراحل قبل تکرار می‌شود تا این اختلاف به حد قابل قبول(کمتر از ۰/۰۰۱) برسد. در ادامه انرژی مطمئن، ثانویه و کل سالانه، دبی طراحی، بلندای طراحی و معیارهای ارزیابی عملکرد مخزن، نظیر اعتمادپذیری و شکست‌پذیری محاسبه می‌شود. در یک مدل RBS پس از تعیین معیارهای فوق در هر اجرای مدل SSR، اگر شاخص اعتمادپذیری با مقدار مطلوب متفاوت باشد، ۲حالت پیش می‌آید:

۱- اگر معیار حاصل از معیار مفروض کوچکتر بود، نیاز انرژی (ظرفیت نصب) کاهش می‌یابد تا اعتمادپذیری مورد نظر افزایش یافته و به میزان مطلوب نزدیک شود.

۲- اگر اعتمادپذیری حاصل از اعتمادپذیری مطلوب بزرگتر بود، نیاز انرژی (ظرفیت نصب) افزایش می‌یابد تا اعتمادپذیری کاهش یافته و به میزان مطلوب نزدیک شود.

روند فوق تا نیل به سطح اعتمادپذیری مطلوب تکرار می‌شود. در هر تکرار کامل از مدل SSR در طول افق بهره‌برداری، با توجه به مقادیر بلندا و دبی طراحی تخصیصی و در نتیجه تخمین نوع توربین مناسب برای کار در این محدوده، محدودیتهایی مربوط به دامنه بلندا، حداقل و حداکثر و نیز دبی حداقل توربین و ظرفیت هیدرولیکی توربین در مدل SSR اعمال می‌گردد[۱۸].

۵. مقایسه نتایج مدلهای RBS و DP

در این بخش به مقایسه نتایج شبیه‌سازی مخزن RBS با سیاست بهره‌برداری معلوم و نتایج مدلDP پرداخته می‌شود. بدین منظور سد کارون ۵ به عنوان مطالعه موردی با خصوصیات زیر انتخاب شده است.

۵-۱. سد کارون ۵ به عنوان مطالعه موردی

حوزه آبریز رودخانه کارون در بالادست محور پیشنهادی سد کارون ۵ در محدوده ۵۰-۴۹ تا ۵۰-۵۱ طول شرقی و ۲۱-۳۱ تا ۲۶-۳۲ عرض شمالی گسترده شده است. موقعیت جغرافیایی محور پیشنهادی نیز عبارت است از ۴۳-۵۰ طول شرقی و ۳۹-۳۱ عرض شمالی و ارتفاع ۱۰۲۶ متر بالاتر از سطح دریا. کل حجم مخزن۲۰۱۳/۱۵ مم‌م، حجم مرده ۱۲۲۰ مم‌م، آبدهی متوسط سالانه ۲۴۶۹ مم‌م و طول تاج ۵۸۵ متر می‌باشد. رقوم نرمال حداکثر مخزن از لحاظ فیزیکی masl ۱۲۰۰می‌باشد. جدول (۱) مقادیر متوسط جریانهای ورودی۴۳ ساله به مخزن سد کارون ۵ را در ماههای مختلف ارایه می‌کند.

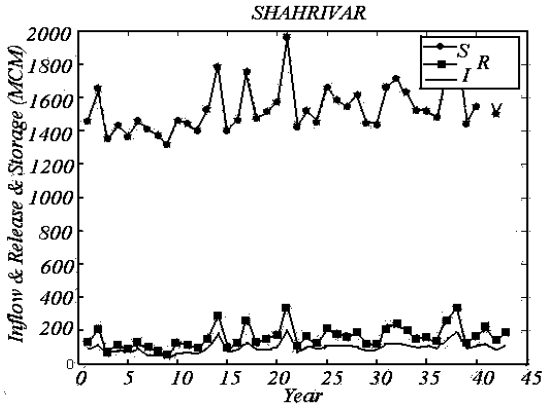
در ابتدا با اجرای مدل RBS برای رقوم نرمال ۱۲۰۰ و در سطح اعتمادپذیری ۹۰ درصد ظرفیت نصب نیروگاه برابر ۵۶۸ مگاوات تعیین گردید. سپس مدل بهینه‌سازی DP با توجه به ظرفیت نصب ۵۶۸ مگاوات، بدست آمده از مدل RBS با اعتمادپذیری ۹۰ درصد و برای رقوم نرمال ۱۲۰۰ و بدون اعمال یک سطح مشخص از اعتمادپذیری تامین انرژی اجرا شد.

نتایج حاصل از این دو مدل در جدول (۲) آمده است. شکل‌های (۲) و (۳) نیز تغییرات حجم مخزن، جریان خروجی از مخزن، جریان ورودی به مخزن و انرژی کل تولیدی را در ماه شهریور به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

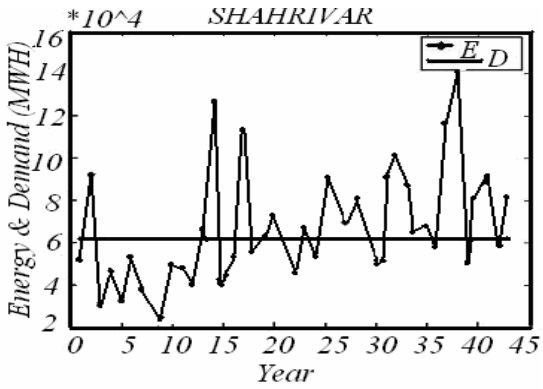
از آنجا که تابع هدف مدل DP بیشینه‌کردن انرژی تولیدی کل است، میزان انرژی تولید شده در این شرایط بیشتر از مدل RBS است، با این تفاوت که محدودیت تامین تقاضای انرژی ۹۰ درصد توسط مدل DP برآورده نشده است.

با توجه به جدول (۲) ملاحظه می‌شود که اعتمادپذیری حاصل از مدل DP برابربا ۰/۶۲ بدست می‌آید. دلیل کاهش شاخص اعتمادپذیری در این موضوع نهفته است که مدل DP، جریان خروجی را طوری تنظیم می‌کند تا در ماههایی که ورودی جریان کم است (دوران کم‌آبی)، نیز بتواند انرژی تولید کند و در واقع سعی می‌کند که درصد تامین نیاز را نیز لحاظ کند.

در ماههای کم‌آبی، میزان انرژی تولیدی مدل DP، بیش از مقدار انرژی تولیدی حاصل از مدل شبیه‌سازی است. همچنین در ماههایی که مقدار خروجی بیش از ظرفیت هیدرولیکی نیروگاه است، مدل DP سعی می‌کند که حجم سرریز حداقل باشد.



شکل ۲. تغییرات حجم (S)، جریان خروجی (R) و جریان ورودی (I) مخزن در ماه شهریور- مدل DP- حجم ذخیره ۲۰۱۳ مم



شکل ۳. تغییرات انرژی کل (E) و نیاز انرژی (D) در ماه شهریور- مدلDP - حجم ذخیره ۲۰۱۳ مم

جدول ۱. جریان ورودی ماهانه به سد کارون ۵ بر حسب میلیون متر مکعب

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
میانگین	۸۸/۲۶	۹۷/۸	۱۲۵/۲	۱۳۷	۱۷۷/۲	۲۷۹/۹	۴۸۳/۹	۴۴۴	۲۶۷/۹	۱۵۳/۹	۱۱۴/۶	۱۰۰	۲۴۶۹/۲
ماکزیمم	۱۷۹/۴	۲۸۳	۵۰۸/۵	۳۶۵	۵۰۵/۵	۸۵۷/۴	۱۲۱۰	۱۱۳۴	۷۳۰/۲	۴۰۶/۱	۳۰۵	۲۰۳/۳	۴۸۶۶/۲
مینیمم	۴۴/۱	۲۸/۱	۴۹/۵۶	۵۶	۵۹/۲۷	۸۶/۲۴	۱۶۱/۴	۱۵۲/۶	۹۵/۸۳	۲۰/۷۴	۲۷/۰۲	۳۹/۶۶	۱۰۵۴/۶
ضریب تغییرات	۰/۳۳	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۴۹	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۳۳	۰/۳۴

این موضوع با توجه به جدول و اینکه درصد زمانی پر بودن مخزن در مدلDP، به طور چشمگیری کمتر از مدل RBS است، مشخص می‌باشد. همچنین در ماههایی که جریان ورودی به مخزن بالاست، میزان انرژی تولیدی ثانویه مدل DP کمتر از مدل شبیه‌سازی می‌باشد.

به طور کلی با وجودی که اعتمادپذیری مدل DP کمتر از مدل شبیه‌سازی است، آسیب‌پذیری حداکثر مدل DP نیزکمتر از مدل شبیه‌سازی است. بنابراین مدل DP به نوعی در جهت کاهش آسیب‌پذیری گام برمی‌دارد.

آنچه تا به حال از نتایج مدل DP و شبیه‌سازی ارایه و با هم مقایسه شد، مبنای یکسانی ندارند. زیرا مدل شبیه‌سازی بر مبنای شاخص اعتمادپذیری در تامین نیاز انرژی (انرژی مطمئن) توسعه یافته است. این در حالی است که تا به حال هیچ قیدی در مدل DP به منظور ارضای نیاز انرژی اعمال نگردیده است.

نکته دوم این است که اعمال یک سطح مشخص از اعتمادپذیری تامین انرژی در مدل DP مانند آنچه در مدل شبیه‌سازی صورت می‌پذیرد، صریحا امکان‌پذیر نیست و نیازمند توسعه یک مدل برنامه‌ریزی اعتمادپذیری است. برای آنکه بتوان تاثیر عامل سیاست بهره‌برداری را بر طراحی سدهای برقابی ارزیابی نمود، بایستی فرضیات و مبانی دو مدل شبیه‌سازی و DP به لحاظ تلاش در تامین انرژی مطمئن با یک سطح معلوم از اعتمادپذیری یکسان گردد. بدین منظور چند حالت قابل بررسی می‌باشد که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

اولین حالت این است که نتایج این دو روش با اعتمادپذیری یکسان مقایسه شود. یعنی مدل شبیه‌سازی در شرایطی ارزیابی می‌گردد که شاخص اعتمادپذیری این روش برابر با ۰/۶۲ (اعتمادپذیری مدلDP) شود. با اعمال این محدودیت، نتایج مطابق جدول (۳) است.

توجه به جدول نشاندهنده افزایش چشمگیر ظرفیت نصب و همچنین افزایش حداکثر آسیب‌پذیری مدل شبیه‌سازی است. مقایسه این دو نوع روش با فرض اعتمادپذیری مساوی، بیانگر این است که جوابهای مدل DP، علاوه بر اینکه آسیب‌پذیری کمتری دارند، انرژی کل ومطمئن بیشتری تولید می‌کنند.

از این منظر بیشتر بودن قابل ملاحظه ظرفیت نصب در مدل RBS نسبت به مدل DP نه تنها یک مزیت محسوب نمی‌شود، بلکه نشان می‌دهد که ایجاد ظرفیت بیشتر که قطعا مستلزم صرف هزینه

بیشتر برای نیروگاه است، نتوانسته است در مقایسه با DP منجر به تولید انرژی مطمئن و حتی کل بیشتری گردد.
به عبارت دیگر کمتر بودن ظرفیت نصب لازم که توسط مدل DP بدست آمده است، ضمن نیل به پتانسیل انرژی همسطح با آنچه مدل RBS بدان رسیده است بیانگر درجه تاثیر و سودمندی اعمال بهینه‌سازی روی سیاست بهره‌برداری است. عاملی که در یک مدل شبیه‌سازی نظیر RBS از آن چشم پوشی می‌شود.

جدول ۲. مقایسه نتایج مدلهای RBS و DP با ظرفیت نصب یکسان

حالت مدل	برنامه‌ریزی پویا	شبیه‌سازی
شاخص اعتمادپذیری	۰/۶۲	۰/۹۰
آسیب‌پذیری حداکثر	۰/۷۱	۰/۹۰
انرژی کل (GWh)	۱۱۷۵/۸	۱۰۷۹/۱
انرژی مطمئن (GWh)	۷۶۰/۶۵	۷۲۱/۴
انحراف معیار حجم ماهانه	۱۸۲/۸	۲۶۶
ضریب تغییرات حجم ماهانه	۰/۱۱	۰/۱۴
میانگین خروجی ماهانه (MCM)	۲۰۲/۲	۱۹۵
حجم ذخیره میانگین (MCM)	۱۵۴۸	۱۷۹۳
ضریب تغییرات خروجی	۰/۵۵	۰/۷۰
درصد زمانی پر بودن مخزن	۴	۳۰
ظرفیت نصب (MW)	۵۶۸	۵۶۸

در ادامه و در سناریوی بعدی، مدل شبیه‌سازی RBS به گونه‌ای تغییر یافته است تا حداکثر آسیب‌پذیری در آن برابر با حداکثر آسیب‌پذیری در مدل DP، یعنی۰/۷۱ شود. در این صورت پارامترهای مدل مطابق جدول (۴) می‌باشند.
برای رسیدن به آسیب‌پذیری حداکثر ۰/۷۱، ظرفیت نصب باید تا حد ۴۸۰ مگاوات تقلیل یابد که در نتیجه اعتماد پذیری برابر ۰/۹۸ می‌شود.
به طور کلی در سناریوی مذکور، نمی‌توان مقایسه‌کاملی بین مدلهای DP و شبیه‌سازی انجام داد، زیرا در مدل شبیه‌سازی اصل بر این است که با اعتمادپذیری معلوم، بتوان نیاز انرژی ماهانه را تامین کرد. بنابراین باید شاخص اعتمادپذیری را صریحا در مدل DP لحاظ و سپس نتایج را با هم مقایسه کرد.

جدول ۳. مقایسه نتایج مدلهای RBS و DP با اعتمادپذیری یکسان

حالت مدل	برنامه‌ریزی پویا	شبیه‌سازی
شاخص اعتمادپذیری	۰/۶۲	۰/۶۲
آسیب‌پذیری حداکثر	۰/۷۱	۰/۹۴
انرژی کل (GWh)	۱۱۷۵/۸	۱۰۱۵/۸
انرژی مطمئن (GWh)	۷۶۰/۶۵	۷۷۴/۴
انحراف معیار حجم ماهانه	۱۸۲/۸	۲۸۸
ضریب تغییرات حجم ماهانه	۰/۱۱	۰/۱۹
میانگین جریان خروجی ماهانه(MCM)	۲۰۲/۲	۱۹۶
حجم ذخیره میانگین(MCM)	۱۵۴۸	۱۴۹۰
ضریب تغییرات خروجی	۰/۵۵	۰/۵۶
درصد زمانی پر بودن مخزن	۴	۱۳
ظرفیت نصب (MW)	۵۶۸	۸۵۹

از آنجا که اعمال کنترل بر شاخص اعتمادپذیری در DP کلاسیک به صورت مستقیم مستلزم تعمیم مدل DP به یک مدل از نوع برنامه‌ریزی اعتمادپذیری مطابق آنچه در بخش (۴) ارایه شد، می‌باشد، نتایج این دو مدل را ابتدا در یک حالت مرزی برای حالتی مقایسه می‌کنیم که اعتمادپذیری برابر با یک شود. یعنی، نیاز انرژی در تمامی ماهها تامین شود. این حالت مرزی حالتی است که مدل DP کلاسیک بدون اعمال هیچگونه تغییر و از طریق اعمال محدودیت تامین نیاز انرژی در مجموعه قیدهای خود فقط قادر به استفاده در شرایط اعتمادپذیری کامل ($\alpha = 1$) می‌باشد.
ظرفیت نصب متناظر با این اعتماد پذیری در مدل RBS برابر با ۳۸۴ مگاوات بدست می‌آید. بنابراین مدل DP نیز در این ظرفیت نصب اجرا می‌گردد. در جدول (۷)، مقایسه نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن در اعتمادپذیری ۹۰ درصد با DP همراه با اعتمادپذیری آمده است. با اعمال سیاست بهینه به جای سیاست بهره‌برداری ثابت در اعتمادپذیری ۹۰ درصد و با ظرفیت نصب مساوی، انرژی کل بیشتری بدست می‌آید. علاوه بر این شاخص آسیب‌پذیری در مدل DP کمتر از مقدار آن در مدل RBS است.
در این تحلیل با یکسان بودن سطح اعتمادپذیری دو مدل DP و RBS و نیز با تابع هدف بیشینه‌سازی تولید انرژی کل مشاهده شد که مقادیر انرژی مطمئن تولید شده توسط دو مدل تقریبا یکسان است. سپس تعیین حداکثر ظرفیت نصب بهینه در سطح اعتمادپذیری ۹۰ درصد در مدل DP مد نظر قرار گرفت. هدف از تحلیل بعدی سنجش این مطلب است که آیا از طریق بهبود سیاستهای بهره‌برداری توسط مدل DP می‌توان برای اعتمادپذیری یکسان، انرژی مطمئن تولیدی را در مقایسه با مدل RBS افزایش داد؟ این کار با اعمال و تکرار مدل DP بر مبنای اعتمادپذیری به ازای مقادیر مختلف b و در نتیجه W آزمایش شد. بر این اساس و

بازاء b=۷۵ در تابع جریمه W، حداکثر ظرفیت نصبی که اعتمادپذیری ۹۰ درصد را ارضاء کند، برابر ۵۷۲ مگاوات بدست می‌آید که منجر به تولید انرژی ۱۱۴۱/۸۶ گیگاوات ساعت می‌شود.

جدول ۵. مقایسه نتایج مدلهای RBS و DP دراعتمادپذیری ۱۰۰ درصد-حجم ذخیره ۲۰۱۳ مم‌م

حالت مدل	برنامه‌ریزی پویا	شبیه‌سازی
شاخص اعتمادپذیری	۱	۱
آسیب‌پذیری حداکثر	۰	۰
انرژی کل (GWh)	۱۱۶۵/۲	۱۱۳۷/۶
انرژی مطمئن (GWh)	۵۰۵	۵۰۵
انحراف معیار حجم ماهانه	۲۱۴/۱	۱۷۱/۸۸
ضریب تغییرات حجم ماهانه	۰/۱۳	۰/۰۸
میانگین خروجی ماهانه (MCM)	۲۰۳/۹۴	۲۰۱/۷۲
ضریب تغییرات خروجی	۰/۶۲	۰/۸۱
حجم ذخیره میانگین (MCM)	۱۶۰۹	۱۹۷۸
ظرفیت نصب(MW)	۳۸۴	۳۸۴

جدول ۶. مقادیر اعتمادپذیری و درصد شکست به ازاء جریمه‌های مختلف

b	N	اعتمادپذیری
۰	۱۹۶	۶۲
۱	۸۲	۸۶
۵۰	۶۰	۸۸
۶۰	۵۱	۹۰

جدول ۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با DP همراه با اعتمادپذیری

حالت مدل	DPبا اعتمادپذیری	شبیه‌سازی
شاخص اعتمادپذیری	۰/۹۰	۰/۹۰
آسیب‌پذیری حداکثر	۰/۷۲	۰/۹۰
انرژی کل (GWh)	۱۱۴۱/۳۹	۱۰۷۹/۱
انرژی مطمئن (GWh)	۷۳۲	۷۲۱/۴
میانگین جریان خروجی ماهانه (MCM)	۲۲۳/۹۴	۱۹۵
ظرفیت نصب (MW)	۵۶۸	۵۶۸
حجم ذخیره میانگین (MCM)	۱۵۵۳	۱۷۹۳

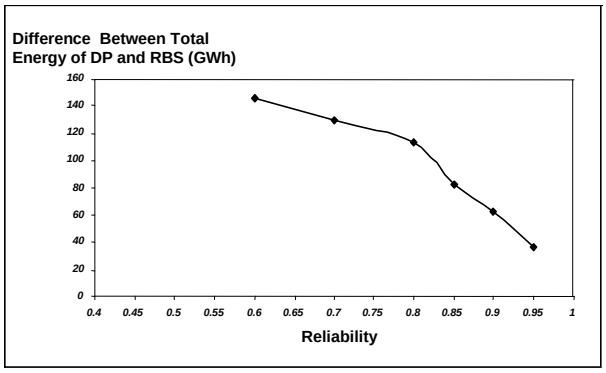
تحلیل فوق برای اعتمادپذیریهای ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۸۵ و ۹۵ درصد نیز انجام گردید. مقایسه نتایج مدلهای DP و RBS در سطوح مختلف اعتمادپذیری تامین نیاز نسبت به شاخصهای انرژی کل، انرژی مطمئن و ظرفیت نصب در جداول (۸) و (۹) و (۱۰) آمده است.

همچنین شکلهای (۴) تا (۶) اختلاف بین شاخصهای انرژی کل و مطمئن و ظرفیت نصب دو مدل DP و RBS در اعتمادپذیری‌های مختلف را نشان می‌دهد.

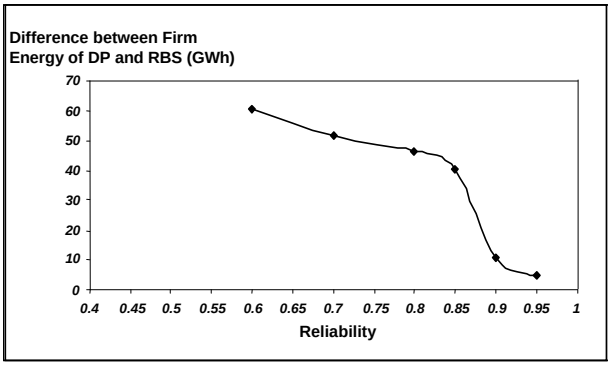
ملاحظه می‌شود که با افزایش اعتمادپذیری، انرژی کل و مطمئن ناشی از اجرای مدل DP کاهش می‌یابد. همچنین هر دو نوع انرژی حاصل از این مدل از نتایج مشابه حاصل از اجرای مدل RBS در اعتمادپذیری‌های مشابه بیشتر است.

با افزایش شاخص اعتمادپذیری، اختلاف بین شاخص انرژی‌های مطمئن و کل حاصل از دو مدل DP و RBS کاهش می‌یابد. توجیه این نتیجه با توجه به این واقعیت میسر است که در حقیقت افزایش سطح اعتمادپذیری در مدل DP یا هر مدل بهینه‌سازی دیگر به معنای اعمال قید اکیدتر و محدودتر در مدل بهینه‌سازی است.

به عبارت دیگر فضای قابل قبول و موجه مساله که مدل در جستجوی بهترین جواب در بین این فضا می‌باشد، محدودتر می‌شود. طبیعی است که هر چه فضای موجه و شدنی یک مساله بهینه‌سازی کوچکتر و مساله مقیدتر باشد، پتانسیل بهبود در مقدار تابع هدف کمتر خواهد بود. بنابراین ملاحظه می‌شود که پتانسیل بهبود در نتایج مدل RBS از طریق جایگزینی آن با یک مدل بهینه‌سازی (DP) در سطوح اعتمادپذیری کمتر (مساله نامقیدتر) بیشتر بوده و اختلاف نتایج دو مدل RBS و DP بیشتر است.



شکل ۴. اختلاف بین شاخص انرژی کل دو مدل DP و RBS در اعتمادپذیری‌های مختلف



شکل ۵. اختلاف بین شاخص انرژی مطمئن دو مدل DP و RBS در اعتمادپذیری‌های مختلف

جدول ۸. مقایسه نتایج مدلهای DP و RBS در سطوح مختلف اعتمادپذیری تامین نیاز نسبت به شاخص انرژی کل

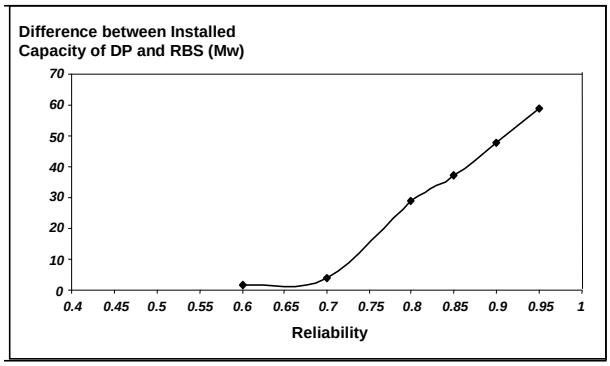
اعتمادپذیری	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۰
انرژی کل مدلDP (GWh)	۱۱۳۸/۷	۱۱۴۱/۴	۱۱۴۳/۶	۱۱۴۶/۲	۱۱۵۱/۳	۱۱۵۵/۸
انرژی کل مدلRBS (GWh)	۱۱۰۱/۷	۱۰۷۹/۱	۱۰۶۰/۷	۱۰۳۲/۶	۱۰۲۱/۸	۱۰۰۹/۵

جدول ۹. مقایسه نتایج مدلهای DP و RBS در سطوح مختلف اعتمادپذیری تامین نیاز نسبت به شاخص انرژی مطمئن

اعتمادپذیری	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۰
انرژی مطمئن مدلDP (GWh)	۶۹۰/۱۵	۷۳۲	۸۰۵/۴	۸۶۱/۰۵	۹۲۲/۹	۹۵۵/۷
انرژی مطمئن مدلRBS (GWh)	۶۸۵/۳	۷۲۱/۴	۷۶۵	۸۱۴/۵	۸۷۱/۳	۸۹۵/۲

جدول ۱۰. مقایسه نتایج مدلهای DP و RBS در سطوح مختلف اعتمادپذیری تامین نیاز نسبت به شاخص ظرفیت نصب

اعتمادپذیری	۰/۹۵	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۷۰	۰/۶۰
حداکثر ظرفیت نصب بهینه مدل DP (MW)	۵۲۵	۵۷۲	۶۵۴	۷۲۷	۸۶۱	۹۴۱
ظرفیت نصب مدل (MW)	۵۲۳	۵۶۸	۶۲۵	۶۹۰	۸۱۳	۸۸۲



شکل ۶. اختلاف بین شاخص ظرفیت نصب دو مدل DP و RBS در اعتمادپذیری‌های مختلف

۶. خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی نقش سیاست بهره‌برداری بر شاخصهای برقابی مد نظر قرار گرفت. به همین منظور، یک مدل ریاضی جهت بهینه‌سازی تولید انرژی از نوع برنامه‌ریزی پویا (DP) توسعه داده شد. تابع هدف این مدل، بیشینه کردن تولید انرژی کل همراه با محدودیت ارضای نیاز انرژی انتخاب گردید. برای ارزیابی کارآیی مدل بهینه‌سازی، نتایج حاصل ازاجرای مدل بهینه‌سازی و معیارهای ارزیابی کارایی نظیر اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری محاسبه شدند. سپس به کمک این معیارها، نتایج دو مدل بهینه‌سازی و شبیه‌سازی با هم مقایسه گردیدند. برای آنکه بتوان تاثیر عامل سیاست بهره‌برداری را بر طراحی سدهای برقابی ارزیابی نمود، لازم بود فرضیات و مبانی دو مدل شبیه‌سازی RBS و DP به لحاظ تلاش در تامین انرژی حداکثر مطمئن با یک سطح معلوم از اعتمادپذیری یکسان شود. بنابراین تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه مخزن با اعمال قیود همراه با اعتمادپذیری در مدل DP عرضه شد. نتایج حاصل نشان داد که:

- مدل DP یک نوع سیاست جیره‌بندی اعمال می‌کند، به طوریکه در ماههای کم آبی مقدار انرژی مطمئن تولیدی حاصل از آن بیشتر از روش شبیه‌سازی می‌باشد و در ماههای پرآبی، حجم سرریز خالص آن کمتر از روش شبیه‌سازی می‌باشد.
- اگر مدلDP به منظور بیشینه کردن انرژی و بدون اعمال هیچ قیدی در مدل به منظور ارضای نیاز انرژی اجرا گردد، اعتمادپذیری مدل DP کمتر از مدل شبیه‌سازی بدست می‌آید. از طرف دیگر آسیب پذیری حداکثرمدلDP کمتر از مدل شبیه‌سازی خواهد بود. در این شرایط مدل DP به نوعی در جهت کاهش آسیب پذیری گام برمی‌دارد. در این تحلیل اگر مدل RBS به گونه‌ای اصلاح شود که شاخص اعتمادپذیری آن برابر با اعتمادپذیری مدل DP شود، افزایش چشمگیر ظرفیت نصب و همچنین افزایش حداکثر آسیب‌پذیری مدل RBS را در بر دارد. این افزایش ظرفیت نصب مدل RBS فاکتور مثبتی تلقی نمی‌شود، چرا که مقایسه نتایج دو مدل در این حالت بیانگر این است که جوابهای مدل DP علاوه بر اینکه آسیب‌پذیری کمتری دارند، انرژی کل و مطمئن بیشتری تولید می‌کنند.
- مقایسه نتایج شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن با DP درآسیب‌پذیری یکسان، نشاندهنده این است که ظرفیت نصب حاصل از مدل RBS و نتیجتا انرژی مطمئن تولیدی در مقایسه با DP کاهش چشمگیری دارد.
- اگر نتایج دو مدل شبیه‌سازی و DP را در یک حالت مرزی برای حالتی مقایسه کنیم که اعتمادپذیری برابر با یک می‌باشد، مشاهده می‌شود که مقدار انرژی کل در مدل DP کمتر از ۳۰ گیگاوات‌ساعت بیش از مدل RBS است. بنابراین بهبود حاصل از بهینه‌سازی در

افزایش تولید انرژی در شرایط اعتمادپذیری ۱۰۰ درصدکمتر از ۲/۵ درصد می‌باشد.

در نهایت برای امکان مقایسه دو مدل DP و RBS در سطوح مختلف از اعتمادپذیری تامین نیاز انرژی مدل DP به یک مدل قادر به کنترل معیار اعتمادپذیری تعمیم یافت. این منظور از طریق اضافه‌کردن یک عبارت جریمه ناشی از عدم تامین نیاز انرژی در تابع هدف از یک طرف و آزادکردن قید تامین نیاز انرژی از محدودیتهای مدل از طرف دیگر برآورده شد. با افزایش سهم این تابع جریمه در تابع هدف حالت مرزی اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد، یعنی همان حالتی که تامین نیاز انرژی قید اکید باشد و با کاهش بزرگی و سهم این تابع جریمه در تابع هدف، حالت مرزی مدل DP بدون قید اعتمادپذیری و صرفا با هدف حداکثر کردن انرژی کل نتیجه می‌شود. با تغییر سهم تابع جریمه فوق در تابع هدف می‌توان نتایج مدل DP را همراه با کنترل بر معیار اعتمادپذیری تنظیم نمود. نتایج حاصل از مقایسه مدلهای RBS و DP برای مقادیر مختلف (ولی یکسان) از سطح اعتمادپذیری نشان داد که:

- گرچه میزان بهبود در انرژی کل ناشی از بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری در سطح اعتمادپذیری ۱۰۰ درصد کمتر از ۲/۵ درصد ارزیابی شده بود، ملاحظه شد که با کاهش سطح اعتمادپذیری تفاوت دو مدل فوق محسوستر شده و پتانسیل بهبود در تولید انرژی ناشی از بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری افزایش می‌یابد. برای مثال در سطح اعتمادپذیری ۶۰ درصد، انرژی کل حاصل از مدل DP بر مبنای اعتمادپذیری نسبت به مدل RBS به میزان ۱۴۶ گیگاوات‌ساعت (۱۴/۵ درصد) افزایش نشان می‌دهد. همچنین سهم بهبود در تولید انرژی مطمئن در همین حالت از ۱۴۶ گیگاوات‌ساعت افزایش در انرژی کل برابر ۶۱ گیگاوات‌ساعت (۶/۸ درصد) می‌باشد. پتانسیل بیشتر در بهبود نتایج تولید انرژی و ظرفیت نصب در سطوح اعتمادپذیری کمتر، ناشی از بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری نسبت به استفاده از یک مدل با سیاست بهره‌برداری ثابت قابل توجیه و منطقی است. در هر مدل بهینه‌سازی چنانچه فضای موجه و شدنی حاصل از محدودیتها محدودتر و تنگتر شود، نقش بهینه‌سازی تابع هدف و به عبارتی فضای موجود برای بهینه‌سازی کمتر می‌شود. بنابراین از آنجا که اعمال اعتمادپذیری بالاتر در تامین تقاضای انرژی همراه با اعمال قید اکیدتر و در نتیجه محدودتر کردن فضای موجه مساله می‌باشد، توجیه استفاده از مدل بهینه‌سازی به جای مدل شبیه‌سازی در سطوح بالاتر از شاخص اعتمادپذیری کمتر خواهد بود.
- در پایان و با توجه به اهمیت انتخاب سطح اعتمادپذیری بر نوع مدلهای قابل استفاده در طراحی و بهره‌برداری مخازن برقابی لازم است خاطر نشان شود که انتخاب سطح فوق تابعی از نقش و جایگاه نیروگاههای برقابی در تامین برق پایه و پیک شبکه و چگونگی اتصال این نوع نیروگاهها به شبکه سراسری است. برای مثال در کشورهای دارای شبکه متصل سراسری برق و کشورهایی که انرژی برقابی سهم عمده‌ای از کل انرژی تولیدی شبکه را تشکیل می‌دهند، نظیر برزیل و کشورهای اسکاندیناوی که سیستم انرژی آنها یک سیستم متکی بر انرژی برقابی (Hydro-based) است، درجه اتکاء به تولید نیروگاههای آبی بسیار زیاد است. بنابراین شکست در عدم تامین نیاز انرژی به صورت مقطعی عواقب ناگوارتری خواهد داشت. طبیعی است در این شرایط سطح اعتمادپذیری استفاده شده در مدلها بایستی بسیار بالا باشد و علاوه بر سطح اعتمادپذیری بلندمدت بالا، کنترل سطح اعتمادپذیری میان‌مدت و حتی کوتاه‌مدت نیز ضروری است.

مراجع

[1] Masse, P., "*Les Reserves et la Regulation de L'avenir Dans la vie Economique*", Vol. I and II, Paris, Hermann and Cie., Eds,1946.

[2] Little, J.D.C., "*The Use of Storage in a Hydroelectric System*", operations Research, Vol. 3, No. 6, 1955, PP. 187-197.

[3] Young, G.K., "*Finding Reservoir Operation Rules*", Hydraulic Div., ASCE, Vol. 93, No. 6, 1967, PP. 297-321.

[4] Loucks, D.P., Stedinger, J.R., Haith, D.A., "*Water Resource Systems Planning & Analysis*", Prentice- Hall, inc., 1981.

[5] Simonovic, S.P., "*The Implicit Stochastic Model for Reservoir Yield Optimization*", Water Resou. Res., Vol. 23, No. 12, 1987, PP. 2159-2165.

[6] Hall, W.A., Butcher, W.S., Esogbue, A., "*Optimization of Operation of a Multiple Purpose Reservoir by Dynamic Programming*", water Resou. Res., Vol. 4, No. 3, 1968, PP. 471-477.

[7] Roefs, T.G., Bodin, L.D., "*Multi Reservoir Operation Studies*", water Resou. Res., Vol.6, No. 2, 1970, PP. 410-420.

[8] Paudyal, G.N., Shrestha, D.L., Bogardi, J.J., "*Optimization Hydropower System Configuration Based on Operational Analysis*", Water Resources Planning and Management, Vol.116, No. 2, 1990, PP. 01-107.

[9] Askew, A.J., "*Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of a Reliability Constraint*", Water Resou. Res., Vol. 10, No. 1, 1974, PP. 51-55.

[10] Hashimoto, T., Stedinger, J.R., Loucks, D.P., "*Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation*", Water Resou. Res., Vol. 18, No. 1, 1982, PP. 14-20.

[11] Simonovic, S.P., "*Reservoir Systems Analysis: Closing Gap Between Theory and Practice*", Water Resources Planning and Management, Vol. 118, No. 3, 1992, P. 1053, ASCE.

[12] Simonovic, S.P., Marino, M.A., "*Reliability Programming in Reservoir Management, 1. Single Multipurpose Reservoir*", Water Resou. Res., Vol. 16, No. 5, 1980, PP. 844-848.

[13] Simonovic, S.P., Marino, M.A., "*Reliability Programming in Reservoir Management, 3. System of Multipurpose Reservoirs*", Water Resou. Res., Vol. 18, No. 4, 1982, PP. 735-743.

[14] Strycharczyk, J.B., Stedinger, J.R., "*Evaluation of a Reliability Programming Reservoir Model*", Water Resou. Res., Vol. 23, No. 2, 1987, PP. 225-229.

[15] Reznicek, K.K., Simonovic, S.P., "*An Improved Algorithm for Hydropower Optimization*", Water Resou. Res., Vol. 26, No. 2, 1990, PP. 189-198.

[16] Lund, J., Guzman, J., "*Some Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel*", Water Resource Planning and Management, Vol. 125, No. 3, 1999, PP. 143-153.

[17] *Engineering and Design Hydropower*, Department of the Army Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, 1989.

[۱۸] بختیار، رهام.،"*طراحی و بهره برداری از مخازن برقابی با فرض عدم قطعیت در ورودیها*"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، آبان ماه ۱۳۸۲.