

# تحلیل حساسیت پارامترهای توابع جریمه در مدل‌های بهینه‌سازی

## بهره‌برداری از مخازن چند منظوره

فخرالدین علیمرادی<sup>۱</sup>، سعید علیمحمدی<sup>۲</sup> و ابراهیم جباری<sup>۳</sup>

### چکیده

یکی از مهمترین ارکان مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن چند منظوره، تعریف یک تابع جریمه یا خسارت می‌باشد. بدلیل تنوع اهداف بهره‌برداری و پیچیدگی سیستم، اغلب بجای استفاده از توابع سود و هزینه، که تنها برخی اهداف را مدنظر قرار می‌دهند، از توابع جایگزین استفاده می‌نمایند. این توابع بصورت مجموع چند عبارت می‌باشند که جریمه یا خسارت متناظر با انحراف از مقادیر مطلوب (نیازها) را منعکس می‌نمایند. در اینصورت یکی از مهمترین مراحل تدوین مدل بهینه‌سازی، تعیین ضرایب و توانهای (پارامترهای) این توابع است. در این مقاله از یک مدل برنامه‌ریزی پویای استوکستیک (*SDP*) جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک مخزن چند منظوره استفاده شده است. بکمک این مدل، پارامترهای تابع خسارت از طریق تحلیل حساسیت مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بدین منظور معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، و آسیب‌پذیری بکار گرفته شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که حساسیت این پارامترها به تغییرات توان توابع به مراتب بیشتر از ضرایب توابع است.

واژه‌های کلیدی: تابع خسارت، برنامه‌ریزی پویای استوکستیک، بهینه‌سازی، برقیابی

### ۱- مقدمه

۳- مدل‌های برنامه‌ریزی پویا، و ۴- مدل‌های شبیه‌سازی. بدلیل زیر کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی پویا در مسائل بهره‌برداری بهینه از مخازن بیشتر از برنامه‌ریزی خطی است: ۱- امکان استفاده مستقیم از هرگونه تابع خطی، غیر خطی، توانی، نمایی و ...، ۲- امکان بکارگیری جزئیات بیشتری از سیستم در مسئله بهینه‌سازی ۳- امکان استفاده از حداکثر حافظه کامپیوتر ۴- امکان بهینه‌سازی و شبیه‌سازی (کنترل نتایج مدل بهینه‌سازی) در یک محیط برنامه‌نویسی.

هر مدل بهینه‌سازی دارای دو بخش اصلی است: ۱- تابع هدف، ۲- محدودیتها. در مدل‌های برنامه‌ریزی پویا با توجه به محدودیت‌های موجود، ابتدا فضای امکانپذیر (*Feasible Space*) مسئله تعریف و سپس این فضا گسسته‌سازی گردیده و در آن بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. نظر به اینکه مقادیر مطلوب (*Target Values*)، در مطالعات طراحی مشخص گردیده‌اند، در مدل‌های بهره‌برداری با فرض بهینه‌بودن سیستم برای آن سطح از مقادیر مطلوب،

محدودیت کمی و کیفی منابع آب، مسائل برنامه‌ریزی منابع آب را به مهمترین بحث‌های مدیریتی و کارشناسی در سالهای اخیر تبدیل نموده است. در شرایط محدود بودن منابع، مدل‌های تخصیص بهینه همواره مورد توجه بوده‌اند. مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها، از جمله مدل‌های تخصیصی است که در اینگونه مسائل مورد استفاده مهندسان و برنامه‌ریزان قرار می‌گیرد. مدل‌های بهره‌برداری از مخازن را بطور کلی می‌توان در چهار گروه تقسیم‌بندی نمود [۱]: ۱- مدل‌های برنامه‌ریزی خطی، ۲- مدل‌های برنامه‌ریزی غیرخطی،

مقاله در تاریخ ۸۵/۱۲/۹ دریافت و در تاریخ ۸۶/۲/۱۹ به تصویب نهایی رسید.

<sup>۱</sup> مربی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس

<sup>۲</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی آب و برق شهید عباس پور، (نویسنده مسئول)، پست الکترونیکی: Salim1350@Yahoo.com

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

شالوده مدل‌های  $DP$  بر اساس مطالعات فوق‌پیریزی گردید و مطالعات بعدی در واقع توسعه مدل‌ها و کارهای قبلی بود در این میان می‌توان به مدل‌های  $DPR$  اشاره نمود [۱۳، ۱۲].

از نخستین کارها در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های برقایی بر اساس این برنامه‌ریزی می‌توان به مطالعات **استدینگر** و **همکاران** اشاره نمود [۱۵، ۱۴]. **بوگاردی** و **همکار**، از یک مدل بهره‌برداری بلندمدت جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از یک سیستم برقایی چند مخزنی استفاده کرده‌اند [۱۶]. **رزینک** و **سیمونوویک** از یک مدل برنامه‌ریزی خطی متوالی بنام  $GEMSLP$  برای حل بهینه مسئله استفاده نمودند [۱۷]. **جورجیاکاکوس** و **همکاران** یک مدل زمانبندی برقایی با هدف حداقل کردن هزینه‌های بهره‌برداری نیروگاه‌های حرارتی تحت قیود تقاضای آب و انرژی تشریح کردند [۱۸]. **لاند** تئوری قوانین بهره‌برداری از نیروگاه‌های برقایی برای مخازن منفرد، سری و موازی را بدست آورده و مورد بحث قرار داده است [۱۹].

### ۳- ساختار مدل

فرم مدل  $SDP$  مورد استفاده در این مطالعات که گاهی آنرا فرم استاندارد  $SDP$  گویند توسط لاکس و همکاران (۱۹۸۱) توسعه یافته است. در این مدل جریان ورودی و حجم ذخیره اول دوره متغیرهای حالت، جریان خروجی یا هم‌ارز آن حجم ذخیره آخر دوره متغیرهای تصمیم‌اند. نظر به اینکه مدل از نوع گسسته است بنابراین لازم است جریان ورودی در هر دوره را به  $NI$  قسمت و حجم ذخیره را به  $NK$  قسمت، تقسیم‌بندی نمود. رابطه پیوستگی جهت بالانس مخزن عبارتست از [۲۰]:

$$R_{kilt} = S_{kt} + Q_{it} - E_{klt} - S_{l,t+1} \quad (1)$$

که در آن  $R_{kilt}$ ، جریان خروجی در دوره  $t$  است چنانچه حجم ذخیره اولیه  $S_{kt}$  حجم ذخیره نهایی  $S_{l,t+1}$  باشد بنابراین حجم تبخیر از مخزن  $E_{klt}$  می‌باشد. همچنین جریان ورودی به مخزن  $Q_{it}$  می‌باشد.  $k$  اندیس کلاس حجم ذخیره اولیه  $(k=1,2,\dots,NK)$ ؛  $l$  اندیس کلاس حجم ذخیره نهایی  $(l=1,2,\dots,NK)$ ؛ و  $i$  اندیس کلاس جریان ورودی در دوره  $t$  است  $(i=1,2,\dots,NI)$ .

حداقل‌سازی انحراف از مقادیر مطلوب می‌تواند به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شود. در این حالت این توابع را توابع خسارت گویند.

فرم کلی این توابع به صورت چند جمله‌ای است که میزان انحراف از مقادیر مطلوب را محاسبه نموده و بسته به نوع هدف، توان و ضریبی به آن تعلق می‌گیرد. یکی از مهمترین مراحل توسعه مدل بهینه‌سازی، تعیین این ضرایب و توانهاست که متأسفانه در تحقیقات گذشته، کمتر به این موضوع توجه شده است. در این مقاله با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی پویای استوکستیک ( $SDP$ )، حساسیت معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، و آسیب‌پذیری نسبت به تغییرات پارامترهای تابع خسارت (ضرایب و توانها) مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- سوابق مطالعاتی

برنامه‌ریزی پویا ( $DP$ ) روشی است که توسط **بلمن** توسعه یافته است [۲]. در این برنامه‌ریزی یک مسئله بهینه‌سازی چند مرحله‌ای به چند مسئله‌ی تک مرحله‌ای تبدیل و سپس حل می‌شود.  $DP$  بطور وسیعی در بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب کاربرد داشته است [۳]. جامعیت و انعطاف‌پذیری این برنامه‌ریزی باعث استفاده گسترده آن در مسائل متنوع منابع آب از قبیل بهره‌برداری از مخزن، توسعه ظرفیتها و تخصیص شده است [۴-۶].

در مسائل بهره‌برداری از مخزن عموماً از فرم استوکستیک  $DP$  ( $SDP$ ) استفاده می‌گردد که در آن جریان ورودی به مخزن بصورت یک زنجیره مارکوف مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود. **گابلینگر** و **لوکوس** نخستین مطالعات را در این زمینه انجام دادند [۸، ۷]. **ترابی** و **مباشری** نشان دادند که صرف‌نظر کردن از طبیعت مارکوفی جریان ورودی باعث افزایش خسارت بهره‌برداری و کاهش کارایی سیستم می‌شود [۹].

یکی از مشکلات  $DP$  که از آن به بلای ابعاد یاد می‌شود، افزایش ابعاد متغیرهای حالت و تصمیم در این برنامه‌ریزی است. **حیدری** و **همکاران** برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته را معرفی نمودند [۱۰]. تمامی این روشها جهت غلبه بر معضل ابعاد در این برنامه‌ریزی می‌باشد.

$$E_t = 2.725.H_t.R_t.e \quad (10)$$

$$E_t^{\max} = PPC.Hour_t \quad (11)$$

$$E_t \leq E_t^{\max} \quad (12)$$

که در آن  $E_t^{tar}$  انرژی مطلوب (نیاز) دو دوره  $t$  به مگاوات ساعت،  $PPC$  ظرفیت نصب نیروگاه به مگاوات،  $PF_t$  ضریب کارکرد نیروگاه در دوره  $t$ ،  $Hour_t$  مجموع کل ساعتها در دوره  $t$ ،  $E_t$  کل مقدار انرژی تولید شده در دوره  $t$  به مگاوات،  $H_t$  هد خالص توربین در دوره  $t$  به متر،  $R_t$  خروجی نیروگاه در دوره  $t$  به میلیون متر مکعب،  $e$  راندمان کلی نیروگاه (حاصلضرب راندمان توربین و ژنراتور)،  $E_t^{\max}$  حداکثر انرژی قابل تولید در دوره  $t$  به مگاوات ساعت می باشد. گام زمانی مدل یا به عبارتی دوره  $t$  برابر یک ماه می باشد.

در محاسبات انرژی نیروگاههای برقی، معمولاً انرژیهای قطعی یا اولیه و ثانویه تعریف می گردند. این دو از روابط زیر حاصل می گردند :

$$FE_t = \text{Minimum}(E_t, E_t^{tar}) \quad (13)$$

$$SE_t = E_t - FE_t \quad (14)$$

که در آن  $FE_t$  و  $SE_t$  به ترتیب انرژیهای قطعی و ثانویه تولیدی در دوره  $t$  به مگاوات ساعت است. خسارت ناشی از انحراف تولید انرژی از مقدار مطلوب آنرا می توان با رابطه زیر نشان داد :

$$LFE_t = CE \cdot \left\{ (E_t^{tar} - E_t) / E_t^{tar} \right\}^{NE} \quad (15)$$

که در آن  $LFE_t$  خسارت انرژی در دوره  $t$  است.  $CE$  و  $NE$  نیز به ترتیب ضریب و توان تابع خسارت انرژی می باشند. نظر به اینکه ممکن است انرژی در دوره‌هایی بیشتر و در دوره‌هایی کمتر از مقدار مطلوب باشد، منطقی است که به انحرافات دو طرف حول مقدار مطلوب، خسارت یکسان در نظر گرفته نشود. بنابراین در حالت کلی داریم

$$\text{if } E_t < E_t^{tar} \Rightarrow LFE_t^1 = CE_1 \cdot \quad (16)$$

$$\left\{ (E_t^{tar} - E_t) / E_t^{tar} \right\}^{NE1} \& LFE_t^2 = 0.0$$

$$\text{if } E_t > E_t^{tar} \Rightarrow LFE_t^2 = CE_2 \cdot \quad (17)$$

$$\left\{ (E_t - E_t^{tar}) / E_t^{tar} \right\}^{NE2} \& LFE_t^1 = 0.0$$

که در آن  $LFE_t^1$  و  $LFE_t^2$  به ترتیب توابع خسارت انرژی به ازای تولید انرژی کمتر و بیشتر از  $E_t^{tar}$  می باشند.

اگر  $f_t^n(k, i)$  تابع خسارت کل سیستم با  $n$  دوره باقیمانده تا پایان بهره‌برداری باشد، رابطه بازگشتی مدل پسر  $SDP$  عبارتست از :

$$f_t^n(k, i) = \text{Min}[L S_{kilt} + \sum_j P_{ij}' \cdot f_{t+1}^{n-1}(l, j)] \quad (2)$$

که در آن  $P_{ij}'$ ، احتمال انتقال جریان از دوره  $t$  به دوره  $t+1$  است، بگونه‌ای که جریان در دوره  $t$  برابر  $Q_{it}$  و در دوره  $t+1$  برابر  $Q_{i,t+1}$  باشد. این احتمال با فرض اینکه جریان ورودی به مخزن بصورت یک زنجیره مارکوف مرتبه اول است، تعریف و محاسبه می گردد.  $LS_{kilt}$  نیز بیانگر خسارت سیستم در دوره  $t$  با انتخاب متغیرهای حالت فوق است.

با حل رابطه بازگشتی در سالهای متوالی، سیاست بهینه بصورت  $R = R(k, i, t)$  یا  $l = l(k, i, t)$  حاصل می گردد که اولی بیانگر خروجی بهینه و دومی بیانگر حجم ذخیره نهایی بهینه است. این سیاست در سالهای متوالی تکرار می گردد که نشاندهنده رسیدن به حل بهینه است. همچنین شرایط حالت پایدار هنگامی حاصل می گردد که مجموع خسارت مورد انتظار سالانه، مستقل از اندیسهای  $t, i, k$  و به ازای همگی آنها برابر مقدار ثابتی باشد به عبارتی :

$$f_t^{n+T}(k, i) - f_t^n(k, i) = Cte ; \forall k, i, t \quad (3)$$

#### ۴- تابع خسارت در مدل بهره‌برداری

هدف اصلی از این مقاله ارائه یک فرم منطقی از تابع خسارت است که در رابطه (۳) با عبارت  $LS_{kilt}$  مشخص گردیده است. بدین منظور از تکنیک تحلیل حساسیت و معیارهای اعتمادپذیری، برگشت پذیری و آسیب‌پذیری استفاده گردیده است. این دو معیار بطور گسترده‌ای در مطالعات بهره‌برداری از مخازن مورد استفاده قرار گرفته اند.

مخزنی را که هدف از احداث آن تولید انرژی برقی، تأمین نیازهای شرب و کشاورزی و ایجاد یک محیط جهت تفریحات آبی می باشد در نظر بگیرید. روابط تولید انرژی برقی عبارتند از :

$$E_t^{tar} = PPC.PF_t.Hour_t \quad (9)$$

## ۵- معیارهای ارزیابی کارایی

نظر به اینکه جهت بهره‌برداری از مخزن توابع جایگزین مورد استفاده قرار گرفته‌اند و این توابع بطور مستقیم نشاندهنده ارزش ریالی حاصل از بهره‌برداری نیستند، لازم است معیارهایی نیز جهت ارزیابی کارایی مدل و سیاست بهره‌برداری تعریف شود. در اینجا از معیارهای اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، و آسیب‌پذیری که بطور گسترده در مطالعات بهره‌برداری از مخازن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، استفاده شده است.

اعتمادپذیری عبارتست از احتمال تأمین نیاز یا یک مقدار مطلوب. اگر خروجی سیستم در دوره  $t$  و  $S$  مجموعه تمام مقادیر رضایتبخش خروجی‌ها باشد، داریم

$$\alpha = \text{Prob}(X_t \in S), \quad t = 1, \dots, n \quad (27)$$

که در آن  $\alpha$  اعتمادپذیری و  $n$  تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری است.

برگشت‌پذیری ( $\beta$ ) نشاندهنده سرعت متوسط بازگشت سیستم از یک وضعیت نارضایتبخش به وضعیت رضایتبخش است [۲۱].

$$\beta = \text{Prob}\{X_{t+1} \in S | X_t \in CF\} \quad (28)$$

آسیب‌پذیری به اندازه و شدت یک شکست هنگامیکه روی می‌دهد اشاره دارد. در اینجا آسیب‌پذیری را بصورت زیر تعریف می‌نماییم:

$$\gamma = [\text{Max}(X_t^{\text{tar}} - X_t); t = 1, 2, \dots, n] / X_t^{\text{tar}} \quad (29)$$

که در آن  $X_t^{\text{tar}}$ ، خروجی مطلوب سیستم در دوره  $t$  و  $\gamma$  آسیب‌پذیری سیستم است.

## ۶- مطالعه موردی: سد و نیروگاه کارون ۵

### مشخصات کلی و آمار و اطلاعات ورودی

رودخانه کارون به عنوان پرآبترین منبع آبی سطحی ایران محسوب می‌گردد. در حال حاضر سدهای کارون ۱، کارون ۳ و مسجد سلیمان، بر روی آن احداث گردیده و سدهای گتوند علیا، و کارون ۴ در دست اجرا می‌باشند. همچنین سدهای خرسان، بازفت و کارون ۵ در بالادست رودخانه در دست مطالعه می‌باشند. در بالادست حوضه بوسیله تونل‌های ۱ و ۲ و ۳ کوهرنگ مقداری از آب حوضه به

در برخی از مخازن یکی از اهداف بهره‌برداری، ایجاد محدوده مطمئن جهت تفریحات آبی است. در این شرایط در فصل تفریحات تراز آب یا حجم مخزن نبایستی از یک حد معین پائینتر ( $S_t^{LL}$ ) یا بالاتر ( $S_t^{UL}$ ) برود و بایستی به انحراف از این مقادیر جریمه تعلق گیرد ( $t$  فقط شامل فصل تفریحات است):

$$\text{if } S_t < S_t^{LL} \Rightarrow LFS_t^1 = CS_1 \cdot \quad (18)$$

$$\{(S_t^{LL} - S_t) / S_t^{LL}\}^{NS1} \& LFS_t^2 = 0.0$$

$$\text{if } S_t > S_t^{UL} \Rightarrow LFS_t^2 = CS_2 \cdot \quad (19)$$

$$\{(S_t - S_t^{UL}) / S_t^{UL}\}^{NS2} \& LFS_t^1 = 0.0$$

اگر از آب مخزن جهت مصارف شهری و کشاورزی استفاده گردد لازم است برای این منظور نیز تابع خسارتی تعریف نمود. نظر به تقدم نیاز شهری بر نیاز کشاورزی، هنگام تعریف این تابع بایستی به این موضوع توجه نمود. فرض کنید  $DT_t$  نیاز کل (شهری و کشاورزی) و  $DU_t$  شهری در دوره  $t$  باشد. داریم:

$$\text{if } R_t < DU_t \Rightarrow LFR_t^1 = CR_1 \cdot \quad (20)$$

$$\{(DU_t - R_t) / DU_t\}^{NR1} \&$$

$$LFR_t^2 = LFR_t^3 = 0.0$$

$$\text{if } DU_t < R_t < DT_t \Rightarrow LFR_t^2 = CR_2 \cdot \quad (21)$$

$$\{(DT_t - R_t) / DT_t\}^{NR2} \&$$

$$LFR_t^1 = LFR_t^3 = 0.0$$

$$\text{if } R_t > DT_t \Rightarrow LFR_t^3 = CR_3 \cdot$$

$$\{(R_t - DT_t) / DT_t\}^{NR3} \& \quad (22)$$

$$LFR_t^1 = LFR_t^2 = 0.0$$

که در آن  $R_t$  خروجی کل از مخزن است. جمله آخر تابع خسارت خروجی ( $LFR_t^3$ ) به این خاطر اضافه شده که به خروجی بیشتر از نیاز.

تابع خسارت کل ( $Lft$ ) عبارتست از مجموع توابع خسارت بالا:

$$Lft = LFE_t + LFH_t + LFS_t + LFR_t \quad (23)$$

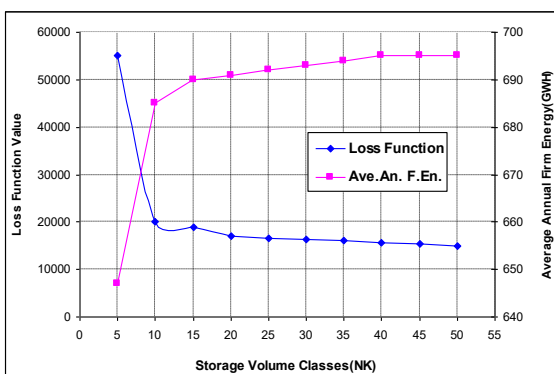
$$LFE_t = LFE_t^1 + LFE_t^2 \quad (24)$$

$$LFS_t = LFS_t^1 + LFS_t^2 \quad (25)$$

$$LFR_t = LFR_t^1 + LFR_t^2 + LFR_t^3 \quad (26)$$

## ۷- اجرای مدل بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت

جهت اجرای مدل بهینه‌سازی لازم است ابتدا جریان ورودی و حجم ذخیره مخزن به تعدادی کلاس گسسته‌سازی شوند. شکل ۲ تغییرات مقادیر میانگین سالانه تابع خسارت و انرژی قطعی در برابر تعداد کلاسهای جریان را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که برای ۲۰  $NK >$  این تغییرات آهنگ خیلی کندی دارد، لذا در این مطالعه  $NK = 20$  انتخاب گردیده است. همچنین تعداد کلاسهای جریان با توجه به تغییرپذیری آن برابر ۵ انتخاب گردید ( $NI = 5$ ).



شکل ۲ منحنی تغییرات تابع خسارت و انرژی قطعی نسبت به تغییرات تعداد کلاسهای حجم ذخیره

با انتخاب این مقادیر برای  $NK$  و  $NI$ ، تحلیل حساسیت ضرایب و توانهای تابع خسارت انجام گردیده است. مقادیر اولیه‌ای که برای پارامترها انتخاب شده عبارتند از:

$$CE_1 = CE_2 = 2 ; NE_1 = NE_2 = 2$$

## ۸- تحلیل حساسیت ضرایب تابع خسارت

در گام نخست تغییرات ضرایب  $CE_1$  و  $CE_2$  (ضرایب خسارت انرژی) مورد توجه قرار گرفتند. شکل‌های ۳ و ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را با تغییرات این دو ضریب نمایش می‌دهند. در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد که تغییرات اعتمادپذیری نسبت به نقطه مبنا کمتر از ۵/۲۰٪ است. همچنین با افزایش  $CE_1$  اعتمادپذیری عموماً کاهش می‌یابد.

حوضه زاینده رود منتقل می‌گردد. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

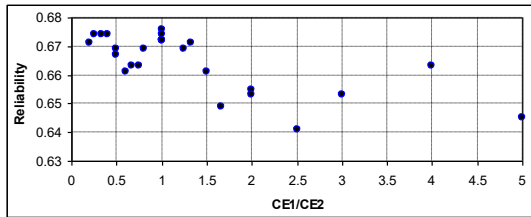
مساحت حوضه آبریز سد کارون ۵، ۱۰۱۸۶ کیلومتر مربع و میزان آبدهی متوسط دراز مدت آن در شرایط طبیعی (بدون برداشت بالادست) ۱۱۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. متوسط بارندگی درازمدت سالانه حوضه برابر ۶۱۳ میلیمتر می‌باشد که از حدود ۲۵۰ میلیمتر در شرق حوضه تا حدود ۱۵۰۰ میلیمتر در شمال غرب حوضه متغیر است. ۳۵ متر مکعب بر ثانیه از آب حوضه در بالادست به مصرف رسیده یا از حوضه خارج می‌گردد، لذا میانگین جریان سالانه ورودی به سد برابر ۷۸ متر مکعب بر ثانیه است [۲۲].

در این مطالعات از یک سری زمانی جریان ورودی به مخزن بطول ۴۳ سال (۱۳۳۵ تا ۱۳۷۷) استفاده گردیده است. همچنین مدل بگونه‌ای تهیه گردیده که تغییرات سطح و حجم مخزن با ارتفاع و نیز تغییرات تراز پایاب نیروگاه با خروجی (منحنی سنجه) و نیز تغییرات راندمان توربین با هد مخزن بصورت عددی و دقیق از روی فایل ورودی خوانده شده و در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳]. بر اساس مطالعات انجام شده (مشانیر ۱۳۷۹)، ظرفیت نصب نیروگاه برای ضریب کارکرد ۲۵٪ و رقوم نرمال ۱۲۰۰ متر از سطح دریا برابر ۳۳۶ مگاوات محاسبه شده است. نظر به اینکه این سد یک سد برقایی است لذا بدون کاستن از کلیت بحث تنها قسمت برقایی تابع خسارت مورد استفاده قرار گرفته است.

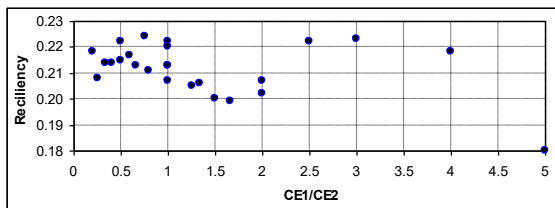


شکل ۱ موقعیت عمومی منطقه مورد مطالعه

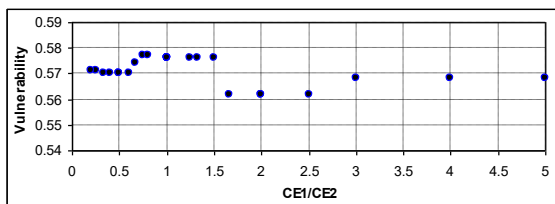
جهت بررسی بیشتر تغییرات این سه معیار در برابر تغییرات نسبت  $CE_1 / CE_2$  به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ آمده است.



شکل ۶ تغییرات اعتمادپذیری نسبت به تغییرات نسبت  $CE_1/CE_2$

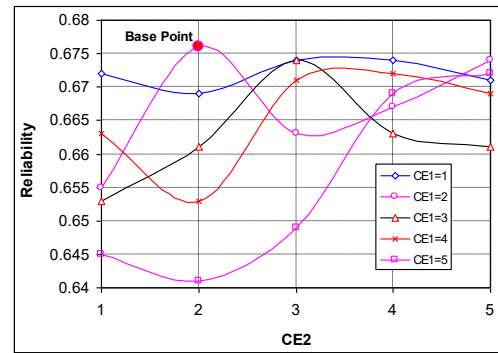


شکل ۷ تغییرات برگشت پذیری نسبت به تغییرات نسبت  $CE_1/CE_2$

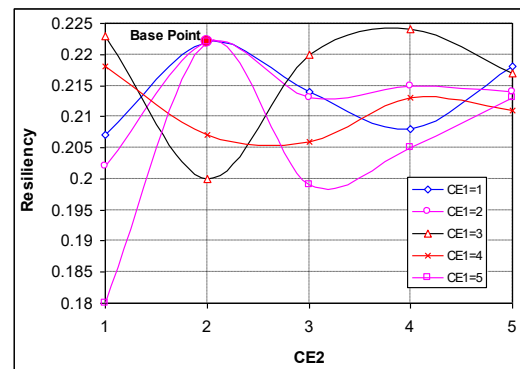


شکل ۸ تغییرات آسیب پذیری نسبت به تغییرات نسبت  $CE_1/CE_2$

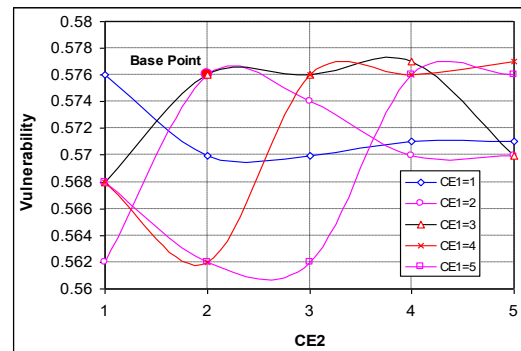
شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش این نسبت روند عمومی اعتمادپذیری رو به کاهش است. همچنین در شکل ۷ دیده می‌شود که تغییرات برگشت پذیری با نسبت فوق یک روند نامنظم و تقریباً نزولی است. همچنین شکل ۸ بیانگر تغییرات نامحسوس آسیب پذیری با تغییر نسبت ضرایب است. روند عمومی در اینجا نیز کاهش آسیب پذیری با افزایش نسبت فوق است. بایستی توجه نمود که  $CE_1$  ضریب جریمه برای حالات کمبود و  $CE_2$  ضریب جریمه برای حالات مازاد است، بنابراین افزایش نسبت  $CE_1 / CE_2$  به معنای افزایش جریمه نسبی در شرایط کمبود می‌باشد. نظر به خاصیت جیره‌بندی نهفته در مدل  $SDP$ ، با افزایش این نسبت این خاصیت افزایش می‌یابد که نتیجه آن کاهش هر سه معیار در نظر گرفته شده می‌باشد. البته این خاصیت به توان تابع خسارت



شکل ۳ تغییرات اعتمادپذیری در برابر تغییرات ضرایب  $CE_2$  و  $CE_1$

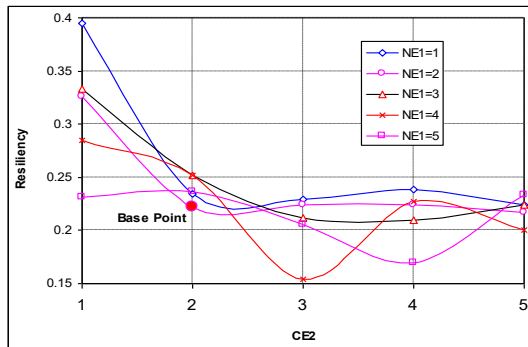


شکل ۴ تغییرات برگشت پذیری در برابر تغییرات ضرایب  $CE_2$  و  $CE_1$

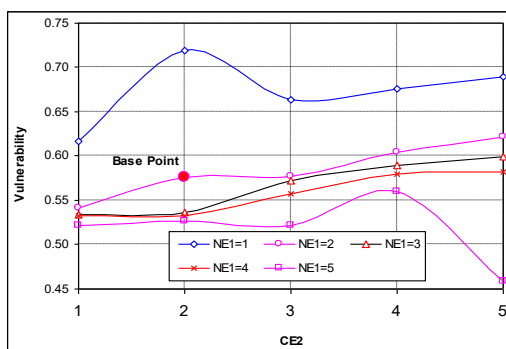


شکل ۵ تغییرات آسیب پذیری نسبت به تغییرات ضرایب  $CE_2$  و  $CE_1$

بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که برگشت پذیری با تغییر  $CE_2$  یک روند نامشخص دارد. همچنین حساسیت آن بیشتر از اعتمادپذیری است. حداکثر اختلاف آسیب پذیری نسبت به نقطه مبنا حدود ۱۹٪ است.



شکل ۱۰ تغییرات برگشت پذیری نسبت به تغییرات توانهای NE1 و NE2



شکل ۱۱ تغییرات آسیب پذیری نسبت به تغییرات توانهای NE1 و NE2

در اینجا نیز تغییرات این سه معیار نسبت به تغییرات نسبت توانها یعنی  $NE1/NE2$  مورد توجه قرار گرفته است.

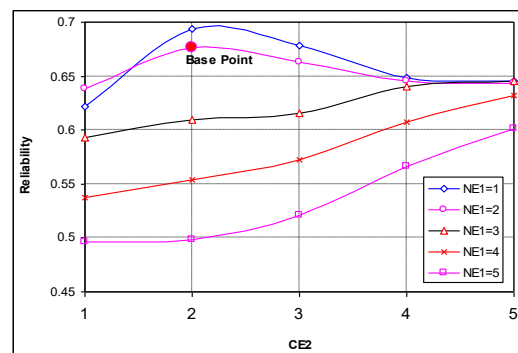
چنانچه در شکل ۱۲ ملاحظه می‌گردد روند عمومی تغییرات، کاهش اعتمادپذیری با افزایش نسبت فوق است. در شکل ۱۳ تغییرات برگشت‌پذیری با این نسبت ملاحظه می‌گردد که نشان‌دهنده یک روند نزولی است. همچنین دامنه تغییرات در اینجا بیشتر از اعتمادپذیری است. شکل ۱۴ آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد که برخلاف ضرایب، در اینجا این پارامتر کاملاً حساس می‌باشد و مجدداً با افزایش نسبت، کاهش می‌یابد.

بر اساس آنالیز فوق ضرایب و توانهای زیر انتخاب شدند:  $CE1=CE2=2, NE1=2, NE2=1.5$

بمراست حساستر است تا ضریب آن. بر اساس بررسی فوق و مقادیر بدست آمده از معیارها، مقادیر زیر جهت تحلیل حساسیت توانها انتخاب شدند  $CE_1 = CE_2 = 2$ .

## ۹- تحلیل حساسیت توانها

با در نظر گرفتن مقادیر ضرایب و توانهای قبلی به‌عنوان مبنا، تغییرات سه معیار کارایی نسبت به تغییر توانهای تابع خسارت بررسی شده است. شکل ۹ تغییرات اعتمادپذیری را با تغییر توانهای تابع خسارت انرژی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که با افزایش  $NE_1$  اعتمادپذیری کاهش و با افزایش  $NE_2$  افزایش می‌یابد. حداکثر اختلاف از نقطه مبنا ۲۶٪ است. در واقع توان  $NE_1$  باعث افزایش خاصیت جیره‌بندی (کاهش اعتمادپذیری) و توان  $NE_2$  باعث کاهش سرریز و نگهداری آب در مخزن جهت استفاده در دوره‌های بعدی (افزایش اعتمادپذیری) می‌گردد. شکل ۱۰ نیز تغییرات برگشت‌پذیری را نمایش می‌دهد که آنهم روندی تقریباً کاهشی دارد. در شکل ۱۱ نیز تغییرات آسیب‌پذیری آمده است که روندی کم و بیش مشابه اعتمادپذیری دارد.



شکل ۹ تغییرات اعتمادپذیری نسبت به تغییرات توانهای NE1 و NE2

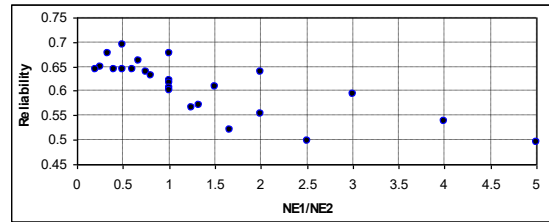
خسارت و تحلیل حساسیت پارامترهای آن، از آمار و اطلاعات سد در دست مطالعه کارون ۵ استفاده شده و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری حساسیت زیادی نسبت به تغییرات ضرایب توابع خسارت ندارند. بهر حال حساسیت برگشت‌پذیری بیشتر از اعتمادپذیری بوده و آسیب‌پذیری تقریباً غیرحساس است.

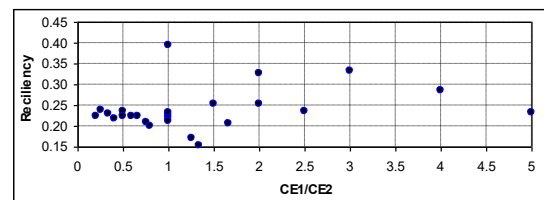
۲- سه معیار ارزیابی نسبت به تغییرات توان تابع خسارت حساس می‌باشند.

۳- با افزایش نسبت CE1/CE2 هر سه معیار یک روند تقریباً کاهشی دارند.

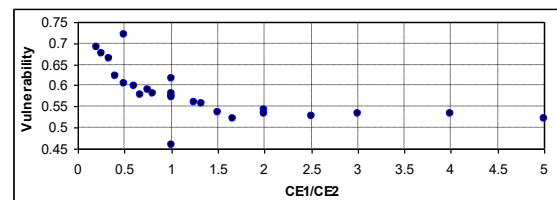
۴- با افزایش نسبت NE1/NE2 نیز روند کاهشی است که این روند در مورد اعتمادپذیری و بخصوص آسیب‌پذیری مشخص‌تر می‌باشد.



شکل ۱۲ تغییرات اعتمادپذیری نسبت به تغییرات نسبت NE1/NE2



شکل ۱۳ تغییرات برگشت‌پذیری نسبت به تغییرات نسبت NE1/NE2



شکل ۱۴ تغییرات آسیب‌پذیری نسبت به تغییرات نسبت NE1/NE2

## مراجع

- [1] Yeh W.W-G. , "Reservoir management and operation models, A state-of-the-art Review", Water Resour Res., Vol. 21, No.12, 1985.
- [2] Bellman R.E., Dynamic Programming; Princeton University Press, Princeton, N.J., 1957.
- [3] Yakowitz S., "Dynamic programming application in Water Resources", Water Resour, Res., Vol. 18, No.4, 1982.
- [4] Mays L.W., Tung Y.K., "Hydrossystem engineering and management", McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1992.
- [5] Becker L., Yeh W.W-G., Optimal timing, sequencing, and sizing of multiple reservoir surface water supply facilities, Water Resour.Res., Vol. 10, No.1, 1974, pp. 57-62.
- [6] Butcher W.S., Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation, Water Resour,Bull., Vol. 7, No.1, 1971, pp. 115-123.
- [7] Gablinger M.,Loucks D.P., "Markov models for flow regulation", ASCE, Journal of Hydra Div, Vol. 96, No.1, 1970, pp. 165-181.
- [8] Loucks D.P., Falkson L.M. , "A comparison of some dynamic, linear, and policy iteration methods for reservoir operation", Water Resour. Bull, Vol. 6, No.3, 1970, pp. 384-400.

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک مدل SDP جهت تحلیل حساسیت ضرایب و توانهای تابع خسارت استفاده گردید. هدف از اجرای مدل، تعیین سیاست بهره‌برداری با منظور حداقل‌سازی مجموع انحرافات از مقادیر مطلوب بود. تابع هدف مورد استفاده به فرم

کلی  $LF_k = \sum_{k=1}^K C_k (X_k - X_k^{tar})^{nk}$  در نظر گرفته شد

که  $X_k$  خروجی متناظر با منظور  $k$  ام،  $X_k^{tar}$  خروجی مطلوب منظور  $k$  ام، و  $C_k$  و  $nk$  نیز به ترتیب ضریب و توان تابع خسارت مربوط به آن منظور می‌باشد. بدین ترتیب یک فرم کلی برای تابع خسارت یک مخزن چند منظوره توسعه داده شد که در مطالعات بهره‌برداری از مخزن بسیار سودمند می‌باشد. جهت نشان‌دادن روند توسعه مدل، تابع



- [9] Torabi M., Mobasheri F. , "*A stochastic dynamic programming model for the optimum operation of a multi-Purpose reservoir*", Water Resour Bull, Vol. 9, No.6, **1973**, pp. 1089-1099.
- [10] Heidari M., Chow V.T., Kokotovic P.V., Meredith D.D., "*Discrete differential dynamic programming approach to Water Resources systems optimization*", Water Resour. Res., Vol. 7, No.2, **1971**, pp. 273-283.
- [11] Karamouz M., Houck M.H., "*Annual and monthly reservoir operating rules*", Water Resour. Res., Vol. 18, No.5, **1982**, pp. 1337-1344.
- [12] Kelman J., Stedinger J.R., Cooper L.A., Hsu E., Yuan S-O. , "*Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation*", Water Resour, Res., Vol. 226, No.3, **1990**, pp. 447-454.
- [13] Karamouz M., Vasiliadis H.V., "*Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts*", Water Resour. Res., Vol. 28, No. 5, **1992**, pp. 1221-1232.
- [14] Stedinger J.R., Bola E., Sule F., Loucks D.P., "*Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization*", Water Resour, Res., Vol. 20, No.11, **1984**.
- [15] Graygier J.C., Stedinger J.R., "*Algorithms for optimizing hydropower system operation*", Water Resour. Res., Vol. 21, No.1, **1985**.
- [16] Bogardi J., Optimal hydropower system configuration based on operational analysis; ASCE, Journal of Water Resour Plann. Mange. Vol. 116, No.2, **1990**, pp. 233-246.
- [17] Reznick, Simonovic, Issues in hydro power modeling using algorithm, ASCE, Journal of Water Resour Plan Manag Vol. 118, No.1, **1992**, pp. 54-70.
- [18] Georgakakos A., Yao P. , Yu Y. , "*Control model for hydroelectric energy-value optimization*", ASCE Journal of Water Resour. Plann. Manag. Vol. 123, No.1, **1997**.
- [19] Lund J., "*Derived power production and energy drawdown rules for reservoirs*", ASCE, Journal of Water Resour Plan. Manag. Vol. 126, No.2, **2000**, pp. 108-111.
- [20] Loucks D.P., Stedinger J.R., Haith D.A., "*Water Resource systems planning and analysis*", Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J., **1981**.
- [21] Hashimoto T., Stedinger J.R., Loucks D.P., "*Reliability, Resiliency, and Vulnerability criteria for Water Resource performance evaluation*", Water Resour. Res., Vol. 18, No.1, **1982**, pp. 14-20.
- [۲۲] مهندسين مشاور مشاور؛ طرح سد و نیروگاه کارون ۵، مطالعات مرحله پیش توجیهی، ۱۳۸۰.
- [۲۳] علیمرادی فخرالدین، بهینه سازی بهره برداری از سیستم مخازن برقایی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران، ۱۳۸۰.