

PSO-MODSIMP: مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی در طراحی و بهره‌برداری

بهینه از سیستم‌های چندمخزنی بر قابی

سپیده امامی تبریزی^۱، سید جمشید موسوی^{*۲} و راحله افضلی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۳ کارشناس ارشد مهندسی آب، شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۱/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۱۳۹۰/۱۰/۲۸، تاریخ تصویب: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳)

چکیده

فرمول‌بندی برنامه ریاضی مسائل طراحی و بهره‌برداری بهینه، از منظر منابع آب، سدهای بر قابی همراه با اعمال کنترل بر اعتمادپذیری بده انرژی، از نوع مدل‌های بهینه‌سازی غیرخطی غیرمحدب با متغیرهای مختلط است. در این مطالعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، با تلفیق مدل حوضه‌ای MODSIM به عنوان مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO)، برای حل این رده از مدل‌های پیچیده در مسائل چندمخزنی توسعه یافته است. در این روش ابتدا امکان تعريف نیاز بر قابی و اعمال سیاست بهره‌برداری استاندارد بر قابی از مخازن در مدل MODSIM فراهم شده است. سپس مدل شبیه‌ساز بهینه‌ساز (MODSIMP) به الگوریتم PSO با تابع هدف حداکثرسازی سود خالص حاصل از MODSIM مستلزم فراخوانی و اجرای مدل MODSIMP می‌باشد. مدل پیشنهادی در تعیین مشخصات بهینه سیستم سه‌سdi خرسان شامل ظرفیت مخازن و توان تولید نیروگاهها به عنوان مطالعه موردی استفاده و نتایج حاصل از آن تحلیل شده است. با توجه به سرعت مدل توسعه یافته MODSIMP در شبیه‌سازی سیستم‌های چندمخزنی بر قابی و انعطاف الگوریتم‌های فرآکوشی در اتصال به مدل‌های شبیه‌ساز و احتساب خصوصیات غیرخطی، مدل ترکیبی PSO-MODSIMP از قابلیت مناسبی در حل مسائل طراحی و بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: انرژی بر قابی، سیستم مخازن چندگانه، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی.

مقدمه

(RBS) در سیستم‌های تک مخزنی بر قابی را به یک مدل RBS چند مخزنی تعمیم داده اند. مدل‌های شبیه‌سازی علیرغم انعطاف و مزیت در احتساب جزئیات، به تنها ی قادر به تعیین سناریوهای برتر و بهینه بهره‌برداری و طراحی در سیستم‌های چندمخزنی نمی‌باشند. در این شرایط مدل‌های بهینه‌سازی می‌توانند به عنوان یک روش تکمیلی و یا جایگزین مطرح باشند. بهینه‌سازی توابع نخستین بار توسط نیوتون، لاگرانژ و کوشی مطالعه و در ادامه لاپل نیتز و نیوتون ایده حساب دیفرانسیل را برای یافتن نقاط بهینه توابع مشتق‌پذیر به کار بردن. دهه ۵۰ را می‌توان آغاز پیشرفت در زمینه مدل‌های بهینه‌سازی و متعاقب آن در دهه ۶۰ کاربرد این روش‌ها در سیستم‌های منابع آب داشت. به عنوان نمونه Sigvaldason

امروزه توجه به طرح‌های توسعه انرژی بر قابی با توجه به ضرورت دستیابی به منابع انرژی پاک از اهمیت ویژه برخوردار است. در این راستا ارزیابی پتانسیل هیدروانرژی در این طرح‌ها با استفاده از روش‌های تحلیل سیستم و مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی سالهای است که مورد توجه بوده است. در این ارتباط برای نمونه می‌توان به کار [۱] Ford در توسعه مدل ResQ در شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخازن با هدف تولید انرژی و تأمین نیاز آبی اشاره کرد. با توجه به عدم قطعیت و نوسانات جریان رودخانه، کنترل اعتمادپذیری تولید انرژی بر قابی نیز در رقابت با دیگر تکنولوژی‌های تولید انرژی حائز اهمیت است. در این راستا [۲] Afzali et al. مدل شبیه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری

رهاسازی از مخزن به گونه‌ای است که انرژی تولیدی در هر دوره در صورت امکان (ارضای قیود حداکثر و حداقل مخزن و دیگر قیود) برابر با نیاز انرژی (مطمئن) تعريف شده گردد. بنابراین اولین مرحله از توسعه مدل مورد نظر در این تحقیق تجهیز مدل MODSIM به سیاست HSOP (مدل MODSIMP) است.

اعمال سیاست استاندارد بر قابی (HSOP) در یک سیستم چند مخزنی بر قابی نیز به معنی محاسبه جریان خروجی از هر مخزن در هر ماه به گونه‌ای است که انرژی تولیدی سیستم در صورت امکان برابر با نیاز انرژی سیستم شود. این مهم باستی بر اساس خصوصیات MODSIM در مدل سازی سیستم مورد نظر انجام گردد. اجزای هر سیستم منابع آب در MODSIM در قالب مجموعه‌ای از گره‌ها و بازوها نمایش داده می‌شود. همچنین مقادیر جریان در تمامی بازوها از جمله بازوهای معرف جریان‌های عبوری از توربین و سرریز از حل یک مدل شبکه جریان نتیجه می‌شود. بنابراین برای اعمال قاعده بهره‌برداری HSOP باستی پارامترهای مدل شبکه جریان را به گونه‌ای تنظیم کرد که مقادیر جریان حاصل از حل مدل شبکه جریان هدف مورد نظر در قاعده مذکور را تأمین کند.

در این ارتباط ایده اصلی برآورد و اصلاح تکراری نیاز آبی گره‌های انتهایی بازوهای جریان توربین‌ها با حل متواالی مدل‌های خطی شبکه جریان (NFP) در هر گام زمانی است. در این راستا روابط مربوط به تأمین نیاز انرژی مطمئن سیستم به قرار زیر خواهد بود:

$$R_i(t) = \frac{FE_i}{2.73 * \bar{H}_i(t) * e_{p,i}} \quad , \quad \sum_{i=1}^n E_i(t) = FE \quad (1)$$

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i(t) = \sum_{i=1}^n (2.73 * (e_{p,i}) * (R_i(t)) * (0.5 * (h_{2,i}(t) + h_{1,i}(t)) - h_{TAIL,i}(t) - h_{f,i}(t))) \quad (2)$$

[۳] و Ginn and Houck [۴] از مدل‌های بهینه‌سازی در سیستم‌های تک مخزنی بر قابی استفاده کردند. Gholami et al [۵] روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را با تکیه بر اهداف بر قابی در سیستم‌های چند مخزنی مقایسه کردند. Lund [۶] از الگوریتم بهینه‌سازی شبکه جریان چند دوره‌ای در مدل HEC-PRM در مدل‌سازی سیستم مرکزی مخازن رودخانه Missouri بهره برداشت. مدل توسعه یافته در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی بهینه‌سازی طراحی- بهره‌برداری بهینه از مخازن آبی با اهداف بر قابی است. ماجول شبیه‌سازی این مدل، MODSIMP، تعمیم یافته مدل MODSIM برای احتساب نیاز بر قابی در سیستم‌های چند مخزنی است. MODSIM یک مدل شبیه‌سازی حوضه‌ای مجهر به مدل‌های بهینه‌سازی شبکه جریان تک دوره‌ای است که با این الگوریتم کارآمد و سریع آزادسازی لاغرانژی بسط داده شده توسط Bertsekas حل می‌شوند [۷]. در واقع ماجول شبیه‌ساز MODSIMP مسئله بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی بر قابی با کنترل اعتمادپذیری عرضه شده توسط Afzali et al. [۸] را با مزیت سرعت محاسباتی بالاتر حل می‌کند. در بخش دوم نیز تلفیق MODSIM با بهینه‌ساز PSO پیشتر در سیستم‌های حوضه‌ای با تمرکز بر مسئله تخصیص آب و بدون احتساب اهداف بر قابی انجام شده است [۹]. در این مطالعه این فرآیند به سیستم‌های بر قابی تعمیم می‌یابد. در نهایت مدل پیشنهادی در بهینه‌سازی اقتصادی ظرفیت سدها و نیروگاه‌های سیستم سه مخزنی بر قابی خرسان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تعمیم مدل MODSIM در شبیه‌سازی اهداف بر قابی

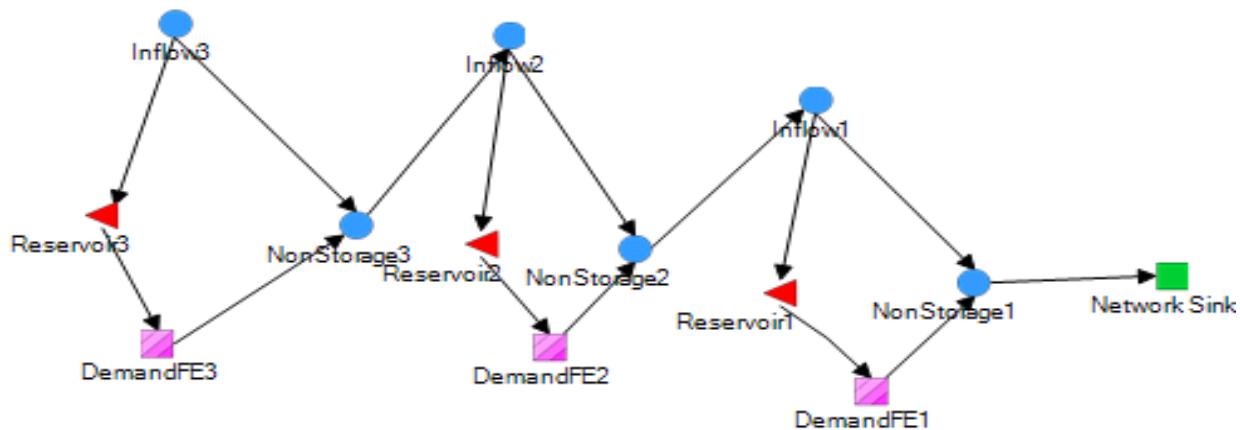
MODSIM یک مدل شبیه‌سازی قطعی، با بهینه‌سازی تک زمانه در حل مسئله تخصیص، و بدون قابلیت احتساب مستقیم نیاز بر قابی و سیاست بهره‌برداری متناسب با اهداف بر قابی است. به عبارت دیگر مدل MODSIM به خودی خود قادر به اعمال سیاست استاندارد بر قابی (HSOP) در مدل و کنترل معیار اعتمادپذیری تأمین انرژی نیست. منظور از سیاست HSOP در یک سیستم تک مخزنی، تعیین

Reservoir1, Reservoir2, Reservoir3 مطمئن، و گره Reservoir3 به ترتیب گره‌های مخازن سری خرسان III، خرسان II و خرسان I می‌باشد. در نهایت تمامی جریان‌های غیرمصرفی وارد Sink می‌شوند. در هر مخزن آورد ورودی توسط بازویی که گره ورودی را به گره مخزن متصل می‌کند به مخزن وارد می‌شود و جریان خروجی از هر مخزن به قدری رها می‌شود که نیاز گره نیاز پایین دست مخزن را در صورت امکان تأمین کند. این جریان توسط بازویی که گره مخزن را به گره نیاز غیرمصرفی متصل می‌کند از مخزن خارج شده و وارد گره غیر ذخیره‌ای می‌گردد. همچنین بازویی که گره آورد ورودی را به گره غیر ذخیره‌ای متصل می‌کند به منظور سرریز ایجاد شده است که در نهایت تمامی جریان‌های خروجی وارد گره تخلیه (Sink) می‌شوند. برای یک گام زمانی نمونه مقادیر مفروض از داده‌های ورودی براساس داده‌های یک ماه از اطلاعات سیستم شامل جریان‌های ورودی به مخازن، احجام ذخیره اولیه، حداکثر و حداقل مخازن، اعداد اولویت نیازهای بازویه‌ای سه گانه توربین، ذخیره مطلوب (هدف) مخازن و سرریز در جدول (۱) ارائه شده است.

اعداد اولویت فوق به گونه‌ای انتخاب شده است که در هر مخزن اولویت نیاز بالاتر از اولویت ذخیره هدف مخزن باشد. هزینه سرریز نیز از هزینه نیاز و ذخیره مطلوب (هدف) هر مخزن بیشتر است. بدین ترتیب تا زمانی که جریان در بازوی توربین به مقدار حداکثر خود یعنی نیاز گره انتهای بازو نرسد، جریان بازوی سرریز فعال نخواهد شد.

$E(t)$: انرژی کل تولیدی سیستم طی دوره t
 $E_i(t)$: انرژی تولیدی در نیروگاه i ام طی دوره t
 FE : نیاز انرژی مطمئن کل سیستم
 FE_i : نیاز انرژی مطمئن نیروگاه i ام
 $e_{P,i}$: راندمان نیروگاه i ام
 $R_i(t)$: جریان عبوری از توربین نیروگاه i ام طی دوره t
 $\bar{H}_i(t)$: بلندای متوسط خالص آب روی توربین نیروگاه i ام طی دوره t
 $h_{2,i}(t)$: تراز آب در مخزن i ام در انتهای دوره t
 $h_{1,i}(t)$: تراز آب در مخزن i ام در ابتدای دوره t
 $h_{TAIL,i}(t)$: تراز آب در پایاب نیروگاه مخزن i ام
 $h_{f,i}(t)$: بلندای افت انرژی در نیروگاه i ام طی دوره t

در روابط فوق مقادیر انرژی بر حسب مگاوات ساعت (MWh)، جریان‌ها بر حسب میلیون متر مکعب (MCM) و ترازها و بلندای آب بر حسب متر (m) می‌باشند. در ادامه سعی شده است فرآیند تکراری اصلاح نیازهای پایین دست مخازن در انتهای بازویه‌ای جریان توربین‌ها به منظور اعمال سیاست HSOP در قالب روابط و فرمول‌بندی مدل NFP در یک گام زمانی دلخواه از مدل MODSIM تبیین گردد. در شکل (۱) شماتیک یک سیستم سه‌سدی نظیر خرسان برای یک گام زمانی نمونه نشان داده شده است. در این سیستم گره‌های Inflow1, Inflow2, Inflow3, NonStorage1, NonStorage2, NonStorage3, Reservoir1, Reservoir2, Reservoir3، آوردهای ورودی DemandFE1, DemandFE2, DemandFE3، گره Network Sink و گره نیازهای غیرمصرفی DemandFE1 نیاز تأمین انرژی

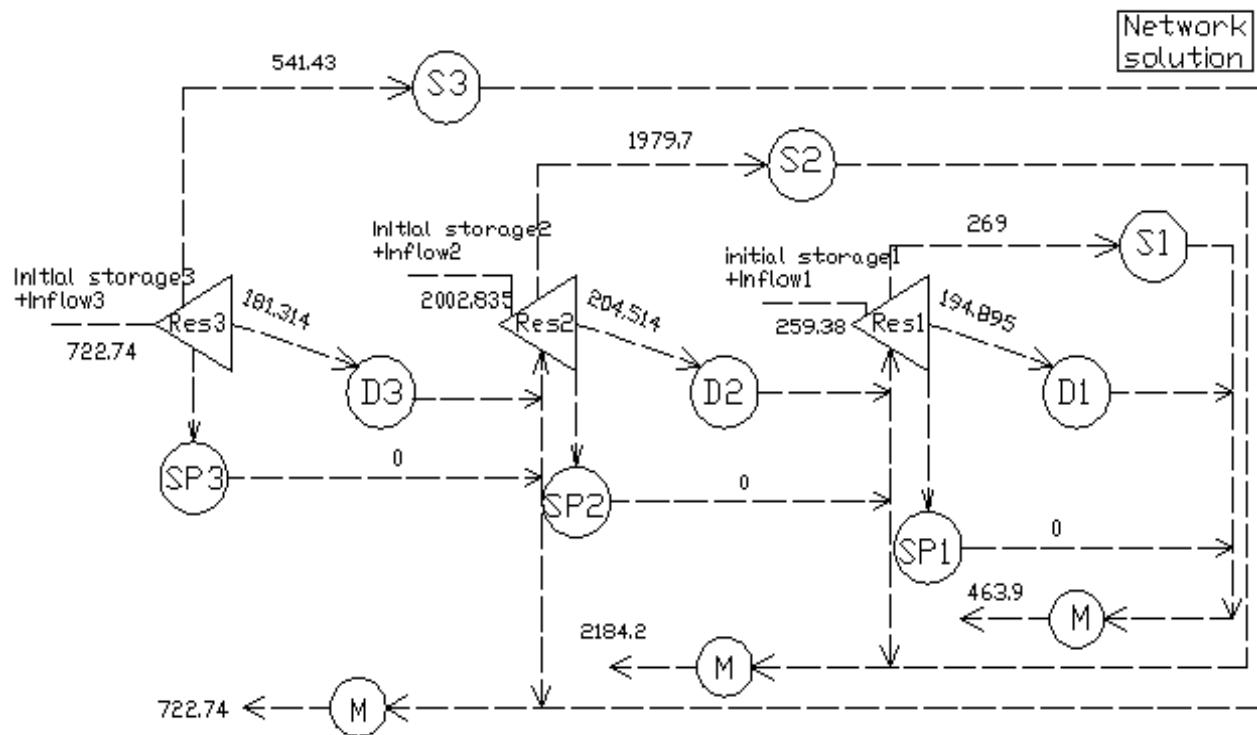


شکل ۱: شماتیک سیستم برقایی سه سدی خرسان در MODSIM

جدول ۱: داده های مسأله سیستم سه سدی خرسان برای یک گام زمانی

خرسان I	خرسان II	خرسان III	آیتم
3.885	16.835	95.83	جریان ورودی (10^6 m^3)
510.99	1986	626.916	حجم اولیه مخزن (10^6 m^3)
274.163	2288.76	741.133	حجم ذخیره حداکثر مخزن (10^6 m^3)
236.827	1683.316	512.699	حجم ذخیره حداقل مخزن (10^6 m^3)
94	90	92	اولویت تأمین نیاز
104	100	102	عدد اولویت گره انتهای بازوی ذخیره مطلوب مخزن
1000	1000	1000	عدد اولویت گره انتهای بازوی سرریز

برای سیستم فوق شبکه جریان ساخته شده در گام زمانی فوق در MODSIM مطابق شکل (۲) می باشد.



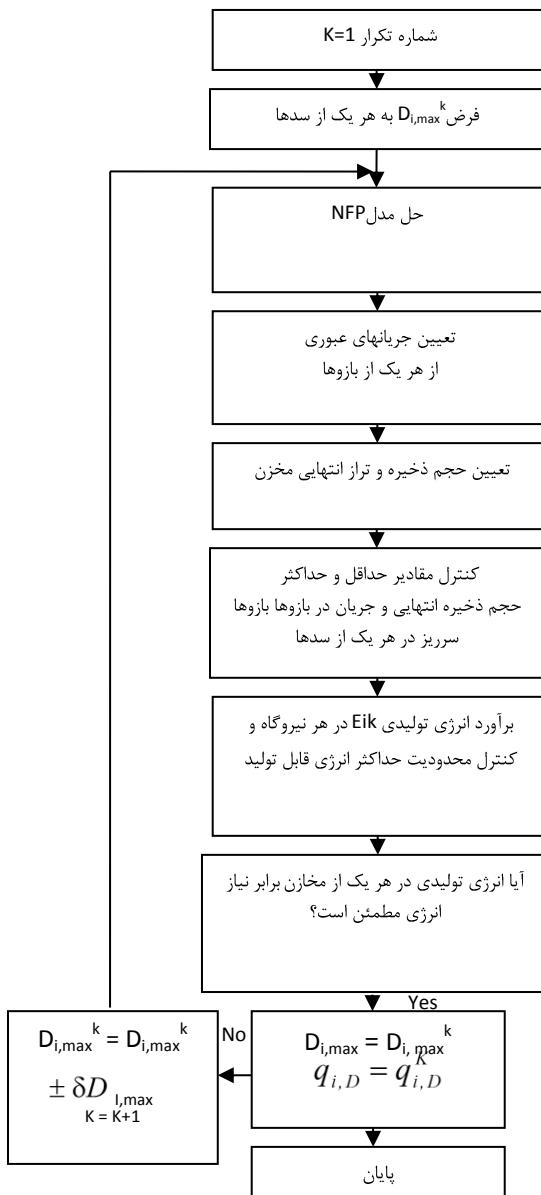
شکل ۲: شبکه جریان محاسباتی در MODSIM متناظر با سیستم شکل ۱

حداقل سازی هزینه شبکه جریان و قیود پیوستگی جریان در گره ها و کران های پایین و بالا در بازو ها مطابق روابط زیر است:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^3 \left[C_{iS} * q_{S,i}(t) + C_{ispill} * q_{sp,i}(t) + C_{iD} * q_{R,i}(t) \right] \quad (3)$$

مقادیر مجهول در این سیستم جریان های عبوری از توربین ها، احجام ذخیره آخر ماه مخازن و جریان های سرریزی می باشند که از حل یک مدل NFP تعیین می شوند. فرمول بندی مدل NFP مذکور با تابع هدف

مربوط به جریان توربین‌ها ($D_{i,\max}$) و در نتیجه جریان‌های عبوری از توربین‌ها ($q_{R,i}$) با حل مدل‌های NFP تکراری در هر گام زمانی، مقدار نهایی مقادیر $D_{i,\max}$ و $q_{R,i}$ به گونه‌ای برآورد می‌شوند که انرژی تولیدی هر نیروگاه در صورت امکان (رعایت قیود حجم ذخیره حداقل و حداکثر) برابر با نیاز انرژی مطمئن تعريف شده برای آن گردد. روند انجام این فرآیند در شکل (۳) نشان داده شده است. این امر به منزله اعمال HSOP در مدل خواهد بود.



شکل ۳: الگوریتم پیاده‌سازی سیاست بهره برداری استاندارد بر قابی (HSOP) در سیستم‌های چندمخزنی MODSIM

s.t

$$\underbrace{q_{S,i}(t+1)}_{\text{ending storage}} = \underbrace{q_{S,i}(t)}_{\text{initial storage}} + \underbrace{q_{I,i}(t)}_{\text{inflow}} - \underbrace{q_{R,i}(t)}_{\text{release}} - \underbrace{q_{sp,i}(t)}_{\text{spill flow}} \quad (4)$$

$$\underbrace{R_{i,\min}}_{\text{min release}} \leq q_{R,i}(t) \leq \underbrace{D_{i,\max}}_{\text{max release}} \quad (5)$$

$$\underbrace{spill_{i,\min}}_{\text{min spill}} \leq q_{SP,i}(t) \leq \underbrace{spill_{i,\max}}_{\text{max spill}} \quad (6)$$

$$\underbrace{S_{i,\min}}_{\text{min storage}} \leq q_{S,i}(t) \leq \underbrace{S_{i,\max}}_{\text{max storage}} \quad (7)$$

در روابط فوق $q_{sp,i}$ ، $q_{R,i}$ و $q_{S,i}$ به ترتیب جریان‌های عبوری از بازوها توربین، ذخیره مطلوب انتهای دوره و سریز مخزن i با ضرایب هزینه واحد به ترتیب جریان $C_{i,S}$ و $C_{i,spill}$ می‌باشند. دقت شود که در مدل شبکه جریان فوق، اعداد اولویت گره‌های نیاز انتهایی بازوها فوق، $DEMR_i$ ، بر اساس رابطه کلی $C_i = -[50000 - 10 * DEMR_i]$ ، هزینه جریان در هر یک از بازوها فوق را در مدل شبکه تعیین می‌کنند (این بدین معنی است که ۳ نوع عدد اولویت $DEMR_{i,S}$ ، $DEMR_{i,D}$ و $DEMR_{i,spill}$ تعريف می‌شود). همچنین $D_{i,\max}$ ، $S_{i,\max}$ و $spill_{i,\max}$ به ترتیب نیازهای گره‌های انتهایی بازوها توربین، ذخیره انتهایی مطلوب مخزن (در مدل شبکه رسیدن به حجم مطلوب انتهای دوره به منزله تعريف یک نیاز خواهد بود) و سریز می‌باشند. ضمناً $R_{i,\min} = 0$ ، $S_{i,\min} = 0$ و $spill_{i,\min} = 0$ مقادیر حداقل جریان در بازوها فوق می‌باشند. در این مدل در صورتی جریان در بازوی سریز مقدار غیرصرف خواهد داشت که جریان بازوی حجم ذخیره مطلوب مخزن به حداکثر مقدار خود برسد و یا به بیان دیگر مخزن در انتهای دوره پر شود. بدین منظور عدد اولویت گره انتهایی بازوی سریز در مدل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بزرگترین ضریب هزینه مربوط به این بازو باشد، تا جریان بازوی سریز صرفاً در صورت ضرورت فعال شود.

در تعیین قابلیت‌های MODSIM برای احتساب نیاز بر قابی با تکرار روی مقادیر نیاز گره‌های انتهایی بازوها

ارزیابی شده و مقادیر جدید متغیرها با استفاده از معادلات (۸) و (۹) تعیین می‌شود. این روند تا رسیدن به یک تعداد تکرار حداقل و یا تکرار مقدار کمینه به دست آمده برای تابع هدف در یک تعداد تکرار متوالی ادامه می‌یابد.

- فرمولبندی مدل

تابع هدف مدل بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از یک سد بر قابی با اعمال کنترل بر اطمینان‌پذیری تأمین بده انرژی مطلوب را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\begin{aligned} COST = & P_{ec} + PC - E_{second} * Svalue \\ & - Efirm * Fvalue + (Re - Re_{firm}) * P \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن $COST$ هزینه کل، P_{ec} هزینه تونل آب بر نیروگاه که در این مطالعه ثابت فرض شده است، PC هزینه احداث نیروگاه، $Svalue$ مقدار ارزش انرژی ثانویه به ازای $Fvalue$ هر کیلو وات ساعت انرژی تولیدی در سال مبنای، $Efirm$ مقدار ارزش انرژی مطمئن به ازای هر کیلو وات ساعت انرژی تولیدی در سال مبنای، Re_{firm} انرژی مطمئن ماهانه تولیدی، E_{second} انرژی ثانویه تولیدی در ماه t که برابر انرژی مازاد بر انرژی مطمئن می‌باشد، Re میزان اعتمادپذیری برابر نسبت تعداد ماههایی که نیاز ماهانه انرژی تأمین شده به تعداد کل ماههای، R سطح اعتمادپذیری مطلوب برابر 90% و P ضریب جریمه انحراف از اعتمادپذیری مطلوب می‌باشد.

متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی و الگوریتم PSO متغیرهای طراحی سیستم سدهای بر قابی شامل رقوم نرمال یا حجم ذخیره مخازن در رقوم نرمال سدها، توان تولید نیروگاهها و رقوم حداقل بهره‌برداری از مخازن است. در واقع منظور از متغیرهای طراحی از منظر مطالعات منابع آب (نه طراحی کامل یک سد بر قابی)، است. رقوم بهینه حداقل بهره‌برداری مخازن بر قابی نیز گرچه ناظر بر شرایط مطلوب بهره‌برداری است، به دلیل نقش آن در موقعیت و طراحی تونل آب بر نیروگاه به شکل قراردادی در زمرة متغیرهای طراحی محسوب می‌شوند.

تلفیق مدل شبیه سازی MODSIMP و الگوریتم PSO – الگوریتم PSO

(Particle Swarm Optimization) PSO یک روش فراکاوشی است که توسط Eberhart and Kennedy [۱۰] معرفی گردید. اساس PSO شبیه‌سازی یک رفتار دسته‌جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرنده‌ها و ماهیان استفاده می‌شود. این الگوریتم مانند سایر تکنیک‌های محاسبات تکاملی از یک جمعیت که شامل راه حل‌های بالقوه مسئله تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. اگر فضای جستجوی مسئله D بعدی باشد، ذره j از گروه را می‌توان با یک بردار D بعدی $X_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jD})^T$ و سرعت آن $V_j = (v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jD})^T$ نمایش داد. بهترین موقعیت به دست آمده توسط z امین ذره را با بردار D بعدی $P_j = (p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jD})^T$ نشان می‌دهند و اندیس g برای بهترین ذره در گروه در نظر گرفته می‌شود، در نهایت جمعیت ذرات (Swarm) مطابق با روابط (۸) و (۹) به حرکت و اداشه می‌شود [۱۱]:

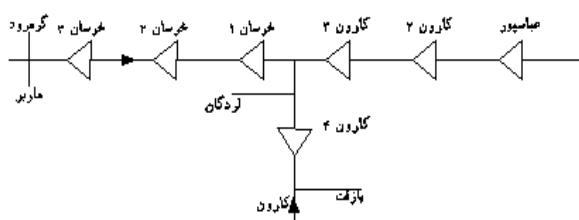
$$v_{jd}^{k+1} = X[wv_{jd}^k + C_1 r_1^k (p_{jd}^k - x_{jd}^k) + C_2 r_2^k (p_{gd}^k - x_{gd}^k)] \quad (8)$$

$$x_{jd}^{k+1} = x_{jd}^k + v_{jd}^{k+1} \quad (9)$$

که در این روابط $N = 1, 2, \dots, N$ و $j = 1, 2, \dots, D$ با اندازه جمعیت، k شماره تکرار، w وزن اینرسی، C_1 و C_2 دو ثابت مثبت بنامهای ضرایب شناخت و اجتماعی، X فاکتور انقباض، که می‌تواند مانند w برای محدود کردن سرعت به کار رود و r_1 و r_2 اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت بین $[0, 1]$ می‌باشد. در هر تکرار از الگوریتم PSO، با استفاده از متغیرهای تصمیم مسئله محاسبات روندیابی متوالی جریان و مقدار انرژی حاصل از سیستم توسط مدل MODSIMP انجام شده و با تعیین مقادیر بهینه متغیرها که شامل رقوم نرمال، رقوم حداقل بهره‌برداری و ظرفیت نصب در هر سد می‌باشد و با توجه به مقدار تابع هدف

مطالعه موردی

سیستم سدهای سری بر قابی خرسان III، II و I بر روی رودخانه خرسان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. حوضه آبریز رودخانه خرسان در جنوب غربی کشور قرار گرفته است. رودخانه مذکور از سرشاخه های اصلی کارون بوده و از دو شاخه مهم ماربر و گرمرود تشکیل شده است. در ارتفاعات بالاتر نیز رودخانه های حنا و گرمک، از شاخه های ماربر و بشار و دشت روم از شاخه های گرمرود در جریان هستند. حوضه مذکور از شمال به حوضه های زاینده رود، دز، کارون و از غرب به حوضه های دز و کرخه و از شرق به حوضه های کر و زاینده رود و از جنوب به حوضه های زهره، کارون، جراحی و مارون محدود می گردد. شکل (۵) شمایی از سیستم خرسان را نشان می دهد.

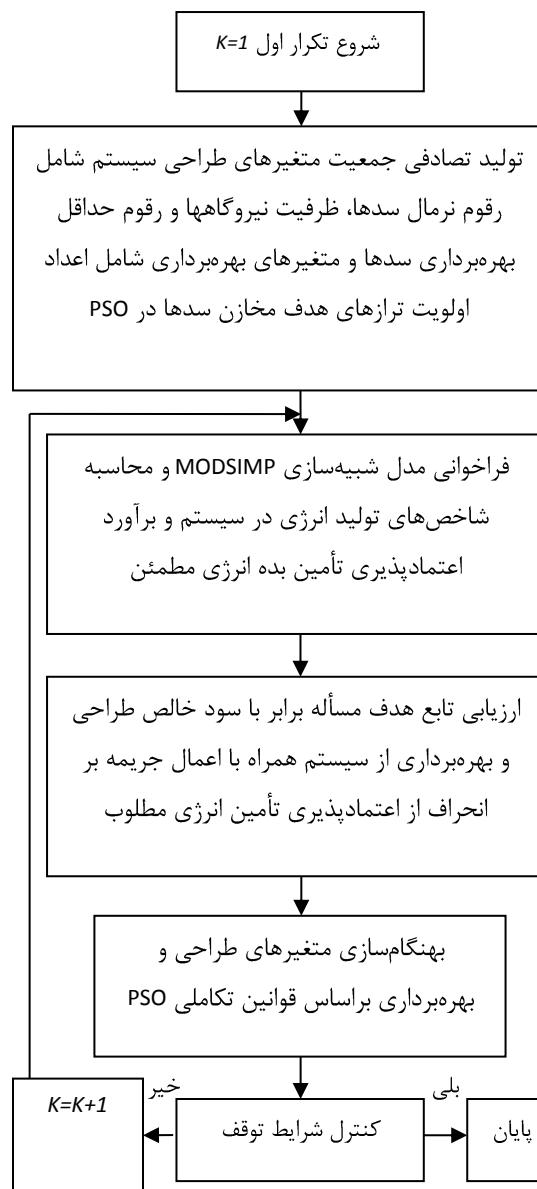


شکل ۵: شمایی از سیستم خرسان

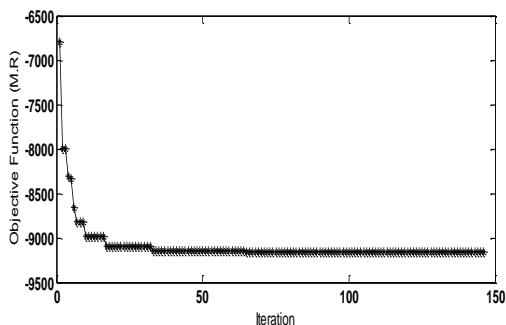
نتایج

دو نوع مدل ترکیبی شبیه سازی- بهینه سازی با عناوین CSEPSO-MODSIMP و SEPSO-MODSIMP با انتخاب سطح اعتماد پذیری ۹۰٪ از تأمین بده انرژی مطمئن در حل مساله استفاده شده است. در هر دو مدل از الگوریتم PSO مجهز به تکنیک کشش تابع و جهش نخ به (SEPSO) به منظور افزایش کارایی و کاهش احتمال همگرایی زودرس الگوریتم بهره گرفته شده است. تفاوت دو مدل مذکور در متغیرهای تصمیم مسأله می باشد. در مدل CSEPSO-MODSIMP، علاوه بر متغیرهای طراحی (رقوم نرمال، رقوم حداقل بهره برداری و توان تولید نیروگاهها)، عدد اولویت ذخیره مطلوب مخازن نیز به عنوان متغیرهای تصمیم بهره برداری مجھول الگوریتم بهینه ساز SEPSO-MODSIMP می باشد. در واقع در مدل PSO متغیرهای تصمیم PSO صرفاً متغیرهای از جنس طراحی

با اتصال مدل شبیه ساز MODSIMP به الگوریتم PSO- MODSIMP مدل بهینه سازی- شبیه سازی PSO- MODSIMP توسعه یافته است. در این مدل متغیرهای تصمیم مساله توسط الگوریتم PSO تولید شده و ارزیابی مطلوبیت مقادیر تولید شده فوق در گرو فراخوانی و اجرای مدل شبیه سازی MODSIMP در برآورد پتانسیل هیدرولری سیستم خواهد بود. ساختار استفاده از مدل مذکور در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴: ساختار مدل ترکیبی بهینه سازی- شبیه سازی- PSO- MODSIMP

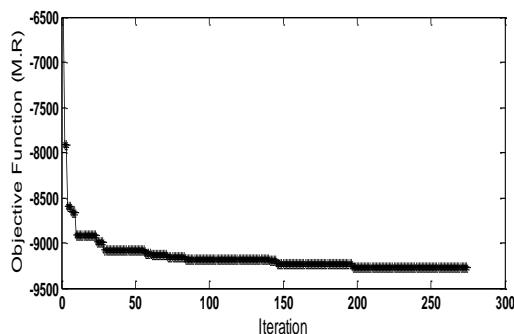


شکل ۶: تغییرات تابع هدف برای Gbest در مدل SEPSON-MODSIM در سیستم خرسان

با در نظر گرفتن تابع هدف و مقادیر پارامترهای یکسان با مدل SEPSON-MODSIM یک مجموعه جواب نمونه از اجراهای مختلف از مدل CSEPSO-MODSIM در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به ثابت ماندن هزینه تا ۵۰ تکرار نهایی، مقدار سود خالص مطابق شکل (۷) برابر با $\frac{۹۲۶۹}{۶}$ واحد نتیجه شده است.

جدول ۳: نتایج متغیرهای طراحی و بهره‌برداری حاصل از مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی CSEPSO-MODSIM در سیستم خرسان در رویکرد شبیه‌سازی یکپارچه سیستم

سد	رقوم نرمال (Masl)	رقوم حداقل بهره‌برداری (Masl)	ظرفیت تولید (MW)	اولویت بهینه ذخیره آب
III خرسان	۱۴۱۷/۴	۱۳۹۲/۶	۳۴۸	۱۶۱
II خرسان	۱۲۳۵	۱۲۱۱/۵	۵۹۳/۸	۱۰۰
I خرسان	۱۰۰۰	۹۹۰/۷	۴۳۳	۱۸۷



شکل ۷: تغییرات تابع هدف برای Gbest در مدل CSEPSO-MODSIM در سیستم خرسان

بوده و در نتیجه در آن از یک سیاست بهره‌برداری معلوم و یا همان سیاست بهره‌برداری استاندارد برقابی (HSOP) استفاده می‌شود. افزودن عدد اولویت مربوط به احجام ذخیره مطلوب (هدف) مخازن ($DEM_{i,S}$) در MODSIM به عنوان متغیرهای بهره‌برداری به مجموعه متغیرهای تصمیم مدل SEPSO سبب می‌شود که امکان بهینه‌سازی بر روی متغیرهای وابسته به بهره‌برداری از سیستم، علاوه بر بهینه‌سازی متغیرهای طراحی، درجه تأثیر آنها در بهبود عملکرد مدل بررسی شود. از آنجا که اعداد اولویت فوق ضرایب هزینه بازوهای مربوط به ذخیره آخر دوره مخازن در مدل‌های تکزمانه NFP در MODSIM را تعیین می‌کنند، احتساب آنها به عنوان متغیرهای تصمیم سبب می‌شود پایی بین الگوریتم بهینه‌سازی خارجی (SEPSO) با تابع هدف تعریف شده روی کل افق زمانی بهره‌برداری و الگوریتم‌های داخلی تکزمانه NFP پیاپی در ایجاد شود و اثرات بهینه‌سازی چندزمانه و اعمال جیره‌بندی جزیی در دوره‌های خشک لحاظ گردد. با اضافه نمودن این متغیرها تعداد متغیرهای تصمیم در مدل CSEPSO-MODSIM از ۹ به ۱۲ عدد افزایش یافته‌است.

در اجرای مدل‌ها تعداد ۱۵ ذره با $w_{max}=0.8$ در فاکتور پنالتی (P) براساس سعی و خطای برابر $4000 \cdot 70^{\circ}$ در نظر گرفته شده است. جدول (۲) جواب‌های حاصل از مدل SEPSO-MODSIM را نشان می‌دهد. با توجه به ثابت ماندن هزینه تا ۵۰ تکرار نهایی، مقدار تابع هدف مطابق شکل (۶) برابر با 9162 واحد با اطلاعات اقتصادی مفروض نتیجه شده است.

جدول ۲: مشخصات طراحی بهینه سیستم خرسان با استفاده از مدل SEPSON-MODSIM

سد	رقوم نرمال (masl)	رقوم حداقل بهره‌برداری (masl)	توان تولید (MW)
III خرسان	۱۴۱۷/۷۶	۱۴۰۴/۷۹	۳۴۸
II خرسان	۱۲۳۵	۱۲۱۰/۷	۵۸۷
I خرسان	۹۹۹/۶۲	۹۹۲/۲۹	۳۷۴/۸۸

SEPSO-MODSIMP کاهاش یافته است. البته با توجه به انرژی مطمئن تولیدی و تابع هدف مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی متغیرهای بهره‌برداری (اعداد اولویت ذخیره مطلوب مخازن)، علاوه بر متغیرهای طراحی (رقوم نرمال، رقوم حداقل بهره‌برداری، توان تولید نیروگاهها)، منجر به بهبود شرایط بهره‌برداری از سیستم می‌گردد. با این وجود درصد بهبود عملکرد (تابع هدف) ناشی از بهینه‌سازی متغیرهای بهره‌برداری چندان قابل ملاحظه نبوده و کمتر از ۵ درصد می‌باشد.

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مطالعه هدف توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی جهت طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنی بر قابی با اتصال الگوریتم PSO به عنوان موتور بهینه‌ساز و مدل MODSIM به عنوان موتور شبیه‌ساز محقق گردید. این کار در ابتدا با فراهم کردن امکان اعمال سیاست بهره‌برداری استاندارد بر قابی در مدل شبیه‌ساز انجام شد.

در ادامه حل مسئله بهینه‌سازی همزمان طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های بر قابی مورد توجه قرار گرفت. در مدل ترکیبی مقادیر جریان عبوری از توربین و تراز هر مخزن بهمنظور تأمین انرژی مطمئن در هر گام زمانی، که از طریق حل الگوریتم NFP و روش روندیابی متوالی جریان با استفاده از سیاست استاندارد بر قابی به دست می‌آید، از PSO به MODSIM به بازگردانده می‌شود و مقدار تابع هدف برای هر نقطه کاندید در درون فضای جستجوی چند بعدی مسئله توسط PSO محاسبه می‌گردد.

CSEPSO- و SEPSO-MODSIMP مدل‌های در بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از MODSIM سیستم سه مخزنی بر قابی خرسان به عنوان مطالعه موردنی استفاده شد. در مدل CSEPSO-MODSIMP علاوه بر متغیرهای طراحی رقوم نرمال سدها، رقوم حداقل بهره‌برداری مخازن سدها و ظرفیت نیروگاهها، اعداد اولویت احجام ذخیره هدف در مخازن نیز به عنوان متغیرهای بهره‌برداری به متغیرهای تصمیم PSO اضافه شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از دو مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی فوق بیانگر درجه تأثیر ناچیز بهینه‌سازی متغیرهای بهره‌برداری

جدول (۴) توان (ظرفیت) تولید نیروگاهها و مقادیر انرژی مطمئن تولید شده را در هر یک از مدل‌های SEPSO- CSEPSO-MODSIMP و MODSIM در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪ ارایه می‌کند.

جدول ۴؛ ظرفیت تولید و انرژی مطمئن متناظر در سطح اعتمادپذیری ۹۰٪ در مدل‌های SEPSO-MODSIMP و CSEPSO-MODSIMP

انرژی مطمئن ماهانه (مگاوات ساعت)	توان تولید (مگاوات)	مدل
۲۳۵۸۰۰	۱۳۱۰	SEPSO-MODSIMP مدل
۲۴۷۳۲۰	۱۳۷۴	CSEPSO-MODSIMP مدل

ملاحظه می‌شود که انرژی مطمئن ماهانه و توان تولید نیروگاهها در مدل CSEPSO-MODSIMP نسبت به مدل SEPSO-MODSIMP به میزان ۴٪ افزایش یافته است. این افزایش بیانگر درجه تأثیر بهینه‌سازی متغیرهای بهره‌برداری است. در جدول (۵) متوسط انرژی تولیدی ماهانه در کل سیستم و هر یک از نیروگاه‌ها در مدل‌های CSEPSO-MODSIMP و SEPSO-MODSIMP آمده است.

جدول ۵ متوسط انرژی تولیدی ماهانه در هر یک از نیروگاهها در مدل‌های CSEPSO- و SEPSO-MODSIMP و MODSIM

انرژی متوسط تولیدی ماهانه در سد خرسان I (مگاوات ساعت)	انرژی متوسط تولیدی ماهانه در سد خرسان II (مگاوات ساعت)	انرژی متوسط تولیدی ماهانه در سد خرسان III (مگاوات ساعت)	انرژی متوسط تولیدی ماهانه در سد خرسان کل سیستم (مگاوات ساعت)	مدل
۷۹۲۶۱	۱۳۸۵۳۲	۷۹۶۳۹	۲۹۷۴۳۲	SEPSO-MODSIMP مدل
۷۱۹۷۳	۱۴۶۹۳۴	۷۸۰۸۱	۲۹۶۹۸۸	CSEPSO-MODSIMP مدل

انرژی کل تولیدی ماهانه در هر یک از نیروگاهها و در سیستم برای مدل CSEPSO-MODSIMP نسبت به مدل

و در نتیجه دارای جواب‌های متعدد است. بنابراین تعیین جریانهای خروجی از مخازن براساس صرفاً معادله برابری مذکور نیازمند تعریف یک معیار دیگر و به عبارتی استفاده از یک مدل بهینه‌سازی است. در این مطالعه این مهم بر اساس فرمول‌بندی مسأله در قالب یک مدل بهینه‌سازی از نوع شبکه جریان (NFP) محقق شد. مزیت این رویکرد امکان بهره‌مندی از سرعت بالای حل این مدل‌ها و بهره‌مندی از دیگر قابلیت‌های یک مدل حوضه‌ای آماده نظیر MODSIM است.

گرچه در سیستم‌های تکمیخزنه تأمین نیاز انرژی و اعمال قاعده HSOP ضرورتاً مستلزم حل مدل‌های بهینه‌سازی NFP نیست، مزیت عمده روش پیشنهادی، با توجه به سرعت بسیار بالای الگوریتم آزادسازی لاگرانژی مورد استفاده در حل مدل‌های NFP در MODSIM در شبیه‌سازی سیستم‌های بر قابی چندمخزنی می‌باشد. این امر بدان جهت است که در سیستم‌های چندمخزنی معادله برای انرژی تولیدی در سیستم با نیاز انرژی مفروض دارای بیش از یک مجھول (جریانهای خروجی از هر یک از مخازن) بوده است.

مراجع

1. Ford, L., and Fulkerson, D. (1962), "Flows in networks", Princeton University Press, Princeton, N.J.
2. Afzali, R., Mousavi, S. J. and Ghaheri, A. (2007) A reliability-based simulation optimization model for multi-reservoir hydropower systems operation: Khersan experience. Water Resources Planning and Management, ASCE, in Press.
3. Sigvaldason, O. T. (1976), "A simulation model for operating a multipurpose multi-reservoir system", Water Resour. Res., 12(2), 263–278.
4. Ginn, T. R. and Houck, M. H. (1989) Calibration of an objective function for the optimization of realtime reservoir operations. Water Resources Research, 25(4), 591-603.
5. Gholami-Zanousi, A., Mousavi, S. J. and Afahar, A. (2004), "Optimization and simulation of a multiple reservoir system operation", Water Supply: Research and Technology (AQUA), 56(6), 409-424.
6. Lund, J., and Guzman, J. (1999), "Some derived operating rules for reservoirs in series or in parallel", J. Water Resour. Plan. Manage., 125(3), 143-153.
7. Bertsekas, D. P. (1991), "Linear Network Optimization", The MIT Press, Cambridge, Mass.
8. Shourian, M., Mousavi, S. J., Menhaj, M. and Jabbari, E. (2008) "Neural Network-based Simulation Optimization Model for Optimal Water Allocation Planning at Basin Scale" Journal of Hydroinformatics, IWA, Volume 10, No. 4, pp. 331-343.
9. Mousavi, S. J., Shourian, M., (2010) "Adaptive Sequentially Space Filling Meta-modeling for Optimal Water-Quantity Allocation at Basin Scale" Water Resources Research, 46, W03520, doi:10.1029/2008WR007076.
10. Kennedy, J. and Eberhart, R. C. (1995). "Particle swarm optimization", Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1942–1948, (IEEE Press).
11. Shi, Y. and Eberhart, R. C. (1998) "A modified Particle Swarm Optimizer", Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, AK, Anchorage.