

PSO-MODSIM: مدل بهینه‌سازی - شبیه‌سازی در طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنه برقابی

سپیده امامی تبریزی^۱، سید جمشید موسوی^{۲*} و راحله افزلی^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 مهندسی مشاور مه‌آب 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 برقابی 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 دسته‌زرات (PSO)، برای حل این رده از مدل‌های پیچیده در مسائل چندمخزنه توسعه یافته‌است. در این روش ابتدا امکان تعریف نیاز برقابی و اعمال سیاست بهره‌برداری استاندارد برقابی از مخازن در مدل MODSIM فراهم شده‌است. سپس مدل شبیه‌ساز بهبودیافته (MODSIM) به الگوریتم PSO با تابع هدف حداکثرسازی سود خالص حاصل از طراحی و بهره‌برداری از سیستم مخازن و نیروگاه‌ها در طول عمر مفید آن متصل گردیده‌است. در این مدل ترکیبی هر بار ارزیابی تابع هدف مدل PSO مستلزم فراخوانی و اجرای مدل MODSIM می‌باشد. مدل پیشنهادی در تعیین مشخصات بهینه سیستم سه‌سدهی خرسان شامل ظرفیت مخازن و توان تولید نیروگاه‌ها به عنوان مطالعه موردی استفاده و نتایج حاصل از آن تحلیل شده‌است. با توجه به سرعت مدل توسعه‌یافته MODSIM در شبیه‌سازی سیستم‌های چندمخزنه برقابی و انعطاف الگوریتم‌های فراکاوشی در اتصال به مدل‌های شبیه‌ساز و احتساب خصوصیات غیرخطی، مدل ترکیبی PSO-MODSIM از قابلیت مناسبی در حل مسائل طراحی و بهره‌برداری بهینه از این سیستم‌ها برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: انرژی برقابی، سیستم مخازن چندگانه، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی.

مقدمه

(RBS) در سیستم‌های تک مخزنه برقابی را به یک مدل RBS چند مخزنه تعمیم داده اند.

مدل‌های شبیه‌سازی علی‌رغم انعطاف و مزیت در احتساب جزئیات، به تنهایی قادر به تعیین سناریوهای برتر و بهینه بهره‌برداری و طراحی در سیستم‌های چندمخزنه نمی‌باشند. در این شرایط مدل‌های بهینه‌سازی می‌توانند به عنوان یک روش تکمیلی و یا جایگزین مطرح باشند.

بهینه‌سازی توابع نخستین بار توسط نیوتن، لاگرانژ و کوشی مطالعه و در ادامه لایب نیتز و نیوتن ایده حساب دیفرانسیل را برای یافتن نقاط بهینه توابع مشتق‌پذیر به کار بردند. دهه ۵۰ می‌توان آغاز پیشرفت در زمینه مدل‌های بهینه‌سازی و متعاقب آن در دهه ۶۰ کاربرد این روش‌ها در سیستم‌های منابع آب دانست. به عنوان نمونه Sigvaldason

امروزه توجه به طرح‌های توسعه انرژی برقابی 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 سالهاست که مورد توجه بوده‌است. 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 برقابی نیز در رقابت با دیگر تکنولوژی‌های تولید انرژی حائز اهمیت است. در این راستا Afzali et al. [۲] مدل شبیه‌سازی بر مبنای اعتمادپذیری

رها سازی 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) تعریف 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 برقایی (HSOP) در یک سیستم چندمخزنه برقایی 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 بایستی 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 بایستی 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 متوالی 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 مخزنه برقایی استفاده کردند. Gholami-Zanoosi et al [۵] روش‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی را با تکیه بر اهداف برقایی در سیستم‌های چندمخزنه مقایسه کردند. Lund [۶] از الگوریتم بهینه‌سازی شبکه جریان چند دوره‌ای در مدل HEC-PRM در مدل سازی سیستم مرکزی مخازن رودخانه Missouri بهره بردند.

مدل توسعه یافته در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی طراحی-بهره‌برداری بهینه از مخازن آبی با اهداف برقایی است. ماجول شبیه ساز این مدل، MODSIMP، تعمیم یافته مدل MODSIM برای احتساب نیاز برقایی در سیستم‌های چند مخزنه است. MODSIM یک مدل شبیه‌سازی حوضه‌ای مجهز به مدل‌های بهینه‌سازی شبکه جریان تک دوره‌ای است که با الگوریتم کارآمد و سریع آزادسازی لاگرانژی بسط داده شده توسط Bertsekas حل می‌شوند [۷]. در واقع ماجول شبیه‌ساز MODSIM مسأله بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه برقایی با کنترل اعتمادپذیری عرضه شده توسط Afzali et al. [۲] را با مزیت سرعت محاسباتی بالاتر حل می‌کند. در بخش دوم نیز تلفیق MODSIM با بهینه‌ساز PSO پیشتر در سیستم‌های حوضه‌ای با تمرکز بر مسأله تخصیص آب و بدون احتساب اهداف برقایی انجام شده است [۸ و ۹]. در این مطالعه این فرآیند به سیستم‌های برقایی تعمیم می‌یابد. در نهایت مدل پیشنهادی در بهینه‌سازی اقتصادی ظرفیت سدها و نیروگاه‌های سیستم سه مخزنه برقایی خرسان مورد استفاده قرار می‌گیرد.

MODSIMP: تعمیم مدل MODSIM در شبیه‌سازی اهداف برقایی

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

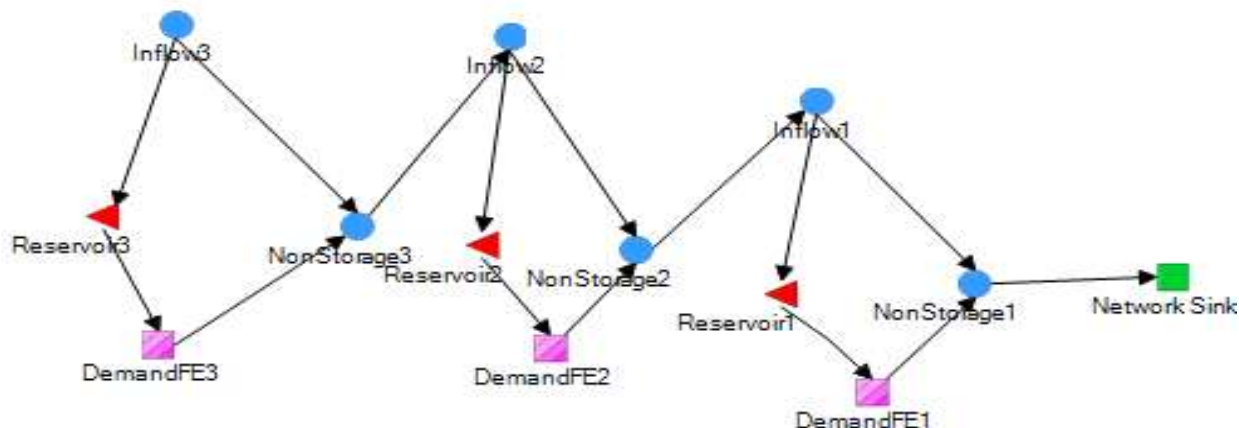
مطمئن، و گره Reservoir1, Reservoir2, Reservoir3 به ترتیب گره‌های مخازن سری خرسان III، خرسان II و خرسان I می‌باشد. در نهایت تمامی جریان‌های غیرمصرفی وارد Sink می‌شوند. در هر مخزن آورد ورودی توسط بازویی که گره ورودی را به گره مخزن متصل می‌کند به مخزن وارد می‌شود و جریان خروجی از هر مخزن به قدری رها می‌شود 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 بازوهای 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 بازوهای 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, Reservoir1, Reservoir2, Reservoir3, DemandFE1, DemandFE2, DemandFE3, NonStorage1, NonStorage2, NonStorage3, Network Sink آورده‌شده‌ای ورودی، و گره DemandFE1 گره نیازهای غیرمصرفی جهت تأمین انرژی

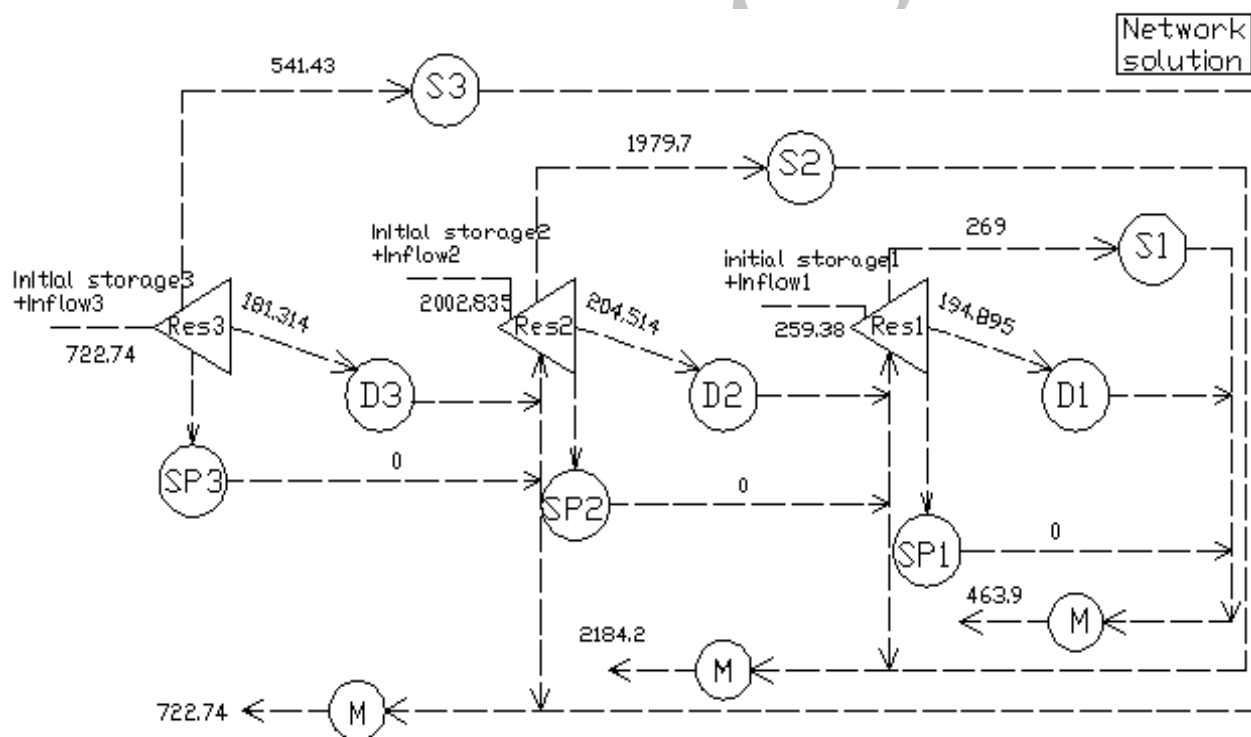


شکل ۱: شمای سیستم برقایی سه سدی خرسان در MODSIM

جدول ۱: داده‌های مسأله سیستم سه‌سدهی خرسان برای یک گام زمانی

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

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



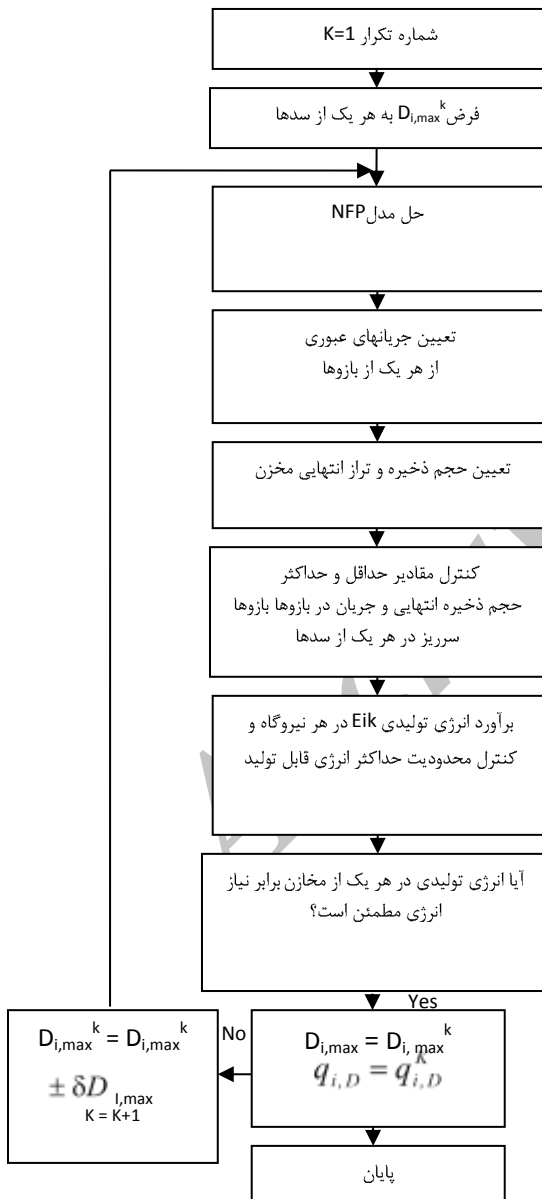
شکل ۲: شبکه جریان محاسباتی در MODSIM متناظر با سیستم شکل ۱

حداقل سازی هزینه شبکه جریان و قیود پیوستگی جریان در گره‌ها و کران‌های پایین و بالا در بازوها مطابق روابط زیر است:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^3 [C_{IS} * q_{S,i}(t) + C_{ispill} * q_{sp,i}(t) + C_{ID} * q_{R,i}(t)] \quad (۳)$$

مقادیر مجهول در این سیستم جریان‌های عبوری از توربین‌ها، احجام ذخیره آخر ماه مخازن و جریان‌های سرریزی می‌باشند که از حل یک مدل NFP تعیین می‌شوند. فرمول‌بندی 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 $q_{R,i}$ و $D_{i,max}$ به گونه‌ای برآورد می‌شوند که انرژی تولیدی هر نیروگاه در صورت امکان (رعایت قیود حجم ذخیره حداقل و حداکثر) برابر با نیاز انرژی مطمئن تعریف شده برای آن گردد. روند انجام این فرآیند در شکل (۳) نشان داده شده‌است. این امر به منزله اعمال HSOP در مدل خواهد بود.



شکل ۳: الگوریتم پیاده‌سازی سیاست بهره برداری استاندارد برقابی (HSOP) در MODSIM در سیستم‌های چندمخزنه

S.t

$$q_{S,i}(t+1) = \underbrace{q_{S,i}(t)}_{\text{ending storage}} + \underbrace{q_{I,i}(t)}_{\text{initial storage}} - \underbrace{q_{R,i}(t)}_{\text{inflow}} - \underbrace{q_{sp,i}(t)}_{\text{release}} - \underbrace{q_{sp,i}(t)}_{\text{spill flow}} \quad (۴)$$

$$\underbrace{R_{i,min}}_{\text{min release}} \leq q_{R,i}(t) \leq \underbrace{D_{i,max}}_{\text{max release}} \quad (۵)$$

$$\underbrace{spill_{i,min}}_{\text{min spill}} \leq q_{SP,i}(t) \leq \underbrace{spill_{i,max}}_{\text{max spill}} \quad (۶)$$

$$\underbrace{S_{i,min}}_{\text{min storage}} \leq q_{S,i}(t) \leq \underbrace{S_{i,max}}_{\text{max storage}} \quad (۷)$$

در روابط فوق $q_{sp,i}$ و $q_{S,i}$ ، $q_{R,i}$ به ترتیب جریان‌های عبوری از بازوهای توربین، ذخیره مطلوب انتهای دوره و سرریز مخزن i با ضرایب هزینه واحد به ترتیب C_{iS} ، C_{iD} ، C_{iSpill} می‌باشند. دقت شود که در مدل شبکه جریان فوق، اعداد اولویت نیاز انتهای بازوهای فوق، $DEM_{i,R}$ ، بر اساس رابطه کلی $[50000 - 10 * DEM_{i,R}] = C_i$ ، هزینه جریان در هر یک از بازوهای فوق را در مدل شبکه تعیین می‌کنند (این بدین معنی است که ۳ نوع عدد اولویت $DEM_{i,S}$ ، $DEM_{i,D}$ ، و $DEM_{i,Spill}$ تعریف می‌شود). همچنین $S_{i,max}$ ، $D_{i,max}$ و $spill_{i,max}$ به ترتیب نیازهای گره‌های انتهایی بازوهای توربین، ذخیره انتهایی مطلوب مخزن (در مدل شبکه رسیدن به حجم مطلوب انتهای دوره به منزله تعریف یک نیاز خواهد بود) و سرریز می‌باشند. ضمناً $R_{i,min} = 0$ ، $S_{i,min}$ و $spill_{i,min} = 0$ مقادیر حداقل جریان در بازوهای فوق می‌باشند. در این مدل در صورتی جریان در بازوی سرریز مقدار غیرصفر 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 انتهای بازوی سرریز در مدل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بزرگترین ضریب هزینه مربوط به این بازو باشد، تا جریان بازوی سرریز صرفاً در صورت ضرورت فعال شود.

در تعمیم قابلیت‌های MODSIM برای احتساب نیاز برقابی با تکرار روی مقادیر نیاز گره‌های انتهایی بازوهای

تلفیق مدل شبیه سازی MODSIMP و الگوریتم

PSO

- الگوریتم PSO

الگوریتم PSO (Particle Swarm Optimization)

یک روش فراکوشی 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 راه‌حل‌های بالقوه مسئله تحت بررسی است، جهت اکتشاف در فضای جستجو استفاده می‌کند. اگر فضای جستجوی مسئله D بعدی باشد، ذره i از گروه را می‌توان با یک بردار D بعدی $X_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jD})^T$ و سرعت آن (تغییر مکان) را هم می‌توان با بردار D بعدی $V_j = (v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jD})^T$ نمایش داد. بهترین موقعیت به دست آمده توسط i امین ذره را با بردار $P_j = (p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jD})^T$ 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 واداشته می‌شود [۱۱]:

$$v_{jd}^{k+1} = X[wv_{jd}^k + C_1r_1^k(p_{jd}^k - x_{jd}^k) + C_2r_2^k(p_{gd}^k - x_{jd}^k)] \quad (۸)$$

$$x_{jd}^{k+1} = x_{jd}^k + v_{jd}^{k+1} \quad (۹)$$

که در این روابط $d=1, 2, \dots, D$ و $i=1, 2, \dots, N$ برابر 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

ارزیابی شده و مقادیر جدید متغیرها با استفاده از معادلات (۸) و (۹) تعیین می‌شود. این روند تا رسیدن به یک تعداد تکرار حداکثر 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 برقایی با اعمال کنترل بر اطمینان‌پذیری تأمین بده انرژی مطلوب را می‌توان به شکل زیر نوشت:

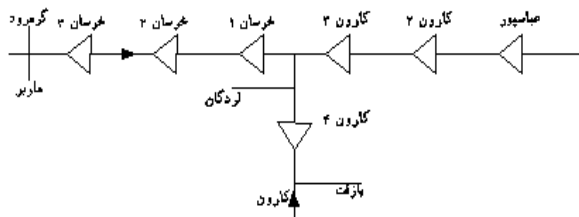
$$COST = Pec + PC - E_{second} * Svalue - Efirm * Fvalue + (Re - Re_{firm}) * P \quad (۱۰)$$

که در آن $COST$ هزینه کل، Pec هزینه تونل آب بر نیروگاه که در این مطالعه ثابت فرض شده است، PC هزینه احداث نیروگاه، $Svalue$ مقدار ارزش انرژی ثانویه به ازای هر کیلو وات ساعت انرژی تولیدی در سال مبناء، $Fvalue$ مقدار ارزش انرژی مطمئن به ازای هر کیلو وات ساعت انرژی تولیدی در سال مبناء، $Efirm$ 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 ماهها، Re_{firm} سطح اعتمادپذیری مطلوب برابر ۹۰٪ و P ضریب جریمه انحراف از اعتمادپذیری مطلوب می‌باشد.

متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی و الگوریتم PSO متغیرهای طراحی سیستم سدهای برقایی 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 برقایی)، است. رقوم بهینه حداقل بهره‌برداری مخازن برقایی نیز گرچه ناظر بر شرایط مطلوب بهره‌برداری است، به دلیل نقش آن در موقعیت و طراحی تونل آب بر نیروگاه به شکل قراردادی در زمره متغیرهای طراحی محسوب می‌شوند.

مطالعه موردی

سیستم سدهای سری برقایی خرسان III, II و I بر روی رودخانه خرسان به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده‌است. حوضه آبریز رودخانه خرسان در جنوب غربی کشور قرار گرفته‌است. رودخانه مذکور از سرشاخه‌های اصلی کارون بوده و از دو شاخه مهم ماربر و گرمرو تشکیل شده‌است. در ارتفاعات بالاتر نیز رودخانه‌های حنا و گرموک، از شاخه‌های ماربر و بشار و دشت‌روم از شاخه‌های گرمرو در جریان هستند. حوضه مذکور از شمال به حوضه‌های زاینده‌رود، دز، کارون و از غرب به حوضه‌های دز و کرخه و از شرق به حوضه‌های کر و زاینده‌رود و از جنوب به حوضه‌های زهره، کارون، جراحی و مارون محدود می‌گردد. شکل (۵) شمایی از سیستم خرسان را نشان می‌دهد.

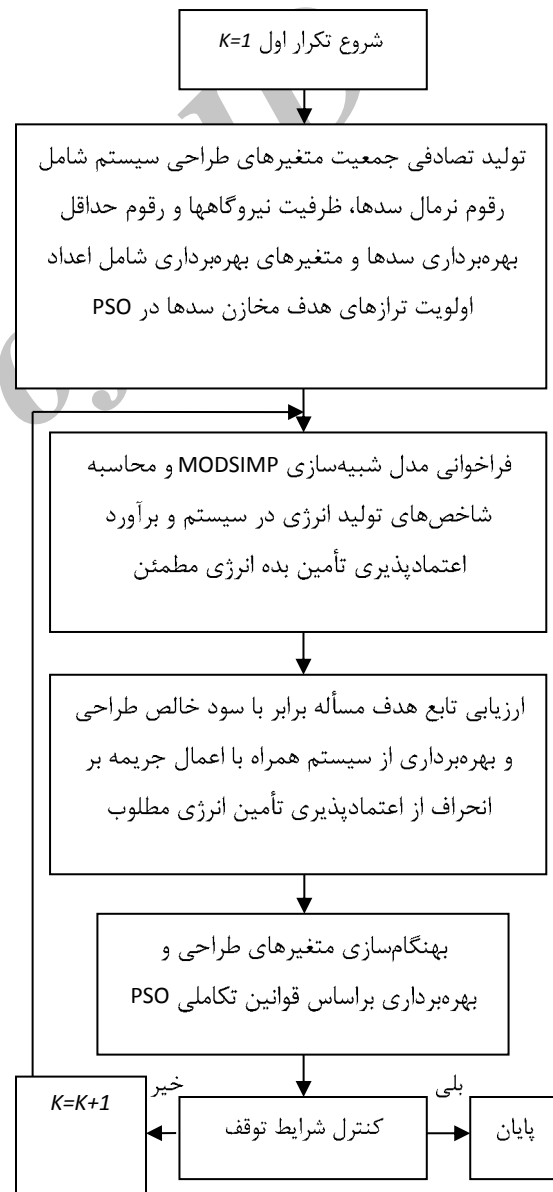


شکل ۵: شمایی از سیستم خرسان

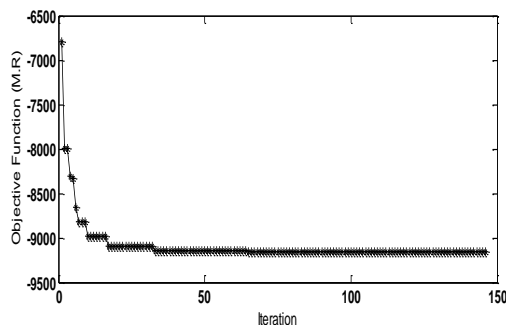
نتایج

دو نوع مدل ترکیبی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با عناوین SEPSO-MODSIM و CSEPSO-MODSIM با انتخاب سطح اعتمادپذیری ۹۰٪ از تأمین بده انرژی مطمئن در حل مساله استفاده شده‌است. در هر دو مدل از الگوریتم PSO مجهز به تکنیک کشش تابع و جهش نخبه (SEPSO) به منظور افزایش کارایی و کاهش احتمال همگرایی زودرس الگوریتم بهره گرفته شده‌است. تفاوت دو مدل مذکور در متغیرهای تصمیم مساله می‌باشد. در مدل CSEPSO-MODSIM، علاوه بر متغیرهای طراحی (رقوم نرمال، رقوم حداقل بهره‌برداری و توان تولید نیروگاه‌ها)، عدد اولویت ذخیره مطلوب مخازن نیز به‌عنوان متغیرهای تصمیم بهره‌برداری مجهول الگوریتم بهینه‌سازی PSO می‌باشد. در واقع در مدل SEPSO-MODSIM متغیرهای تصمیم PSO صرفاً متغیرهای از جنس طراحی

با اتصال مدل شبیه‌ساز MODSIM به الگوریتم PSO مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی PSO-MODSIM توسعه یافته‌است. در این مدل متغیرهای تصمیم مساله توسط الگوریتم PSO تولید شده و ارزیابی مطلوبیت مقادیر تولید شده فوق در گرو فراخوانی و اجرای مدل شبیه‌سازی MODSIM در برآورد پتانسیل هیدروانرژی سیستم خواهد بود. ساختار استفاده از مدل مذکور در شکل (۴) نشان داده شده‌است.



شکل ۴: ساختار مدل ترکیبی بهینه‌سازی- شبیه‌سازی PSO-MODSIM

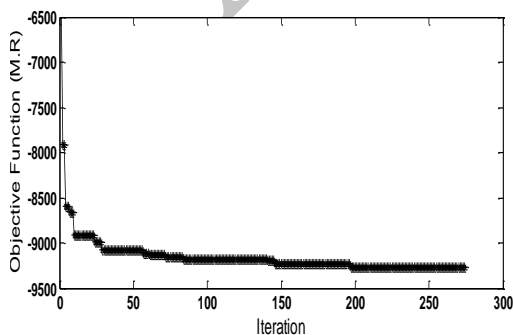


شکل ۶: تغییرات تابع هدف برای Gbest در مدل SEPSO-MODSIM در سیستم خرسان

با در نظر گرفتن تابع هدف و مقادیر پارامترهای یکسان با مدل SEPSO-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 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

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



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 برقایی (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، و 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 پلی بین الگوریتم بهینه‌سازی خارجی (SEPSO) با تابع هدف تعریف شده روی کل افق زمانی بهره‌برداری و الگوریتم‌های داخلی تک‌زمانه NFP پیاپی در MODSIM ایجاد شود و اثرات بهینه‌سازی چندزمانه و اعمال جیره‌بندی جزئی در دوره‌های خشک لحاظ گردد. با اضافه نمودن این متغیرها تعداد متغیرهای تصمیم در مدل CSEPSO-MODSIM از ۹ به ۱۲ عدد افزایش یافته است.

در اجرای مدل‌ها تعداد ۱۵ ذره با $w_{max}=0.8$ ، $w_{min}=0.1$ ، $C_1=2.3$ ، $C_2=1.2$ ، P_{em} برابر ۰/۷ و فاکتور پنالتی (P) براساس سعی و خطا برابر ۴۰۰۰۰ 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 ۹۱۶۲ واحد با اطلاعات اقتصادی مفروض نتیجه شده است.

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

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

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

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

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

خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مطالعه هدف توسعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی جهت طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه برقایی با اتصال الگوریتم PSO به‌عنوان موتور بهینه‌سازی و مدل MODSIM به‌عنوان موتور شبیه‌سازی محقق گردید. این کار در ابتدا با فراهم کردن امکان اعمال سیاست بهره‌برداری استاندارد برقایی در مدل شبیه‌سازی انجام شد. در ادامه حل مسأله بهینه‌سازی همزمان طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های برقایی 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 برقایی به دست می‌آید، از MODSIM به PSO بازگردانده می‌شود و مقدار تابع هدف برای هر نقطه کاندید در درون فضای جستجوی چند بعدی مسأله توسط PSO محاسبه می‌گردد.

مدل‌های SEPSO-MODSIM و CSEPSO-MODSIM در بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از سیستم سه مخزنه برقایی خرسان به عنوان مطالعه موردی استفاده شد. در مدل CSEPSO-MODSIM 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

ملاحظه می‌شود که انرژی مطمئن ماهانه و توان تولید نیروگاه‌ها در مدل CSEPSO-MODSIM نسبت به مدل SEPSO-MODSIM به میزان ۴/۹٪ افزایش یافته‌است. 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 SEPSO-MODSIM و CSEPSO-MODSIM آمده‌است.

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

MODSIM				مدل
انرژی متوسط تولیدی ماهانه کل	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)	مدل SEPSO-MODSIM
۲۹۷۴۳۲	۱۳۸۵۳۲	۷۹۶۳۹	۷۹۲۴۱	مدل SEPSO-MODSIM
۲۹۶۹۸۸	۱۴۶۹۳۴	۷۸۰۸۱	۷۱۹۷۳	مدل CSEPSO-MODSIM

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

بوده است.

گرچه در سیستم‌های تک‌مخزنه 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 برقایی چندمخزنه می‌باشد. این امر بدان جهت است که در سیستم‌های چندمخزنه معادله برابری انرژی تولیدی در سیستم با نیاز انرژی مفروض دارای بیش از یک مجهول (جریانهای خروجی از هر یک از مخازن)

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 حوضه ای آماده نظیر MODSIM 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.