

OPTIMAL DESIGN OF FLOOD CONTROL SYSTEMS USING PARTICLE SWARM OPTIMISATION ALGORITHM

S.H. Meraji, M.H. Afshar & A. Afshar

Department of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

Abstract: Cost and safety are two most important factors involved in the design of civil engineering systems and structures. Thus, the optimal design of structure dimensions is of big importance in order to reduce the cost of construction while meeting the safety requirement and the design constraints. Up to now several algorithms have been developed and used for optimization of different civil engineering problems. One of these algorithms is the Particle Swarm Optimization (PSO) which is a swarm intelligence based algorithm inspired by the social behavior of animals such as fish schooling and bird flocking to solve continuous problems. In this paper, an optimization model is developed for the optimal design of flood control systems which contain both detention dam and bottom outlet. The proposed model uses the powerful PSO algorithm as the search engine and The "Transport Module" of "SWMM" as the hydraulic analyzer of the system. The applicability of the model to solve real world problem is verified by the optimal design of of South Pars flood control system which contains both detention dam and bottom outlet. The results show that the proposed optimization model can considerably reduce the total costs of flood control systems.

طراحی بهینه سیستم‌های کنترل سیلاب با استفاده از الگوریتم

Particle Swarm

سید حامد معراجی، محمد هادی افشار و عباس افشار

چکیده: از مهمترین عوامل تعیین کننده در طراحی سیستم‌ها و سازه‌های عمرانی، عوامل هزینه و ایمنی سازه‌ها می باشد. جهت این امر، تعیین ابعاد بهینه این سازه‌ها برای کاهش هزینه‌ها به نحوی که ایمنی آنها در حد مطلوب باقی بماند و کلیه پارامترها و محدودیتهای طراحی برآورده سازد، مورد نیاز می‌باشد. الگوریتمهای متعددی جهت حل مسائل بهینه سازی توسعه یافته اند. الگوریتم بهینه سازی Particle Swarm (PSO)، یکی از جدیدترین الگوریتمهایی است که در اصل، جهت حل مسائل بهینه سازی پیوسته بر مبنای اصول زندگی مصنوعی و تحقیقات روانشناسی و با الگو برداری از حرکت دست جمعی پرندگان و ماهیان، توسعه یافته است. در این مقاله مدل بهینه‌سازی ارائه گردیده، که در آن از الگوریتم PSO به عنوان ابزار بهینه سازی و از بلوک Transport از نرم افزار SWMM به عنوان ابزار شبیه ساز جهت تحلیل هیدرولیکی سیستم کنترل سیلاب استفاده شده است. مدل بهینه سازی ارائه شده، مجموعه‌ای کارآمد ایجاد کرده است که ضمن بررسی دقیق رفتار هیدرولیکی سیستم، قادر به طراحی بهینه سیستم مورد نظر است. به عنوان مطالعه موردی در این مقاله، از مدل فوق جهت طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب پارس جنوبی در جنوب ایران که ترکیبی از یک سد تاخیری با تخلیه کننده تحتانی و چندین کانال انتقال آب است، استفاده شده است. نتایج نشان دهنده کارآمدی مدل پیشنهادی در کاهش هزینه‌های ساخت تا حدود ۲۳ درصد، می باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های کنترل سیلاب، الگوریتم بهینه سازی Particle Swarm، PSO، SWMM-Transport

تاریخ وصول: ۸۶/۱۱/۲۰

تاریخ تصویب: ۸۷/۸/۲۲

سیدحامد معراجی، کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. Hamed_meraji@iust.ac.ir

دکتر محمد هادی افشار، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. Mhafshar@iust.ac.ir

دکتر عباس افشار، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران. A_afshar@iust.ac.ir

سال ۲۰۰۸ نیز Afshar و Rajabpour از روش PSO با همسایگی محلی و فراگیر برای طراحی و بهره برداری بهینه سیستمهای پمپاژ آبیاری استفاده نمودند. در زمینه سابقه مدل‌های تلفیقی بهینه ساز با شبیه ساز SWMM نیز می توان به مدل ارائه شده توسط سادات دربندی و افشار در سال ۱۳۸۱ اشاره نمود که در آن با تلفیق الگوریتم ژنتیک و بلوک Transport از شبیه ساز SWMM، بهینه سازی شبکه های جمع آوری آبهای سطحی را انجام دادند [۸]. هدف اصلی از این مقاله، ارائه مدلی جهت طراحی بهینه سیستم هدایت و کنترل سیلاب است. بنابراین در ابتدا الگوریتم PSO و نحوه عملکرد آن بیان گردیده، سپس به تشریح مدل پیشنهادی پرداخته شده است. جهت تشریح مدل بهینه سازی تلفیقی، سیستم مورد نظر معرفی گردیده و فرمول بندی، قیود و متغیرهای تصمیم حاکم بر آن تعیین شده است. در انتها به بررسی عملکرد مدل در قالب حل سه نوع مسئله و ارائه نتایج و بررسی آنها پرداخته شده است.

۲. الگوریتم Particle Swarm Optimization

دانشمندان متعددی، قوانین ضروری حاکم بر گروه پرندگان و ماهیان را مورد مطالعه قرار داده اند و آنها را شبیه سازی نموده اند [۹]. رعایت این قوانین توسط تک تک پرندگان و ماهیان، آنها را قادر ساخته تا با هم همگام شده و بدون برخورد با یکدیگر، به طور دسته جمعی، به رقص آرائی بپردازند و صحنه های شگفت انگیزی را خلق کنند. در فرآیند شبیه سازی، حرکت گروه، در نتیجه تلاش همه اعضا (پرند، ماهی و غیره) است که سعی می کنند در هنگام حرکت، فاصله بهینه را با همسایگان خود حفظ نمایند [۱۰]. روش بهینه سازی Particle Swarm، اولین بار توسط Kennedy و Eberhart در سال ۱۹۹۵ معرفی گردید [۱۱]. اساس PSO، شبیه سازی یک رفتار دسته جمعی است که از آن برای نشان دادن حرکت گروه پرندگان و ماهیان استفاده می شود. فرآیند PSO، با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد شروع می شود، که در اینجا به عنوان یک Swarm از Particle ها خوانده می شود. مانند آنچه که در همه الگوریتم‌های تکاملی وجود دارد، هر Particle در Swarm مجموعه مختلفی از پارامترهای نا مشخص می باشند که باید مقادیر بهینه آنها تعیین شود و در واقع هر Particle یک نقطه از فضای راه حل را ارائه می دهد. اساس الگوریتم، جستجوی فضای راه حل ها به یک روش مناسبی که توسط حرکت گروهی Particle ها به سوی بهترین موقعیتی که در گذشته با آن روبرو شده اند، با این امید که در این فرآیند به یک موقعیت بهتری برسند، صورت می گیرد تا سرانجام همه Particle ها در نقطه بهینه همگرا می شوند. تفاوت بین PSO و سایر الگوریتم‌های تکاملی در روشی است که از طریق آن، جمعیت ایجاد شده، در فضای جستجو حرکت می کند، یعنی PSO از روش مختص خود جهت هدایت Swarm استفاده می کند.

۱. مقدمه

جهت کاهش اثرات و خسارات ناشی از حوادث طبیعی که بخش عمده آن ناشی از سیلابها است، می توان از تمهیدات مدیریتی و یا احداث سازه های محافظ بهره برد. برخی اقدامات ساختمانی که در فرآیند کنترل سیلاب ممکن است انجام شوند عبارتند از احداث سد، کانال، خاکریز و ... که باید یک ارتباط منطقی بین ابعاد این سازه ها جهت کاهش هزینه ساخت و تضمین ایمنی آنها وجود داشته باشد. به عنوان مثال در یک حوضه با هیدروگراف سیل طراحی مشخص، هر اندازه ارتفاع سد بیشتر باشد، حجم مخزن پشت سد افزایش یافته و زمان لازم برای سرریز شدن آن هنگام وقوع سیل افزایش می یابد و میزان حداکثر سیلاب کاهش می یابد، لذا کانال زمان بیشتری برای هدایت سیل ورودی به پایین در اختیار دارد و می تواند با ابعاد کوچکتر، سیلاب را از خود عبور دهد. بدیهی است که هزینه احداث سازه ها با ابعاد سازه ها متناسب و مرتبط است. بنابراین انجام بهینه یابی برای دستیابی به ابعاد و اندازه هایی که کمترین هزینه را صرف نماید، ضروری می باشد.

نگاهی به مقالات و تحقیقات موجود نشان می دهد که روشهای بهینه سازی متعددی، تحت شرایط گوناگون، جهت بهینه سازی سیستم‌های مختلف توسعه داده شده اند. یکی از این روشها، روش الگوریتم PSO است که تا کنون از آن در حوزه های مختلفی از مهندسی عمران و مهندسی آب استفاده شده است. در سال ۲۰۰۴، Baltar و Fontane، پس از تشریح روش PSO و روش های بهینه سازی چند هدفه، با استفاده از الگوریتم PSO، بهینه سازی چند هدفه بهره برداری از مخزن سد را جهت تامین اهداف حداکثر کردن نیاز آبی مطمئن سالانه، حداکثر کردن تولید انرژی سالانه، حداقل کردن ریسک سیلاب و حداکثر کردن قابلیت اطمینان کلی سیستم، انجام دادند [۱]. Reddy و Kumar در سال ۲۰۰۷، با توسعه روش PSO و انجام جهش هوشمند بر روی اعضای ممتاز در گروه، مسئله بهره برداری چند مخزنه را حل نمودند [۲]. Chau در سال ۲۰۰۴، از الگوریتم PSO برای آموزش شبکه عصبی جهت پیش بینی تراز سطح آب در رودخانه Shing Mun در هنگ کنگ، و پیش بینی رواناب در منطقه Siu Lek Yuen در هنگ کنگ، استفاده نمود [۳]. Afshar و Meraji نیز در سال ۲۰۰۶، پس از آزمودن الگوریتم PSO توسط چندین توابع آزمونی استاندارد و تایید قابلیت این الگوریتم در حل مسائل بهینه سازی فراگیر، از آن برای حل مسئله بهره برداری از مخزن سد در ایران استفاده نمودند [۵]. همچنین آنها نشان دادند که روش PSO در مقایسه با سایر روشهای GA، ANT و HBMO دارای توانایی بیشتر در یافتن و همگرا شدن به جوابهای بهتر می باشد و قادر است که با تلاش محاسباتی بسیار کمتر از سایر روشها، به جوابهای بهینه دست یابد [۶]. در سال ۲۰۰۷، Dararikhah، Meraji و Afshar از الگوریتم PSO جهت بهینه سازی ابعاد سرریزهای متوالی در سدها بهره بردند [۷].

فرض کنید که همه Particle ها دارای شاخصی از یک تا N که اندازه Swarm است باشند، آنگاه معادلات به روز رسانی سرعت برای تعداد همسایگی برابر با $NS=2l+1$ به صورت زیر می باشند:

$$N_i = \left\{ \begin{array}{l} pbest_{i-l}^n, pbest_{i-l+1}^n, \dots \\ pbest_{i-1}^n, pbest_i^n, pbest_{i+1}^n, \dots \\ pbest_{i+l-1}^n, pbest_{i+l}^n \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$lbest_i^n \in N_i \mid f(lbest_i^n) = \text{Min} \{ f(a) \}, \quad \forall a \in N_i \quad (2)$$

$$V_{i,d}^{n+1} = w.V_{i,d}^n + c_1 r_{1,i,d}^n (pbest_{i,d}^n - x_{i,d}^n) + c_2 r_{2,i,d}^n (lbest_{i,d}^n - x_{i,d}^n) \quad (3)$$

که در آن $i = 1, 2, \dots, N$ که N اندازه Swarm می باشد؛ $d = 1, 2, \dots, D$ که D اندازه ابعاد فضای جستجو می باشد؛ $n = 1, 2, \dots, iTer_{Max}$ حداکثر تعداد تکرارها می باشد؛ w ، اینرسی وزنی نامیده می شود؛ c_1 و c_2 دو ضریب ثابت و مثبت می باشند که به ترتیب پارامترهای شناختی و اجتماعی خوانده می شوند؛ $r_{1,i,d}$ و $r_{2,i,d}$ اعداد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ با توزیع یکنواخت هستند.

با توجه به مطالب گفته شده، مدل Gbest در حقیقت حالت خاصی از مدل Lbest است که در آن $NS=N$ می باشد. لذا با در نظر گرفتن تعداد همسایگی برابر با اندازه Swarm، مدل Gbest فراهم می گردد. موقعیت کنونی هر عضو نیز مطابق معادله زیر بهبود می یابد:

$$X_{i,d}^{n+1} = X_{i,d}^n + V_{i,d}^{n+1} \quad (4)$$

$$X_{d,Min} \leq X_{i,d}^{n+1} \leq X_{d,Max} \quad (5)$$

که در آن $X_{d,Max}$ و $X_{d,Min}$ به ترتیب حد پائین و بالای فضای جستجوی هر Particle در بعد d ام می باشند. از آنجایی که هیچ فرآیندی جهت کنترل سرعت Particle ها وجود نداشت، لازم شد که یک مقدار حداکثر V_{max} برای آنها در نظر گرفته شود ($-V_{d,Max} \leq V_{i,d}^{n+1} \leq V_{d,Max}$). اگر میزان سرعت از این حد فراتر رود، باید برابر با V_{max} قرار گیرد، مقدار این پارامتر برای فرآیند بهینه سازی تعیین کننده است، زیرا ممکن است به ازای مقادیر بالای V_{max} ، Particle ها از روی راه حل های خوب عبور کنند و یا اینکه با مقادیر کم آن، از اکتشاف مناسب در فضای جستجو جلوگیری شود. میزان $V_{d,Max}$ معمولاً برابر با $k \times X_{d,Max}$ در نظر گرفته می شود که در آن $0.1 \leq k \leq 1.0$ می باشد [10]. در این مقاله جهت پوشش تمامی فضای جستجو توسط Particle ها، $V_{d,Max}$ برابر با $k \times (X_{d,Max} - X_{d,Min})$ در نظر گرفته شده که در آن $k = 1.0$ می باشد.

در PSO، علاوه بر آن که هر عضو از جمعیت، دارای یک سرعت انطباقی (تغییر مکان) است که مطابق با آن در فضای جستجو حرکت می کنند، هر کدام از آنها دارای حافظه نیز می باشند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می رسند را به خاطر می سپارند. بنابراین حرکت هر عضو در دو جهت صورت می گیرد:

۱- به سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده اند. ۲- به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آنها ملاقات کرده است.

دو گونه از الگوریتم PSO توسعه داده شد، یکی PSO با همسایگی فراگیر و دیگری PSO با همسایگی محلی. در گونه همسایگی فراگیر، هر Particle به سوی بهترین موقعیت خود در گذشته و همچنین بهترین موقعیت بهترین Particle در کل Swarm، (Gbest) حرکت می کند، ولی در گونه همسایگی محلی، هر Particle به سوی بهترین موقعیت خود در گذشته و بهترین موقعیت بهترین Particle در همسایگی خود، (Lbest) حرکت می کند [۱۰].

حال فرض کنید که فضای جستجوی مسئله، D بعدی باشد، پس i مین Particle از Swarm را می توان با یک بردار D بعدی $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ نمایش داد، و سرعت آن (تغییر مکان آن) را هم می توان با بردار D بعدی $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ نمایش داد. میزان جابجایی هر Particle از طریق اطلاعات مربوط به موقعیت کنونی و میزان سرعت هر Particle بدست می آید. هر عضو بهترین موقعیت خود را در گذشته ($pbest$) که در آن بیشترین ارزش را داشته است، در حافظه خود دارد. این اطلاعات به تجربیات شخصی هر عضو شباهت دارد. علاوه بر آن، هر عضو، موقعیت بهترین عضو در کل گروه ($gbest$) یا در همسایگی خود ($lbest$) را از میان $pbest$ ها نیز در حافظه دارد. این اطلاعات به دانش هر عضو از تجربه و عملکرد سایر اعضای گروه شباهت دارد. پس بنابراین هر عضو i سعی می کند تا موقعیت خود را با استفاده از اطلاعاتی چون موقعیت کنونی X_i ، سرعت کنونی V_i ، فاصله بین موقعیت کنونی و $pbest$ و فاصله بین موقعیت کنونی و $gbest$ یا $lbest$ ، بهبود بخشد. بهبود موقعیت با استفاده از مفهوم سرعت صورت می گیرد.

مدل Gbest همگرایی سریعتر را ارائه می دهد. این مدل تنها یک Particle را که در بین کل Swarm دارای بالاترین برازندگی است، در نظر می گیرد. این عضو مانند یک جاذب عمل می کند و سایر اعضا را به طرف خود می کشد. و در نهایت همه گروه در موقعیت این عضو همگرا خواهند شد. بنابراین اگر موقعیت این عضو مرتباً بهبود نیابد و به روز نشود، ممکن است که Swarm همگرایی نابهنگام داشته باشد و در نقطه بهینه محلی گیر کند. اما مدل Lbest سعی می کند با قرار دادن چندین عضو جاذب، از همگرایی سریع و نابهنگام گروه جلوگیری کند. بنابراین مجموعه ای از Particle ها برای هر Particle در نظر گرفته می شود که از میان آنها بهترین عضو در همسایگی ($lbest$) برای هر Particle انتخاب می شود.

۲-۱. پارامترهای PSO :

در مدت زمان کوتاهی وارد مخزن می‌شود، به تدریج و با دبی کمتر از دبی ورودی (بسته به اندازه سطح تخلیه کننده تحتانی سد و ارتفاع آب در مخزن) در مدت زمان طولانی تر از مخزن سد خارج خواهد شد. با کاهش سطح مقطع تخلیه کننده، حداکثر تراز آب پشت سد (برای یک سیل با هیدروگراف ورودی مشخص) افزایش می‌یابد، زیرا با کوچک شدن سطح مقطع تخلیه کننده، میزان دبی خروجی از سد کاهش یافته و مقدار بیشتری از حجم سیل ورودی باید در پشت سد ذخیره گردد، لذا آب در پشت سد در تراز بالاتری قرار خواهد گرفت. بدیهی است بیشتر شدن ارتفاع آب، سبب بیشتر شدن سرعت خروج جریان در محل تخلیه کننده نیز خواهد شد. جریان حداکثری که از کانالهای پایین دست سد عبور خواهد کرد به حداکثر جریانی که از تخلیه کننده سد می‌گذرد، جریانهای ورودی از شاخه‌های فرعی و روند جریان با توجه به توپوگرافی منطقه بستگی دارد. بنابراین با کاهش دبی خروجی از تخلیه کننده، دبی عبوری از کانالهای پایین دست نیز کاهش می‌یابد. بدین ترتیب، برای یک شیب ثابت، ابعاد کانالهای پایین دست سد که بر اساس حداکثر جریانی که از آنها خواهد گذشت طراحی می‌شوند، کوچکتر خواهند شد. همچنین با تغییر شیب، ابعاد لازم کانال برای عبور دبی مورد نظر تغییر می‌کند. بنابراین، سه عامل ارتفاع سد، شیب کانال (تراز گره‌ها) و ابعاد کانال (عرض و ارتفاع) با هم در تعامل می‌باشند و بهینه‌سازی باید بین این سه متغیر صورت گیرد تا ابعاد و اندازه‌هایی بدست آید که سیل ورودی را (با اعمال شرطها و قیدها) کنترل نموده و با کمترین هزینه انتقال دهد. بدیهی است هر اندازه طول کانال برای هدایت سیل به پایین دست بیشتر باشد، ساخت سد تأخیری با ارتفاع بیشتر، که نتیجه آن کوچکتر شدن ابعاد کانال است، اقتصادی‌تر می‌باشد.

جهت تهیه مدل نیاز به یک بهینه‌ساز قوی است تا علاوه بر به دست آوردن بهینه مطلق (فراگیر)، قیود مسئله را نیز ارضا نماید. بهینه‌ساز باید توانایی تعیین بهینه فراگیر، بهینه‌سازی با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و استفاده از متغیرهای تصمیم پیوسته را داشته باشد. الگوریتم PSO با بهره‌گیری از فرآیند جستجوی نیرومندی که داراست، توانایی تعیین بهینه فراگیر را خواهد داشت. همچنین با تعریف جریمه برای تخلف از قیود، می‌توان مسائل بهینه‌سازی مقید را به مسایل بهینه‌سازی بدون قید و محدودیت تبدیل نمود. در مورد عامل سوم نیز باید گفت اساس PSO، بر مبنای جستجو در فضای پیوسته است و این خود از اصلی‌ترین مزیت این الگوریتم است. همچنین برای تأمین نیازهای بهینه‌ساز و کنترل قیود هیدرولیکی، استفاده از شبیه‌سازی که بتواند جریان‌های ناپایدار در کانال‌های باز را شبیه‌سازی نماید، ضروری است. شبیه‌سازی باید قابلیت ترکیب با الگوریتم PSO و تأمین نیازهای آن، از جمله سرعت و دبی جریان و ارتفاع آب در کانال، توانایی شبیه‌سازی جریان ناپایدار در کانال‌های باز با لحاظ کردن هیدروگراف ورودی،

نقش اینرسی وزنی w در رابطه (۳)، به عنوان شاخصی موثر بر رفتار همگرایی PSO مطرح گردیده است. اینرسی وزنی، جهت کنترل تاثیر سوابق سرعت‌های پیشین بر سرعت‌های جاری، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، پارامتر w ، قابلیت Swarm را در اکتشاف مناطق بهینه فراگیر و محلی، و استخراج جواب بهینه، تنظیم می‌کند. نتایج تجربی نشان داده که بهتر است در ابتدا، جهت بهبود اکتشاف فراگیر در فضای جستجو، مقدار زیادتری برای اینرسی وزنی w در نظر گرفته شود و به تدریج جهت بهبود در استخراج راه حل بهینه، از مقدار آن کاسته شود [۱۲-۱۳]. بنابراین می‌توان برای تعیین اینرسی وزنی w از رابطه زیر استفاده نمود:

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times n}{iTer_{\max}} \quad (۴)$$

که در آن w_{\max} میزان اولیه اینرسی وزنی، w_{\min} میزان نهایی اینرسی وزنی، $iTer_{\max}$ حداکثر تعداد تکرارها و n نیز شماره تکرار جاری می‌باشد.

پارامترهای c_1 و c_2 در رابطه (۳)، بر همگرایی PSO تاثیر مهمی نمی‌گذارند. هر چند که میزان مناسب آنها ممکن است که افزایش سرعت همگرایی و بهبود جواب بهینه محلی را نتیجه دهد. مطالعه گسترده‌ای در مورد پارامترهای شتاب برای اولین نسخه PSO توسط Kennedy انجام گرفته است [14]. به عنوان پیش فرض، مقادیر $c_1 = c_2 = 2$ پیشنهاد شده است، اما نتایج تجربی نشان می‌دهد که مقادیر $c_1 = c_2 = 0.5$ ممکن است نتایج بهتری را حاصل نماید. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که ممکن است انتخاب پارامتر شناختی، c_1 ، بزرگتر از پارامتر اجتماعی، c_2 ، با این شرط که $c_1 + c_2 \leq 4$ باشد، منجر به نتایج بهتری شود [۱۵]. پارامترهای r_1 و r_2 برای حفظ تنوع و گوناگونی Swarm بکار می‌روند و آنها اعداد تصادفی در محدوده $[0, 1]$ با توزیع یکنواخت هستند.

۳. مدل پیشنهادی برای طراحی بهینه سیستم کنترل

سیلاب

۳-۱. معرفی سیستم

سیستم کنترل سیلاب مورد نظر، از یک سد تأخیری با تخلیه کننده تحتانی، کانالهای انتقال آب، ورودی‌ها برای وارد شدن جریان به کانال‌ها و خروجی‌ها برای خارج شدن جریان از کانال‌ها، تشکیل می‌شود. همانگونه که پیش از این بیان شد با افزایش ارتفاع سد، هزینه ساخت سد و حجم مخزن افزایش یافته و مخزن قادر به ذخیره نمودن حجم بیشتری از سیل خواهد بود. در نتیجه سیل که

۱-۲-۳. قیود سیستم

قیودی که باید توسط مدل ارضا گردد بدین صورتند که:

(الف) سرعت جریان در کانالها باید در محدوده بین حداقل و

حداکثر سرعت مجاز باشد، یعنی $V_{Min} \leq V_i \leq V_{Max}$

(ب) تراز آب در گره در شاخه پایین دست از شاخه بالا دست بیشتر

نباشد، یعنی $h_i \geq H_i$.

(ج) شیب کانالها از شیب مجاز کمتر نشود، یعنی $S_i \geq S_{min}$.

(د) ارتفاع سد از حد مجاز اجرایی بیشتر نشود، یعنی $Hd_i \leq Hd_{max}$.

(ر) ارتفاع خاکبرداری و خاکریزی از حد مجاز اجرایی بیشتر نشود،

یعنی $diff\ 1_i \leq diff\ 1_{max}$ و $diff\ 2_i \leq diff\ 2_{max}$.

(ز) ظرفیت شاخه از دبی ورودی به شاخه کمتر نشود، یعنی

$q_i \geq Q_i$

که در این روابط، V_i سرعت جریان در شاخه i ، V_{Min} حداقل

سرعت مجاز در کانال، V_{Max} حداکثر سرعت مجاز در کانال،

$diff\ 1_i$ حداکثر عمق خاکبرداری در شاخه i ، $diff\ 2_i$ حداکثر

عمق خاکریزی در شاخه i ، $diff\ 1_{Max}$ حداکثر عمق مجاز

خاکبرداری در کانال، $diff\ 2_{Max}$ حداکثر عمق مجاز خاکریزی در

کانال، q_i ظرفیت شاخه i ، Q_i دبی طرح شاخه i ، h_i تراز آب

در گره i (گره بالا دست)، H_j تراز آب در گره j (گره پایین

دست) می باشند.

۲-۲-۳. انتخاب متغیرهای تصمیم

اولین گام در الگوریتم PSO، انتخاب متغیرهای تصمیم آنهاست.

متغیرهای تصمیم در واقع عبارتند از پارامترهایی که PSO باید آنها

را در محدوده مشخص شده، متناسب با برزندگی و امتیازشان

انتخاب نماید. دو حالت برای انتخاب متغیرهای تصمیم در نظر

گرفته شده است، حالت اول که در آن سطح مقطع تخلیه کننده

سدها، تراز گره کانالها، عرض و ارتفاع کانالها، همگی جزو

متغیرهای تصمیم می باشند و در این حالت شبیه ساز فقط به عنوان

تحلیل کننده جریان عمل می نماید و در طراحی ابعاد کانال، به طور

مستقیم نقشی ندارد. جهت ارائه آسان تر مطالب، این مدل

SWMM-PSO-UD نامیده می شود، شکل (۱) (حالت a). در حالت

دوم، رقوم گرهها و سطح تخلیه کننده سدها، جزو متغیرهای تصمیم

PSO بوده ولی ابعاد کانالها توسط شبیه ساز (Transport) طراحی

می شوند. در این حالت شبیه ساز علاوه بر تحلیل جریان، در صورت

ناکافی بودن ظرفیت کانالها، ابعاد آنها را با گامهای معین و از پیش

تعیین شده افزایش می دهد و نهایتاً ابعاد کانالها را طوری طراحی

می نماید تا بتوانند دبی طرح را از خود عبور دهند. جهت ارائه آسان

تر مطالب، این مدل SWMM-PSO-D نامیده می شود، شکل (۱)

(حالت b). تفاوت های این دو حالت از جنبه های مختلف قابل بررسی

می باشد، اول اینکه تعداد متغیرهای تصمیم در حالت اول

(SWMM-PSO-UD) نسبت به حالت دوم (SWMM-PSO-D)

توانایی شبیه سازی مخزن سد و توانایی طراحی شبکه علاوه بر تحلیل آن را داشته باشد.

با در نظر گرفتن عوامل فوق، بلوک Transport از شبیه ساز

SWMM، به عنوان تحلیلگر مدل انتخاب شد. با انجام کمی

تغییرات، SWMM، توانایی شبیه سازی مخزن سد را نیز دارد، بدین

صورت که این برنامه المانی به نام Storage در اختیار دارد که قادر

است جریان ورودی را در خود ذخیره نماید و با استفاده از تابعی،

میزان دبی خروجی از آن را بر حسب سطح تخلیه کننده و ارتفاع

آب روی آن در مخزن سد، تعیین نماید. این تابع به صورت زیر

می باشد:

$$Outflow = A_1 \times (Depth - D_0)^{A_2} \quad (7)$$

که در آن $Outflow$ دبی خروجی از تخلیه کننده، $Depth$ ارتفاع

آب در پشت سد نسبت به پای سد در هر گام زمانی، D_0 تراز

تخلیه کننده نسبت به پای سد، A_1 ضریبی ثابت که می توان آنرا

مساوی حاصلضرب سطح تخلیه کننده در $\sqrt{2g}$ در نظر گرفت و

A_2 ضریبی ثابت است که می توان آنرا برابر 0.5 در نظر گرفت تا

رابطه فوق تبدیل به رابطه زیر شود:

$$Q = \sqrt{2gH_e} \times a \quad (8)$$

بنابراین SWMM با داشتن منحنی ارتفاع حجم مخزن، هیدروگراف

ورودی به مخزن و نیز موقعیت و سطح مقطع تخلیه کننده، می تواند

ارتفاع آب در مخزن را در هر گام زمانی محاسبه نماید. بنابراین

می توان از طریق تعیین حداکثر تراز ارتفاع آب ذخیره شده در پشت

سد، ارتفاع سد را با در نظر گرفتن ارتفاع آزاد آن، محاسبه کند.

۲-۳. فرمولبندی مدل

مدل مورد نظر باید طراحی ارائه نماید که علاوه بر ارضای قیود و

محدودیت های هیدرولیکی، اجرایی، کمترین هزینه را نیز داشته

باشد. در سیستم معرفی شده، پارامترهای ارتفاع سد، ابعاد کانال،

طول شاخه ها و متوسط عمق خاکبرداری یا خاکریزی در هر شاخه

در هزینه موثرند. بنابراین، تابع هزینه که جزئی از تابع هدف

می باشد، بصورت زیر تعریف می شود:

$$Min\ Cost = \sum_{i=1}^n f_i(b_i, d_i, \bar{Z}_{1i}, \bar{Z}_{2i}, L_i) + \sum_{j=1}^k g_j(Hd_j) \quad (9)$$

که در آن، b_i عرض کانال در شاخه i ، d_i ارتفاع کانال در شاخه

i ، \bar{Z}_{1i} متوسط عمق خاکبرداری در شاخه i ، \bar{Z}_{2i} متوسط ارتفاع

خاکریزی در شاخه i ، L_i طول شاخه i ، Hd_j ارتفاع سد j

می باشد.

۴. بررسی عملکرد مدل

۴-۱. مسئله تحلیلی

تردیدی وجود ندارد که پاسخ و یا طرحی که از طریق حل تحلیلی حاصل می‌شود بهترین پاسخ می‌باشد و طرح ارائه شده توسط مدل نمی‌تواند بهتر (کم هزینه تر) از آن باشد. اما اگر اختلاف بین حل مدل و حل تحلیلی، صفر و یا ناچیز باشد اطمینان ما به بهینه بودن طرح‌های ارائه شده توسط مدل بیشتر می‌شود و توانایی مدل در طراحی بهینه به اثبات می‌رسد.

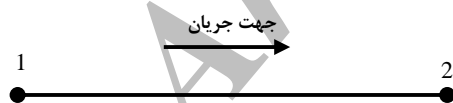
شبکه‌ای شامل دو گره و یک کانال با مقطع مستطیل (شکل (۲)) در نظر بگیرید که باید جریان ثابتی را که به گره بالا دست آن (گره ۱) می‌رسد، به گره پایین دست (گره ۲) انتقال دهد. مشخصات حوضه و شبکه از قبیل تراز زمین در محل گره‌ها، طول کانال، دبی ورودی و غیره بصورت زیر می‌باشد.

۱. دبی ورودی به گره $Q_{in} = 1$ متر مکعب بر ثانیه
۲. تراز زمین در گره $1 = 150$ متر
۳. تراز زمین در گره $2 = 150$ متر
۴. طول کانال $L = 12$ متر
۵. ضریب زبری مانینگ $n = 0.13$

همچنین تابع هزینه برای شبکه معرفی شده به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$Cost = (b \times h) \times L \times C_C + \frac{(d \times b \times L)}{2} \times C_E \quad (10)$$

که در آن C_C هزینه واحد حجم عملیات بتنی و برابر ۴۰۰۰ واحد، C_E هزینه واحد حجم عملیات خاکی (خاکریزی و خاکبرداری) و برابر ۱۰۰، b عرض کانال، h ارتفاع کانال ($h/L = 0.5$)، L طول کانال و d ارتفاع خاکریزی و یا خاکبرداری در گره ۲ می‌باشد. جهت کم کردن تعداد مجهولات، تراز گره ۱ را مشخص و برابر تراز زمین در این گره در نظر گرفته می‌شود:



شکل ۲. پلان مسأله جهت حل تحلیلی

با توجه به مقادیر عددی C_C ، C_E و L ، رابطه (۱۰) به صورت زیر ساده می‌شود:

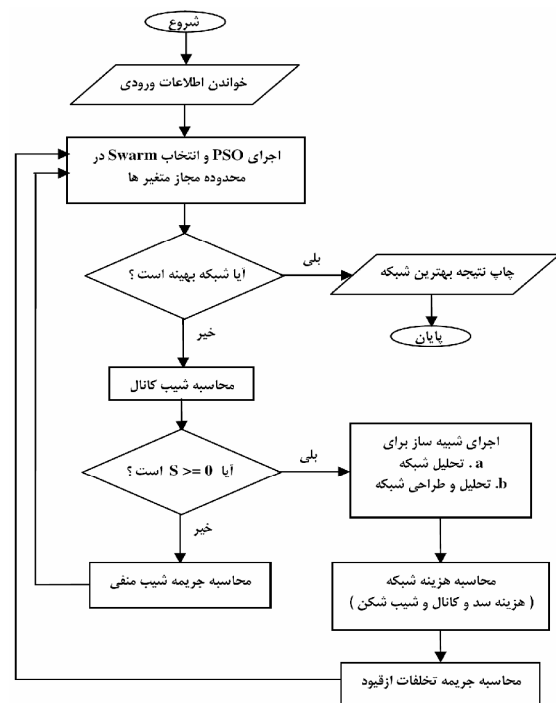
$$Cost = (b^2 / 2) \times 50 \times 400 + \frac{(d \times b \times 50)}{2} \times 100 \quad (11)$$

با توجه به فرضهای انجام شده، مجهولات مسأله عبارت از تراز گره ۲ (عمق خاکبرداری) و عرض کانال خواهد بود (b و d). شبیه ساز، طبق فرمول مانینگ، دبی عبوری از کانال‌های آزاد با مقطع مستطیلی را از رابطه زیر بدست می‌آورد:

بیشتر خواهد بود لذا زیاد بودن تعداد متغیرهای تصمیم در حالت اول ممکن است PSO را از مسیر مطلوب منحرف نموده و به جواب‌های نا مطلوب و نامعقول برساند. ثانیاً، در حالت اول، ممکن است در بعضی راه‌حل‌های انتخاب شده توسط PSO، ابعاد کانال برای عبور جریان کافی نباشد. بنابراین، برای سوق دادن PSO به سمت انتخاب‌هایی که این شرط را تأمین نماید باید جریمه‌ای برای تخلف از ظرفیت شاخه در نظر گرفته شود اما در حالت دوم، ابعاد کانال، با توجه به حداکثر دبی عبوری، طراحی می‌شوند و مشکل فوق پیش نمی‌آید و نیازی به در نظر گرفتن جریمه برای تخلف از ظرفیت مجاز نیست.

ثالثاً، در حالت دوم، شبیه ساز در هنگام طراحی، در صورت کافی نبودن ابعاد پیش فرض کانال، عرض و ارتفاع کانال را به اندازه مشخصی افزایش می‌دهد و ظرفیت کانال را با ابعاد جدید محاسبه می‌نماید. در صورتی که باز هم ظرفیت کافی نباشد دوباره ابعاد را افزایش می‌دهد و این سیکل آنقدر تکرار می‌شود تا ابعاد مناسب طراحی شود.

بنابراین در این حالت، همه نسبت‌های ممکن بین عرض و ارتفاع کانال، در نظر گرفته نمی‌شود. این مشکل را می‌توان با در نظر گرفتن پارامتری به عنوان نسبت ارتفاع و عرض کانال و اجرای مدل با در نظر گرفتن نسبت‌های مختلف تا اندازه‌ای برطرف نمود. همچنین ممکن است با در نظر گرفتن گام‌های نامناسب جهت افزایش ابعاد کانال، برنامه از روی ابعاد بهینه عبور کرده و آن را در نظر نگیرد.



شکل ۱. ساختار مدل SWMM-PSO-UD

b. ساختار مدل SWMM-PSO-D

الگوریتم در طی ۲۰۰۰ ارزیابی تابع (در حدود ۱۰۰ دوره حرکت توسط ۲۰ Particle) به جواب بهینه $f(x^*) = 434623.95996$ همگرا شد. شکل (۳) بهترین، مقدار متوسط و بدترین مقدار تابع هدف حاصله از ۱۰ اجرا را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این طراحی در جدول (۳) آورده شده است. جدول (۴) نیز پارامترهای آماری تابع هدف را در ۱۰ اجرا، ارائه می‌دهد. با مقایسه نتایج و طرح های حاصل از دو روش، مشاهده می‌شود که اختلاف هزینه در شبکه‌ای که مدل SWMM-PSO-D طراحی نموده نسبت به شبکه‌ای که به صورت تحلیلی طراحی شده است بسیار ناچیز می‌باشد:

$$\text{Cost}_{\text{PSO}} - \text{Cost}_{\text{تحلیلی}} = \text{اختلاف هزینه} \quad (18)$$

$$= 434623.95996 - 434613.9695 = 9.990 \text{ واحد}$$

$$\text{درصد خطا} = \frac{9.990}{434613.9695} = 0.000023 \% \quad (19)$$

این اختلاف بسیار ناچیز و قابل صرفنظر کردن است. البته درصد زیادی از این اختلاف نیز به این خاطر است که شبکه‌ای که توسط مدل طراحی شده، روندیابی را نیز در نظر گرفته است و عمل روند سیلاب سبب شده که حداکثر جریان ورودی به گره 1 که مقدار آن ۵۰ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد به ۵۰/۰۰۱۸ متر مکعب بر ثانیه درون کانال افزایش یابد.

ولی در حل تحلیلی عمل روند در نظر گرفته نشده است. بنابراین با ناچیز بودن این اختلاف، صحت و قدرت مدل SWMM-PSO طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب به اثبات می‌رسد. اما جهت اطمینان بیشتر به صحت عملکرد مدل برای شبکه‌هایی که شامل سد نیز می‌باشند و همچنین شبکه‌هایی که از وسعت بیشتری برخوردارند، از این مدل جهت طراحی بهینه یک مسئله واقعی، استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات شبکه طراحی شده بصورت تحلیلی

برای مثال تحلیلی

نام گره	تراز زمین (m)	ارتفاع خاکبرداری (m) d	تراز گره (m)
1	۱۵۰	۰/۰۰	۱۵۰
2	۱۵۰	۳۱/۸۳۵۷	۱۱۸/۱۶۴۲
	حداکثر دبی عبوری از کانال m^3/s	عرض کانال h (m)	ارتفاع کانال h (m)
12	۵۰	۱/۷۲۴۴	۰/۸۶۲۲
COST		۴۳۴۶۱۳/۹۶۹۵	

$$Q_{MAX} = K \cdot Q_{FUL} \quad (12)$$

که در آن، Q_{FUL} دبی عبوری از یک مقطع مستطیلی در حالت کاملاً پر و K ضریبی است که بستگی به عواملی چون نسبت بین شعاع هیدرولیکی مقطع مستطیلی در حالت باز و بسته و غیره دارد. این ضریب برای مقاطعی که نسبت بین ارتفاع و عرض آنها (h/b) برابر ۰/۵ باشد، برابر با ۱/۲۵۸ می‌باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$Q = \frac{1.258}{n} \times A \times R_{FUL}^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} = \frac{1.258}{n} \times (b \times h) \times \left[\frac{b \times h}{2(b+h)} \right]^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{d}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

در رابطه فوق، R_{FUL} شعاع هیدرولیکی مقطع پر در حالت بسته می‌باشد. با توجه به نسبت h/b ، میزان دبی ورودی برابر با ۵۰ متر مکعب بر ثانیه و ساده سازی رابطه فوق خواهیم داشت:

$$b = 3.299462563 \times d^{-\frac{3}{16}} \quad (14)$$

بدین ترتیب تنها مجهول مسأله، عمق خاکبرداری در گره 2 یعنی d خواهد بود. از ترکیب روابط (۱۱) و (۱۴) خواهیم داشت:

$$\text{Cost} = 1088645.32 \cdot d^{-\frac{6}{16}} + 8248.656408 \cdot d^{\frac{13}{16}} \quad (15)$$

با مشتق گیری از رابطه (۱۵) و برابر با صفر قرار دادن آن، عمق خاکبرداری معادل هزینه بهینه به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\text{Cost}' = 0 \quad d = 31.8357148 \text{ m} \quad (16)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\text{تراز کانال در گره 2} = \quad (17)$$

ارتفاع خاکبرداری در گره 2 - تراز زمین در گره 2 =

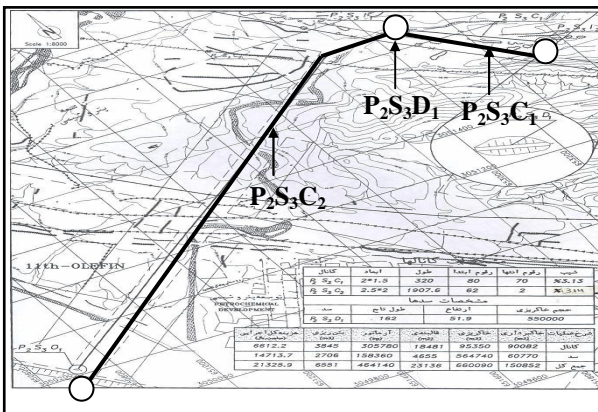
$$= 150 - d = 150 - 31.8357148 = 118.164285 \text{ m}$$

همچنین با توجه به مقدار d و رابطه (۱۴) خواهیم داشت: m $b = 1/7244$ و نیز از رابطه (۱۱) نتیجه می‌شود: $\text{Cost} = 434613/9695$. نتایج این طراحی در جدول (۱) نشان داده شده است. شبکه فوق بدون در نظر گرفتن قید حداکثر سرعت توسط مدل SWMM-PSO-D نیز طراحی شد. پارامترهای PSO در حل این مسئله در جدول (۲) ارائه شده است.

در این مسئله، گام‌های تغییر ابعاد عرض و ارتفاع کانال جهت انجام عملیات طراحی توسط SWMM، برابر ۰/۰۵ فوت (۰/۱۵ متر) است. با کاربرد الگوریتم PSO در حل مسئله فوق الذکر، این

جدول ۴. پارامتر های آماری تابع هدف در ۱۰ بار اجرا

پارامتر های آماری	تابع هدف
بهترین جواب	۴۳۴۶۲۳/۹۵۹۹۶
بدترین جواب	۴۳۴۶۲۴/۱۷۳۵۰۸۸
جواب متوسط	۴۳۴۶۲۴/۰۰۷۷۱۸
انحراف معیار	۰/۰۶۹۸۷۷

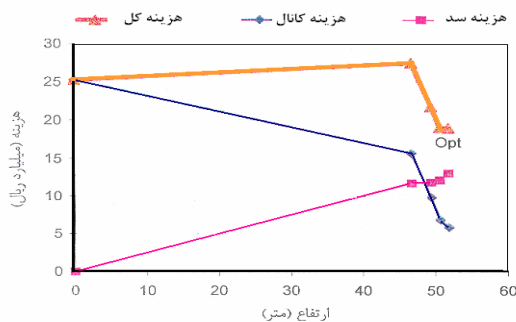


شکل ۴. توپوگرافی حوضه مربوط به سامانه سوم از بسته دوم

نمودار هزینه سد- ارتفاع سد، که مشاور از آن برای این سامانه استفاده نموده در شکل (۵) نشان داده شده است. برای استفاده از این نمودار در تعیین تابع هزینه‌ای که به مدل معرفی خواهد شد با انتخاب مختصات سه نقطه از آن، رابطه درجه دو زیر برای محاسبه هزینه سد با توجه به ارتفاع آن بدست می‌آید:

$$\text{هزینه ساخت سد} = 5.1H^2 + 6.9H \quad (20)$$

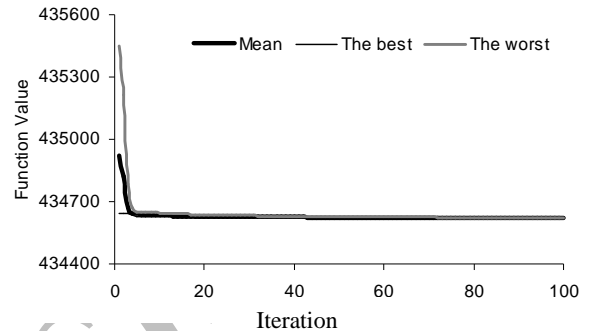
در رابطه فوق H ارتفاع سد می‌باشد. همچنین با استفاده از آمار و اطلاعات مشاور برای هزینه‌های شبکه های طراحی شده برای بسته‌ها و سامانه‌های مختلف، هزینه واحد حجم عملیات خاکبرداری، خاکریزی و عملیات بتنی بصورت آنچه که در جدول (۵) نشان داده شده است، ارائه گردیده است.



شکل ۵. تغییرات مجموع هزینه های المان های دفع سیلاب سامانه نسبت به ارتفاع سد P2S3D1

جدول ۲. پارامتر های الگوریتم PSO

پارامتر	c_1	c_2	W_{max}	W_{min}	χ
مقدار	۰/۵	۰/۵	۰/۹	۰/۴	۱/۰
نوع همسایگی	اندازه Swarm		حداکثر دوره		
مقدار	۲۰		۱۰۰	فراگیر	



شکل ۳. بهترین، مقدار متوسط و بدترین مقدار تابع هدف در ۱۰ اجرا

۴-۲. مطالعه موردی: پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی

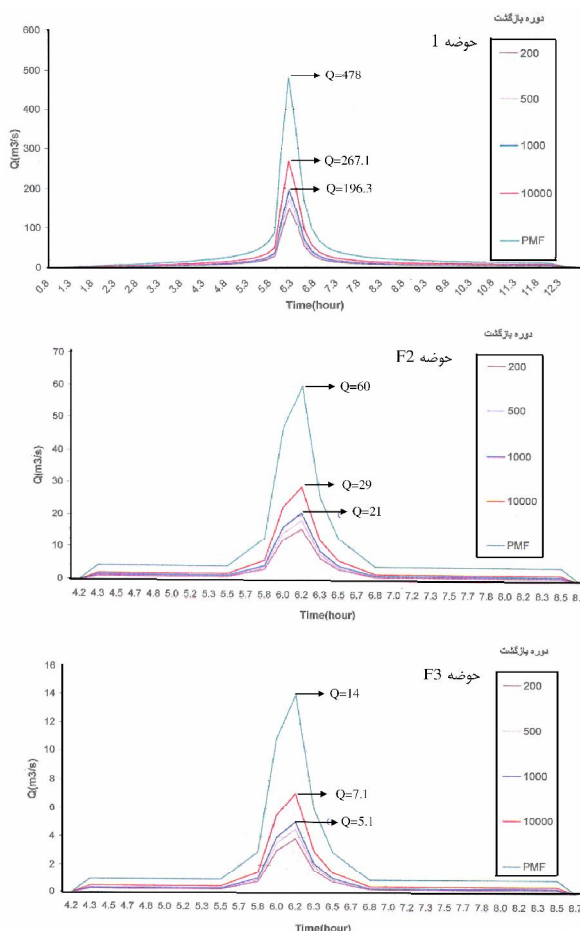
منطقه عسلویه به دلیل دارا بودن منابع سرشار انرژی شاهد سرمایه گذاری‌های عظیمی در این زمینه می‌باشد. لذا جهت ایجاد چتر امنیتی برای تأسیسات این منطقه، طرح کنترل سیلابی در این منطقه تدوین شده و در حال اجرا می‌باشد. بدین منظور شرکت مشاور، این منطقه را به شش بسته و هر بسته را به چند سامانه تقسیم‌بندی نموده و برای هر سامانه، سیستم کنترل سیلاب را طرح نموده است. لذا در این مقاله، جهت کنترل عملکرد مدل، سیستم کنترل سیلاب یکی از این سامانه‌ها را به وسیله مدل SWMM-PSO طراحی نموده و نتایج را با طرح در حال اجرا مقایسه می‌نماییم. حوضه‌ای که برای این منظور در نظر گرفته شده است سامانه سوم از بسته دوم می‌باشد (شکل (۴)).

جدول ۳. مشخصات شبکه طراحی شده توسط

نام گره	تراز زمین (m)	ارتفاع خاکبرداری (m) d	تراز گره (m)
1	۱۵۰	۰/۰۰	۱۵۰
2	۱۵۰/۰	۳۱/۸۲۸۷۷	۱۱۸/۱۶۱۲۲
نام کانال	حداکثر دبی عبوری از کانال m^3/s	عرض کانال b (m)	ارتفاع کانال h (m)
12	۵۰/۰۰۱۸	۱/۷۲۴۴	۰/۸۶۲۲
COST			۴۳۴۶۲۳/۹۶۰

جدول ۶. نتایج طراحی شرکت مشاور برای پروژه کنترل سیلاب پارس جنوبی

مشخصات کانالها				
نام کانال	ابعاد (m)	طول (m)	رقوم ابتدا (m)	رقوم انتها (m)
P ₂ S ₃ C ₁	۲ × ۱/۵	۳۲۰	۸۰	۷۰
P ₂ S ₃ C ₂	۲/۵ × ۲	۱۹۰۷/۶	۶۲	۲
مشخصات سدها				
نام سد	طول تاج (m)	ارتفاع (m)	حجم خاکریزی (m ³)	
P ₂ S ₃ D ₁	۱۶۲	۵۱/۹	۵۵۰۰۰۰	
هزینه کل اجرایی (میلیون ریال)		شرح عملیات		
۶۶۱۲/۲		کانال		
۱۴۷۱۳/۷		سد		
۲۱۳۲۵/۹		جمع کل		



شکل ۷. هیدروگراف سیلاب های ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ساله و سیلاب حداکثر محتمل در حوضه ۱، F2 و F3

جدول ۵. هزینه اجرای واحد حجم عملیات

هزینه اجرای واحد حجم عملیات [میلیون ریال]		
خاکبرداری	خاکریزی	قالببندی، آرماتوربندی و بتن ریزی
۰/۱۲۴	۰/۰۰۴۶	۰/۴

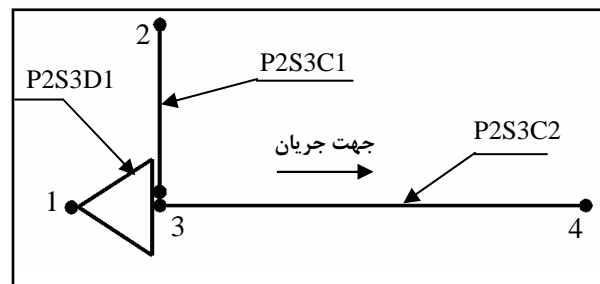
بنابراین تابع هزینه کلی سیستم شامل هزینه ساخت سدی به ارتفاع H و ساخت شیب شکن یا کانالی به عرض b ، ارتفاع h و طول L که متوسط عمق خاکبرداری در طول خاکبرداری شده (Lb) برابر Eb و متوسط ارتفاع خاکریزی در طول خاکریزی شده (Lr) برابر Er می باشد از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} \text{هزینه کل} &= \sum_{i=1}^n [5.1H_i^2 + 6.9H_i] + \\ &+ \sum_{j=1}^m [0.4(b_j \times h_j) \times L_j] + \\ &+ 0.0124 \times (Eb_j \times (b_j + \frac{2}{3}Eb_j) \times Lb_j) + \\ &+ 0.0046 \times (Er_j \times (b_j + \frac{2}{3}Er_j) \times Lr_j) \end{aligned} \quad (21)$$

در رابطه فوق n تعداد سدها و m مجموع تعداد شیب شکن ها و کانال ها در شبکه می باشد.

۱-۲-۴. طرح مشاور

طبق محاسبات مشاور، سیستم کنترل سیلاب سامانه سوم این بسته، از یک سد خاکی به ارتفاع ۵۱/۹ متر، ۲ تبدیل ورودی، کانال جمعاً به طول ۲۲۲۸ متر و یک تبدیل خروجی تشکیل می شود. شکل (۶) پلان این طرح را به صورت شماتیک نشان می دهد. مشخصات طرح ارائه شده توسط مشاور در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۶. پلان طرح ارائه شده توسط مشاور برای مسأله دوم

البته در این طرح، دو شاخه P2S3C1 و P2S3C2 در نقطه 3، دقیقاً به هم متصل نمی باشند. بلکه جریان شاخه P2S3C1 از طریق یک ورودی وارد شاخه P2S3C2 می شود. به گره های 1، 2 و 3 به ترتیب هیدروگراف های سیلاب طراحی حوضه های 1، F2 و F3 وارد می شود. این هیدروگراف ها در اشکال (۷) مشاهده می شوند.

جدول ۸. حداکثر و حداقل تراز مجاز گره ها

نام گره	رقوم کانال (m)	
	حداکثر تراز مجاز	حداقل تراز مجاز
10	۱۵۰/۵	۱۴۹/۵
20	۸۶/۰	۸۴/۰
21	۸۰/۵	۵۰/۰
30	۶۸/۵	۶۲/۰
40	۵/۵	۲/۰

این مسئله توسط هر دو مدل SWMM-UD و SWMM-PSO-D حل شده است. همچنین در هر کدام از اینها نیز، از دو مدل بهینه‌سازی PSO با همسایگی فراگیر و محلی با تعداد ۱۰ عضو در همسایگی، استفاده شده است. پارامترهای الگوریتم PSO در جدول (۹) نشان داده شده است. جهت جستجوی جواب بهینه از ۱۰۰ و ۲۰۰ دوره حرکت، توسط ۱۰۰ Particle استفاده شده است. جداول (۱۰) و (۱۱) پارامترهای آماری تابع هدف را در ۱۰ اجرا، برای این حالات ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از همگرایی جواب که تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد دفعات ارزیابی تابع برای بهترین، متوسط و بدترین جواب می‌باشد، برای بهترین سری اجراها در شکل (۹) ارائه شده است. مشخصات شبکه طراحی شده توسط این مدل‌ها نیز در جداول (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است.

جدول ۹. پارامترهای الگوریتم PSO

پارامتر	C_1	C_2	W_{max}	W_{min}	χ
مقدار	۰/۵	۰/۵	۰/۹	۰/۴	۱/۰

جدول ۱۰. پارامترهای آماری تابع هدف در ۱۰ بار

اجرای SWMM-PSO-D برای حالت اول پروژه

کنترل سیلاب عسلویه

تابع هدف	بهترین جواب	بدترین جواب	جواب متوسط	انحراف معیار
A	۱۶۴۴۰/۴۹۲	۱۶۴۶۵/۳۵۲	۱۶۴۵۰/۴۸۲	۸/۲۰۱۷
B	۱۶۴۳۶/۵۲۷	۱۶۴۴۴/۴۳۰	۱۶۴۳۹/۳۲۴	۲/۲۴۲۷
C	۱۶۴۳۵/۴۶۱	۱۶۴۵۷/۴۲۴	۱۶۴۴۴/۵۳۶	۶/۱۳۰
D	۱۶۴۳۲/۸۴۴	۱۶۴۴۰/۴۴۶	۱۶۴۳۷/۰۳۰	۲/۴۴۲۳

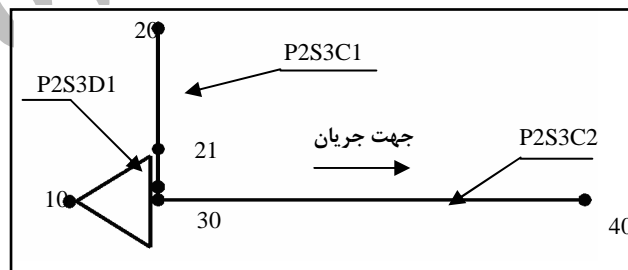
A: ۱۰۰ تکرار - Particle ۱۰۰ همسایگی فراگیر
 B: ۱۰۰ تکرار - Particle ۱۰۰ همسایگی محلی
 C: ۲۰۰ تکرار - Particle ۱۰۰ همسایگی فراگیر
 D: ۲۰۰ تکرار - Particle ۱۰۰ همسایگی محلی

۲-۲-۴. طراحی توسط مدل SWMM-PSO

پلان این طرح همانند طرح ارائه شده توسط مشاور (شکل (۶)) می‌باشد. اما برای اینکه بتوان در گره 3 برای دو شاخه P2S3C1 و P2S3C2، ترازهای مختلفی در نظر گرفت در مدل کردن این شبکه از یک المان اضافی شیب شکن استفاده شده است (شکل (۸)). برای این المان (المان 2130) که میان دو شاخه مذکور قرار می‌گیرد، طول بسیار ناچیزی در نظر گرفته می‌شود.

همچنین در صورت تجاوز سرعت جریان در این المان از ماکزیمم سرعت مجاز، جریمه سرعت برای آن در نظر گرفته نمی‌شود ولی در بخش محاسبات هزینه، هزینه المان شیب شکن همانند المان کانال برآورد شده است.

مشخصات المان‌های در نظر گرفته شده از قبیل نوع المان‌ها، تراز گره‌های بالا دست و پایین دست المان‌ها و طول المان‌ها در جدول (۷) مشخص شده است. به گره‌های 10، 20 و 30 به ترتیب هیدروگراف‌های سیلاب طراحی حوضه‌های 1، F3 و F2 وارد می‌شود. جهت کنترل سایش رویه بتنی کانال توسط جریان، حداکثر سرعت مجاز جریان برابر با ۱۲ m/s در نظر گرفته شده است. مقادیر حداکثر و حداقل تراز مجاز گره‌ها نیز در جدول (۸) مشخص شده است.



شکل ۸. شبکه کنترل سیلاب با در نظر گرفتن یک المان سد و دو المان کانال و یک شیب شکن

جدول ۷. مشخصات المانها برای پروژه کنترل سیلاب

پارس جنوبی در حالت اول

نام المان	نوع المان	رقوم زمین (m)		طول المان (m)
		بالا دست	پایین دست	
1030 (P2S3D1)	سد	۱۵۰	۶۸	-
2021 (P2S3C1)	کانال	۸۶	۷۲	۳۲۰
2130	شیب شکن	۷۲	۶۸	۰/۵
3040 (P2S3C2)	کانال	۶۸	۰/۰۰	۱۹۰۷/۶

نام سد	سطح مقطع تخلیه کننده (m ²)	ارتفاع سد (m)	ماکزیمم دبی خروجی (m ³ /s)
1030	۲/۱۷۶۶	۴۶/۷۴۶۹	۶۵/۹۰۱۱
هزینه کل اجرایی (میلیون ریال)		شرح عملیات	
۴۹۶۵/۱۵۷		کانال	
۰/۲۴۰۶		شیب شکن	
۱۱۴۶۷/۴۴۶۲		سد	
۱۶۴۳۲/۸۴۳۶		جمع کل	

جدول ۱۳. نتایج طراحی مدل SWMM-PSO-UD برای حالت اول پروژه کنترل سیلاب عسلویه برای بهترین جواب

مشخصات کانال ها				
نام کانال	رقوم کانال (m)		ابعاد کانال (m)	حداکثر سرعت (m/s)
	گره بالادست	گره پایین دست		
2021	۸۶/۰۰	۶۳/۹۲۸	۱/۲۶۳×۰/۶۳۲	۹/۰۸۷۶
2130	۶۲/۹۲۸	۶۲/۰۰	۳/۲۳۳×۱/۶۱۷	۱۷/۳۲۴۱
3040	۶۲/۰۰	۵/۴۰۵	۳/۵۱۱×۱/۷۵۶	۱۲/۰۰
مشخصات سد				
نام سد	سطح مقطع تخلیه کننده (m ²)	ارتفاع سد (m)	ماکزیمم دبی خروجی (m ³ /s)	شرح عملیات
1030	۲/۱۸۶۱	۴۶/۶۹۱۷	۶۶/۱۵۰۲	کانال
هزینه کل اجرایی (میلیون ریال)		شیب شکن		
۴۹۷۲/۰۵۴		سد		
۴/۲۸۶۰		جمع کل		
۱۱۴۴۰/۷۴۹۷		۱۶۴۱۷/۰۸۹۲		

۵. مقایسه و تفسیر نتایج

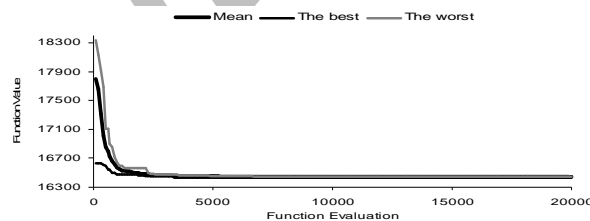
هزینه طرح ارائه شده توسط شرکت مشاور برای این سامانه برابر ۲۱۳۲۵/۹ میلیون ریال می باشد. در صورتی که بهترین طرحی که مدل در حالت اول ارائه می نماید مبلغ ۱۶۴۱۷/۰۸۹۲ میلیون ریال، هزینه صرف خواهد نمود. بنابراین استفاده از مدل SWMM-PSO سبب کاهش ۲۳ درصدی در هزینه اجرای سیستم کنترل سیلاب این سامانه در حالت اول خواهد شد.

از نتایج حاصل از جداول (۱۰) و (۱۱) واضح است که در هر دو مدل SWMM-PSO-D و SWMM-PSO-UD، الگوریتم PSO با ساختار همسایگی محلی، کارایی بهتری را در یافتن جواب بهینه تر، از خود نشان داده است که این خود به دلیل آشفستگی که در Swarm و حرکت آن ایجاد شده، می باشد که سبب می شود از نقاط بهینه نامرغوب بگریزد. مقادیر به مراتب کمتر انحراف معیار و اختلاف کم میان مقادیر بهترین و بدترین مقادیر تابع هدف نیز، نشان دهنده کیفیت بالای جواب ها در الگوریتم PSO با ساختار

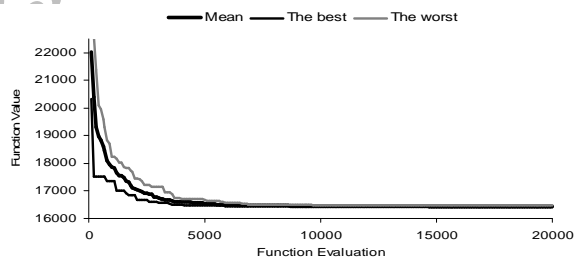
جدول ۱۱. پارامترهای آماری تابع هدف در ۱۰ بار اجرای SWMM-PSO-UD برای حالت اول پروژه کنترل سیلاب عسلویه

تابع هدف	بهترین جواب	بدترین جواب	جواب متوسط	انحراف معیار
A	۱۶۴۳۶/۷۰۹	۱۷۰۱۰/۲۶۱	۱۶۶۵۱/۰۰۵	۱۷۶/۷۵۱
B	۱۶۴۲۸/۲۳۶	۱۶۴۸۳/۶۰۷	۱۶۴۴۹/۳۸۷	۱۵/۸۳۹
C	۱۶۴۵۶/۱۱۵	۱۷۵۰۴/۸۶۴	۱۶۶۳۰/۶۶۵	۳۱۵/۸۸۷
D	۱۶۴۱۷/۰۸۹	۱۶۴۷۰/۵۲۶	۱۶۴۳۱/۱۵۸	۱۴/۷۱۷

A: ۱۰۰ تکرار - ۱۰۰ Particle همسایگی فراگیر
 B: ۱۰۰ تکرار - ۱۰۰ Particle همسایگی محلی
 C: ۲۰۰ تکرار - ۱۰۰ Particle همسایگی فراگیر
 D: ۲۰۰ تکرار - ۱۰۰ Particle همسایگی محلی



a. (مدل SWMM-PSO-D)



b. (مدل SWMM-PSO-UD)

شکل ۹. تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد دفعات ارزیابی تابع برای بهترین، متوسط و بدترین در ۱۰ اجرا (تعداد Particle ها برابر با ۱۰۰، همسایگی محلی، ۲۰۰ تکرار)

جدول ۱۲. نتایج طراحی مدل SWMM-PSO-D برای حالت اول پروژه کنترل سیلاب عسلویه برای بهترین جواب

مشخصات کانال ها				
نام کانال	رقوم کانال (m)		ابعاد کانال (m)	حداکثر سرعت (m/s)
	گره بالادست	گره پایین دست		
2021	۸۴/۳۹۷	۶۷/۶۳۴	۱/۳۲۶×۰/۶۶۳	۸/۱۹۹۶
2130	۶۷/۶۳۴	۶۲/۱۲۶	۰/۷۴۷×۰/۳۷۳	۳۵/۸۰۳۳
3040	۶۲/۱۲۶	۵/۴۱۵	۳/۵۲۱×۱/۷۶۰	۱۲/۰
مشخصات سد				

- Planning", Dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, 2004, USA.
- [2] Kumar, D., Nagesh, Reddy, M., Janga, "Multipurpose Reservoir Operation Using Particle Swarm Optimization", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, May/June 2007, 133, 3, pp. 192-201.
- [3] Chau, K.W., "Particle Swarm Optimization Training Algorithm for ANNs in Stage Prediction of Shing Mun River", Journal of Hydrology, Volume 329, Issues 3-4, 15 October 2006, pp. 363-367.
- [4] Chau, K.W., "Rainfall-Runoff Correlation with Particle Swarm Optimization Algorithm", Lecture Notes in Computer Science, Volume 3174, 2004, pp. 970-975.
- [5] Meraji, S., Hamed., Afshar. M.H., Afshar, A., "Reservoir Operation by Particle Swarm Optimization Algorithm", 7th International conference of civil engineering (Icce7th), 2006, Tehran, Iran.
- [6] Daraeikhah, M., Meraji, S., Hamed, Afshar, M.H., "Application of Particle Swarm Optimization to Optimal Design of Cascade Stilling Basin", 2003.
- [7] Afshar, M.H., Rajabpour, R., "Appication of Local and Global Particle Swarm Optimization Algorithms to Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Systems". Journal of IRRIGATION AND DRAINAGE, Wiley InterScience, 2008.
- [8] Reynolds, C., "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", Computer Graphics, Vol.21, No.4, 1987, pp.25-34.
- [9] Eberhart, R.C., Simpson, P., Dobbins, R., "Computational Intelligence", PC Tools, Academic Press, chapter 6, 1996, pp. 212-226.
- [10] Kennedy, J., Eberhart, R., "Particle Swarm Optimization", Proceedings of the International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995 IEEE, Piscataway, 1995, pp. 1942-1948.
- [11] Shi, Y., Eberhart, R., "Parameter Selection in Particle Swarm Optimization", In: Porto VW, Saravanan N, Waagen D and Eiben AE (eds) Evolutionary Programming VII, 1998, pp. 611-616.
- [12] Shi, Y., Eberhart, R., "A Modified Particle Swarm Optimizer", Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Evolutionary Computation. AK, Anchorage, 1998.
- [13] Kennedy, J., "The Behavior of Particles". In: Porto VW, Saravanan N, Waagen D and Eiben AE (eds) Evolutionary Programming VII, Springer 1998, pp. 581-590.
- [14] Carlisle, A., Dozier, G., "An Off-The-Shelf PSO". Proceedings of the Particle Swarm Optimization Workshop, 2001, pp. 1-6.

[۱۵] معراجی، سیدحامد، «طراحی بهینه سیستمهای کنترل سیلاب با استفاده از الگوریتم Particle Swarm»، پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.

همسایگی محلی نسبت به الگوریتم PSO با ساختار همسایگی فراگیر است. با توجه به شکل (۹)، نزدیکی نمودارها در مدل با الگوریتم PSO با ساختار همسایگی محلی، نشان دهنده کیفیت بالای جوابها و همگرایی سریع تر به جواب بهینه در همه اجراها، در این مدل می باشد. با توجه به جداول (۱۲) و (۱۳)، ملاحظه می گردد که مدل SWMM-PSO-UD (مدل بدون طراحی اعضا توسط SWMM-PSO-D) جواب بهتری را نسبت به مدل SWMM-PSO-D (مدل با طراحی اعضا توسط SWMM) ارائه کرده است. با توجه به اینکه تعداد متغیرهای مدل SWMM-PSO-UD از مدل SWMM-PSO-D بیشتر است، انتظار می رود که جواب مدل SWMM-PSO-UD از مدل SWMM-PSO-D بهتر باشد، اما از آنجا که طراحی اعضا توسط SWMM از طریق افزایش ابعاد از یک مقدار حداقل و به صورت گامهای مشخص صورت می گیرد، ممکن است که با انتخاب گامهای نامناسب و بزرگ، مدل SWMM-PSO-D جوابی نامرغوب ایجاد کند. این مشکل را می توان با انتخاب گامهای کوچک تر در طراحی رفع کرد ولی با این کار، هزینه محاسباتی و زمان اجراها بسیار زیادتر خواهد شد. بر خلاف مدل SWMM-PSO-D، در مدل SWMM-PSO-UD، طراحی اعضا از طریق انتخاب ابعاد توسط الگوریتم PSO در محدوده ای که از قبل برای آن تعیین شده صورت می گیرد و اگر الگوریتم توانایی جستجو در فضای ابعادی بزرگتر را داشته باشد، می تواند جوابی مرغوبتر و بهینه تر را بیابد.

۶. نتیجه گیری

در این مقاله، پس از معرفی و تشریح الگوریتم PSO و بیان شیوه حل مسائل بهینه سازی توسط این الگوریتم، سیستم کنترل سیلاب مورد نظر معرفی گردیده و روابط حاکم بر آن جهت طراحی اِیمن این سیستم، بیان شد. در ادامه با معرفی دو مدل اصلی بهینه سازی SWMM-PSO-D و SWMM-PSO-UD، طراحی بهینه سیستم کنترل سیلاب پارس جنوبی به عنوان مطالعه موردی ارائه گردید. با توجه به نتایج حاصله و مقایسه هزینه طرحهای ارائه شده توسط مشاور و مدل های پیشنهادی، کارایی این مدل ها به اثبات می رسد. مشخص شد که در هر دو مدل پیشنهادی، الگوریتم PSO با ساختار همسایگی محلی، کارایی بهتری را در یافتن جواب بهینه تر، از خود نشان می دهند. همچنین با توجه به اینکه مدل SWMM-PSO-D دارای متغیرهای تصمیم کمتری نسبت به مدل SWMM-PSO-UD است، در کل می توان انتظار داشت که با معرفی گامهای طراحی مناسب برای مدل SWMM-PSO-D، این مدل با افزایش تعداد اعضای موجود در سیستم، به نتایج بهتری دست یابد.

مراجع

- [1] Baltar, A., Fontane, D.G., "A Multiobjective Particle Swarm Optimization Model for Reservoir Operations and

[۱۶] سادات دربندی، احمدعلی، «طراحی بهینه شبکه جمع آوری آبهای سطحی با استفاده توأم از الگوریتم ژنتیک و ماجول *SWMM-Transport*»، پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.

Archive of SID