نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد۷، پاییز ۱۳۹۲، ص. ۴۰۱-۳۸۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 7, Fall 2013, p. 389-401

کاربرد یک الگوریتم اصلاح شده بهینه سازی ازدحام ذرات در طراحی سیستم های توزیع آب

علیرضا مقدم[1*]، امین علیزاده[2]، علیرضا فرید حسینی[3]، علی نقی ضیایی[4]، دانیال فلاح هروی[5]

چکیده

طراحی بهینه سیستم های توزیع آب به عنوان یک مسئله واقعی بهینه سازی مطرح است و هدف آن یافتن بهترین راه حل برای انتقال آب از مخزن به مصرف کنندگان است به نحوی که تمام نیازهای آنها با کمترین هزینه تأمین شود. بسیاری از محققین پژوهش های متفاوتی از قبیل برنامه ریزی خطی و غیر خطی، روش های بهینه سازی جهانی و الگوریتم های تکاملی برای کمینه کردن هزینه این سیستم ها ارائه نموده اند. الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) یکی از الگوریتم های تکاملی است که در ابتدا برای حل مسائل بهینه سازی با متغیرهای پیوسته معرفی شد، اما پس از مدتی برای مسائلی با متغیرهای گسسته نیز توسعه یافت. در این مقاله برای کمینه کردن هزینه طراحی سیستم های توزیع آب، پس از اصلاحاتی درالگوریتم PSO پیوسته، برنامه آن در محیط نرم افزار MATLABبا تحلیل‌گر هیدرولیکی شبکه EPANET2.0 تلفیق شد. در انتها برای اثبات کارایی الگوریتم ارائه شده و بدست آوردن بهترین مقادیر پارامترهای آن در بهینه سازی و طراحی سیستم‌های توزیع آب، از سه شبکه مرجع دوحلقه ای، هانوی و کادو درمطالعات پیشین استفاده شد که این شبکه ها از لحاظ آرایش و تعداد لوله ها با همدیگر متفاوت هستند. در نتیجه بهینه سازی شبکه دوحلقه ای مینیمم هزینه این شبکه بعد از ۳۱۰۰ بار ارزیابی تابع هدف بدست آمد که نسبت به الگوریتم های قبلی بهبود داشته است. در شبکه هانوی نیز مینیمم هزینه $۶/۰۹۷\times۱۰^{۶}$ دلار بدست آمد که کمتر از حداقل هزینه ای است که تاکنون در نتایج دیگر محققین با در نظر گرفتن مقدار ۱۰/۶۶۷= ارائه شده است. برای شبکه کادو هزینه ۱۳۰،۶۶۶،۰۴۳روپیه بدست آمده کمتر از هزینه سایرین بود. نتایج بدست آمده نشان ازعملکرد عالی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم ها دارد.

واژه های کلیدی: سیستم های توزیع آب، الگوریتم PSO، بهینه سازی، EPANET2.0

مقدمه

هزینه بالای سیستم های توزیع آب[6] سبب شده است که تلاش های زیادی در راستای اجرای سیستم هایی که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه هستند انجام گیرد، تا علاوه بر انتقال آب، نیاز های مصرف کنندگان نیز با کمیت و کیفیت مناسب تامین شود. منظور از طراحی بهینه سیستم های توزیع آب، تعیین بهترین ترکیب ممکن از مولفه های سیستم به نحوی است که سبب کاهش در هزینه ها گردد و قیود طراحی مسئله و نیاز مصرف کنندگان با حداکثر قابلیت اطمینان تامین شود. در عمل، این بهینه سازی بر اساس متغیرهایی که یک سیستم توزیع آب دارد به شکل های گوناگون اتفاق می افتد و شرایط متفاوتی برای اجرای صحیح و طراحی قیود یک چنین شبکه هایی وجود دارد.

در دهه های گذشته، اکثر محققان در این زمینه از روش‌های بهینه سازی سنتی که بر اساس برنامه ریزی خطی و غیر خطی بنا شده اند تغییر جهت داده و به سمت استفاده از الگوریتم های پویا روی آورده اند که می توان از آن قبیل: الگوریتم ژنتیک[7] (GA) (Savic and Walters, 1997، Wu and Simpson, 2001، Wu and Walski, 2005)، بهینه سازی کلونی مورچگان[8] (ACO)(Maier et al., 2003، Zecchin et al., 2005)،جهش ترکیبی قورباغه (SFLA)[9] (Eusuff and Lansey, 2003)، شبیه سازی تبرید[10] (SA)(Cunha and Sousa, 1999)، ارزیابی پیچیده ترکیبی[11] (SCE)(Liong and Atiquzzaman, 2004)، جستجوی

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب ، استاد و استادیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(* - نویسنده مسئول: Email: Alireza.Moghaddam@yahoo.com)
۵- عضو هیأت علمی، مهندسی مکانیک دانشگاه جامع علمی کاربردی خراسان

6- Water Distribution Systems
7- Genetic Algorithm
8- Ant Colony
9- Suffled Frog Leaping Algorithm
10- Simulated Annealing
11- Shuffled Complex Evolution

پراکنده[1] (Lin et al., 2007) و الگوریتم جستجوی هارمونی[2] (HS) (Geem, 2006)را نام برد.

از میان همه فرض هایی که در الگوریتم های تکاملی رایج هستند و در طراحی بهینه سیستم های توزیع آب استفاده می شوند مفروضات زیر مشترک هستند:

در مسائل گسسته بر خلاف دیگر روش های بهینه سازی، یکسری قطرهای تجاری موجود در بازار بطور مستقیم به الگوریتم ها معرفی می شوند.

این الگوریتم ها فقط اطلاعات داده شده توسط تابع هدف را استفاده می کنند و از پیچیدگی های موجود در ارتباط با تخمین مشتقات و دیگر توابع کمکی فاصله می گیرند.

آنها از نظر مفهومی فرایندهای بهینه سازی جهانی هستند که می توانند خودشان را به آسانی با هر تابع هدف دیگری هماهنگ کنند و تمام سیستم های با شرایط کاری متفاوت را تجزیه و تحلیل نمایند.

چون این الگوریتم ها مجموعه ای از راه حل ها را ارائه می دهند می توانند راه حل بهینه یا نزدیک به بهینه را به آسانی پیدا کنند.

در نهایت راه حل خروجی از تکرارهایی که در فضای حل الگوریتم های فوق انجام می شود بدست می آید. این فرآیند تا زمانیه طول میانجامد که تمام راه حل های ممکن در فضای جستجو بررسی شود. الگوریتم های پویا و تکنیک های جستجوی آنها بوسیله دو عنصر اساسی توصیف می شوند (Montalvo et al., 2008):

اکتشاف[3] توانایی یک الگوریتم برای جستجوی گسترده درون فضای حل و تولید پاسخ های جدید است.

بهره برداری[4] توانایی یک الگوریتم برای تمرکز بر روی جستجو در نزدیک فضایی از راه حل است که قبلاً در آنجا راه حل های نزدیک به بهینه پیدا شده است و یا به عبارت دیگر توانایی الگوریتم در پروراندن پاسخ های فعلی است.

الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات[5](PSO)در ابتدا توسط ابرهات و کندی(Kennedy and Eberhart, 1995)معرفی گردید و بر اساس رفتار اجتماعی پرندگانیاست که برای رسیدن به یک مقصد نامشخص تلاش می کنند. اکثر الگوریتم هایی که در پیشینه پژوهش به آنها اشاره شد از روابط و عملگرهای پیچیده ای برای حل مسأله بهره می برند و همچنین از سرعت پایینی برای پردازش مسأله برخوردار هستند. اما درک ماهیت الگوریتم PSO و بکارگیری آن بسیار آسان است. این روش با استفاده از قابلیت هوش جمعی، تعداد پارامترهای اندک و سرعت همگرایی بالانتیجه خوبیدر حل مسائل پیچیده بهینه سازی از خود نشان داده است(Montalvo et al., 2008; Liao et al, 2007).

در این مقاله ضمن انجام تغییراتی در الگوریتمPSOاستاندارد، کاربرد آن را در طراحی بهینه سیستم هایتوزیع آب بیان می شود. برای حل مسائل بهینه سازی سیستم های توزیع آب، ابتدا برنامه الگوریتم PSOدر محیط نرم افزار برنامه نویسی Matlabنوشته شد و سپس با نرم افزارشبیه سازی هیدرولیکیEPANET 2.0متصل گردید. متغیرهای تصمیم در این مسائل قطرهای لوله های شبکه در نظر گرفته شده اند.

درادامه، ابتدا شرحی از یک مسئله طراحی بهینه سیستم هایتوزیع آب بیان می شود و پس از معرفی الگوریتمPSO، در نهایتکاربرد این الگوریتم را در بهینه سازی سه شبکه مرجعبررسی کرده و با نتایج دیگر محققین مقایسه می شود.

مواد و روش ها

تعریف مسئله و طراحی بهینه یک سیستم توزیع آب

منظور از طراحی بهینه یک سیستم توزیع آب تخمین مقادیر متغیرهای این سیستم است؛ بگونه ای که هزینه های نگهداری و سرمایه گذاری سیستم مینیمم و قیود شبکه نیز ارضا شود. هزینه هایی که برای یک سیستم توزیع آب مطرح است عبارتند از: هزینه های انتقال، ذخیره، پمپاژ، کنترل، انرژی و نگهداری. بنابراین محدودیت های زیادی در طی طراحی مطرح می شوند: محدودیت های مهندسی، محدودیت های ماکزیمم و مینیمم فشار در هر گره، محدودیت های ماکزیمم و مینیمم سرعت جریان در لوله ها، برقراری معادله پیوستگی و معادله بقای انرژی و هماهنگی با برخی از معیارهای قابلیت اطمینان. بعضی از محققین در بهینه سازی های خود از یک تابع هدف که فقط شامل هزینه های خطوط لوله است استفاده کرده اند(Zecchin et al., 2005،Maier et al., 2003)ولی تعداد دیگری از آنها هزینه های متفاوتی را در تابع هدف مطرح کرده اند(Dandy and Engelhardt, 2006).

در این پژوهش، سه مثال مورد بررسی قرار می گیرد که در تابع هدف بهینه سازی آنها فقط هزینه های خطوط لوله مطرح است. بدین منظور به خاطر تسهیل در مقایسه با نتایج بدست آمده با نویسندگان دیگر، از تابع هدف زیر برای تخمین هزینه ها استفاده شد:

$$Minimize\ F_{obj} = \sum_{i=1}^{N} c_i(D_i) \times l_i \quad (1)$$

که F_{obj} بیانگر جمع هزینه بر روی تمام لوله هایی است که دارای شاخص i هستند. $c_i(D_i)$ هزینه در واحدطول برای لوله ای به قطر D_i ، طول لوله i و N تعداد لوله ها در شبکه می باشد.قیودی که در مسأله مطرح هستند به شرح زیر می باشد:

1- Scatter Search
2- Harmony Search
3- Exploration
4- Exploitation
5- Particle Swarm Optimization

قانون پیوستگی:

$$\sum Q_j^{in} - Q_j^{out} = d_j \quad (۲)$$

که Q_{in} و Q_{out} به ترتیب جریان ورودی و خروجی به گره می باشند، و d_j میزان جریان مصرفی یا تقاضا در هر گره است.

قانون بقای انرژی:

در هر حلقه از شبکه، قانون بقای انرژی می تواند به شکل زیر نوشته شود:

$$\sum_{k \in Loop\ l} \Delta H_k = 0, \quad \forall l \in NL \quad (۳)$$

که ΔH_k افت فشار در لوله k و NL تعداد کل حلقه ها در سیستم است. افت فشار در هر لوله تفاوت هد بین گره های متصل به همدیگر است و با استفاده از رابطه هیزن-ویلیامز محاسبه می شود:

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = \omega \frac{L_k}{C_k^{\alpha} D_k^{\beta}} Q_k^{\alpha}, \ \forall k\ npipe \quad (۴)$$

که $H_{1,k}$ و $H_{2,k}$هد در دو انتهای لوله k هستند؛ ω ثابت تبدیل عددی معادله است (که بستگی به واحدها دارد)؛ C_k ضریب زبری لوله k (که وابسته به جنس لوله است)؛ α و β ضرایب رگرسیون می‌باشند. محدودیت فشار در گره ها :

برای هر گره در شبکه باید رابطه ی زیر برقرار باشد:

$$H_j \geq H_j^{min}, \qquad j = 1, \ldots, NN \quad (۵)$$

که هد فشار در گره و H_j^{min} مینیمم فشار مورد نیاز در گره i است.

بدیهی است که قیود مربوط به برقراری معادلات پیوستگی و انرژی در حین شبیه سازی با نرم افزار EPANET 2.0 همواره رعایت می شوند (Liong and Atiquzzaman, 2004) ولی قید مینیمم فشار در گره ها بایستی به عنوان هزینه جریمه در تابع هدف وارد شود، بطوریکه خطا در عدم رعایت آن باعث افزایش در تابع هدف گردد. این خطا به قدری موثر است که باعث می شود راه حل های غیرقابل قبول از فضای حل مساله حذف شوند. بدین منظور در زمانی که فشار در هر گره از مقدار مشخص شده کمتر باشد فاکتور جریمه در تابع هدف وارد می شود و برای گره هایی که فشار بیشتر از فشار مینیمم است این فاکتور حذف می شود:

$$Minimize\ F_{obj} = \sum_{i=1}^{N} c_i(D_i) \times l_i + \quad (۶)$$

با استفاده از Heaviside که تابعی از است بصورت روشن و صریح بیان می شود(Montalvo, 2008):

$$Minimize\ F_{obj} = \sum_{i=1}^{N} c_i(D_i) \times l_i + P, \quad (۷)$$

فاکتور که بصورت خطی با رشد ($\Delta H_j = H_j^{min} -$) افزایش می یابد بیانگر یک مقدار ثابت است که زمانی موثر واقع می شود که مینیمم فشار در شبکه ارضا نشود. پارامتر پنالتی می باشد که مقدار آن توسط کاربر تعیین می گردد.

متغیرهای تصمیم در مسئله، قطرهای مربوط به لوله های جدید در شبکه است و هدف تخمین مقادیری است که کل هزینه خطوط لوله را مینیمم کند در حالیکه حداقل فشار در شبکه نیز تأمین شود. بنابراین، این معادلات برای طراحی یک سیستم توزیع آب یک مسئله چند جمله ای غیر خطی دشوار[1] (NP-hard) را شکل می دهد. فضای حل بسیار بزرگ است که در عمل تحلیل همه احتمالات به دلیل مدت زمانی که برای محاسبات نیاز است قابل انجام نیست به همین دلیل بایستی از الگوریتم های بهینه سازی برای این منظور استفاده نمود.

الگوریتم بهینه سازی جامع ذرات (Particle Swarm Optimization Algorithm)

در الگوریتم بهینه سازی جامع ذرات (PSO)، هر راه حل یک جمعیت از پرندگان است که به عنوان یک ذره نیز مطرح شده است. در این مجموعه، پرندگان دارای هوش مصنوعی فردی هستند و رفتار اجتماعی و مختصات حرکتشان را به سمت یک مقصد خاص توسعه می دهند(Shi and Eberhart, 1998)؛بنابراین، هر پرنده در فضای جستجو از موفقیت فعلی که دارد به سمت بهترین مقصد تجربه شده در جمعیت پروازمی نماید و این فرآیند تا زمانی ادامه پیدا می کند که پرنده به موفقیت مطلوب برسد. هدف در این فرآیند برقراری ارتباط بین هوش فردی یا تعامل اجتماعی است.

در ابتدا، فرایند از یک مجموعه از ذرات شروع می شود، هریک از آنها یک راه حل برای مسئله هیدرولیکی را شامل می شود که بطور تصادفی تولید شده است و سپس جستجوها برای تعیین راه حل بهینه در طی تکرارهای متوالی صورت می گیرد. i- امین ذره در ارتباط با یک موقعیت در فضای sبعدی است، که sتعداد متغیرهای تصمیم گیری مسئله را نشان می دهد . مقادیر متغیرهای s که موقعیت ذرات را تعیین می کنند، یک راه حل ممکن از مسئله بهینه سازی است. هر ذره i به طور کامل توسط سه بردار مشخص می شود؛ بردار $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \ldots, x_{is})$ که موقعیت کنونی ذره است، بردار $Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \ldots, y_{is})$ بهترین موقعیتی است که ذره در تکرار قبلی به آن رسیده است و بردار سرعت ذره که با $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \ldots, v_{is})$ نشان داده می شود. در هر چرخه، هدف شناسایی ذره ای است که بهترین موقعیت لحظه ای را در مسئله دارد؛ سپس موقعیت این ذره به عنوان موقعیت جدید X_i^{it}در محاسبات برای هر ذره در اجتماع وارد می شود. این محاسبات بر اساس دو رابطه زیر صورت می گیرد:

$$V_i^{iter+1} = wV_i^{iter} + c_1 rand()(Y_i^{iter} - X_i^{iter}) + c_2 rand()(Y_*^{iter} - X_i^{iter}) \quad (۸)$$

$$X_i^{iter+1} = X_i^{iter} + V_i^{it} \quad (۹)$$

که V_i^{iter+1} سرعت جدید ذره تعریف می شود؛ C_1 و C_2 دو

1- Non-deterministic Polynomial-time

قید مثبتی هستند که به ترتیب ضریب یادگیری شخصی[1] و ضریب یادگیری جهانی[2] (جمعی) نامیده می شوند؛ ()rand تابعی است که اعداد تصادفی بین صفر تا یک تولید می کند (دو عدد تصادفی مستقل در معادله ۸ وارد می شوند)؛ Y_8 بهترین حل کنونی در میان ها است. یک فاکتور اینرسی است که برای کنترل تأثیر سرعت های قبلی روی سرعت های کنونی معرفی شد و مقدار مجاز آن در الگوریتم PSOاستاندارد در بازه (۰/۹-۰/۴) تغییر می کند. مقدار در ابتدای استفاده از این الگوریتم ثابت فرض می شد اما نتایج تجربی نشان داد که بهتر است در ابتدای فرایند جستجو، جهت بهبود جستجوی فراگیر در فضای تصمیم، مقدار زیادتری برای این پارامتر در نظر گرفته شده و بتدریج برای کنترل تعادل بین جستجوی جهانی و جستجوی محلی در طی تکرار های متوالی، بصورت خطی با زمان کاهش یابد(Shi and Eberhart, 1998a, 1998b).

در این پژوهش برای کاهش مقدار W در هر تکرار از یک ضریب ثابت به نام w_{damp} استفاده شد. البته تعیین مقدار مناسب w_{damp} بسیار اهمیت دارد و می تواند بر کاهش یا افزایش سرعت همگرایی الگوریتم تأثیر بسزایی داشته باشد.

$$w^{iter+1} = w^{iter} \times w_d \qquad (۱۰)$$

برای کنترل تغییرات سرعت ذرات، دامنه های بالا و پایین به ترتیب زیر معرفی می شوند:

$$V_{min} \le V \le V_i \qquad (۱۱)$$

که V_{max} و V_{min} ماکزیمم و مینیمم سرعت مجاز برای هر ذره است و معمولاً $V_{max} = -V_{min}$ فرض می شود.

الگوریتمی که در بالا توضیح داده شد، به عنوان الگوریتم PSOاستاندارد مطرح شده که برای سیستم های پیوسته استفاده می شود و نمی تواند برای مسائل گسسته کاربردی باشد. دیدگاههای متفاوتی برای ارتباط مسائل گسسته با الگوریتم PSOمطرح است(Al-Kazemi and Mohan, 2002; Shi et al., 2007). در یکی از این دیدگاه ها، این الگوریتم فقط بخش های صحیح بردار سرعت را دریافت می کند، از این رو سرعت های جدید V_i^{iter+1} عدد صحیح هستند و در نتیجه موقعه های جدید بردار سرعت اعداد صحیح خواهند بود.

بر اساس این نظریه معادله ۸ به شکل زیر تغییر می کند:

$$V_i^{iter+1} = \text{fix}(w^{iter} V_i^{iter} + c_1 rand()(Y_i^{iter} - X_i^{iter}) + c_2 rand()(Y^{iter} - X_i^{iter})) \qquad (۱۲)$$

که fix() بیانگر این است که فقط قسمت صحیح نتایج قابل قبول است. علاوه بر این سرعت قطعی نمی تواند از محدودیت ایجاد شده در معادله ۱۱ تجاوز کند. اگر $V_i^{iter+1} > V_{max}$ آنگاه $V_i^{iter+1} = V_{max}$ ، و برای $V_i^{iter+1} < V_{min}$ ؛ $V_i^{iter+1} = V_{min}$ در هر تکرار i فرض می شود. موقعیت جدید ذره نیز از رابطه ۹ به شرح زیر و طبق فرایند استاندارد PSO محاسبه می شود. اگر $X_i^{iter+1} < 0$ باشد، $X_i^{iter+1} = 0$ در نظر گرفته می شود. در هر مسئله گسسته اگر $X_i^{iter+1} > X_{max}$ که X_{max} یک موقعیت ماکزیمم از پیش تعریف شده باشد سپس مشابه سرعت، $X_i^{iter+1} = X_{max}$ فرض می شود و به طور مشابه اگر $X_i^{iter+1} < X_{min}$ آنگاه $X_i^{iter+1} = X_{min}$ در این مقاله، X_{min} و X_{max} ماکزیمم و مینیمم قطرهای قابل انتخاب برای هر شبکه است و V_{max} از رابطه زیر محاسبه شده است:

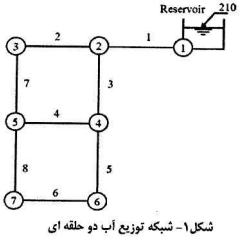
$$V_{max} = 0.5 * (X_{max} - X_n) \qquad (۱۳)$$

نتایج و بحث

در ادامه عملکرد الگوریتم PSOبر روی سه مثال شناخته شده در مسائل بهینه سازی شبکه های توزیع آب بررسی می شود. برای بدست آوردن بهترین مقادیر w ، c_1 و c_2 سعی شد با استفاده از پژوهش های پیشین(Shi et al., 2007; Liao et al., 2007; Jina et al., 2007)و بازه مجاز این پارامترها، پس از انجام تکرار های متوالی بهترین مقادیر آنها برای هر شبکه ارائه شود.

مثال ۱: شبکه دوحلقه ای (Two-loop network)

شبکه دو حلقه ای که در ابتدا توسط (Alperovits and Shamir, 1977) معرفی شد در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل۱- شبکه توزیع آب دو حلقه ای

این شبکه شامل دوحلقه می باشد که از ۷ گره و ۸ لوله تشکیل

1- Personal Learning Coefficient
2- Global Learning Coefficient

شده است و از یک مخزن با هد ثابت ۲۱۰ متر تغذیه می شود.طول تمامی لوله ها ۱۰۰۰ متر و ضریب هیزن ویلیامز آنها ۱۳۰ می باشد. مینیمم فشار مجاز در هر گره ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. ۱۴ قطر تجاری برای طراحی شبکه معرفی شده اند که به همراه هزینه در واحد طول آنها در جدول ۱و مصارف و ارتفاع گره ها در جدول ۲ آورده شده است.بنابراین در فضای جستجوی مسئله $۱۴^{۹}=۱/۳۸\times۱۰^{۹}$حالت مختلف وجود دارد، که حل مسئله را با دشواری روبرو می کند.

جدول۱- سایز و هزینه لوله های قابل انتخاب برای شبکه دو حلقه‌ای

شماره لوله	قطر (mm)	هزینه ($/m)	شماره لوله	قطر (mm)	هزینه ($/m)
۱	۲۵/۴	۲	۸	۲۰۴/۸	۵۰
۲	۵۰/۸	۵	۹	۳۵۵/۶	۶۰
۳	۷۶/۲	۸	۱۰	۴۰۶/۴	۹۰
۴	۱۰۱/۶	۱۱	۱۱	۴۵۷/۲	۱۲۰
۵	۱۵۲/۴	۱۶	۱۲	۵۰۸	۱۷۰
۶	۲۰۳/۲	۲۳	۱۳	۵۵۸/۸	۳۰۰
۷	۲۵۴	۳۲	۱۴	۶۰۹/۶	۵۵۰

با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می شود که پس از بهینه‌سازی این شبکه با الگوریتم PSO، مینیمم مطلق هزینه ۴۱۹۰۰۰ دلار به طور متوسط پس از ۳۱۰۰ بار ارزیابی تابع هدف[1](NFE) بدست آمد که نسبت به سایر الگوریتم ها برتری داشته است (شکل۲).

جدول۲- مشخصات گره ها برای شبکه دو حلقه ای

شماره گره (ID)	ارتفاع (m)	مصرف (m^3/h)
۲	۱۸۰	۱۰۰
۳	۱۹۰	۱۰۰
۴	۱۸۵	۱۲۰
۵	۱۸۰	۲۷۰
۶	۱۹۵	۳۳۰
۷	۱۹۰	۲۰۰
(مخزن)۱	۲۱۰	-۱۱۲۰

در طی انجام محاسبات در این مثال مقدار ضریب ثابت هیزن ویلیامز ω=۱۰/۶۶۷ است در صورتیکه در الگوریتم GA و SA، ω=۱۰/۵۰۸۸ و در الگوریتم HS، ω=۱۰/۵۸۷۹ در نظر گرفته شده است. تأثیر ضریب ω به این دلیل مورد بررسی قرار می گیرد که با افزایش آن افت در طول لوله ها نیز افزایش می یابد و در نتیجه بایستی قطر لوله ها را بزرگتر انتخاب نمود.

بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم PSO برای این شبکه w_{damp}=۰/۹۸ ، $c_1=c_2$=۲/۰۵ ، w=۰/۴ مثال جمعیت اولیه در ابتدای شروع برنامه ۱۰۰ و شرایط خاتمه برای الگوریتم نیز حداکثر ۳۰ تکرار لحاظ شد.

جدول۳- نتایج حاصل برای شبکه دو حلقه ای

مدل	هزینه ($)	NFE	ω
GA	۴۱۹۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۰/۵۰۸۸
SA	۴۱۹۰۰۰	۲۵۰۰۰	۱۰/۵۰۸۸
SFLA	۴۱۹۰۰۰	۱۱۳۲۳	۱۰/۶۶۷
HS	۴۱۹۰۰۰	۵۰۰۰	۱۰/۵۸۷۹
SS	۴۱۹۰۰۰	۳۲۱۵	۱۰/۶۶۷
PSO (This work)	۴۱۹۰۰۰	۳۱۰۰	۱۰/۶۶۷

مثال ۲: شبکه توزیع آب هانوی (Hanoi network)

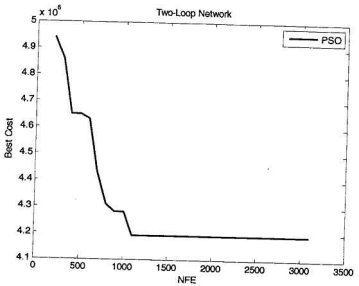
شبکه توزیع آب هانوی اولین بار توسط (Fujiwara and Khang, 1990)مورد مطالعه قرار گرفت شکل ۳. این شبکه از ۳۴ لوله و ۳۲ گره با مشخصات داده شده در جدول ۴ و یک مخزن آب در ارتفاع ۱۰۰ متر تشکیل شده است. دبی مصرفی گره ها بر حسب متر مکعب بر ساعت در شکل ۳ نیز نشان داده شده است.

حداقل فشار مجاز برای تمامی گره ها ۳۰ متر و ضریب هیزن- ویلیامز تمامی لوله ها برابر ۱۳۰ می باشد. در این مثال ۶ قطر برای هر لوله از شبکه قابل انتخاب است در نتیجه کل فضای جستجو شامل $۶^{۳۴}=۲/۸۶۵\times۱۰^{۲۶}$ احتمال ممکن برای طراحی می باشد. در جدول ۵ مقادیر هزینه در واحد طول هر لوله برای قطرهای تجاری قابل انتخاب ارائه شده است.

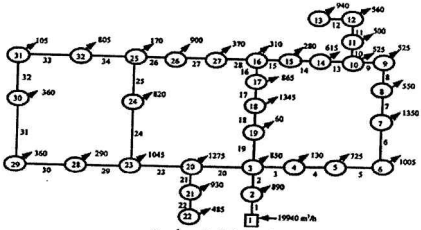
در این تحقیق هزینه $۶/۰۹۷\times۱۰^{۶}$ دلار پس از شبیه سازی با نرم افزار EPANET 2.0 (ω=۱۰/۶۶۷) به طور متوسط پس از ۳۰۳۰۰ بار ارزیابی تابع هدف بدست آمد شکل ۴. جدول ۶ بطور کامل نتایج بدست آمده از الگوریتم PSO را در مقایسه با سایر الگوریتم ها نشان می دهد. در الگوریتم های SA و HS مینیمم هزینه $۶/۰۵۸\times۱۰^{۶}$ دلار گزارش شده است در حالیکه ω=۱۰/۵۰۸۸ است که اگر راه حل پیشنهاد شده توسط این الگوریتم ها با نرم افزار EPANET 2.0 (ω=۱۰/۶۶۷) شبیه سازی شود حداقل مینیمم فشار ۳۰ متر در تمام گره ها رعایت نمی شود (Wanga et al., 2012).

پس از آنالیز حساسیت بهترین مقادیر پارامترهای الگوریتم برای این شبکه به این ترتیب بدست آمد: w=۰/۶ ، $c_1=c_2$=۲/۰۵ و w_{damp}=۰/۹۹۸. ماکزیمم تکرار نیز برای شرط توقف الگوریتم ۱۰۰ و اندازه جمعیت اولیه نیز ۳۰۰ در نظر گرفته شد.

1Number of Objective Function Evaluations



شکل۲- نمودار همگرایی الگوریتم PSOدربهینه سازی شبکه دو حلقه ای



شکل۳- شبکه توزیع آب هانوی

جدول٤- مشخصات گره ها و لوله های شبکه هانوی

	شماره لوله	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	
مشخصات لوله ها	طول لوله(m)	۱۰۰	۱۳۵۰	۹۰۰	۱۱۵۰	۱۳۵۰	۴۵۰	۸۵۰	۸۵۰	۸۰۰	۹۵۰	۱۲۰۰	
	شماره لوله	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	
	طول لوله(m)	۳۵۰۰	۸۰۰	۵۰۰	۵۵۰	۲۷۳۰	۱۷۵۰	۸۰۰	۴۰۰	۲۲۰۰	۱۵۰۰	۵۰۰	
	شماره لوله	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴
	طول لوله(m)	۲۶۵۰	۱۲۳۰	۱۳۰۰	۸۵۰	۳۰۰	۷۵۰	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۱۶۰۰	۱۵۰	۸۶۰	۹۵۰
مشخصات گره ها	شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	
	مصرف(m^3/h)	-۱۹۹۴۰	۸۹۰	۸۵۰	۱۳۰	۷۲۵	۱۰۰۵	۱۳۵۰	۵۵۰	۵۲۵	۵۲۵	۵۰۰	
	شماره گره	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	
	مصرف(m^3/h)	۵۶۰	۹۴۰	۶۱۵	۲۸۰	۳۱۰	۸۶۵	۱۳۴۵	۶۰	۱۲۷۵	۹۳۰	۴۸۵	
	شماره گره	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲		
	مصرف(m^3/h)	۱۰۴۵	۸۲۰	۱۷۰	۹۰۰	۳۷۰	۲۹۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۰۵	۸۰۵		

جدول۵- سایز و هزینه لوله های قابل انتخاب برای شبکه هانوی

شماره لوله	قطر (mm)	قطر (in)	هزینه ($/m)
۱	۳۰۴/۸	۱۲	۴۵/۷۲۶
۲	۴۰۶/۴	۱۶	۷۰/۴۰۰
۳	۵۰۸	۲۰	۹۸/۳۷۸
۴	۶۰۹/۶	۲۴	۱۲۹/۳۳۳
۵	۷۶۲	۳۰	۱۸۰/۷۴۸
۶	۱۰۱۶	۴۰	۲۷۸/۲۸۰

مثال ۳: شبکه توزیع آب کادو (Kadu network)

یک شبکه توزیع آب با دو مخزن، ۲۶ گره، ۳۴ لوله و ۹ حلقه در شکل ۵ نشان داده شده است که در ابتدا توسط (Kadu et al., 2008)معرفی و بهینه شد. دو مخزن با هدهای ۱۰۰ و ۹۵ متر شبکه را به ترتیب از طریق گره های ۱ و ۲ تغذیه می کنند. شماره گره ها و لوله ها و دبی مصرفی هر گره بر حسب متر مکعب بر دقیقه در شکل نشان داده شده است و ضریب هیزن ویلیامز برای تمامی لوله ها ۱۳۰ می باشد. سایر اطلاعات از قبیل طول لوله ها و مینیمم فشار مورد نیاز برای هر گره در جدول ۷ ارائه شده است. ۱۴ قطر تجاری قابل انتخاب برای بهینه سازی این شبکه وجود دارد که به همراه هزینه در واحد طول آنها در جدول۸ بیان شده است.در نتیجه در این مسئله نیز 14^{34} حالت مختلف برای طراحی امکان پذیر است که در غیاب روش‌های بهینه سازی بایستی مورد ارزیابی قرار گیرد.

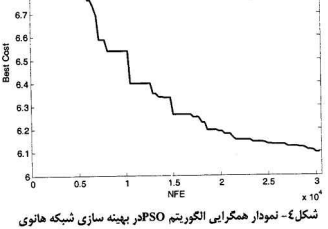
این شبکه قبلا توسط الگوریتم های ژنتیک و ترکیب آنها با برنامه ریزی خطی بهینه شده که مینیمم هزینه ارائه شده در این روش ها ۱۳۱,۳۱۲,۸۱۵ روپیه است که پس از ۴۴۴۰ بار ارزیابی تابع هدف حاصل شده است (Haghighi et al.,2012) ولی در این پژوهش الگوریتم PSOپس از ۴۵۱۵۰ بار ارزیابی تابع هدف، مینیمم هزینه ۱۳۰,۶۶۶,۰۴۳روپیه را بدست آورد جدول ۹. ماکزیمم تعداد ارزیابی تابع هدف در مقایسه با دو روش قبلی افزایش یافت ولی در مقابل هزینه نهایی شبکه کاهش داشت.

نمودار شکل ۶ نشان می دهد که مینیمم هزینه پس از ۲۲۰۰ بار ارزیابی تابع هدف ثابت می شود و کارایی الگوریتم در افزایش سرعت همگرایی مشهود است.

پس از بهینه سازی این شبکه با الگوریتم PSO، مقادیر نهایی برای پارامترهای آن به این ترتیب انتخاب شد: w=۰/۴ ، $c_1=c_2=2/05$ و $W_{damp}=0/998$ همچنین بهینه سازی بر اساس جمعیت اولیه ۱۵۰ شروع شد و در ۳۰۰ تکرار نیز خاتمه یافت.

نتیجه گیری

طراحی بهینه شبکه های توزیع آب همواره یکی از مسائلی است که محققین و مهندسین در طی سالیان اخیر بر روی آن تمرکز کرده اند. غیر خطی، غیر همگرا و گسسته بودن ماهیت این مسائل همواره باعث دشواری در حل آنها شده است.

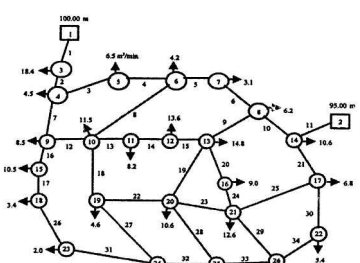


شکل٤- نمودار همگرایی الگوریتم PSOدر بهینه سازی شبکه هانوی

جدول۶- نتایج حاصل برای شبکه هانوی

	قطرهای لوله ها (اینچ)					
شماره لوله	HS	SA	SCE	ACO	GA	PSO (This work)
۱	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۴	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۶	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۷	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۸	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۴۰
۹	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۴۰
۱۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۱۱	۲۴	۲۴	۲۰	۲۴	۲۴	۲۴
۱۲	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
۱۳	۲۰	۲۰	۱۶	۲۰	۲۰	۲۰
۱۴	۱۶	۱۶	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶
۱۵	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۱۶	۱۲	۱۲	۲۴	۱۲	۱۲	۱۲
۱۷	۱۶	۱۶	۲۰	۲۰	۱۶	۱۶
۱۸	۲۰	۲۰	۳۰	۲۴	۲۰	۲۴
۱۹	۲۰	۲۰	۳۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲۱	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۲۳	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲۴	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۲۵	۳۰	۳۰	۲۴	۳۰	۳۰	۳۰
۲۶	۲۰	۲۰	۱۲	۲۰	۲۰	۲۰
۲۷	۱۲	۱۲	۲۰	۱۲	۱۲	۱۲
۲۸	۱۲	۱۲	۲۴	۱۲	۱۲	۱۲
۲۹	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
۳۰	۱۲	۱۲	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
۳۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۳۲	۱۶	۱۶	۱۶	۱۲	۲۰	۲۰
۳۳	۱۶	۱۶	۲۰	۱۶	۱۶	۱۶
۳۴	۲۴	۲۴	۲۴	۲۰	۲۰	۲۰
هزینه($ ۱۰^۶)	۶/۰۵۶	۶/۰۵۶	۶/۲۲۰	۶/۱۳۴	۶/۱۹۵	۶/۰۹۷
NFE	۲۰۰۰۰۰	۵۳۰۰۰	۲۵۴۰۲	۸۵۵۷۱	۱۰۰۰۰۰۰	۳۰۳۰۰
ω	۱۰/۵۰۸۸	۱۰/۵۰۸۸	۱۰/۶۶۷	۱۰/۶۶۷	۱۰/۹۰۳۱	۱۰/۶۶۷

بدین منظور دو هدف اساسی در بهینه سازی شبکه هـای توزیـع آب مطرح است: ۱- بدسـت آوردن راه حلـی جهـانی و ۲- توسـعه و ایجاد یک فرایند محاسباتی موثر (Haghighi et al.,2012). در ایـن مقاله پس از انجام اصلاحاتی بر روی الگوریتم PSOاستاندارد کـاربرد آن در طراحی بهینه شبکه های توزیع آب ارائه شد. عملکرد الگـوریتم PSOمطرح شده در این پـژوهش بـر روی سـه مثـال شـناخته شـده بررسی و نتایج با تحقیقات نویسندگان قبلی مقایسه شد.



شکل۵- شبکه توزیع آب کادو

جدول۷- مشخصات گره ها و لوله های شبکه کادو

	شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱		
	طول لوله(m)	۳۰۰	۸۲۰	۹۴۰	۷۳۰	۱۶۲۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۴۰۰	۱۱۷۵	۷۵۰	۲۱۰		
مشخصات	شماره لوله	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲		
لوله ها	طول لوله(m)	۷۰۰	۳۱۰	۵۰۰	۱۹۶۰	۹۰۰	۸۵۰	۶۵۰	۷۶۰	۱۱۰۰	۶۶۰	۱۱۷۰		
	شماره لوله	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	
	طول لوله(m)	۹۸۰	۶۷۰	۱۰۸۰	۷۵۰	۹۰۰	۶۵۰	۱۵۴۰	۷۳۰	۱۱۷۰	۱۶۵۰	۱۳۲۰	۳۲۵۰	
	شماره گره	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
مشخصات	مصرف(m^3/min)	–	–	۱۸/۴	۴/۵	۶/۵	۴/۲	۳/۱	۶/۲	۸/۵	۱۱/۵	۸/۲	۱۳/۶	۱۴/۸
گره ها	شماره گره	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶
	مصرف(m^3/min)	۱۰/۶	۱۰/۵	۹	۶/۸	۳/۴	۴/۶	۱۰/۶	۱۲/۶	۵/۴	۲	۴/۵	۳/۵	۲/۲

جدول۸- سایز و هزینه لوله های قابل انتخاب برای شبکه کادو

شماره لوله	قطر (mm)	هزینه (rupees/m)	شماره لوله	قطر (mm)	هزینه (rupees/m)
۱	۱۵۰	۱,۱۱۵	۶	۴۰۰	۴,۲۵۵
۲	۲۰۰	۱,۶۰۰	۷	۴۵۰	۵,۱۷۲
۳	۲۵۰	۲,۱۵۴	۸	۵۰۰	۶,۰۹۲
۴	۳۰۰	۲,۷۸۰	۹	۶۰۰	۸,۱۸۹
۵	۳۵۰	۳,۴۷۵	۱۰	۷۰۰	۱۰,۶۷۰

در هر سه مثال الگوریتم PSOنشان داد کـه عـلاوه بـر افـزایش سرعت همگرایی، قادر است راه حـل بهینـه را در فضـای جسـتجوی مسأله پیدا کند. پس از بررسی پارامترهـای الگـوریتم PSOدر هرسـه شبکه مرجع می توان نتایج زیر را بیان نمود:

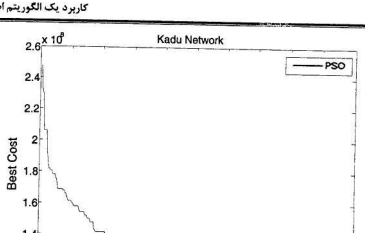
با توجـه بـه فـاکتور w کـه مقـدار مجـاز آن در الگـوریتم PSO استاندارد در بازه (۰/۹-۰/۴) است، می توان نتیجه گرفت کـه هرچـه مقدار w به ۰/۴ نزدیکتر باشد همگرایی سریعتر اتفاق مـی افتـد ولـی اگر مساله دارای مینیمم محلی های بیشمار باشد مانند (شبکه هانوی) این احتمال وجود دارد که الگوریتم در مینیمم های محلی گرفتار شود. برعکس با افزایش مقدار w به ۰/۹ الگوریتم راه حل ها را با احتیـاط بیشتری بررسی می کند ولی بایسـتی تعـداد تکـرار را در ایـن حالـت افزایش داد.

با افزایش تعداد متغیر های تصمیم مسأله (قطر لوله های شـبکه) بایستی اندازه جمعیت اولیه نیز افزایش یابد که مشاهده مـی شـود در

شبکه هانوی و کادو اندازه جمعیت اولیه نسبت به شبکه دو حلقـه ای بیشتر است.

جدول۹- نتایج حاصل برای شبکه کادو

قطرهای لوله ها (میلیمتر)			
شماره لوله	GA-ILP	GA	PSO (This work)
۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰
۲	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰
۳	۴۰۰	۴۰۰	۵۰۰
۴	۳۵۰	۳۵۰	۲۵۰
۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۶	۲۵۰	۲۵۰	۲۰۰
۷	۸۰۰	۸۰۰	۹۰۰
۸	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۹	۴۰۰	۴۰۰	۶۰۰
۱۰	۵۰۰	۵۰۰	۷۰۰
۱۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰
۱۲	۷۰۰	۷۰۰	۷۰۰
۱۳	۸۰۰	۸۰۰	۵۰۰
۱۴	۴۰۰	۴۰۰	۴۵۰
۱۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۱۶	۵۰۰	۵۰۰	۴۵۰
۱۷	۳۵۰	۳۵۰	۳۰۰
۱۸	۳۵۰	۳۵۰	۴۵۰
۱۹	۱۵۰	۱۵۰	۵۰۰
۲۰	۱۵۰	۲۰۰	۱۵۰
۲۱	۷۰۰	۷۰۰	۶۰۰
۲۲	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۲۳	۴۵۰	۴۰۰	۱۵۰
۲۴	۳۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۲۵	۷۰۰	۷۰۰	۵۰۰
۲۶	۲۵۰	۲۵۰	۱۵۰
۲۷	۲۵۰	۲۵۰	۳۵۰
۲۸	۲۰۰	۲۰۰	۳۵۰
۲۹	۳۰۰	۳۰۰	۱۵۰
۳۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
۳۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
۳۲	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۳۳	۲۰۰	۲۵۰	۲۰۰
۳۴	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
هزینه (rupees)	۱۳۱,۳۱۲,۸۱۵	۱۳۱,۶۷۸,۹۳۵	۱۳۰,۶۶۶,۰۴۳
NFE	۴۴۴۰	۳۶۰۰۰۰	۴۵۱۵۰
ω	۱۰/۶۶۷	۱۰/۶۶۷	۱۰/۶۶۷



شکل۶- نمودار همگرایی الگوریتم PSOدر بهینه سازی شبکه کادو

در این سه شبکه ضرایب c_1 و c_2 با توجه به مقادیر پیشنهاد شده آنها توسط Eberhart در بازه (۳-۲) تغییر کرد و تمام حالات مختلف مورد بررسی قرار گرفت ولی در نهایت این نتیجه حاصل شد که بهترین مقادیر این ضرایب برای هر سه شبکه $c_1=c_2=2/05$ است.

در این پژوهش از فاکتور جدید به نام w_{damp} برای کاهش w در هر تکرار و تاثیر سرعت های پیشین بر سرعت های کنونی استفاده شد. مقدار این فاکتور در افزایش سرعت همگرایی و گرفتار نشدن در مینیمم های محلی بسیار موثر است ولی بررسی ها در این پژوهش نشان داد که بهتر است مقدار این فاکتور در بازه (۰/۹۹۸-۰/۹۸۰) تغییر کند و هر چه سایز شبکه بزرگتر شود بایستی مقدار آن را نیز افزایش داد.

در نهایت می توان بیان کرد که الگوریتم PSOیک الگوریتم توانمند در حل مسائل بهینه سازی شبکه های توزیع آب است و با تعداد پارامترهای اندک، اجرای آسان و سرعت همگرایی بالایی که دارد می توان راه حل بهینه را در مدت زمان کمتر نسبت به سایر الگوریتم ها پیدا کند.

مراجع

Al-Kazemi B., Mohan C.K., 2002. Multi-phase discrete particle swarm optimization, in: JCIS, , pp. 622–625.

Alperovits E., and ShamirU. 1977. Design of optimal water distribution systems, Water Resour. Res. 13 (6) 885–900.

Cunha M., and Sousa J. 1999. Water distribution network design optimization: Simulated Annealing Approach. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 125 (4) 215–221.

Dandy G.C., Engelhardt M.O. 2006. Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains, Journal of Water Resources Planning and Management 132 (2) 79–88.

Dong Y., Tang B.X.J., Wang D. 2005. An application of swarm optimization to nonlinear programming, Computers & Mathematics with Applications 49 (11–12).1655–1668.

Eusuff M.M., and Lansey E.K. 2003. Optimisation of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm, J. Water Resour. Plan. Manage. 129 (3) 210–225.

Farmani, R., Wright, J.A., Savic, D.A. and Walters, G.A., 2005. Self-Adaptive Fitness Formulation for Evolutionary Constrained Optimization of Water Systems. Journal of Computing in Civil Engineering, 19(2), 212-216.

Fujiwara O., and Khang D.B. 1990. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks.Water Resour. Res. 26 (4) 539–549.

Geem Z.W. 2006. Optimal cost design of water distribution networks using harmony search, Eng. Optim. 38 (3) 259–280.

Haghighi A., Samani M.V.H, Samani M.V. Z., 2011. GA-ILP Method for Optimization of Water Distribution Networks-Water Resour Manage. 25:1791–1808

Jina Y.-X., Chenga H.-Z., Yanb Zhang J.-Y., L. 2007. New discrete method for particle swarm optimization and its application in transmission network expansion planning, Electric Power

Proceedings, IEEEWorld Congress on Computational Intelligence. pp. 69–73.

Shi, Y., and Eberhart, R. C.,(1998a). Parameter Selection in Particle Swarm Optinmization. In:Porto VW, Saravanan N, Wagen D and Eiben AE (eds) Evolutionary Programming . VII, PP. 611-616. Springer.

Shi, Y., and Eberhart, R. C., (1998b). A modified particle Swarm optimizer. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, AK, Anchorage.

Shi X.H., Liang Y.C., Lee H.P., Lu C., Wang Q.X. 2007. Particle swarm optimization-based algorithms for tsp and generalized tsp, Information Processing Letters 103 (5) 169–176.

Wanga H., Liua S., Menga F., Lia M. 2012. Gene Expression Programming Algorithms for Optimization of Water Distribution Networks -The Second SREE Conference on Engineering Modelling and Simulation (CEMS).

Wu Z.Y., and Simpson A.R. 2001. Competent Genetic-Evalutionary Optimization of Water Dstribution Systems. Journal of Computation in Civil Engineering, 15 (2), pp 89-101.

Wu Z.Y., and Walski T. 2005. Self-adaptive penalty approach compared with other constraint-handling techniques for pipe line optimization. J Water Resour Plan Manage 131(3):181–192.

Zecchin A.C., Simpson A.R., Maier H.R., Nixon J.B., 2005. Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization, IEEE Transactions on Evolutionary Computation 9 (2) 175–191.

Systems Research 77 (3–4) 227–233.

Kadu M.S., Gupta R., and Bhave P.R. 2008. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. J Water Resour Plan Manage 134(2):147160.

Kennedy J., Eberhart R.C. 1995. Particle swarm optimization, in: IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, IEEEServiceCenter, Piscataway, NJ.

Liao C.-J., Tseng C.-T., Luarn P. 2007. A discrete version of particle swarm optimization for flowshop scheduling problems, Computers a Operation Research 34 (10) 3099–3111.

Lin M.D., Liu Y.H., Liu G.F., and Chu C.W. 2007. Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks. Eng. Optim. 39 (7) 857.

Liong S.-Y., Atiquzzaman M. 2004. Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. Journal of The Institution of Engineers. Singapore 44 (1) 93–107.

Maier H.R., Simpson A.R., Zecchin A.C., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y., C.L. Tan, 2003. Ant colony optimization for design of water distribution systems, Journal of Water Resources Planning and Management 129 (3) 200–209.

Montalvo, I., Izquierdo, J., P´erez, R. and Tung, M.M. 2008. Particle Swarm Optimization applied tothe design of water supply systems. Computers and Mathematics with Applications, doi:10.1016/j.camwa.2008.02.006.

Savic D.A., and Walters G.A. 1997. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 123 (2).67–77.

Shi Y., Eberhart R., .1998. A modified particle swarm optimizer, in: Evolutionary Computation

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/٤/۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 7, Fall 2013, p. 389-401

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد۷، پاییز ۱۳۹۲، ص. ۴۰۱-۳۸۹

The Application of An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm in Design of Water Distribution Systems

A.Moghaddam[1*], A. Alizadeh[2], A. Farid[3], A.N. Ziaei[4], D. Fallah[5]

Abstract

Optimal design of water distribution system is a real problem and its aim is finding the best solution for transferring of water from the reservoir to consumers;so that, all their needs to be supplied with the lowest cost. Many researchers proposed various researches such as linear, nonlinear programming, global optimization,and evolutionary algorithms for minimizing the cost of these systems. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, which is an evolutionary algorithm originally introduced for solving optimization problem with continuous variables, but later it was developed for problems with discretevariables. Inthis research, for minimizing the cost of waterdistribution system design after modifications in continuous PSO algorithm, the program was linked to the hydraulic simulator (EPANET 2.0 in Matlab environment). Finally, for improving the algorithm performance, and obtaining the best values of PSO in optimization and water distribution system design, we were used three benchmark networks from previous studies that are different in layout and also the number of pipes, which they called Two-loop, Hanoi, and Kadu networks. From Two-loop network optimization, the least-cost network was estimated from 3100 number of objective function evaluation, which caused to improve the results, when compared to the pervious algorithms. In Hanoi network, the minimum cost was obtained 6.097×10^{6} with =10.667 value, which was less than the results of other networks. Additionally, in Kadu network the cost was obtained 130,666,043 Indian rupees, which was less when compare to the other methods. The results showed a good performance of this algorithm when compared to the other algorithms.

Keywords: Water distribution systems, PSO algorithm, Optimization, EPANET2.0.

1,2,3,4-M.Sc Student of Water Resources Engineering, Professor and Assistant Professor Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: Alireza.Moghaddam@yahoo.com)
5- Member of Mechanical Engineering Department, ElmiSanatiKhorasan University