

# الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی برای طراحی شبکه‌های توزیع آب

کاظم محمدی اقدم<sup>۱</sup>، ایرج میرزایی<sup>۲</sup>، نادر پورمحمد<sup>۳</sup>، محمد پورمحمد آقابابا<sup>۴</sup>

پذیرش ۹۳/۱/۲۴

دریافت ۹۲/۱۰/۱۱

## چکیده

این مقاله کاربرد یک نسخه جدید از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات را برای طراحی شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد می‌کند. مسئله بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های توزیع آب حلقوی، به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی NP-Hard شناخته شده است که نمی‌تواند به‌آسانی توسط روش‌های سنتی بهینه‌سازی حل شود. در این مقاله، برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم PSO، مفهوم اندازه گروه دینامیکی به کار گرفته شد. در این سیاست، اندازه گروه به‌صورت دینامیکی مطابق با تعداد تکرار الگوریتم تغییر می‌کند. علاوه بر آن، یک رویه جهش جدید معرفی می‌شود تا خاصیت تنوع‌طلبی الگوریتم PSO را افزایش داده و به‌رهایی از کمینه‌های محلی کمک کند. این نسخه جدید PSO، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی است. الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل طراحی شبکه‌های توزیع آب به کار گرفته شد و دو مثال کاربردی و مقایسه‌ای ارائه شد تا کارایی و مؤثر بودن روش پیشنهادی را نشان دهند.

**واژه‌های کلیدی:** شبکه توزیع آب، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، گروه دینامیکی، ذره جهشی، شرط دینامیکی

## Application of Dynamic Mutated Particle Swarm Optimization Algorithm to Design Water Distribution Networks

*K. Mohammadi-Aghdam<sup>1</sup>, I. Mirzaei<sup>2</sup>, N. Pourmahmood<sup>3</sup>, M. Pourmahmood-Aghababa<sup>4</sup>*

(Received Jan. 1, 2014)

Accepted Apr. 13, 2014)

### Abstract

This paper proposes the application of a new version of the heuristic particle swarm optimization (PSO) method for designing water distribution networks (WDNs). The optimization problem of looped water distribution networks is recognized as an NP-hard combinatorial problem which cannot be easily solved using traditional mathematical optimization techniques. In this paper, the concept of dynamic swarm size is considered in an attempt to increase the convergence speed of the original PSO algorithm. In this strategy, the size of the swarm is dynamically changed according to the iteration number of the algorithm. Furthermore, a novel mutation approach is introduced to increase the diversification property of the PSO and to help the algorithm to avoid trapping in local optima. The new version of the PSO algorithm is called dynamic mutated particle swarm optimization (DMPSO). The proposed DMPSO is then applied to solve WDN design problems. Finally, two illustrative examples are used for comparison to verify the efficiency of the proposed DMPSO as compared to other intelligent algorithms.

**Keywords:** Water Distribution Network, Particle Swarm Optimization (PSO), Dynamic Swarm, Mutated Particle, Hydraulic Conditions.

1. PhD Student of Energy Conversion, Dept. of Mechanical Engineering, Urumia University of Technology, Urumia, Iran  
2. Prof. of Energy Conversion, Dept. of Mechanical Engineering, Urumia University of Technology, Urumia, Iran  
3. Assoc. Prof. of Energy Conversion, Dept. of Mechanical Engineering, University of Urumia, Iran  
4. Assoc. Prof. of Electrical Engineering, Urumia University of Technology, Urumia, Iran (Corresponding Author) (+98 441) 3554180 m.p.aghababa@ee.uut.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران  
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران  
۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک- تبدیل انرژی، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
۴- دانشیار گروه مهندسی برق، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران (نویسنده مسئول)  
m.p.aghababa@ee.uut.ac.ir (۰۴۴۱)۳۵۵۴۱۸۰

گرفته شده است [۱۳]. ایساف و همکاران کاربرد الگوریتم جهش قورباغه در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب را بررسی نموده‌اند [۱۴]. الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده و الگوریتم کولونی مورچگان نیز برای حل این مسئله پیشنهاد شده‌اند [۱۵ و ۱۶]. در پژوهشی که توسط سدکی و همکاران در سال ۲۰۱۲ انجام شد، از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات<sup>۴</sup> برای حل مسئله طراحی شبکه توزیع آب استفاده شده است [۱۷]. ولی به‌خاطر برخی مشکلات مانند گیرکردن در تله کمینه محلی و سرعت همگرایی پایین، جواب‌های خوبی از این روش‌ها به‌دست نیامده است. بنابراین پیشنهاد یک روش اصلاحی برای حل مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب ضروری به‌نظر می‌رسد. الگوریتم PSO در اواسط قرن بیستم به‌عنوان یک روش جدید بهینه‌سازی معرفی شده است [۱۸]. این روش حرکت گروهی ماهی‌ها و پرندگان را شبیه‌سازی می‌کند و کاربردهای زیادی در حل مسائل مختلف مهندسی پیدا کرده است [۱۹-۲۴]. در این روش ابتدا تعدادی از پرندگان به‌عنوان جواب‌های بالقوه، در فضای جستجو پخش می‌شوند. سپس پرندگان (ذرات) بر اساس پارامترهای مختلفی مانند سرعت به جستجوی فضا می‌پردازند. پرندگان از هوش و اطلاعات پرندگان دیگر نیز استفاده می‌کنند. در مقایسه با الگوریتم ژنتیک، الگوریتم PSO مزیت‌هایی مانند داشتن حافظه و استفاده از یافته‌های دیگران را دارا است؛ ولی این الگوریتم دارای دو عیب عمده است: گیرکردن در کمینه محلی و سرعت همگرایی پایین. این دو عیب در مورد مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب که مسئله پیچیده‌ای است، نمایان می‌شود.

هدف اصلی این مقاله معرفی یک الگوریتم PSO اصلاحی برای طراحی شبکه‌های توزیع آب حلقوی بود. هدف بهینه‌سازی، کمینه کردن هزینه لوله‌ها در شبکه بود. فرض شد که توپولوژی شبکه ثابت و معلوم است و مقدار تقاضای آب در هر گروه توسط مصرف‌کنندگان مشخص است. همچنین مقدار آب موجود در مخازن نیز معلوم فرض شد. ابتدا یک اندازه گروه دینامیکی برای الگوریتم PSO پیشنهاد شد تا سرعت همگرایی الگوریتم را افزایش دهد. سپس از یک عملگر جهش جدید برای افزایش تنوع طلبی الگوریتم استفاده شد. الگوریتم جدید معرفی شده به‌نام الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی<sup>۵</sup> نامیده می‌شود. الگوریتم DMPSO برای حل مسائل بهینه‌سازی طراحی شبکه‌های توزیع آب به‌کار گرفته شد و نتایج با روش‌های دیگر موجود مقایسه شدند. برای شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه توزیع آب از نرم‌افزار اپانت<sup>۶</sup> استفاده شد [۲۵].

امروزه شبکه‌های توزیع آب<sup>۱</sup> نقش مهمی را در زندگی شهری و روستایی ایفا می‌کنند. شبکه‌های توزیع آب از اجزای مختلفی مانند لوله‌ها، تانکرها، مخازن، شیرها و بخش‌های دیگر تشکیل شده‌اند که وظیفه رساندن آب به مصرف‌کنندگان را بر عهده دارند. چیدمان‌های متفاوت اجزای شبکه‌های توزیع آب می‌تواند هزینه‌های متفاوتی را به‌وجود آورد. واضح است که در چنین شرایطی، هدف طراحی این است که هزینه کلی شبکه را کمینه کند. کمینه کردن هزینه طراحی شبکه توزیع آب می‌تواند یک مسئله بهینه‌سازی NP-Hard<sup>۲</sup> باشد. مسائل NP-Hard مسائلی هستند که زمان اجرای حل آنها با اندازه ورودی مسئله به‌صورت چندجمله‌ای رابطه ندارد و تاکنون برای آنها راه حل سریع و قابل انجام در زمان معقول پیدا نشده است. چنین مسائل بهینه‌سازی می‌توانند جنبه‌های گوناگونی مانند هزینه نگهداری، هزینه طراحی، هزینه قابلیت اطمینان، هزینه انتخاب مواد و شرایط هیدرولیکی داشته باشند. یک مسئله بهینه‌سازی رایج و کاربردی در رابطه با مسائل طراحی شبکه‌های توزیع آب، پیدا کردن قطره‌های مناسب برای شبکه با فرض معلوم بودن توپولوژی شبکه است. در این موارد، قیودی مانند اصل بقای انرژی و کمینه فشار نیز باید برآورده شوند. در مسئله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با توپولوژی ثابت، هدف اصلی، پیدا کردن قطرهای مناسب لوله‌ها از یک لیست تجاری از پیش مشخص شده است، به‌طوری که قوانین هیدرولیکی شبکه برآورده شود و هزینه کمینه شود. به‌خاطر گسسته بودن متغیرها و پیچیدگی غیرخطی گری معادلات هیدرولیکی دینامیک سیستم، یک مسئله غیرخطی، مقید، غیرهموار، نامحدوب و چندین مودالی حاصل می‌شود که از گروه مسائل NP-Hard است [۱].

از آنجایی که حل مسائل NP-Hard توسط روش‌های بهینه‌سازی سنتی امکان‌پذیر نیست، تا به‌حال از روش‌های متفاوت عددی برای حل مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب استفاده شده است. اولین روش مورد استفاده، روش برنامه‌ریزی دینامیکی بوده است [۲]. بعد از آن روش برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل مسائل طراحی شبکه توزیع آب به‌کار گرفته شدند؛ ولی از آنجایی که این روش‌ها قیود مسئله را بیش از حد ساده کرده‌اند، جواب‌های خوبی به‌دست نیاورده‌اند [۳ و ۴]. اخیراً، استفاده از روش‌های هوشمند در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی رو به افزایش بوده است [۵-۱۱]. پولوگسی و همکاران از الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> برای طراحی شبکه توزیع آب حلقوی استفاده کرده‌اند [۱۲]. در پژوهش دیگری الگوریتم ممتیک برای طراحی شبکه‌های توزیع آب به‌کار

<sup>4</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>5</sup> Dynamic Mutated Particle Swarm Optimization (DMPSO)

<sup>6</sup> EPANET

<sup>1</sup> Water Distribution Networks (WDNS)

<sup>2</sup> Non-deterministic Polynomial-time Hard (NP-Hard)

<sup>3</sup> Genetic Algorithm (GA)

## ۲- مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب

در حالت کلی، شبکه‌های توزیع آب از چندین جز مانند لوله‌ها، تانکرها، مخازن و شیرها تشکیل شده‌اند. در یک شبکه توزیع آب این اجزا به هم متصل می‌شوند تا آب مورد نیاز مصرف‌کننده را تأمین کنند. طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب را می‌توان به صورت انتخاب ترکیب بهینه اجزای شبکه تفسیر کرد، به طوری که محدودیت‌هایی مانند برآورد حداقل فشار و کمترین هزینه ممکن را ارضا کند. از طرف دیگر با فرض ثابت بودن توپولوژی شبکه، مسئله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب به صورت انتخاب قطرهای مناسب لوله‌ها، از یک لیست تجاری موجود قطر لوله تعریف می‌شود، به طوری که هزینه کل لوله‌های مصرفی کمینه شود. محدودیت‌هایی مانند قوانین هیدرولیکی برای پیوستگی جریان و کمینه فشار درخواستی در گره‌های شبکه نیز باید ارضا شوند. در ادامه مشخصه‌های اصلی طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب بیان می‌شود.

### ۱-۲- تعریف و فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی

تعریف ۱- اقطار مناسب لوله‌ها از بین قطرهای موجود در لیست تجاری طوری انتخاب شود تا تابع هزینه زیر کمینه شود

$$\text{Min Cost} = \sum_{i=1}^{\text{npipe}} c_i(D_i) \times L_i \quad (1)$$

که در این رابطه

$c_i(D_i)$  هزینه در واحد طول برای لوله با قطر  $D_i$ ،  $L_i$  طول لوله‌های مصرفی با قطر  $D_i$  و  $\text{npipe}$  بیانگر تعداد کل لوله‌های مورد نیاز است.

فرض ۱- در این پژوهش فرض شد که توپولوژی و ساختار شبکه توزیع و نیز مقدار تقاضای آب در گره‌ها و حداقل فشار مورد نیاز در گره‌ها، معلوم و ثابت هستند.

نکته ۱- تعریف ۱ و فرض ۱ مشخص می‌کنند که قطرهای لوله به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند.

قید ۱- اصل بقای جرم: برای هر گره جریان‌های ورودی و خروجی باید یکسان باشد به عبارت دیگر:

$$\sum Q_{in}^j - \sum Q_{out}^j = Q_e^j \quad \forall j=1,2,\dots,N \quad (2)$$

که در این رابطه

$Q_{in}^j$ ،  $Q_{out}^j$  و  $Q_e^j$  به ترتیب جریان‌های ورودی، خروجی و تقاضا در گره  $j$  هستند و  $N$  تعداد کل گره‌های شبکه توزیع است.

قید ۲- اصل بقای انرژی: برای هر حلقه بسته در شبکه توزیع مقدار

تلفات هد باید صفر باشد.

$$\sum_{i \in \text{loop}_n} \Delta H_i = 0 \quad \forall i = 1, 2, \dots, \text{npipe}; n=1, 2, \dots, NL. \quad (3)$$

که در این رابطه

$H_i$  تلفات هد در لوله  $i$ ،  $NL$  تعداد کل حلقه‌های شبکه توزیع است و  $\Delta_i$  به سه صورت زیر تعریف می‌شود

$$\Delta H_i = H_i^u - H_i^d = \omega \frac{L_i}{C_i^\alpha D_i^\beta} Q_i |Q_i|^{\alpha-1} \quad (4-الف)$$

$$\Delta H_i = H_i^u - H_i^d = f_i \frac{L_i}{2gV_i^2 D_i} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \text{npipe} \quad (4-ب)$$

$$H_i = H_i^u - H_i^d = \frac{V_i^2 n_i^2 L_i}{R_i^{4/3}} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \text{npipe} \quad (4-پ)$$

که در این رابطه

$H_i^u$  و  $H_i^d$  هدهای دو طرف لوله  $i$ ،  $\omega$  ثابت بوده،  $C_i$  ثابت هیزن-ویلیامز،  $\alpha$  و  $\beta$  ضریب رگرسیون،  $f_i$  ضریب اصطکاک،  $V_i$  سرعت و  $n$  ضریب سختی است. در این مقاله از رابطه ۴-الف برای محاسبه هد استفاده شد.

قید ۳- محدودیت‌های فشار: یک فشار حداقل و حداکثر باید در هر گره برآورد شود

$$P_j^{\min} \leq P_j \leq P_j^{\max} \quad \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

که در این رابطه

$P_j$  فشار هد در گره  $j$ ،  $P_j^{\min}$  کمینه فشار و  $P_j^{\max}$  بیشینه فشار مجاز در گره  $j$  است.

در این پژوهش بر اساس تجربه، حداقل فشار در شبکه ۳۰ متر لحاظ شد که نیاز مصرف‌کنندگان را تأمین می‌کند. بیشینه فشار نیز با توجه به شرایط مسئله انتخاب شد.

قید ۴- محدودیت‌های سرعت: یک سرعت حداقل و حداکثر باید در هر گره برآورد شود

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \text{npipe} \quad (6)$$

که در این رابطه

$V_i$  سرعت آب در لوله  $i$ ،  $V_i^{\min}$  کمینه سرعت و  $V_i^{\max}$  بیشینه سرعت مجاز در لوله  $i$  است.

قید ۵- قطرهای موجود: قطرهای لوله‌های مورد مصرف باید از یک لیست تجاری از پیش تعیین شده انتخاب شوند.

$$D_i \in \{D\} \quad \forall i = 1, 2, \dots, \text{npipe} \quad (7)$$

نکته ۲- قیدهای مذکور باید به تابع هزینه ۱ اضافه شوند تا مسئله بهینه‌سازی تکمیل شود؛ ولی از آنجایی که نرم‌افزار ایپانت، قیود ۱ و ۲ را برآورده می‌سازد، فقط قید ۳ به تابع هزینه ۱ اضافه می‌شود. در نتیجه تابع هزینه کل به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{MinCost} = \sum_{i=1}^{n_{\text{pipe}}} c_i(D_i) \times L_i + W_{p1} \sum_{j=1}^N \max[(P_j^{\text{min}} - P_j), 0] + W_{p2} \sum_{j=1}^N \max[(P_j - P_j^{\text{max}}), 0] \quad (8)$$

که در این رابطه

$W_{pi}$  ضریب پنالتی است.

در این پژوهش، برای سادگی فرضیات، از تأثیر قید ۴ صرف‌نظر شد.

### ۳- الگوریتم PSO استاندارد

الگوریتم مهاجرت پرندگان توسط ادوارد و کندی در سال ۱۹۹۵ فرموله شده است [۲۶]. فرایند فکری این الگوریتم از رفتار اجتماعی حیواناتی مانند دسته پرندگان یا دسته ماهی‌ها گرفته شده است. الگوریتم مهاجرت پرندگان در این که با یک ماتریس جمعیت تصادفی شروع می‌کند، به الگوریتم ژنتیک پیوسته شباهت دارد. برخلاف الگوریتم ژنتیک، الگوریتم مهاجرت پرندگان هیچ عملگر تکاملی مانند هم‌گذری و جهش ندارد. سطرهای ماتریس، ذرات نامیده می‌شوند، همانند کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک. آنها حاوی مقادیر متغیرها هستند و به صورت دودویی کد نشده‌اند. هر ذره با سرعتی پیرامون سطح هزینه حرکت می‌کند. ذرات، سرعت و موقعیت‌شان را بر اساس بهترین جواب‌های کلی و محلی به‌روز می‌کنند [۲۶]

$$v_i(t+1) = w(t)v_i(t) + \text{RAND} \times C_1 (P_{i,\text{best}}(t) - x_i(t)) + \text{rand} \times C_2 (G_{i,\text{best}}(t) - x_i(t)) \quad (9)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (10)$$

که در این روابط

$v_i(t)$  سرعت ذره در لحظه  $t$  ام،  $x_i(t)$  متغیرهای ذره در لحظه  $t$  ام،  $\text{RAND}$  و  $\text{rand}$  اعداد تصادفی مستقل یکنواخت،  $C_1=C_2=2$  فاکتورهای یادگیری (پارامترهای شتاب)،  $P_{i,\text{best}}(t)$  بهترین جواب محلی و  $G_{i,\text{best}}(t)$  بهترین جواب کلی هستند.

الگوریتم مهاجرت پرندگان، بردار سرعت هر ذره را به‌روز می‌کند. سپس آن سرعت را به موقعیت ذره یا مقادیر ذره می‌افزاید. به‌روز رسانی‌های سرعت، توسط بهترین جواب کلی مربوط به

کمترین هزینه پیدا شده تا به حال یک ذره و بهترین جواب محلی مربوط به کمترین هزینه در جمعیت حاضر تأثیر می‌پذیرد. اگر بهترین جواب محلی هزینه‌ای کمتر از هزینه بهترین جواب فعلی داشت، آنگاه جایگزین بهترین جواب کلی می‌شود. سرعت ذره یادآور بهینه‌سازهای محلی است که از اطلاعات مشتق استفاده می‌کنند، زیرا سرعت مشتق موقعیت است. ثابت  $C_1$  پارامتر شناختی و ثابت  $C_2$  پارامتر اجتماعی نامیده می‌شود.

الگوریتم مهاجرت پرندگان به‌عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های بهینه‌سازی قابل اعمال به مسائل بهینه‌سازی پیچیده شناخته شده است. محاسن عمده آن به این شرح است: الگوریتم مهاجرت پرندگان یک روش غیرمشتقی است. پیاده‌سازی الگوریتم مهاجرت پرندگان آسان است، بنابراین در کاربردهای عملی قابل استفاده است. تعداد پارامترهای الگوریتم مهاجرت پرندگان محدود است و در مقایسه با الگوریتم‌های دیگر، تأثیر پارامترها روی جواب نهایی کم است. محاسبات روش الگوریتم مهاجرت پرندگان ساده است. نسبت به سایر روش‌های هوشمند، الگوریتم مهاجرت پرندگان وابستگی کمی به جواب‌های اولیه دارد.

با این حال الگوریتم مهاجرت پرندگان و دیگر روش‌های هوشمند بهینه‌سازی دارای دو عیب مهم و عمده هستند: عیب اول این که ممکن است جمعیت، همگرایی نارس داشته باشد. هرچند که الگوریتم مهاجرت پرندگان جواب‌های خوبی، سریع‌تر از سایر الگوریتم‌های هوشمند پیدا می‌کند، ولی معمولاً نمی‌تواند کیفیت جواب‌های پیدا شده را با گذشت زمان بهبود ببخشد [۲۷]. معمولاً به‌هنگام بهینه‌کردن مسائل بهینه‌سازی چند مودالی، الگوریتم مهاجرت پرندگان مشکل همگرایی زودرس (نارس) دارد. به این دلیل که در الگوریتم مهاجرت پرندگان، پرندگان به سمت یک جواب یکتا همگرا می‌شوند و این جواب روی خط ما بین بهترین جواب کلی و بهترین جواب محلی قرار دارد که ممکن است جواب بهینه محلی هم نباشد [۲۸]. دلیل دیگر این مشکل، سرعت بالای جریان اطلاعات مابین پرندگان است که به تشکیل پرندگان مشابه می‌انجامد که این باعث بیشتر شدن احتمال گیرکردن در کمینه محلی می‌شود [۲۹]. مشکل اساسی دیگر الگوریتم مهاجرت پرندگان، همگرایی کند با جواب بهینه است. به عبارت دیگر الگوریتم مهاجرت پرندگان برای بهبود کیفیت جواب فرار از تله‌های کمینه‌های محلی نیازمند صرف زمان زیادی است. در مسائل کاربردی که زمان پردازش اهمیت زیادی دارد، این مشکل بیشتر جلوه می‌کند. بنابراین مکانیسمی لازم است تا سرعت همگرایی الگوریتم مهاجرت پرندگان را بالا ببرد، بدون این که این الگوریتم در کمینه محلی بیفتد.

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، دارای دو عیب کلی همگرایی به جواب زیر بهینه یا بهینه محلی و همگرایی دیر به جواب کلی است. در این قسمت برای غلبه بر این عیب‌ها، روش بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی، پیشنهاد می‌شود. در روش بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی، استفاده از اندازه گروه تطبیقی و عملگر جهش پیشنهاد می‌شود. ایده استفاده از اندازه گروه تطبیقی به این صورت است که اندازه گروه در الگوریتم، در هر تکرار متناسب با تعداد تکرار الگوریتم خواهد بود. در نتیجه در ابتدای الگوریتم، اندازه گروه زیاد و در انتهای آن اندازه گروه کم خواهد بود و در نتیجه سرعت الگوریتم زیاد می‌شود.

در مسائل بهینه‌سازی پیچیده، مانند مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب، اندازه بالای گروه باعث کاهش سرعت پیشرفت الگوریتم می‌شود؛ زیرا در هر تکرار به تعداد اندازه گروه باید ارزیابی تابع هزینه انجام گیرد. در مورد مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب باید به اندازه سائز گروه، تحلیل هیدرولیکی نیز انجام شود که کاری وقت‌گیر است. در نتیجه اندازه گروه، تأثیر زیادی در سرعت همگرایی الگوریتم دارد. از طرف دیگر در الگوریتم مهاجرت پرندگان، گروه با اندازه بالا قسمت‌های بیشتری از فضای جستجو را جستجو می‌کند. در نتیجه توانایی تنوع‌طلبی الگوریتم بالا بوده و احتمال پیدا کردن نواحی خوب فضای جستجو زیاد می‌شود. همچنین در این حالت تعداد تکرار لازم برای رسیدن به یک جواب خوب نیز کاهش می‌یابد؛ ولی در مقابل تعداد زیاد پرندگان گروه باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی در هر تکرار می‌شود. به علاوه گروه با تعداد پرندگان کم بار محاسباتی کمی دارد، ولی احتمال گیر کردن در کمینه محلی در این حالت زیاد است.

بنابراین در این پژوهش استفاده از سائز گروه دینامیکی برای افزایش سرعت همگرایی پیشنهاد می‌شود. در این روش در ابتدای اجرای الگوریتم، اندازه گروه بالا در نظر گرفته می‌شود تا در ابتدای الگوریتم نواحی بیشتری از فضای جستجو رؤیت شوند. این باعث شناسایی نواحی امیدبخش فضای جستجو می‌شود. همچنین با پیشرفت الگوریتم و همگرا شدن به نواحی خوب، باید اندازه گروه کاهش یابد تا در هر تکرار، تعداد کمتری تابع هزینه ارزیابی شود و در نتیجه الگوریتم با سرعت بیشتری به جواب برسد. در این راستا، در پژوهش حاضر استفاده از اندازه گروه دینامیکی به صورت زیر پیشنهاد شد

$$n = \left[ n_{\max} - \frac{n_{\max} - n_{\min}}{t_{\max}} \times t \right] \quad (11)$$

که در این رابطه

$n$  اندازه گروه،  $n_{\max}$  مقدار بیشینه اندازه گروه است که کاربرد بسته به مسئله آن را تعیین می‌کند،  $n_{\min} \in [5, n_{\max}]$  مقدار کمینه اندازه گروه،  $t_{\max}$  بیشینه تعداد تکرار که بر اساس پیچیدگی مسئله و تجربه تعیین می‌شود،  $t$  شماره تکرار فعلی و  $[\cdot]$  نیز به معنای جزء صحیح است.

نکته ۲- به هنگام کاهش اندازه، گروه پرندگانی که دارای تابع هزینه بالا (بد) هستند، از گروه حذف می‌شوند. علاوه بر استفاده از اندازه گروه دینامیکی، برای جلوگیری از تله کمینه محلی، استفاده از یک عملگر جهش جدید در این مقاله پیشنهاد شد. برای جلوگیری از گیر کردن در کمینه محلی، باید توانایی تنوع‌طلبی الگوریتم زیاد شود. به این معنا که نباید الگوریتم فقط به یک سمت در فضای جستجو همگرا شود. این زمانی اتفاق می‌افتد که الگوریتم در مسیر جستجو به جواب‌های بدی برسد که عبور از آنها الگوریتم را به جواب بهینه کلی می‌رساند؛ اما معمولاً به علت بد بودن جواب‌های اولیه موجود در مسیر، از ادامه آن مسیر به ظاهر بد، ولی در نهایت خوب، جلوگیری می‌شود. در این راستا می‌توان از اپراتوری استفاده کرد که تنوع‌طلبی الگوریتم را افزایش دهد و با یک احتمالی برخی از جواب‌های بد را نیز قبول کرد. در این پژوهش ایده استفاده از اپراتور جدید جهش معرفی شد:

در هر تکرار پس از ایجاد جواب‌های جدید، به تعداد  $X_{rate} \approx 5$  درصد از کل پرندگان گروه (به جز بهترین پرنده) به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و با جواب‌های تصادفی دیگری جایگزین می‌شوند. این کار تنوع‌طلبی الگوریتم را افزایش می‌دهد. پرندگان جدید توسط یک تغییر تصادفی در پرنده انتخاب شده فعلی ایجاد می‌شوند. به این معنا که قطر لوله انتخاب شده با قطر لوله جدید که به صورت تصادفی انتخاب می‌شود، جایگزین می‌شود. به این پرندگان جدید، پرندگان جهشی می‌گویند. پرندگان جهشی در صورت داشتن تابع هزینه بهتر جایگزین پرنده فعلی می‌شوند. در غیر این صورت با احتمال  $e^{-\frac{\Delta f}{T}}$  پذیرفته می‌شوند که در آن  $T$  مقدار یک تابع هزینه خوب در گروه و  $\Delta f$  اختلاف توابع هزینه جهشی و فعلی است. در صورت رد جواب جهشی، فرایند بالا تکرار می‌شود تا یک جواب قابل قبول به دست آید. فلوچارت الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی در شکل ۱ آمده است.

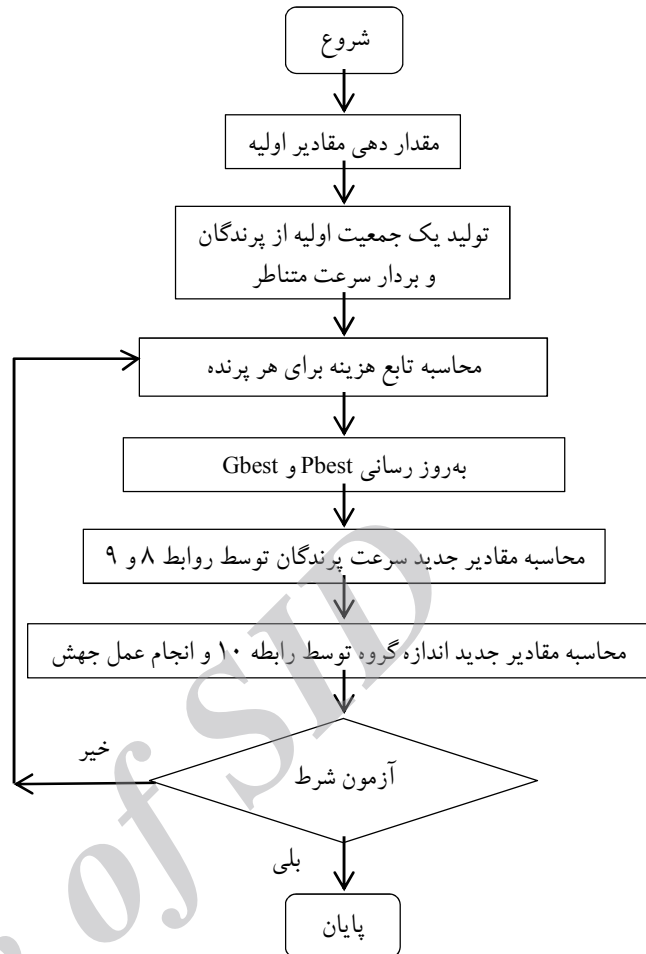
نکته ۳- لازم به ذکر است که در الگوریتم معرفی شده، از یک ضریب اینرسی جدید  $w$  به صورت زیر استفاده می‌شود

$$w(t) = w_{\max} - \frac{f(x_i(t))}{\sum f(x_i(t))} \times \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \times t \quad (12)$$



## ۵- آزمون با توابع

در ادبیات بهینه‌سازی، کارایی روش‌های جدید بهینه‌سازی توسط پیدا کردن کمینه برخی توابع معروف آزمون انجام می‌پذیرد. در این پژوهش، روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی توابع لیست شده در جدول ۱ به‌کار گرفته شد. برای کاهش اثرات ذات تصادفی الگوریتم‌ها، هر مسئله ۱۰۰ بار توسط الگوریتم‌ها حل شد و نتایج در جدول ۲ برای روش بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی آورده شد. در جدول ۲، عبارت  $RATE_{SM}$  بیانگر نرخ موفقیت الگوریتم در رسیدن به جواب بهینه و  $AVERAGE_{OBJEN}$  نشان دهنده متوسط تعداد ارزیابی‌های تابع هزینه برای رسیدن به جواب بهینه است. بنابراین اولی معیاری از دقت و در نتیجه گیر نکردن در کمینه محلی و دومی معیاری از سرعت و صرف زمان برای پیدا کردن جواب است. همچنین در شکل‌های ۲ و ۳ نمونه‌ای از نمودارهای همگرایی روش آورده شده است. در این شکل‌ها معلوم است که روش پیشنهادی برای بهینه‌سازی برای گروه ذرات دینامیکی جهشی زودتر از روش الگوریتم مهاجرت پرندگان به جواب مناسب می‌رسد. همچنین گیرکردن روش الگوریتم مهاجرت پرندگان در کمینه‌های محلی از شکل ۲ معلوم می‌شود. جدول ۲ نشان می‌دهد روش پیشنهادی در تمامی موارد، جواب‌ها را سریع‌تر و با دقت بیشتری پیدا می‌کند.



## ۶- مطالعه موردی

در این پژوهش، بعد از پیشنهاد روش‌های اصلاحی، دو شبکه معروف پر کاربرد توسط الگوریتم‌ها، طراحی شد. لازم به ذکر است که مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب برای هر بار ارزیابی تابع هزینه، نیاز به فراخوانی نرم‌افزار ایپانت برای تحلیل هیدرولیکی دارد. به این منظور و برای ایجاد ارتباط بین نرم‌افزار متلب<sup>۵</sup> (که برنامه بهینه‌سازی در آن محیط نوشته شد) با مدل شبیه‌سازی ایپانت از نرم‌افزار EPANET Programmer's Toolkit استفاده شد [۳۰]. شبکه اول، سیستم هانوی است که در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۱]. شبکه هانوی از ۳۲ گره و ۳۴ لوله تشکیل شده است. یک مخزن به این شبکه نیز متصل است. ۶ قطر لوله متفاوت برای این شبکه وجود دارد که یک فضای جستجو  $10^{26} \times 2/8651 = 6^{34}$  را تشکیل می‌دهند. کمینه فشار مورد نیاز در هر گره در این شبکه برابر ۳۰ متر است. اطلاعات مربوط به شبکه و هزینه لوله‌ها در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. از آن جایی که الگوریتم PSO مقادیر پیوسته را به‌عنوان جواب برمی‌گرداند، ولی مقادیر قطر لوله‌ها گسسته هستند، در هر تکرار بعد

شکل ۱- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی

که در این رابطه

$w_{max}$  برابر  $0.9$ ،  $w_{min}$  برابر  $0.4$ ،  $t_{max}$  بیشینه تعداد تکرار الگوریتم و  $t$  شماره تکرار فعلی است. دلیل انتخاب ضریب اینرسی به شکل بالا این است که ضریب اینرسی، مقدار تأثیر سرعت قبلی بر روی سرعت جدید را تعیین می‌کند. در ابتدای الگوریتم که نیاز به تنوع طلبی بالا است، مقدار آن زیاد و در انتهای الگوریتم که نیاز به دقت بیشتری در جستجو است، مقدار آن کم می‌شود. عبارت  $\frac{f(x_i(t))}{\sum f(x_i(t))}$  نیز موجب تطبیقی شدن پارامتر اینرسی می‌شود. به این صورت که چون تابع هزینه هر پرنده، معیاری از حرکت پرنده در گام فعلی است، می‌توان از آن برای تعیین اندازه تأثیر حرکت فعلی پرنده روی حرکت گام بعدی استفاده کرد و گام حرکت را متناسب با آن انتخاب کرد. از طرف دیگر به منظور نرمال‌سازی اثر تابع هزینه، مقدار آن بر حاصل جمع کل مقدار هزینه‌های کل پرندگان در حرکت فعلی تقسیم می‌شود و از قدر مطلق استفاده می‌شود تا برای حرکت پرندگان بر مقدار اندازه حرکت تأثیر نگذارد.

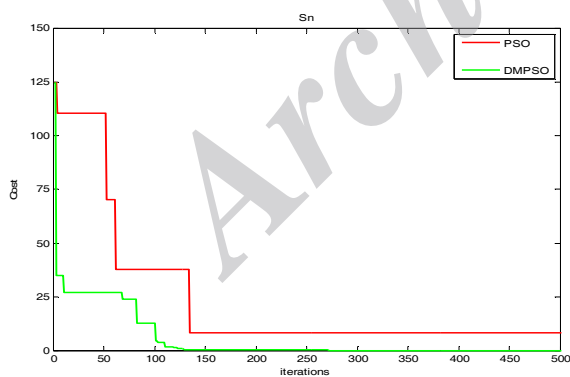
<sup>5</sup> MATLAB

جدول ۱- توابع آزمون

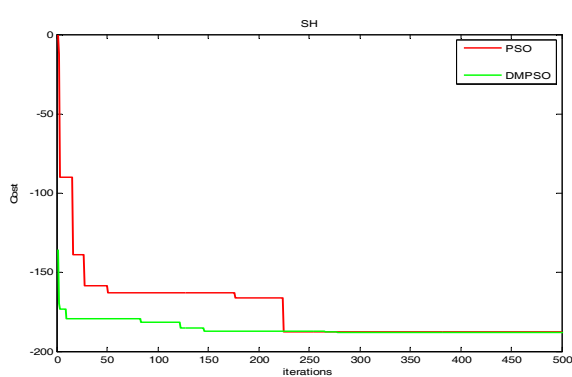
نام تابع	تابع آزمون	D	فضای جستجو	X*	f(X*)
SH <sup>۱</sup>	$f_1(X) = \left\{ \sum_{j=1}^5 j \cos[(j+1)x_1 + j] \right\} \times \left\{ \sum_{j=1}^5 j \cos[(j+1)x_2 + j] \right\}$	۲	$[-10,10]^D$	18 minimum	-۱۸۶/۷
ES <sup>۲</sup>	$f_2(X) = -\cos(x_1)\cos(x_2)\exp(-((x_1 - \pi)^2 + (x_2 - \pi)^2))$	۲	$[-100,100]^D$	$[\pi, \pi]$	-۱
S <sub>n</sub> <sup>۳</sup>	$f_3(X) = \sum_{i=1}^D x_i^2$	۱۰	$[-100,100]^D$	$[0,0,\dots,0]$	۰
NQ <sub>n</sub> <sup>۴</sup>	$f_4(X) = \sum_{i=1}^D x_i^4$	۱۵	$[-1.3,1.3]^D$	$[0,0,\dots,0]$	۰
RA <sub>n</sub> <sup>۵</sup>	$f_5(X) = \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$	۲۰	$[-5,5]^D$	$[0,0,\dots,0]$	۰
SC <sub>n</sub> <sup>۶</sup>	$f_6(X) = \sum_{i=1}^D -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	۲۰	$[-500,500]^D$	$[1,1,\dots,1]$	-۴۱۸/۹۸ D
R <sub>n</sub> <sup>۷</sup>	$f_7(X) = \sum_{i=1}^D -[100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (x_i - 1)^2]$	۲۵	$[-5,10]^D$	$[1,1,\dots,1]$	۰
Z <sub>n</sub> <sup>۸</sup>	$f_8(X) = \left( \sum_{i=1}^D x_i^2 \right) + \left( \sum_{i=1}^D 0.5ix_i \right)^2 \left( \sum_{i=1}^D 0.5ix_i \right)^4$	۳۰	$[-5,10]^D$	$[1,1,\dots,1]$	۰

جدول ۲- نتایج برای روش DMPSO

تابع	AVERAGE <sub>OBJEN</sub>		RATE <sub>SM</sub>	
	DMP SO	PSO	DMP SO	PSO
SH	۱۸۰	۱۹۸	۹۹	۹۹
ES	۱۹۱	۲۱۱	۹۹	۹۹
S <sub>n</sub>	۳۹۴	۴۲۷	۹۹	۹۸
NQ <sub>n</sub>	۵۵۵	۵۶۴	۹۹	۹۸
RA <sub>n</sub>	۶۰۱	۶۹۸	۹۸	۹۸
SC <sub>n</sub>	۷۰۵	۷۹۲	۹۸	۹۷
R <sub>n</sub>	۷۵۴	۸۳۴	۹۸	۹۷
Z <sub>n</sub>	۹۴۲	۹۹۳	۹۷	۹۶

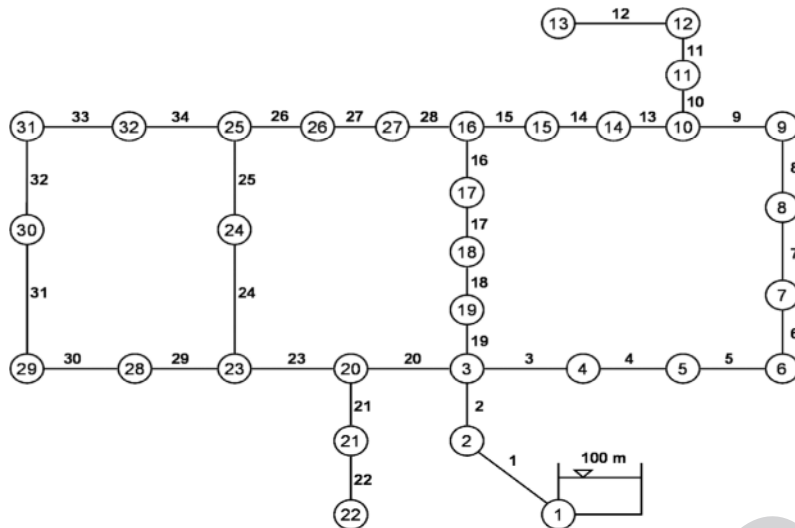


شکل ۳- نمودار همگرایی برای تابع Sn



شکل ۲- نمودار همگرایی برای تابع SH

- 1 Shubert Function
- 2 Easom Function
- 3 Function Sphere
- 4 Quartic Function
- 5 Rastrigrin Function
- 6 Schwefel Function
- 7 Rosenbrock Function
- 8 Zakharov Function



شکل ۴- شبکه هانوی

جدول ۴- اطلاعات هزینه مربوط به شبکه هانوی

لوله	قطر (میلی متر)	هزینه (دلار به متر)
۱	۳۰۵	۴۵/۷۲۶
۲	۴۰۶	۷۰/۴
۳	۵۰۸	۹۸/۳۷۸
۴	۱۰۶	۱۲۹/۳۳۳
۵	۷۶۲	۱۸۰/۷۴۸
۶	۱۰۱۶	۲۷۸/۲۸۰

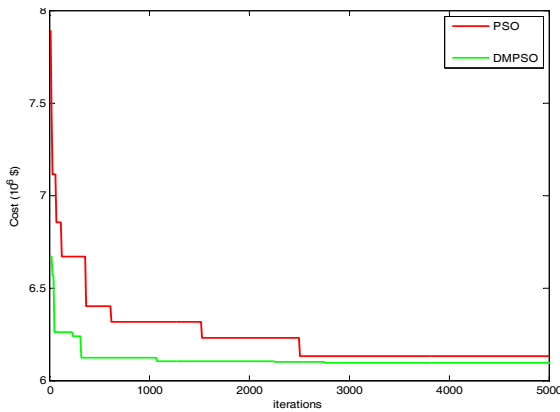
از محاسبه جواب‌های جدید توسط الگوریتم، ابتدا جواب‌ها به سمت نزدیک‌ترین اعداد صحیح گرد می‌شوند. سپس برنامه بررسی می‌کند که آیا جواب‌های جدید به‌عنوان قطر لوله‌ها، جزء قطر لوله‌های تجاری موجود هستند یا نه. اگر مقادیر جدید جزء فهرست موجود نباشند، آن‌ها با نزدیک‌ترین مقادیر قطر لوله‌های موجود در لیست تجاری جایگزین می‌شوند. بعد از گرد کردن اعداد و رسیدن به نزدیک‌ترین قطر لوله، الگوریتم بررسی می‌کند که آیا قیود هیدرولیکی برآورده می‌شوند یا نه. در صورت برآورده نشدن قیود، ابتدا تمامی گره‌های شبکه برای پیدا کردن گره با بیشترین تجاوز از قیود بررسی می‌شوند. سپس با بررسی تمامی مسیرهای آن گره به مخازن، قطر بعدی برای لوله‌ای که کمترین تفاوت را در تابع هزینه ایجاد می‌کند، انتخاب می‌شود. این کار تا زمانی که قطر مناسب قابل قبول پیدا شود ادامه می‌یابد [۳۲ و ۳۳].

جدول ۵ قطر لوله‌های به‌دست آمده را برای شبکه هانوی از راه روش‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی، جواب‌های بهتری را نسبت به سایر روش‌های هوشمند به‌دست آورده است. همچنین شکل ۵ نمودار همگرایی الگوریتم‌های مهاجرت پرندگان و بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی برای شبکه هانوی را نشان

جدول ۳- اطلاعات مربوط به شبکه هانوی

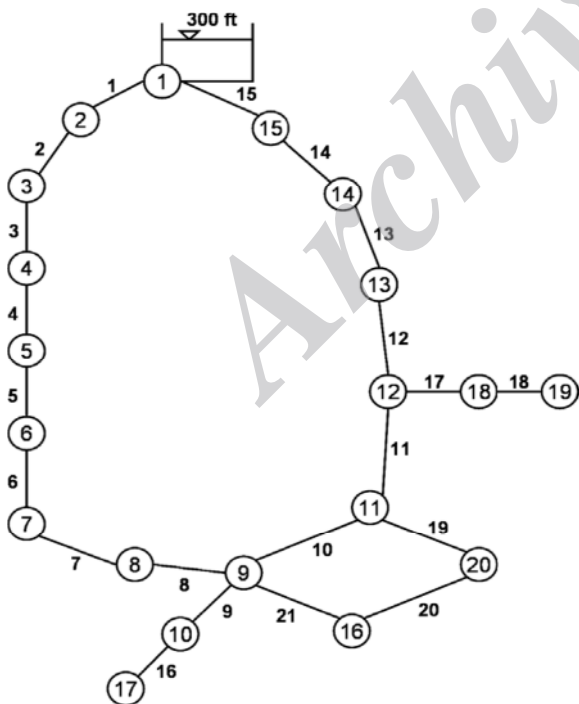
گره	اطلاعات لوله		اطلاعات گره	
	طول (متر)	لوله	تفاضل (متر مکعب بر ساعت)	گره
(منبع) ۱	۱۰۰	۱	-۱۹۹۴۰	۱
۲	۱۳۵۰	۲	۸۹۰	۲
۳	۹۰۰	۳	۸۵۰	۳
۴	۱۱۵۰	۴	۱۳۰	۴
۵	۱۴۵۰	۵	۷۲۵	۵
۶	۴۵۰	۶	۱۰۰۵	۶
۷	۸۵۰	۷	۱۳۵۰	۷
۸	۸۵۰	۸	۵۵۰	۸
۹	۸۰۰	۹	۵۲۵	۹
۱۰	۹۵۰	۱۰	۵۲۵	۱۰
۱۱	۱۲۰۰	۱۱	۵۰۰	۱۱
۱۲	۳۵۰۰	۱۲	۵۶۰	۱۲
۱۳	۸۰۰	۱۳	۹۴۰	۱۳
۱۴	۵۰۰	۱۴	۶۱۵	۱۴
۱۵	۵۵۰	۱۵	۲۸۰	۱۵
۱۶	۲۷۳۰	۱۶	۳۱۰	۱۶
۱۷	۱۷۵۰	۱۷	۸۶۵	۱۷
۱۸	۸۰۰	۱۸	۱۳۴۵	۱۸
۱۹	۴۰۰	۱۹	۶۰	۱۹
۲۰	۲۲۰۰	۲۰	۱۲۷۵	۲۰
۲۱	۱۵۰۰	۲۱	۹۳۰	۲۱
۲۲	۵۰۰	۲۲	۴۸۵	۲۲
۲۳	۲۶۵۰	۲۳	۱۰۴۵	۲۳
۲۴	۱۲۳۰	۲۴	۸۲۰	۲۴
۲۵	۱۳۰۰	۲۵	۱۷۰	۲۵
۲۶	۸۵۰	۲۶	۹۰۰	۲۶
۲۷	۳۰۰	۲۷	۳۷۰	۲۷
۲۸	۷۵۰	۲۸	۲۹۰	۲۸
۲۹	۱۵۰۰	۲۹	۳۶۰	۲۹
۳۰	۲۰۰۰	۳۰	۳۶۰	۳۰
۳۱	۱۶۰۰	۳۱	۱۰۵	۳۱
۳۲	۱۵۰	۳۲	۸۰۵	۳۲
	۸۶۰	۳۳		
	۹۵۰	۳۴		





شکل ۵- نمودار همگرایی برای شبکه هانوی

شبکه دوم مورد مطالعه، شبکه تونل شهر نیویورک بود (شکل ۶). در این مورد هدف، طراحی شبکه نبود، بلکه از آنجایی که شبکه طراحی شده حداقل فشار مورد نیاز در گره‌ها را برآورده نمی‌کند، هدف این مسئله افزودن لوله‌ها به سیستم موجود بود، به طوری که حداقل فشار در گره‌ها برآورده شود و هزینه لوله‌های مصرفی کمینه شود. این شبکه شامل ۲۰ گره و ۲۱ لوله بود. در این مسئله الگوریتم تصمیم می‌گیرد که آیا لوله‌ای به لوله موجود خاص اضافه شود یا نه. ۱۵ قطر متفاوت لوله به علاوه تصمیم به اضافه شدن یا اضافه نشدن لوله فضای جستجوی  $10^{25} \times 1/93 = 6^{21}$  را به وجود می‌آوردند. اطلاعات مربوط به شبکه و هزینه لوله‌ها در جدول‌های ۶ و ۷ آمده است.



شکل ۶- شبکه تونل شهر نیویورک

می‌دهد. از شکل می‌توان دید که روش بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی سریع است و جواب‌های بهتری را در مقایسه با روش الگوریتم مهاجرت پرندگان پیدا می‌کنند.

جدول ۵- قطر لوله‌های به دست آمده برای شبکه هانوی

لوله	GA [۳۴]	ACO [۳۵]	PSO [۳۶]	DMPSO
۱	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۴	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۵	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۶	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۷	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۸	۳۰	۴۰	۳۰	۴۰
۹	۳۰	۴۰	۴۰	۴۰
۱۰	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۱۱	۲۴	۲۴	۳۰	۲۴
۱۲	۲۴	۲۴	۲۴	۲۴
۱۳	۱۲	۲۰	۱۶	۲۰
۱۴	۲۰	۱۲	۲۰	۱۶
۱۵	۱۶	۱۲	۱۲	۱۲
۱۶	۲۰	۱۲	۱۶	۱۲
۱۷	۲۴	۲۰	۲۰	۱۶
۱۸	۳۰	۲۴	۲۰	۲۴
۱۹	۳۰	۲۰	۲۴	۲۰
۲۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲۱	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰
۲۲	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۲۳	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
۲۴	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۲۵	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
۲۶	۱۶	۲۰	۲۰	۱۶
۲۷	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۲۸	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۲۹	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
۳۰	۱۲	۱۶	۱۲	۱۲
۳۱	۱۲	۱۲	۱۲	۱۲
۳۲	۱۶	۱۲	۲۰	۱۶
۳۳	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
۳۴	۲۰	۲۰	۲۴	۲۴
هزینه ( $10^6$ \$)	۶/۱۷۳	۶/۱۳۴	۶/۱۶۰	۶/۰۸۱

جدول ۶- اطلاعات مربوط به شبکه تونل نیویورک

اطلاعات لوله		اطلاعات گره			
قطر موجود (اینچ)	طول (فوت)	لوله	هد انرژی حداقل (فوت)	تفاض (فوت مکعب بر ثانیه)	گره
۱۸۰	۱۱۶۰۰	۱	۳۰۰	-۲۲۰۱۷	۱
۱۸۰	۱۹۸۰۰	۲	۲۵۵	۹۲/۴	۲
۱۸۰	۷۳۰۰	۳	۲۵۵	۹۲/۴	۳
۱۸۰	۸۳۰۰	۴	۲۵۵	۸۸/۲	۴
۱۸۰	۸۶۰۰	۵	۲۵۵	۸۸/۲	۵
۱۸۰	۱۹۱۰۰	۶	۲۵۵	۸۸/۲	۶
۱۳۲	۹۶۰۰	۷	۲۵۵	۸۸/۲	۷
۱۳۲	۱۲۵۰۰	۸	۲۵۵	۸۸/۲	۸
۱۸۰	۹۶۰۰	۹	۲۵۵	۱۷۰	۹
۲۰۴	۱۱۲۰۰	۱۰	۲۵۵	۱۷۰	۱۰
۲۰۴	۱۴۵۰۰	۱۱	۲۵۵	۱۷۰	۱۱
۲۰۴	۱۲۲۰۰	۱۲	۲۵۵	۱۱۷/۱	۱۲
۲۰۴	۲۴۱۰۰	۱۳	۲۵۵	۱۱۷/۱	۱۳
۲۰۴	۲۱۱۰۰	۱۴	۲۵۵	۹۲/۴	۱۴
۲۰۴	۱۵۵۰۰	۱۵	۲۵۵	۹۲/۴	۱۵
۷۲	۲۶۴۰۰	۱۶	۲۶۰	۱۷۰	۱۶
۷۲	۳۱۲۰۰	۱۷	۲۷۲/۸	۵۷/۵	۱۷
۶۰	۲۴۰۰۰	۱۸	۲۵۵	۱۱۷/۱	۱۸
۶۰	۱۴۴۰۰	۱۹	۲۵۵	۱۱۷/۱	۱۹
۶۰	۳۸۴۰۰	۲۰	۲۵۵	۱۷۰	۲۰
۷۲	۲۶۴۰۰	۲۱			

جدول ۸- قطر لوله‌های به دست آمده برای شبکه تونل نیویورک

لوله	GA [۳۴]	ACO [۳۵]	PSO [۳۶]	DMP SO
۱	.	.	.	.
۲	.	.	.	.
۳	.	.	.	.
۴	.	.	.	.
۵	.	.	.	.
۶	.	.	.	.
۷	.	۱۴۴	۱۴۴	.
۸	.	.	.	.
۹	.	.	.	.
۱۰	.	.	.	.
۱۱	.	.	.	.
۱۲	.	.	.	.
۱۳	.	.	.	.
۱۴	.	.	.	.
۱۵	۱۲۰	.	.	۹۶
۱۶	۸۴	۹۶	۹۶	۹۶
۱۷	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶
۱۸	۸۴	۸۴	۸۴	۸۴
۱۹	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲
۲۰	.	.	.	.
۲۱	۷۲	۷۲	۷۲	۷۲
Cost (\$۱۰۰)	۳۸/۸۰	۳۸/۶۴	۳۸/۶۴	۳۸/۵۲

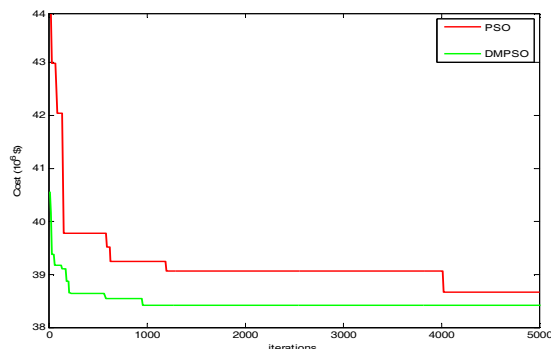
جدول ۹- هدهای انرژی محاسبه شده برای شبکه تونل نیویورک

گره بحرانی	حداقل فشار	GA [۳۴]	ACO [۳۵]	PSO [۳۶]	DMP SO
۱۶	۲۶۰	۲۶۰/۵۹	۲۶۰/۰۸	۲۶۰/۰۸	۲۶۰/۰۲
۱۷	۲۷۲/۸	۲۷۲/۹۱	۲۷۲/۸۷	۲۷۲/۸۷	۲۷۲/۸
۱۹	۲۵۵	۲۵۵/۷۸	۲۵۵/۰۵	۲۵۵/۰۶	۲۵۵/۱۷

جدول ۷- اطلاعات هزینه لوله‌های شبکه تونل نیویورک

شماره لوله	قطر (اینچ)	هزینه (دلار به اینچ)
۱	.	.
۲	۳۶	۹۳/۵
۳	۴۸	۱۳۴
۴	۶۰	۱۷۶
۵	۷۲	۲۲۱
۶	۸۴	۲۶۷
۷	۹۶	۳۱۶
۸	۱۰۸	۳۶۵
۹	۱۲۰	۴۱۷
۱۰	۱۳۲	۴۶۹
۱۱	۱۴۴	۵۲۲
۱۲	۱۵۶	۵۷۷
۱۳	۱۶۸	۶۳۲
۱۴	۱۸۰	۶۸۹
۱۵	۱۹۲	۷۴۶
۱۶	۲۰۴	۸۰۴

پیشرفت الگوریتم افزوده شود. در نهایت برای افزایش تنوع طلبی و جستجوی فضاهای کشف نشده فضای جستجو، از یک اپراتور جهشی جدید استفاده شد که ذرات جایگزین را با احتمال خاصی، به جای ذرات موجود گروه معرفی می‌کند. این اپراتور باعث فرار از تله کمینه محلی می‌شود. برای ارزیابی روش معرفی شده DMPSO از توابع آزمون معروف موجود در ادبیات بهینه‌سازی استفاده شد. در این مقاله هشت تابع پیچیده با ابعاد بالا توسط روش‌های اصلاحی بهینه آزمایش شدند و نتایج مقایسه‌ای نشان داد که روش‌های پیشنهادی سریع‌اند و در کمینه محلی گیر نمی‌کنند. در ادامه دو شبکه معروف و پرکاربرد که قبلاً توسط روش‌های دیگر هوشمند طراحی و بهینه‌سازی شده بودند، به عنوان شبکه‌های آزمون انتخاب و طراحی شدند. این دو شبکه، شبکه‌های هانوی و تونل نیویورک بودند. نتایج مقایسه‌ای نشان داد که روش‌های پیشنهادی این مقاله بهتر از نتایج موجود در کارهای گذشته بودند. با در نظر گرفتن موارد اشاره شده، در نهایت روش معرفی شده DMPSO به عنوان ابزار مفید بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب پیشنهاد می‌شود.



شکل ۷- نمودار همگرایی برای شبکه تونل نیویورک

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مسئله طراحی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از روش اصلاحی و ابداعی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات به نام الگوریتم گروه ذرات دینامیکی جهشی، بررسی شد. در این روش، سائز گروه ثابت نیست و در ابتدای اجرای الگوریتم زیاد است و رفته‌رفته با اجرای الگوریتم اندازه گروه کاهش می‌یابد تا به سرعت

## ۸- مراجع

1. Yates, D.F., Templeman, A.B., and Boffey, T.B. (1984). "The computational complexity of the problem of determining least capital cost designs for water supply networks." *J. of Eng. Optimiz.*, 7, 143-145.
2. Schaake, J.C., and Lai, D. (1969). *Linear programming and dynamic programming applied to water distribution network design*, MIT Hydrodynamics Lab Report, 116.
3. Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution systems." *J. of Water Resour. Res.*, 13(6), 885-900.
4. Varma, K., Narasimhan, S., and Bhallamudi, S.M. (1997). "Optimal design of water distribution systems using NLP method." *J. of Environ. Eng.*, 123, 381-388.
5. Gogna, A., and Tayal, A. (2013). "Metaheuristics: Review and application." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 25(4), 503-526.
6. Kavousi-Fard, A., and Kavousi-Fard, F. (2013). "A new hybrid correction method for short-term load forecasting based on ARIMA, SVR and CSA." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 25(4), 559-574.
7. Moradinasab, N., Shafaei, R., Rabiee, M., and Ramezani, P. (2013). "No-wait two stage hybrid flow shop scheduling with genetic and adaptive imperialist competitive algorithms." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 25, 207-225.
8. Pellegrini, P., and Favaretto, D. (2012). "Quantifying the exploration performed by metaheuristics." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 24, 247-266.
9. Romdhane, L.B., and Ayeb, B. (2011). "An evolutionary algorithm for abductive reasoning." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 23, 529-544.
10. Sun, C., Zhao, H, and Wang, Y. (2011). "A comparative analysis of PSO, HPSO, and HPSO-TVAC for data clustering." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 23, 51-62.
11. Meng, Z., Zou, B., Zeng, Y. (2012). "Considering direct interaction of artificial ant colony foraging simulation and animation." *J. of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 24, 95-107.
12. Bolognesi, A., Bragalli, C., Marchi, A., and Artina, S. (2010). "Genetic heritage evolution by stochastic transmission in the optimal design of water distribution networks." *J. of Advance Eng. Software*, 41, 792-801.

13. Banos, R., Gil, C., Reza, J., and Montoya, F.G. (2010). "A memetic algorithm applied to the design of water distribution networks." *J. of Appli. Soft. Comput.*, 10, 261-266.
14. Eusuff, M.M., and Lansey, K.E. (2003). "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm." *J. of Water Resour Plan Manage*, 129, 210-225.
15. Tospornsampan, J., Kita, I., Ishii, M., and Kitamura, Y. (2007). "Split-pipe design of water distribution network using simulated annealing." *Int. J. of Comput. Inform. Syst. Sci. Eng.*, 1, 153-163.
16. Zecchin, A.C., Maier, H.R., Simpson, A.R., Leonard, M., and Nixon, J.B. (2007). "Ant colony optimization applied to water distribution system design: Comparative study of five algorithms." *J. of Water Resour Plan Manage*, 133, 87-92.
17. Sedki, A., and Ouazar, D. (2012). "Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems." *J. of Advanced Eng. Inform.*, 26, 582-591.
18. Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). "Particle swarm optimization." *In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Australia Perth, 1942-1948.
19. Gaing, Z.L. (2004). "A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system." *J. of IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19, 384-391.
20. Hassanzadeh, I., and Mobayen, S. (2011). "Controller design for rotary inverted pendulum system using evolutionary algorithms." *J. of Mathematical Problems in Engineering*, doi: 10.1155/2011/572424.
21. Lin, C., and Hung, S. (2013). "Automatic multi-cycle reload design of pressurized water reactor using particle swarm optimization algorithm and local search." *J. of Annals of Nuclear Energy*, 59, 255-260.
22. Sedki, A., and Ouazar, D. (2012). "Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems." *J. of Advanced Engineering Informatics*, 26, 582-591.
23. Hassanzadeh, I., and Mobayen, S. (2008). "PSO-Based controller design for rotary inverted pendulum system." *J. of Applied Sciences*, 8, 2907-2912.
24. Montalvo, J., Schwarze, S., and Pérez-García, R. (2010). "Multi-objective particle swarm optimization applied to water distribution systems design: An approach with human interaction." *J. of Mathematical and Computer Modelling*, 52, 1219-1227.
25. Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2 user's manual*, Reports EPA/600/R-00/057. US Environ. Prot. Agency, Cincinnati, Ohio.
26. Kennedy, J., and Eberhart, R.A. (1997). "Discrete binary version of the particle swarm algorithm." *Proceedings of the Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 4104-4109.
27. Angeline, P. (1998). "Using selection to improve particle swarm optimization." *Optimization Conference on Evolutionary Computation*, Piscataway, New Jersey.
28. Bergh, F.V., and Engelbrecht, A.P. (2002). "A new locally convergent particle swarm optimization." *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Hammamet, Tunisia.
29. Riget, J., and Vesterstrom J.A. (2002). *Diversity-guided particle swarm optimizer- The ARPSO*, EVALife Technical Report, no 2002-2, 2002.
30. USEPA. (2014). *EPANET programmer's toolkit, water supply and water resources division of the U.S. environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory*, USA.
31. Fujiwara, O., and Khang, D.B. (1990). "A two phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *J. of Water Resour. Res.*, 26, 539-549.
32. Reza, J., Martinez, J., Gil, C., and Banos, R. (2007). "Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks." *J. of Water Resour. Manag.*, 22, 1367-1379.
33. Zecchin, A.C., Maier, H.R., Simpson, A.R., Leonard, M., Roberts, A.J., and Berrisford, M.J. (2006). "Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization." *J. of Math. Comput. Model.*, 44, 451-468.
34. Dandy, G.C., Simpson, A.R., and Murphy, L.J. (1996). "An improved genetic algorithm for pipe network optimization." *J. of Water Resour. Res.*, 32, 449-458.
35. Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y., and Tan, C.L. (2003). "Ant colony optimization for the design of water distribution systems." *J. of Water Resour. Plan. Manage*, 129, 200-209.
36. Afshar, M.H., Akbari, M., and Mariño, M.A. (2005). "Simultaneous layout and size optimization of water distribution networks: Engineering approach." *J. of Infrastructure Systems*, 11, 221-230. (In Persian)