

# بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب با الگوریتم دسته ذرات با قابلیت پرواز بازگشتی و مجهز به حافظه هارمونی

آزاده احمدی<sup>۲</sup>

محسن نفیسی<sup>۱</sup>

پذیرش ۹۳/۵/۲۶

دریافت ۹۲/۱۲/۱۲

## چکیده

نبود یک شبکه فاضلاب کارا، باعث به خطر افتادن سلامت عمومی و شیوع بیماری‌های واگیردار در جوامع شهری می‌شود. هزینه‌های زیاد احداث این شبکه‌ها و وجود محدودیت‌های مالی، سبب ورود روش‌های مختلف بهینه‌سازی در طراحی این شبکه‌ها شده است. مسئله طراحی شبکه‌های فاضلاب، دارای متغیرهای تصمیم گسسته و پیوسته همزمان است. علاوه بر آن، پیچیدگی زمانی غیرخطی این‌گونه مسائل باعث استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی در طراحی شبکه‌های فاضلاب شده است. در این پژوهش، از الگوریتم دسته ذرات با قابلیت پرواز بازگشتی و مجهز به حافظه هارمونی در بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب استفاده شد. تابع هدف، شامل حداقل کردن هزینه‌های حفاری و تهیه لوله‌های شبکه، با توجه به قطرهای موجود در بازار بود. استفاده از مکانیسم‌های پرواز بازگشتی و حافظه هارمونی، مانع از پرواز بی‌ثمر ذرات و افزایش کارایی و ثبات محاسباتی الگوریتم دسته ذرات می‌شود. در مطالعه حاضر، قیود مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب در دو سطح، بررسی و ارضا شدند که موجب همگرایی مطلوب الگوریتم ذرات، در مقایسه با روش‌های معمول جری‌دهی در سایر روش‌های تکاملی شد. برای تعیین فضای امکان‌پذیر متغیرهای تصمیم، از مدل هیدرولیکی معادله مانینگ استفاده شد. کارایی الگوریتم با ارائه دو نمونه از شبکه‌های فاضلاب نشان داده شد. نتایج، بهبود محسوسی در کاهش هزینه‌ها نسبت به دیگر الگوریتم‌ها و ثبات محاسباتی بیشتری را نسبت به دسته ذرات استاندارد در بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب، الگوریتم دسته ذرات، حافظه هارمونی، مکانیسم پرواز بازگشتی

## Sewer Networks Optimization by Particle Swarm Optimization with Abilities of Fly-Back Mechanism and Harmony Memory

M. Nafisi<sup>1</sup>

A. Ahmadi<sup>2</sup>

(Received March 3, 2014

Accepted Aug. 17, 2014)

### Abstract

Lack of an efficient sewer network in urban areas threatens public health and may give rise to contagious diseases. Various optimization methods have been developed for use in designing sewers networks in response to a number of requirements such as the high costs of constructing sewer networks, financial limitations, the presence of both discrete and continuous decision variables, and the nonlinear time complexity of such design problems. In this study, the particle swarm optimization algorithm (PSO) with the capability of "fly-back" mechanism equipped with the harmony search (HPSO) is used for the optimization of sewers network designs. The objective function consists of minimizing the excavation and embedding costs of commercial pipes. The fly-back mechanism and the harmony memory method are used to prevent leaving out variables from the feasible space of the problem in an attempt to enhance model efficiency. Model constraints are satisfied at two levels, which leads to the desirable convergence of the PSO algorithm as compared to the conventional penalty methods in alternative evolutionary algorithms. In order to determine the admissible decision variables, the Manning equation is used as a hydraulic model. The performance of the proposed algorithm is shown by presenting two examples of sewer networks. Compared to the PSO algorithm used in sewer network optimization models, the proposed model exhibits a tangible improvement in cost reduction and a higher computational stability.

**Keywords:** Sewer Networks Optimization, Particle Swarm Optimization, Harmonic Memory, Fly-Back Mechanism.

1. MSc Student, Dept. of Civil Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan  
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Isfahan University of Tech., Isfahan  
(Corresponding Author) (+98 31) 33913845 aahmadi@cc.iut.ac.ir

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان  
۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان (نویسنده مسئول)  
۳۳۹۱۳۸۴۵aahmadi@cc.iut.ac.ir (۰۳۱)

برنامه‌ریزی مرتبه دوم، به بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب پرداختند. متغیرهای تصمیم‌گوریتیم ژنتیک به‌عنوان بهینه‌ساز خارجی قطر و محل قرارگیری ایستگاه‌های پمپاژ، متغیرهای تصمیم‌برنامه‌ریزی مرتبه دوم شیب و عمق حفاری پایین‌دست لوله‌ها در نظر گرفته شد. حقیقی و بخشی‌پور با توجه به وجود قیدهای غیرخطی و گسسته در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب و اهمیت ارضای آن‌ها، الگوریتیم ژنتیک باینری را توسعه دادند که در آن، تمامی قیدهای شبکه‌های فاضلاب به‌صورت ساماندهی شده، برآورد شد و در نتیجه تابع هدف، آزادانه بهینه شد که با طبیعت الگوریتیم ژنتیک همخوانی دارد [۸] و [۹]. افشار در بهینه‌سازی شبکه‌های تخلیه اضطراری سیلاب، رویکردی نیمه مقید از الگوریتیم جامعه مورچه‌ها ارائه کرد، به‌نحوی که برخی قیدهای هیدرولیکی صریحاً در فرایند تصمیم‌گیری و مابقی با رویکردهای تخصیص جریمه، نظیر روش پنالتی، در تابع هدف در نظر گرفته شدند [۱۰]. افشار و همکاران در مطالعه‌ای از روش اتومای سلولی برای بهینه‌سازی اجزای شبکه‌های فاضلاب بهره بردند. رویکرد ارضای قیود در این مطالعه، جریمه‌دهی بود. الگوریتیم در مقایسه با الگوریتیم ژنتیک و روش‌های ریاضی تعداد ارزیابی کمتری از تابع هدف انجام داده و سرعت محاسبات بالاتری دارد [۱۱]. در این روش به دلیل پیچیدگی محاسبات فقط متغیر تصمیم شیب، بهینه شده است.

یکی از پرکاربردترین روش‌های تکاملی که بر پایه انگیزه رفتار اجتماعی پرندگان شکل گرفته، بهینه‌سازی دسته ذرات<sup>۲</sup> است. دسته ذرات به توابع ویژه‌ای مانند آنچه تلاقی و یا جهش در الگوریتیم ژنتیک و یا به‌روز رسانی میزان فرومون در کلونی مورچه‌ها است، نیاز ندارد و ذرات، فقط با استفاده از سرعت داخلی، حرکت خود را به‌روز می‌کنند. همچنین حافظه این روش، اطلاعات خود را تنها از راه حرکت بهترین ذره دسته در تاریخچه، دریافت می‌کند [۱۲]. ایزکوئیدرو و همکاران از الگوریتیم دسته ذرات برای بهینه‌سازی شبکه فاضلاب استفاده کردند. رویکرد ارضای قیود در مطالعه آن‌ها، تخصیص جریمه به پاسخ‌های ناممکن عنوان شده است. آنها تعداد ذرات و تعداد تکرارهای الگوریتیم برای حل شبکه‌ای متشکل از شش لوله را، به ترتیب ۱۰۰ ذره و ۸۰۰ تکرار در نظر گرفتند [۱۳].

امروزه بالا بودن هزینه‌های محاسباتی، مهم‌ترین عامل عدم کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در طراحی شبکه‌های واقعی است. از طرفی روش‌های فرا ابتکاری با توجه به ماهیت تصادفی اما جهت‌دار خود، رسیدن به جواب‌های بهینه سراسری را تضمین نمی‌کنند و به تنظیم پارامترها با توجه به مسئله در حال بررسی نیاز دارند. به همین

فاضلاب مناطق صنعتی، بازرگانی یا مسکونی به‌منظور استفاده مجدد و یا رهاسازی، توسط شبکه‌های فاضلاب، جمع‌آوری و تصفیه می‌شوند. یک شبکه فاضلاب دارای جانمایی درختی است که از تعدادی لوله و چاهک آدم‌رو تشکیل شده است و در نهایت به یک یا چند خروجی ختم می‌شود. با توجه به متغیرهای تصمیم پیوسته و گسسته مانند شیب و قطر لوله‌ها، روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای کاهش هزینه‌های اقتصادی در این شبکه‌ها، به‌کار گرفته شده است. طراحی بهینه و کم‌هزینه شبکه‌ها را می‌توان به‌طور خلاصه، بهینه‌سازی یک تابع هدف وابسته به قیدهای توپولوژیکی، هندسی و هیدرولیکی معرفی کرد. نخستین تلاش پژوهشگران برای بهینه‌سازی اجزای این شبکه‌ها، با جانمایی مشخص، استفاده از برنامه‌ریزی خطی بود [۱]. اگرچه محدودیت‌هایی مانند وجود نداشتن روابط خطی بین متغیرهای تصمیم به‌دلیل شرایط متغیر هیدرولیک جریان و گسسته بودن قطر لوله‌های موجود در بازار، استفاده از برنامه‌ریزی خطی را به چالش کشیده است؛ اما همچنان مطالعات در بهبود استفاده از این روش ادامه دارد [۲].

برنامه‌ریزی پویا و نسخه اصلاح شده آن، یعنی برنامه‌ریزی پویای دیفرانسیلی گسسته<sup>۱</sup>، عملکرد مطلوبی در زمینه بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب نشان داده است و استفاده از آن در برخی از مطالعات اخیر، برای مقایسه با نتایج روش‌های فرا ابتکاری و تعیین پارامترهای همگرایی آن‌ها، به چشم می‌خورد؛ اما نیاز به گسسته‌سازی متغیرها، پیچیده شدن و بالا رفتن حجم محاسبات با افزایش ابعاد مسئله و وارد کردن ترتیب گام‌ها توسط کاربر، کاربرد آن را در شبکه‌هایی با ابعاد کم، محدود کرده است [۳] و [۴]. با توجه به ضعف روش‌های بهینه‌سازی ریاضی در مواجهه با برخی مسائل مهندسی، هوش مصنوعی و الگوریتیم‌های فرا ابتکاری متنوعی ظهور پیدا کردند و به‌سرعت در مسائل مختلف مهندسی به‌کار گرفته شدند. هنی و همکاران از الگوریتیم ژنتیک برای طراحی شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی استفاده کردند [۵]. ستوده نیز از الگوریتیم ژنتیک، در طراحی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب برای بهینه‌سازی شیب لوله‌ها استفاده کرد [۶].

لیانگ و همکاران در مطالعه‌ای از دو روش فرا ابتکاری الگوریتیم ژنتیک و روش جستجوی ممنوعه، در بهینه‌سازی اجزای شبکه‌های فاضلاب بهره بردند. نتایج به‌دست آمده صرفه اقتصادی ۹ درصد در الگوریتیم ژنتیک و صرفه اقتصادی ۱۶ درصد در روش جستجوی ممنوعه را نسبت به هزینه احداث یک شبکه واقعی نشان داد [۷]. پن و کائو با ترکیب روش‌های الگوریتیم ژنتیک و

<sup>2</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>1</sup> Discrete Differential Dynamic Programming (DDDP)

C هزینه ساخت شبکه، N تعداد لوله‌های شبکه، M تعداد چاهک‌های آدم‌رو،  $K_p$  هزینه واحد تهیه و نصب لوله به‌عنوان تابعی از قطر لوله یعنی  $D_l$  و متوسط ارتفاع حفاری دو سر لوله یعنی  $E_l$  و  $K_m$  هزینه احداث چاهک آدم‌رو به‌عنوان تابعی از ارتفاع آن یعنی  $h_m$  است.

## ۲-۲- قیدهای هیدرولیکی و ساختگاهی

۲-۲-۱- حداقل عمق خاک‌ریزی روی لوله‌ها و تأسیسات شبکه این قید برای حفاظت از لوله‌ها، در برابر بارهای وارده و همچنین اطمینان از پایین‌تر قرار گرفتن شبکه فاضلاب از شبکه انتقال آب شرب در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۲)

$$E_{min} \leq E_l \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (2)$$

که در این رابطه  $E_{min}$  حداقل عمق حفاری لوله،  $E_l$  متوسط عمق حفاری دو سر لوله  $l$ ام و N تعداد لوله‌های شبکه است.

## ۲-۲-۲- حداقل قطر لوله‌های شبکه

لوله‌های فاضلاب باید قادر به عبور دبی طرح در نظر گرفته شده برای آن‌ها باشند (رابطه ۳)

$$Q_l \geq Q_{l(design)} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (3)$$

که در این رابطه  $Q_l$  ظرفیت حمل لوله  $l$ ام با توجه به روابط مقاومت جریان مانند معادله مایننگ و  $Q_{l(design)}$  دبی طراحی در نظر گرفته شده برای لوله  $l$ ام است.

## ۲-۲-۳- حداقل و حداکثر سرعت جریان در لوله‌ها

برای جلوگیری از خوردگی لوله‌ها و نیز اطمینان از تأمین سرعت خودشویی، حداقل و حداکثر سرعت جریان در نظر گرفته می‌شود (روابط ۴ و ۵)

$$V_l \leq V_{lmax} \quad (4)$$

$$V_l \geq V_{lmin} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (5)$$

که در این روابط  $V_{lmax}$  بیشینه سرعت جریان در لوله  $l$ ام،  $V_{lmin}$  حداقل سرعت جریان (سرعت خودشویی) در لوله  $l$ ام است.

دلیل، مطالعات در ابداع روش‌های نوین بهینه‌سازی، تنظیم پارامترهای روش‌های بهینه‌سازی موجود و نحوه ارضای قیود برای همگرایی مطلوب این روش‌ها ادامه دارد. برای افزایش نرخ همگرایی و دقت در الگوریتم دسته ذرات، لی و همکاران نسخه‌ای اصلاح‌شده از این الگوریتم را، با عنوان دسته ذرات ابتکاری (HPSO)<sup>۱</sup> معرفی کردند. این الگوریتم از قابلیت پرواز بازگشتی<sup>۲</sup> به‌همراه حافظه هارمونی<sup>۳</sup> برخوردار است. آن‌ها این الگوریتم را در بهینه‌سازی طراحی سازه خرپا به‌کار بردند. نتایج، نرخ همگرایی بیشتر را نسبت به الگوریتم دسته ذرات استاندارد نشان می‌دهد [۱۴].

در این مقاله، با توجه به اهمیت نحوه ارضای قیود در روش‌های فرا ابتکاری به‌منظور همگرایی و تسریع نرخ آن‌ها و همچنین افزایش ثبات محاسباتی از الگوریتم HPSO در بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب بهره گرفته شد. برای استفاده از این الگوریتم، قیدهای ساختگاهی با استفاده از حافظه هارمونی و قیدهای هیدرولیکی با استفاده از مکانیسم پرواز بازگشتی، به‌صورت مستقیم در بهینه‌سازی اجزای شبکه‌های فاضلاب شامل قطر و شیب، وارد شد که منجر به افزایش کارایی و ثبات محاسباتی الگوریتم و عملکرد مناسب آن در بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب شد. در این مقاله پس از تعریف مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب، تفاوت الگوریتم HPSO با الگوریتم دسته ذرات و همچنین نحوه تقسیم فضای مسئله و تعیین سطوح ارضای قیود ساختگاهی و هیدرولیکی شرح داده شد. سپس با ارائه مثال‌هایی از بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب، نتایج الگوریتم HPSO با سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری به‌کار رفته در این زمینه مقایسه شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- ساختار مدل بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب

هدف از بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب با جانمایی درختی مشخص، حداقل کردن هزینه‌های احداث است. تابع هدف به‌منظور برآورد هزینه‌های ساخت شبکه، بدون در نظر گرفتن ایستگاه پمپاژ و دهانه‌های ریزش به‌صورت ریاضی مطابق رابطه ۱ بیان می‌شود [۱۵]

$$C = \sum_{i=1}^N L_i K_p (D_i, E_i) + \sum_{m=1}^M K_m (h_m) \quad (1)$$

که در این رابطه

<sup>۱</sup> Heuristic Particle Swarm Optimization (HPSO)

<sup>۲</sup> Fly-Back Mechanism

<sup>۳</sup> Harmony Memory

## ۲-۲-۴- حد اقل شیب لوله‌های شبکه

به منظور اطمینان از ثقلی اجرا شدن شبکه در حین فرایند نصب لوله‌ها، حد اقل شیب به عنوان شیب حد اقل اجرا در نظر گرفته می‌شود. شیب طولی لوله‌های شبکه باید بیشتر از حد اقل شیب اجرا در نظر گرفته شود (رابطه ۶)

$$S_l \geq S_{\min(\text{construction})} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (6)$$

که در این رابطه

$S_{\min(\text{construction})}$  حد اقل شیب ساختگاهی و  $S_l$  شیب طولی لوله  $l$  است.

## ۲-۲-۵- حد اقل و حداکثر عمق استغراق نسبی در لوله‌ها

برای اطمینان از تحت فشار قرار نگرفتن لوله‌های شبکه و تأمین سرعت خودشویی، این قید در نظر گرفته می‌شود (روابط ۷ و ۸)

$$\eta_{l\min} \leq \eta \leq \eta_{l\max} \quad (7)$$

$$\eta = \left(\frac{h}{D}\right)_l \quad (8)$$

که در این روابط

$\eta_l$  استغراق نسبی در لوله  $l$  ام،  $\eta_{l\min}$  حد اقل استغراق نسبی مجاز لوله  $l$  ام،  $\eta_{l\max}$  حداکثر استغراق نسبی مجاز لوله  $l$  ام،  $h_l$  عمق جریان در لوله  $l$  ام و  $D_l$  قطر لوله  $l$  ام است.

## ۲-۲-۶- انتخاب قطر لوله‌های فاضلاب با توجه به قطرهای موجود در بازار

طبق رابطه ۹، قطر انتخابی برای لوله  $l$  ام باید عضوی از مجموعه قطرهای موجود در بازار یعنی  $\bar{D}_{\text{commercial}}$  باشد

$$D_l \in \bar{D}_{\text{commercial}} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (9)$$

## ۲-۲-۷- قاعده تلسکوپی قرارگیری لوله‌ها

قطر انتخابی برای هر لوله باید بزرگ‌تر یا مساوی قطر لوله بالادست آن باشد (رابطه ۱۰)

$$D_l \geq D_{l(\text{upstream})} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (10)$$

که در این رابطه

$D_{l(\text{upstream})}$  بیشینه قطر لوله‌های بالادست لوله  $l$  ام است.

تفاوت الگوریتم HPSO با الگوریتم PSO، در چگونگی ارزیابی قیود مسئله است. در این بخش ابتدا روش دسته ذرات استاندارد و سپس چگونگی ارزیابی قیود در الگوریتم HPSO شرح داده شد.

## ۲-۳-۱- تشریح الگوریتم دسته ذرات استاندارد

الگوریتم دسته ذرات، نخستین بار توسط کندی و ابرهارت معرفی شد. در این الگوریتم، افراد یک جمعیت به سمت جستجوی فضا حرکت می‌کنند و هر فرد به سرعت به عنوان یک عملگر برای به دست آوردن یک مجموعه جدید از افراد عمل می‌کند. این افراد، ذره<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. در دسته ذرات استاندارد، هر ذره دارای سه بردار است [۱۲]

$$X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is})^t \quad (11)$$

$$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{is})^t \quad (12)$$

$$V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{is})^t \quad (13)$$

که در این روابط

$X_i$  بردار مکان ذره در یک فضای  $t$  بعدی و با  $s$  متغیر تصمیم،  $P_i$  بردار بهترین مکان ذره در گذشته خود و  $V_i$  بردار سرعت ذره که ذره به وسیله آن مکان خود را به روز می‌کند،  $t$  بعد مسئله،  $s$  تعداد متغیرهای تصمیم،  $i$  اندیس تعداد ذرات،  $x_i$  مقدار متغیر تصمیم  $s$  ام مربوط به ذره  $i$  ام،  $p_{is}$  بهترین مقدار متغیر تصمیم  $s$  ام در تاریخچه ذره  $i$  ام و  $v_{is}$  مقدار سرعت متغیر تصمیم  $s$  ام برای استفاده در به روزرسانی مقدار ذره  $i$  ام در تکرارهای بعدی است.

$$\text{new}X_i = \text{current}X_i + \text{new}V_i \quad (14)$$

$$\text{new}V_i = \omega \cdot \text{current}V_i + c_1 \cdot \text{rand}() \cdot (P_i - \text{current}X_i) + c_2 \cdot \text{rand}() \cdot (P_g - \text{current}X_i) \quad (15)$$

که در این روابط

$\omega$  ضریب اینرسی،  $c_1$  و  $c_2$  پارامترهای اینرسی است که در عددی تصادفی در بازه صفر تا ۱ ضرب می‌شود،  $P_g$  بردار بهترین مکان به دست آمده در بین تمامی بردارهای  $P_i$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که در رابطه ۱۵ دیده می‌شود، بردار سرعتی که برای به روز شدن بردار مکان ذره به کار می‌رود، متأثر از اختلاف بردار مکان ذره با بردار بهترین مکان به دست آمده در گذشته خود و بردار بهترین مکان به دست آمده در میان همه ذرات است. تعداد تکرارها برای همگرایی می‌تواند مشخص باشد و یا در حالتی که

<sup>1</sup> Particle

## ۲-۳- تشریح الگوریتم HPSO

نتیجه بهتری برای تابع هدف حاصل نشد، پایان یابد. در تکرار نخست الگوریتم، بردار مکان تمامی ذرات به صورت تصادفی تولید می‌شود. انتخاب تصادفی تا زمانی ادامه می‌یابد که بردار مکان هر ذره که در واقع حلی از مسئله است، تمامی قیود مسئله را برآورده سازد. باید توجه داشت که در تکرار نخست، بردار  $P_i$  با بردار  $X_i$  یکسان است. پس از آن، بردار سرعت ذرات  $V_i$  به صورت تصادفی انتخاب و در طول تکرارهای بعد، بردار مکان و سرعت ذرات با استفاده از روابط ۱۴ و ۱۵ به روز می‌شود [۱۲].

### ۲-۳-۲- ارزیابی قیود در الگوریتم HPSO

در نحوه برخورد با قیدها و ذراتی که به حلی ناممکن می‌انجامند، رویکردهای متفاوتی وجود دارد، از جمله این رویکردها می‌توان به ترمیم جواب‌های ناموجه، دور ریختن جواب‌های ناموجه و یا روش پنالتی که در آن جریمه‌ای به ذرات ناموجه در تابع هدف اختصاص می‌یابد، اشاره کرد. استفاده از روش جریمه در دسته ذرات، باعث بازگشت ذرات به بهترین مکان در تاریخچه خود می‌شود. این امر ممکن است در گستره جستجوی کلی تأثیرگذار باشد [۱۶]. تعیین برخی پارامترهای تنظیم‌شونده در تابع هدف که بین مقدار تابع هدف و جریمه، تعادل ایجاد می‌کند، از دیگر مشکلات این روش است.

در الگوریتم HPSO از رویکرد پرواز بازگشتی به همراه حافظه هارمونی برای ارزیابی قیود مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. شکل ۱ فلوچارت الگوریتم HPSO را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، در این الگوریتم دو سطح برای بررسی ارزیابی قیود به کار گرفته شده است. سطح اول مربوط به بررسی تخطی کردن پرواز ذرات از کران در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصمیم و سطح دوم مربوط به تخطی کردن پرواز ذرات از قیدهای ویژه مسئله است. اگر دو سطح بررسی یکسان در نظر گرفته شوند، در مکانیسم پرواز بازگشتی، ذرات به مکان قبلی خود بازگردانده می‌شوند که به این ترتیب امکان گرفتار شدن الگوریتم در نقاط بهینه محلی افزایش می‌یابد [۱۷]. شکل ۲ نحوه تعیین فضای امکان‌پذیر مسئله و ارتباط بین سطوح در نظر گرفته شده برای بررسی ارزیابی قیود را نشان می‌دهد. اگر ذرات در سطح اول بررسی از کران متغیرهای تصمیم تخطی کرده باشند، با استفاده از حافظه هارمونی به کران بازگردانده می‌شوند و اگر مکان بازگردانده شدن ذرات از قیود ویژه مسئله تخطی کنند، با مکانیسم پرواز بازگشتی به مکان قبلی خود بازگردانده می‌شوند.

### ۲-۳-۳- استفاده از حافظه هارمونی در الگوریتم HPSO

حافظه هارمونی، بخشی از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی است که با بررسی چگونگی عملکرد یک آهن‌گساز در یافتن بهترین

هارمونی برای گوش‌نوازتر کردن قطعه در دست ساخت به وجود آمده است [۱۸]. در این الگوریتم تمامی بردارهای موجود در حافظه هارمونی، در فضای امکان‌پذیر مسئله قرار دارند. تعداد بردارهای پاسخ، برابر اندازه در نظر گرفته شده برای حافظه است. بردار پاسخ جدید با انتخاب ترکیبی و به صورت تصادفی از بردارهای پاسخ ذخیره‌شده در حافظه هارمونی پدید می‌آید. این پاسخ‌های ترکیبی جدید، قطعاً در کران تعیین شده برای متغیرهای تصمیم قرار خواهند داشت؛ اما الزاماً قیود ویژه تعیین شده، مسئله را ارضا نمی‌کنند. با بررسی ارزیابی قیود ویژه مسئله در پاسخ جدید، چنانچه نتیجه بهتری برای تابع هدف پدید آید، پاسخ جدید جایگزین بدترین پاسخ موجود در حافظه می‌شود. در الگوریتم PSO، مجموعه بردارهای بهترین مکان ذرات در تاریخچه ( $P_i$ ها) چنین حافظه‌ای را تشکیل می‌دهند. همان‌طور که اشاره شد، زمانی از عناصر این بردار استفاده می‌شود که در سطح اول بررسی ارزیابی قیود، بردار مکان به روز شده ذرات، از کران متغیرهای تصمیم تخطی کرده باشند. در مطالعه حاضر، با تعریف سطوح ارزیابی قیود در شبکه‌های فاضلاب و با استفاده از الگوریتم HPSO، میزان ثبات محاسباتی و نرخ کارایی الگوریتم، نسبت به سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری با حل مثال‌هایی نشان داده شده است.

### ۲-۳-۴- تعیین سطوح بررسی ارزیابی قیود، در مسئله بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب

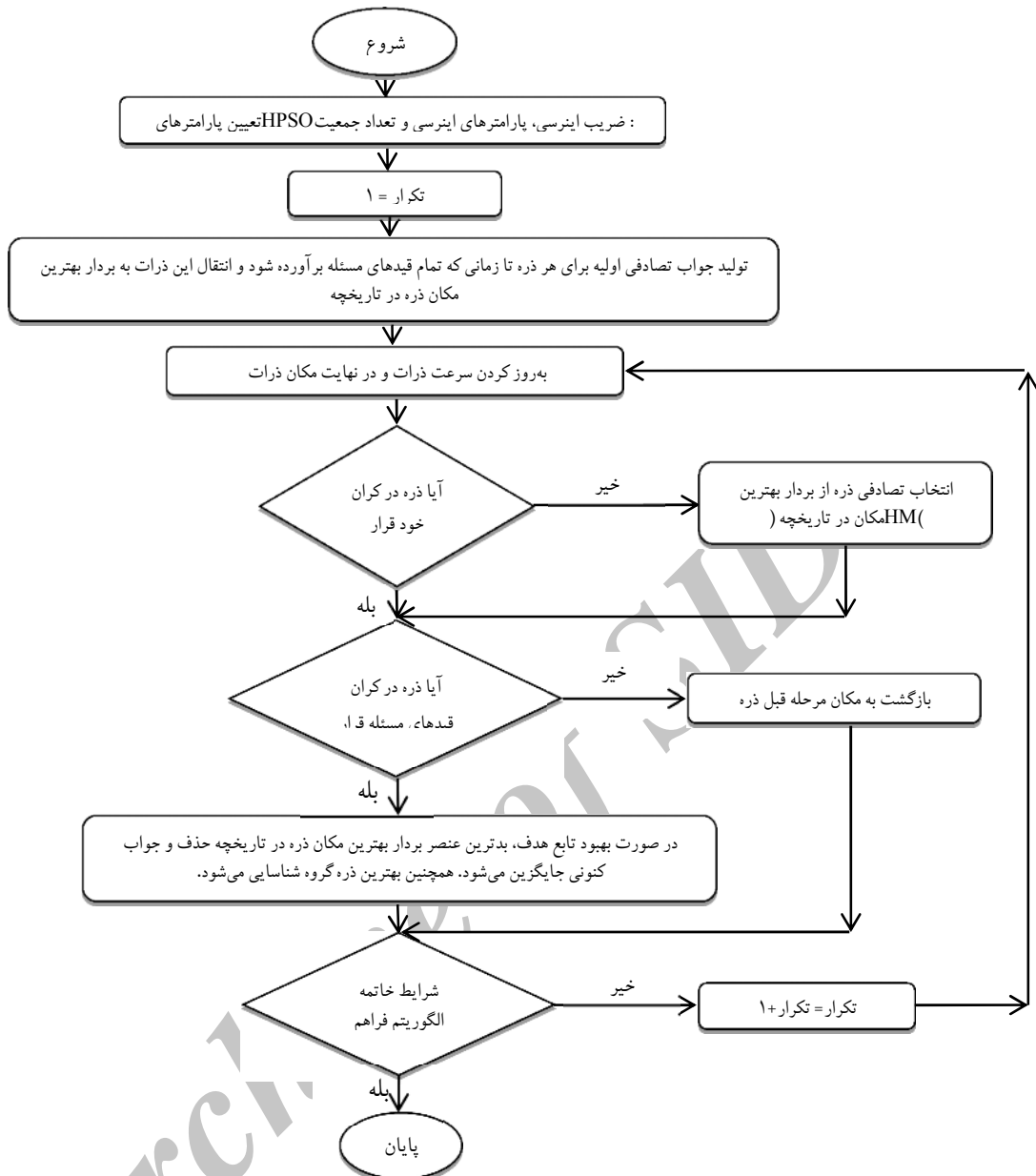
در بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب، قطر و شیب لوله‌ها به عنوان متغیر تصمیم انتخاب می‌شوند. در این مطالعه، برای استفاده از حافظه هارمونی در سطح اول ارزیابی قیود، کران بالا و پایین متغیر تصمیم قطر به ترتیب حد بالا و پایین قطرهای تجاری تعیین شد (رابطه ۱۶). همچنین برای متغیر تصمیم شیب کران بالا، حداکثر شیب ساختگاهی ( $S_{max(construction)}$ ) و کران پایین، حداقل شیب ساختگاهی ( $S_{min(construction)}$ ) است (رابطه ۱۷). حداکثر شیب ساختگاهی به منظور کنترل حداکثر ارتفاع حفاری شبکه در نظر گرفته می‌شود.

$$D_{min(commercial)} \leq D_l \leq D_{max(commercial)} \quad \forall l = 1, \dots, n \quad (16)$$

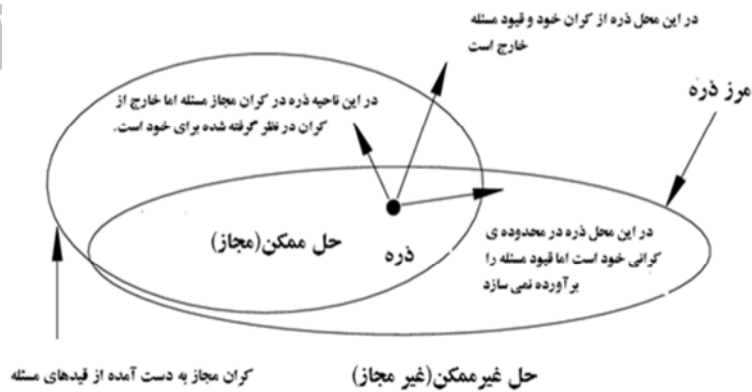
$$S_{min(commercial)} \leq S_l \leq S_{max(commercial)} \quad \forall l = 1, \dots, n \quad (17)$$

که در این روابط

$D_l$  قطر لوله  $l$ ام،  $D_{min(cimmercial)}$  حداقل قطر لوله تجاری موجود،  $D_{max(cimmercial)}$  حداکثر قطر تجاری موجود،  $S_l$  شیب لوله  $l$ ام و  $N$  تعداد لوله‌های شبکه است.



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم HPSO



شکل ۲- تعیین سطوح ارضای قیود در فضای مسئله در الگوریتم HPSO [۱۴]

توجه به معادله پیوستگی تعیین و در رابطه ۲۶ قرار می‌گیرد. این شیب، حداقل شیب لازم برای عبور دبی طرح لوله است ( $S_{l\ min1\ (hydraulic)}$ ). رابطه ۲۸ حداقل شیب با توجه به تأمین سرعت خودشویی را ارائه می‌دهد ( $S_{l\ min2\ (hydraulic)}$ ). عمق استغراق نسبی در این حالت ( $\eta_{l\ min}$ ) از معادله پیوستگی در رابطه ۲۷ و با استفاده از روش‌های عددی به دست می‌آید

$$\max(S_{l\ min1\ (hydraulic)}, S_{l\ min2\ (hydraulic)}) \leq S_l \leq S_{l\ max\ (hydraulic)} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (25)$$

$$S_{l\ min1\ (hydraulic)} = (n \times V_l^2) \times (R^{\frac{2}{3}} (\eta_{l\ max}))^{-2} \quad (26)$$

$$Q_{l\ (design)} = V_{clean} A (\eta'_{l\ min}) \quad (27)$$

$$S_{l\ min2\ (hydraulic)} = (n \times V_{min}^2) \times (R^{\frac{2}{3}} (\eta'_{l\ min}))^{-2} \quad (28)$$

قاعده تلسکوپی به صورت رویه اصلاحی، در سطح دوم بررسی ارضای قیود به الگوریتم معرفی شده است. به این ترتیب که اگر قطری در بردار پاسخ، بزرگ‌تر از قطر لوله پایین دست خود بود، با قطر پایین دست تعویض می‌شود. کران شیب با توجه به رابطه ۲۵ برای قطر اصلاح شده محاسبه و چنانچه شیب موجود لوله در بردار پاسخ از این کران تخطی کند، ذره به مکان قبلی خود باز می‌گردد (مکانیسم پرواز بازگشتی). با توجه به اعمال مستقیم قیود هیدرولیکی و ساخت به فرایند بهینه‌سازی شبکه، می‌توان از این محدودیت‌ها برای انتخاب جمعیت اولیه به نحوی که در فضای امکان‌پذیر مسئله باشند، بهره برد.

### ۳- کاربرد مدل در طراحی شبکه فاضلاب

برای بررسی کارایی و ثبات محاسباتی الگوریتم HPSO، دو نمونه از شبکه‌های فاضلاب موجود در ادبیات بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب، حل و نتایج با سایر روش‌ها مقایسه شد. مشخصات رایانه به‌کار رفته در تمامی اجراها Intel Core i5-2.3 GHz CPU بود.

#### ۳-۱- مسئله نمونه ۱، شبکه شهر کرمان

این مسئله به‌عنوان قسمتی از شبکه جمع‌آوری شهر کرمان و با استفاده از الگوریتم HPSO با به‌کارگیری مدل هیدرولیکی مانینگ با ضریب ثابت ۰/۰۱۳ حل شد. تابع هدف مطابق رابطه ۱ و هزینه نصب و کارگذاری لوله‌ها برای واحد طول از رابطه ۲۹ و هزینه احداث چاهک‌های آدم‌رو از رابطه ۳۰ به‌دست می‌آید [۱۱ و ۱۹]

$$K_p = 1.93e^{3.43D_l} + 0.812E_l^{1.53} + 0.437D_lE_l^{1.47} \quad (29)$$

$$K_h = 41.46h_m \quad (30)$$

که در این روابط

$e$  عدد نپر،  $D_l$  قطر لوله  $l$  ام برحسب متر،  $E_l$  متوسط عمق حفاری

سایر قیود که عمدتاً هیدرولیکی هستند، در تعیین محدوده قیود ویژه مسئله (سطح دوم ارضای قیود) به‌کار رفتند که در ادامه به نحوه استحصال آن‌ها اشاره می‌شود. تخطی پاسخ‌های به‌روز شده از محدوده قیدهای ویژه مسئله، منجر به بازگشت ذره به مکان قبلی خود می‌شود. در مطالعه حاضر از مدل هیدرولیکی معادله مانینگ استفاده شد (رابطه ۱۸). سطح مقطع و شعاع هیدرولیکی جریان در لوله‌ها از روابط ۱۹ و ۲۰ به دست می‌آید [۲]

$$Q_l = \frac{1}{n} A(\eta_l) R(\eta_l)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$A(\eta_l) = 0.25D_l^2 [\cos^{-1}(1-2\eta_l) - 2 \times (1-2\eta_l) \times \sqrt{\eta_l(1-\eta_l)}] \quad (19)$$

$$R(\eta_l) = \frac{A_l}{D_l \times \cos^{-1}(1-2\eta_l)} \quad (20)$$

که در این روابط  $Q_l$  دبی قابل حمل لوله  $l$  ام،  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $A(\eta_l)$  و  $R(\eta_l)$  به ترتیب سطح مقطع و شعاع هیدرولیکی جریان، به‌عنوان تابعی از استغراق نسبی لوله ( $\eta_l$ ) به‌شمار می‌روند.

کران بیشینه قطر لوله‌ها در سطح دوم ارضای قیود، همانند سطح اول حداکثر قطر تجاری موجود است؛ اما کران پایین قطر ( $D_{l\ min\ (hydraulic)}$ ) با توجه به عبور دبی طراحی لوله ( $Q_{l\ (design)}$ ) با بیشینه سرعت مجاز در لوله و با استغراق نسبی حداکثر مجاز لوله با استفاده از رابطه ۱۹ در رابطه پیوستگی تعیین می‌شود (رابطه ۲۱)

$$D_{l\ min\ (hydraulic)} = \sqrt{\frac{4 \times Q_{l\ (design)}}{V_{l\ max} \times \cos^{-1}(1-2\eta_{l\ max}) - 2 \times (1-2\eta_{l\ max}) \times \sqrt{\eta_{l\ max}(1-\eta_{l\ max})}}} \quad (21)$$

$$D_{l\ min\ (hydraulic)} \leq D_l \leq D_{l\ max\ (commercial)} \quad \forall l = 1, \dots, N \quad (22)$$

با مشخص بودن  $D_l$  کران بیشینه شیب ( $S_{l\ max\ (hydraulic)}$ ) با در نظر گرفتن قید سرعت بیشینه مجاز جریان در لوله با استفاده از حل عددی معادله پیوستگی (رابطه ۲۳) و یافتن استغراق نسبی هر لوله ( $\eta_{l\ max}$ ) و جایگذاری  $\eta_{l\ max}$  در معادله مانینگ از رابطه ۲۴ به‌دست می‌آید

$$Q_{l\ (design)} = V_{l\ max} A(\eta'_{l\ max}) \quad (23)$$

$$S_{l\ max\ (hydraulic)} = (n \times V_{l\ max}^2) \times (R^{\frac{2}{3}} (\eta'_{l\ max}))^{-2} \quad (24)$$

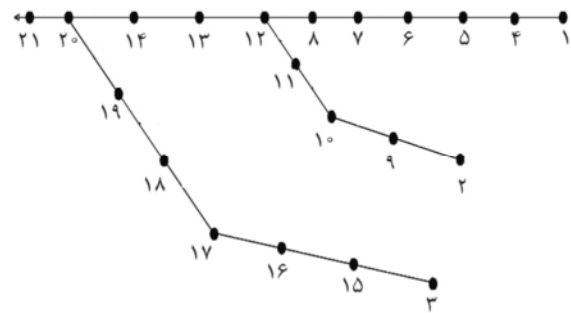
با مشخص بودن  $D_l$ ، کران حداقل شیب بزرگ‌ترین مقدار روابط ۲۶ و ۲۸ در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۲۵). در رابطه ۲۶ با فرض استغراق نسبی حداکثر مجاز در لوله  $l$  ام سرعت جریان در لوله با

جدول ۱- اطلاعات ورودی شبکه‌ی کرمان

| شماره لوله‌ها<br>(شماره گره<br>بالادست) | تراز ارتفاعی<br>بالادست<br>(متر) | تراز ارتفاعی<br>پایین‌دست<br>(متر) | طول<br>(متر) | دبی<br>(لیتر بر ثانیه) |
|---|----------------------------------|------------------------------------|--------------|------------------------|
| ۱                                       | ۷۴/۵۹                            | ۷۳/۶۶                              | ۲۶۰          | ۲۷/۹                   |
| ۲                                       | ۷۰/۷                             | ۶۹/۹                               | ۳۰۰          | ۵۴/۹                   |
| ۳                                       | ۷۳                               | ۷۱/۵                               | ۴۰۰          | ۲۱/۱                   |
| ۴                                       | ۷۳/۶۶                            | ۷۲/۱                               | ۴۶۰          | ۳۰/۴                   |
| ۵                                       | ۷۲/۱                             | ۷۱/۱۹                              | ۲۶۰          | ۳۲/۴                   |
| ۶                                       | ۷۱/۱۹                            | ۶۹/۸۵                              | ۳۰۰          | ۳۴                     |
| ۷                                       | ۶۹/۸۵                            | ۶۸/۲۴                              | ۴۵۰          | ۳۶/۶                   |
| ۸                                       | ۶۸/۲۴                            | ۶۷/۲۸                              | ۴۰۰          | ۳۸/۷                   |
| ۹                                       | ۶۹/۹                             | ۶۹/۳                               | ۲۷۰          | ۵۶/۲                   |
| ۱۰                                      | ۶۹/۳                             | ۶۸/۴                               | ۳۱۰          | ۵۸                     |
| ۱۱                                      | ۶۸/۴                             | ۶۷/۲۸                              | ۴۴۰          | ۵۹/۶                   |
| ۱۲                                      | ۶۷/۲۸                            | ۶۶/۲۲                              | ۴۷۰          | ۹۶/۷                   |
| ۱۳                                      | ۶۶/۲۲                            | ۶۵/۸۲                              | ۳۵۰          | ۱۰۱/۲                  |
| ۱۴                                      | ۶۵/۸۲                            | ۶۵/۴۲                              | ۳۴۰          | ۱۰۴/۷                  |
| ۱۵                                      | ۷۱/۵                             | ۷۰/۱                               | ۴۰۰          | ۲۶/۴                   |
| ۱۶                                      | ۷۰/۱                             | ۶۸/۶                               | ۴۰۰          | ۳۰                     |
| ۱۷                                      | ۶۸/۶                             | ۶۶/۸                               | ۵۰۰          | ۳۱/۹                   |
| ۱۸                                      | ۶۶/۸                             | ۶۶/۱                               | ۴۰۰          | ۴۰/۳                   |
| ۱۹                                      | ۶۶/۱                             | ۶۵/۴۲                              | ۵۹۰          | ۴۴/۶                   |
| ۲۰                                      | ۶۵/۴۲                            | ۶۴/۵                               | ۳۲۰          | ۱۶۵/۹                  |

بالادست و پایین دست لوله  $l$  ام برحسب متر،  $h_m$  ارتفاع چاهک آدم روی  $m$  برحسب متر است.

محدودیت‌های به‌کار رفته در مسئله حداقل سرعت  $0.3$  متر بر ثانیه، بیشینه سرعت  $3$  متر بر ثانیه و حداقل پوشش  $2/45$  متر بودند. حداقل و حداکثر استغراق نسبی به ترتیب  $0.1$  و  $0.82$  بود. جانمایی در شکل ۳ و اطلاعات مربوط به تراز ارتفاعی نقاط، دبی طراحی و طول هر لوله در جدول ۱ نشان داده شده است. قطرهای تجاری به‌کار رفته در شبکه  $200$ ،  $250$ ،  $300$ ،  $400$ ،  $500$  و  $600$  میلی‌متر در نظر گرفته شد. ضریب اینرسی  $\omega$  برابر  $0.6$  و پارامترهای اینرسی  $C_1$  و  $C_2$  با استفاده از توصیه ترلا در پژوهشی در سال  $2003$ ، مقدار  $2/7$  و تعداد ذرات  $50$  ذره و حداکثر تکرار در الگوریتم،  $800$  تکرار با توجه به اجرای الگوریتم در حل مسائل نمونه انتخاب شد [۲۰]. بهترین نتیجه تحلیل و طراحی شبکه در  $10$  اجرای الگوریتم HPSO در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳- شکل جانمایی شبکه کرمان

جدول ۲- طراحی و حل بهینه شبکه کرمان با استفاده از الگوریتم HPSO

| شماره لوله | شیب ( $10^{-3}$ ) | قطر<br>(میلی‌متر) | تراز حفاری بالادست<br>(متر) | تراز حفاری پایین‌دست<br>(متر) | استغراق نسبی | سرعت<br>(متر بر ثانیه) |
|------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------|------------------------|
| ۱          | ۳/۵۷              | ۲۵۰               | ۷۲/۱۴۰                      | ۷۱/۲۱۰                        | ۰/۶۷         | ۰/۸۰۲                  |
| ۲          | ۳/۲۲              | ۳۰۰               | ۶۸/۲۵۰                      | ۶۷/۲۸۴                        | ۰/۸۲         | ۰/۸۸۵                  |
| ۳          | ۴/۱۳              | ۲۰۰               | ۷۰/۵۵۰                      | ۶۸/۸۹۶                        | ۰/۸۲         | ۰/۷۶۵                  |
| ۴          | ۳/۳۹              | ۲۵۰               | ۷۱/۲۱۰                      | ۶۹/۶۵۰                        | ۰/۷۳         | ۰/۷۹۶                  |
| ۵          | ۳/۵               | ۲۵۰               | ۶۹/۶۵۰                      | ۶۸/۷۴۰                        | ۰/۷۶         | ۰/۸۱۳                  |
| ۶          | ۴/۴               | ۲۵۰               | ۶۸/۷۴۰                      | ۶۷/۴۰۰                        | ۰/۷۱         | ۰/۹۱۰                  |
| ۷          | ۳/۷۸              | ۲۵۰               | ۶۷/۴۰۰                      | ۶۵/۶۹۷                        | ۰/۸۲         | ۰/۸۵۰                  |
| ۸          | ۲/۱۶              | ۳۰۰               | ۶۵/۶۹۷                      | ۶۴/۸۳۰                        | ۰/۷۱         | ۰/۷۱۶                  |
| ۹          | ۳/۳۷              | ۳۰۰               | ۶۷/۲۸۴                      | ۶۶/۳۷۳                        | ۰/۸۲         | ۰/۹۰۶                  |
| ۱۰         | ۳/۵۹              | ۳۰۰               | ۶۶/۳۷۳                      | ۶۵/۲۵۸                        | ۰/۸۲         | ۰/۹۳۵                  |
| ۱۱         | ۰/۹۷              | ۴۰۰               | ۶۵/۲۵۸                      | ۶۴/۸۳۰                        | ۰/۷۵         | ۰/۵۸۶                  |
| ۱۲         | ۲/۲               | ۴۰۰               | ۶۴/۸۳۰                      | ۶۳/۷۷۰                        | ۰/۸۰         | ۰/۸۹۷                  |
| ۱۳         | ۲/۳               | ۴۰۰               | ۶۳/۷۷۰                      | ۶۲/۹۴۴                        | ۰/۸۲         | ۰/۹۱۸                  |
| ۱۴         | ۲/۵               | ۴۰۰               | ۶۲/۹۴۴                      | ۶۲/۰۸۶                        | ۰/۸۲         | ۰/۹۴۹                  |
| ۱۵         | ۳/۱۱              | ۲۵۰               | ۶۸/۸۹۶                      | ۶۷/۶۵۰                        | ۰/۶۷         | ۰/۷۵۰                  |
| ۱۶         | ۳/۷۵              | ۲۵۰               | ۶۷/۶۵۰                      | ۶۶/۱۵۰                        | ۰/۶۹         | ۰/۸۲۸                  |
| ۱۷         | ۳/۶               | ۲۵۰               | ۶۶/۱۵۰                      | ۶۴/۳۵۰                        | ۰/۷۴         | ۰/۸۲۲                  |
| ۱۸         | ۱/۷۵              | ۳۰۰               | ۶۴/۳۵۰                      | ۶۳/۶۵۰                        | ۰/۸۲         | ۰/۶۵۲                  |
| ۱۹         | ۲/۱۲              | ۳۰۰               | ۶۳/۶۵۰                      | ۶۲/۳۹۶                        | ۰/۸۲         | ۰/۷۱۹                  |
| ۲۰         | ۶/۳۴              | ۴۰۰               | ۶۲/۰۸۶                      | ۶۰/۰۵۶                        | ۰/۸۲         | ۱/۵۰۴                  |

مقدار تابع هدف:  $76342/53$



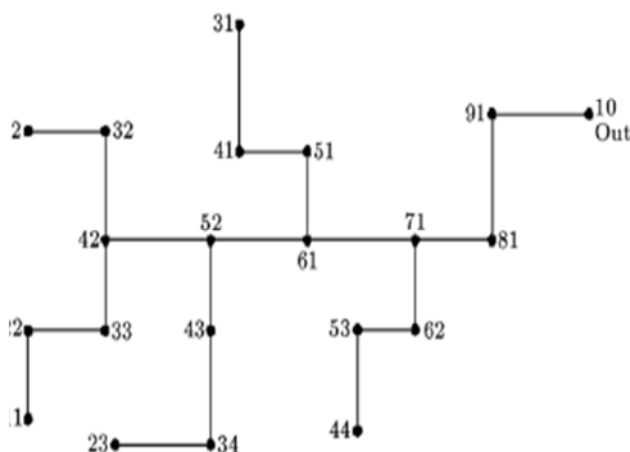
نظر گرفته شد. پارامترهای الگوریتم، مطابق با پارامترهای شبکه کرمان انتخاب شد.

جدول ۳- نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم های مختلف بر روی شبکه کرمان

| روش بهینه سازی          | هزینه (US.\$) | متوسط زمان اجرا (میلی ثانیه) | تعداد تکرارها |
|-------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
| برنامه ریزی غیرخطی [۲۱] | ۸۳۰۱۱۶        | -                            | -             |
| Fletcher-reeves [۱۹]    | ۸۱۰۵۵۳        | -                            | -             |
| BFGS [۱۹]               | ۸۲۰۷۳۲        | -                            | -             |
| GA [۱۹]                 | ۷۷۰۷۳۶        | ۱۸۰۰۰                        | ۱۰۰۰۰۰        |
| CA [۱۹]                 | ۸۰۰۸۷۹        | ۵                            | ۱۶            |
| CA [۱۹]                 | ۸۰۰۰۳۵        | ۹۴                           | ۱۶            |
| مطالعه حاضر HPSO        | ۷۶۰۳۴۲        | ۳۰۰۰۰                        | ۸۰۰           |

جدول ۴- نتایج حاصل از ۱۰ مرتبه اجرای مسئله ی اول

| روش بهینه سازی   | بیشینه | کمینه | میانگین | انحراف معیار |
|------------------|--------|-------|---------|--------------|
| CA [۱۹]          | ۸۰۸۸۰  | ۸۰۸۸۰ | ۸۰۸۸۰   | ۰            |
| CA [۱۹]          | ۸۰۰۴۳  | ۸۰۰۳۵ | ۸۰۰۳۷   | ۴/۰۱         |
| مطالعه حاضر HPSO | ۷۶۴۱۳  | ۷۶۳۴۲ | ۷۶۳۳۶   | ۳۳/۶۲        |



شکل ۴- شکل جانمایی شبکه مسئله طراحی ۲

در جدول ۳ نتایج به دست آمده از الگوریتم HPSO با سایر الگوریتم های به کار رفته پیشین در شبکه کرمان مقایسه شده است. مقدار تابع هدف به دست آمده از الگوریتم HPSO، کمترین میزان تابع هدف را در میان سایر الگوریتم های به کار رفته نشان می دهد. اگرچه متوسط زمان اجرای الگوریتم نسبت به سایر الگوریتم ها بیشتر است، اما مقایسه صحیح، نیاز به برآورد دقیق تابع پیچیدگی زمان هر یک از الگوریتم ها دارد. تابع پیچیدگی زمان به مشخصات سیستم به کار رفته و چگونگی کدنویسی الگوریتم بستگی دارد. همچنین تعداد تکرارها به منظور همگرایی الگوریتم، نسبت به الگوریتم ژنتیک کاهش قابل مقایسه ای را نشان می دهد؛ اما نسبت به الگوریتم اتومای سلولی، به تعداد تکرار بیشتری برای همگرایی نیازمند است. جدول ۴ نتایج پیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار مقادیر تابع هدف در ۱۰ مرتبه اجرای الگوریتم را نشان می دهد. انحراف معیار نتایج، معیار مناسبی برای بررسی ثبات محاسباتی الگوریتم است. روش اتومای سلولی از این حیث پایدارترین نتایج را نشان می دهد.

### ۳-۲- مثال طراحی دوم

شبکه ای که در شکل ۴ مشاهده می شود، اولین بار در مطالعه مایز و ونزل و بعدها توسط پژوهشگران دیگری بررسی شد. این شبکه دارای ۲۰ لوله و ۲۱ گره است که مشخصات آن در جدول ۵ آمده است. تابع هدف مطابق رابطه ۱ و هزینه تهیه و نصب لوله  $l$  با توجه به متوسط عمق حفاری و قطر آن از رابطه ۳۱ و هزینه احداث چاهک آدم روی  $m$  با توجه به ارتفاع آن از رابطه ۳۲ به دست می آید [۴]

$$K_p = \begin{cases} 10.98D_l + 0.8E_l - 5.98 & \text{if } D_l \leq 3' \text{ and } E_l \leq 10' \\ 5.94D_l + 1.166E_l + 0.504E_l D_l - 9.64 & \text{if } D_l \leq 3' \text{ and } E_l \geq 10' \\ 30.0D_l + 4.9E_l - 105.9 & \text{if } D_l \geq 3' \end{cases} \quad (31)$$

$$K_h = 250 + h_m^2 \quad (32)$$

محدودیت های در نظر گرفته شده برای این شبکه، به ترتیب حداکثر و حداقل عمق استغراق نسبی ۰/۹ و ۰/۱، حداکثر سرعت فوت بر ثانیه و حداقل ارتفاع حفاری ۸ فوت بود. ضریب مانینگ ثابت و به میزان ۰/۰۱۳ تعیین شد. قطرهای تجاری به کار رفته در شبکه ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱، ۲۴، ۳۰، ۳۶، ۴۲ و ۴۸ اینچ در

جدول ۵- اطلاعات ورودی شبکه مسئله طراحی ۲

| شماره لوله | شماره گره بالادست | تراز ارتفاعی نقطه بالادست (ft) | تراز ارتفاعی نقطه پایین دست (ft) | طول لوله (ft) | دبی (cfs) |
|------------|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------|-----------|
| ۱          | ۱۱                | ۵۰۰                            | ۴۹۵                              | ۳۵۰           | ۴         |
| ۲          | ۲۲                | ۴۹۵                            | ۴۸۷                              | ۴۰۰           | ۳         |
| ۳          | ۳۳                | ۴۸۷                            | ۴۸۰                              | ۳۵۰           | ۲         |
| ۴          | ۱۲                | ۴۹۰                            | ۴۸۵                              | ۴۰۰           | ۴         |
| ۵          | ۳۲                | ۴۸۵                            | ۴۸۰                              | ۴۳۰           | ۴         |
| ۶          | ۴۲                | ۴۸۰                            | ۴۷۰                              | ۵۵۰           | ۵         |
| ۷          | ۲۳                | ۴۹۰                            | ۴۸۵                              | ۵۰۰           | ۸         |
| ۸          | ۳۴                | ۴۸۵                            | ۴۷۵                              | ۴۵۰           | ۴         |
| ۹          | ۴۳                | ۴۷۵                            | ۴۷۰                              | ۳۵۰           | ۴         |
| ۱۰         | ۵۲                | ۴۷۰                            | ۴۶۵                              | ۵۰۰           | ۶         |
| ۱۱         | ۳۱                | ۴۸۵                            | ۴۷۵                              | ۵۰۰           | ۹         |
| ۱۲         | ۴۱                | ۴۷۵                            | ۴۷۰                              | ۳۵۰           | ۷         |
| ۱۳         | ۵۱                | ۴۷۰                            | ۴۶۵                              | ۳۵۰           | ۴         |
| ۱۴         | ۶۱                | ۴۶۵                            | ۴۵۵                              | ۵۶۵           | ۷         |
| ۱۵         | ۴۴                | ۴۶۸                            | ۴۶۴                              | ۴۰۰           | ۴         |
| ۱۶         | ۵۳                | ۴۶۴                            | ۴۶۰                              | ۳۰۰           | ۲         |
| ۱۷         | ۶۲                | ۴۶۰                            | ۴۵۵                              | ۳۴۵           | ۳         |
| ۱۸         | ۷۱                | ۴۵۵                            | ۴۵۱                              | ۴۰۰           | ۷         |
| ۱۹         | ۸۱                | ۴۵۱                            | ۴۴۸                              | ۵۰۰           | ۲         |
| ۲۰         | ۹۱                | ۴۴۸                            | ۴۴۵                              | ۶۱۲           | ۵         |

مقادیر تابع هدف، در ۱۰ مرتبه اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. اگرچه مقدار انحراف معیار الگوریتم در مقایسه با الگوریتم اتومای سلولی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد؛ اما این مقدار نسبت به الگوریتم PSO کاهش درخور توجهی دارد که نشان دهنده ثبات محاسباتی الگوریتم با توجه به تفاوت مکانیسم‌های ارضای قیود، در این الگوریتم‌ها است. در مطالعه ایزکوئیدرو و همکاران بر روی یک شبکه فاضلاب شامل شش لوله، با استفاده از الگوریتم PSO و رویکرد تخصیص جریمه در ارضای قیود، تعداد ذرات ۱۰۰ و تعداد اجرای الگوریتم برای یافتن بهترین پاسخ ۶۰ اجرا در نظر گرفته شده است.

علی‌رغم بزرگ‌تر بودن ابعاد شبکه‌های بررسی شده در این مطالعه، تعداد اجراها و تعداد ذرات به ترتیب ۱۰ و ۵۰ ذره در نظر گرفته شد. طبیعتاً کاهش تعداد ذرات و کاهش تعداد تکرارهای اجرای برنامه در الگوریتم HPSO در مقایسه با PSO برای یافتن جواب‌های بهینه، سبب کاهش هزینه‌های محاسباتی خواهد شد.

نتایج به دست آمده از تحلیل و طراحی شبکه نمونه دوم، با استفاده از الگوریتم HPSO در جدول ۶ نشان داده شده است. در این مثال نیز، الگوریتم ۱۰ مرتبه اجرا و بهترین نتیجه حاصل شده به عنوان نتیجه نهایی گزارش شد. در جدول ۷ نتایج به دست آمده از الگوریتم HPSO با سایر الگوریتم‌های به کار رفته پیشین در شبکه نمونه دوم مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، الگوریتم HPSO نتیجه مطلوب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها نشان داد. به نظر می‌رسد با توجه به استفاده از دو مکانیسم ارضای قیود در الگوریتم HPSO یعنی پرواز بازگشتی و حافظه هارمونی، گریز از نقطه بهینه محلی و یافتن نقطه بهینه سراسری، مسئله تسهیل و عملکرد الگوریتم مطلوب می‌شود. با توجه به جدول ۷ تعداد تکرارهای الگوریتم HPSO در مقایسه با الگوریتم PSO کاهش چشمگیری داشته که نشان دهنده تسریع سرعت همگرایی با تغییر مکانیسم جریمه‌دهی به مکانیسم‌های اشاره شده در الگوریتم HPSO است. همچنین جدول ۸ بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف معیار

جدول ۶- طراحی و حل بهینه شبکه مسئله طراحی ۲ با استفاده از الگوریتم HPSO

| شماره لوله | شیب ( $10^{-3}$ ) | قطر (in) | تراز حفاری بالادست (ft) | تراز حفاری پایین دست (ft) | استغراق نسبی | سرعت (ft/s) | دبی جمععی (cfs) |
|------------|-------------------|----------|-------------------------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------|
| ۱          | ۱۴/۲              | ۱۲       | ۴۹۲                     | ۴۸۷                       | ۰/۷۷         | ۶/۱۸        | ۴               |
| ۲          | ۲۰/۰              | ۱۵       | ۴۸۷                     | ۴۷۹                       | ۰/۶۵         | ۸/۲۲        | ۷               |
| ۳          | ۲۰/۰              | ۱۵       | ۴۷۹                     | ۴۷۲                       | ۰/۸۰         | ۸/۵۱        | ۹               |
| ۴          | ۱۲/۵              | ۱۲       | ۴۸۲                     | ۴۷۷                       | ۰/۸۲         | ۵/۸۰        | ۴               |
| ۵          | ۱۳/۴              | ۱۵       | ۴۷۷                     | ۴۷۱/۲                     | ۰/۹۰         | ۶/۸۸        | ۸               |
| ۶          | ۱۶/۸              | ۲۱       | ۴۷۱                     | ۴۶۱/۹                     | ۰/۹۰         | ۹/۶۵        | ۲۲              |
| ۷          | ۱۳/۴              | ۱۵       | ۴۸۲                     | ۴۷۵/۲                     | ۰/۹۰         | ۶/۸۸        | ۸               |
| ۸          | ۱۸/۴              | ۱۸       | ۴۷۵/۲                   | ۴۶۷                       | ۰/۷۰         | ۹/۰۶        | ۱۲              |
| ۹          | ۱۴/۲              | ۲۱       | ۴۶۷                     | ۴۶۲                       | ۰/۷۰         | ۸/۸۵        | ۱۶              |
| ۱۰         | ۱۰/۰              | ۳۰       | ۴۶۱/۹                   | ۴۵۶/۹                     | ۰/۹۰         | ۹/۴۶        | ۴۴              |
| ۱۱         | ۲۰/۰              | ۱۵       | ۴۷۷                     | ۴۶۷                       | ۰/۸۰         | ۸/۵۱        | ۹               |
| ۱۲         | ۱۴/۲              | ۲۱       | ۴۶۷                     | ۴۶۲                       | ۰/۷۰         | ۸/۸۵        | ۱۶              |
| ۱۳         | ۱۴/۲              | ۲۱       | ۴۶۲                     | ۴۵۷                       | ۰/۸۸         | ۸/۹۳        | ۲۰              |
| ۱۴         | ۱۲/۴              | ۳۶       | ۴۵۴                     | ۴۴۷                       | ۰/۷۸         | ۱۲/۰۰       | ۷۱              |
| ۱۵         | ۱۱/۰              | ۱۲       | ۴۶۰                     | ۴۵۵/۵                     | ۰/۹۰         | ۵/۳۷        | ۴               |
| ۱۶         | ۱۱/۹              | ۱۵       | ۴۵۵                     | ۴۵۲                       | ۰/۷۱         | ۶/۴۷        | ۶               |
| ۱۷         | ۱۴/۴              | ۱۸       | ۴۵۲                     | ۴۴۷                       | ۰/۶۲         | ۷/۷۹        | ۹               |
| ۱۸         | ۱۰/۰              | ۴۲       | ۴۴۷                     | ۴۴۳                       | ۰/۷۲         | ۱۱/۸۰       | ۸۷              |
| ۱۹         | ۶/۸               | ۴۲       | ۴۴۳                     | ۴۳۹/۵                     | ۰/۹۰         | ۹/۷۶        | ۸۹              |
| ۲۰         | ۷/۶۴              | ۴۲       | ۴۳۹/۵                   | ۴۳۴/۸                     | ۰/۹۰         | ۱۰/۳۱       | ۹۴              |

مقدار تابع هدف: ۲۳۵۰۶۹۹ دلار

جدول ۷- نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم‌های مختلف بر روی شبکه مسئله طراحی ۲

| روش بهینه‌سازی           | هزینه  | متوسط زمان اجرا (میلی ثانیه) | تعداد تکرارها |
|--------------------------|--------|------------------------------|---------------|
| DDDP [۴]                 | ۲۶۵۷۷۵ | -                            | -             |
| Spreadsheetsolution [۱۹] | ۲۴۵۸۷۴ | -                            | -             |
| Conventional ACO [۱۹]    | ۲۴۵۹۹۱ | ۱۵۹۵۵                        | ۷۲۵۲۲         |
| Conventional PSO [۱۹]    | ۲۴۶۰۰۳ | ۸۰۰                          | ۳۰۰۰          |
| CA [۱۹]                  | ۲۶۱۷۴۸ | ۲۲                           | ۳۶            |
| CA [۱۹]                  | ۲۵۴۲۵۷ | ۳۶                           | ۱۸            |
| مطالعه حاضر HPSO         | ۲۳۵۶۹۹ | ۳۰۰۰                         | ۸۰۰           |

جدول ۸- نتایج حاصل از ۱۰ مرتبه اجرای مسئله‌ی اول

| روش بهینه‌سازی        | بیشینه | کمینه  | میانگین | انحراف معیار |
|-----------------------|--------|--------|---------|--------------|
| Conventional PSO [۱۹] | ۳۰۹۰۰۰ | ۲۴۶۰۰۳ | ۲۶۵۶۶۷  | ۱۹۹۰۰        |
| CA [۱۹]               | ۲۶۳۲۳۳ | ۲۶۱۷۴۸ | ۲۶۲۴۹۱  | ۷۸۲          |
| CA [۱۹]               | ۲۵۵۵۵۰ | ۲۵۴۲۵۷ | ۲۵۵۲۲۸  | ۵۱۰          |
| مطالعه حاضر HPSO      | ۲۳۹۰۹۸ | ۲۳۵۶۹۹ | ۲۳۶۴۲۰  | ۱۱۶۵         |

#### ۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر با استفاده از الگوریتم دسته ذرات با قابلیت پرواز بازگشتی و مجهز به حافظه هارمونی، رویکرد پرواز بازگشتی در سطحی از مسئله بهینه سازی شبکه های فاضلاب و ترمیم آن ها با استفاده از حافظه هارمونی در سطح دیگری از مسئله به منظور تسریع نرخ همگرایی و ثبات محاسباتی دسته ذرات استاندارد به کار گرفته شد. برای استفاده از هر دو مکانیسم ارضای قیود در مسئله برای متغیرهای تصمیم، شیب و قطر کران های متفاوت در نظر گرفته شد. در تخطی ذرات از قیدهای عمدتاً ساختگاهی، مکانیسم ترمیم با حافظه هارمونی و در تخطی ذرات از قیدهای هیدرولیکی، رویکرد پرواز بازگشتی به کار گرفته شد.

کاهش اجراهای الگوریتم و تعداد جمعیت ذرات در الگوریتم HPSO در مقایسه با PSO باعث کاهش حجم محاسبات شد. با

توجه به تعداد پارامترهای کم تخصیصی در الگوریتم دسته ذرات، با به کارگیری صحیح مکانیسم های ارضای قیود، این الگوریتم قادر به گریز از نقاط بهینه محلی و یافتن جواب بهینه سراسری در مسئله بهینه سازی شبکه های فاضلاب خواهد بود. نتایج حل مسائل نمونه نشان داد کارایی و ثبات محاسباتی الگوریتم HPSO، در مقایسه با سایر الگوریتم های بهینه سازی به کار رفته در این زمینه قابل قبول است. اگرچه در حل مسائل نمونه، زمان اجرای الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم ها مقدار بیشتری را نشان داد، اما مقایسه دقیق، نیازمند اطلاعاتی مانند مشخصات سیستم پردازنده و چگونگی کدنویسی در استفاده از سایر الگوریتم ها است. بنابراین پیشنهاد می شود کارایی الگوریتم پیشنهادی در بهبود تابع هدف، با ملاحظه زمان اجرا در حل مسائل بزرگ مقیاس، یعنی بیش از ۲۰ لوله، بررسی و مطالعه شود.

#### ۵- مراجع

- 1- Elimam, A., Charalambous, C., and Ghobrial, F. (1989). "Optimum design of large sewer networks." *J. of Environmental Engineering*, 115(6), 1171-1190.
- 2- Swamee, P.K., and Sharma, A.K. (2013). "Optimal design of a sewer line using linear programming." *J. of Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4430-4439.
- 3- Li, G., and Matthew, R.G. (1990). "New approach for optimization of urban drainage systems." *J. of Environmental Engineering*, 116(5), 927-944.
- 4- Mays, L.W., and Wenzel, H.G. (1976). "Optimal design of multilevel branching sewer systems." *J. of Water Resources Research*, 12(5), 913-917.
- 5- Heaney, J., Wright, L., Sample, D., Field, R., and Fan, C. (1999) "Innovative methods for the optimization of gravity storm sewer design." *Proc., 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Storm Drainage*, USEPA.
- 6- Setoodeh, M. (2004). "Optimal design of sewer networks." M.S. Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- 7- Liang, L.Y., Thompson, R.G., and Young, D.M. (2004). "Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search." *J. of Engineering, Construction and Architectural Management*, 11(2), 101-112.
- 8- Haghghi, A., and Bakhshipour, A.E. (2012). "Optimization of sewer networks using an adaptive genetic algorithm." *J. of Water Resources Management*, 26(12), 3441-3456.
- 9- Haghghi, A. (2011). "Development of an unconditional mathematical model to design sewer networks." *J. of Water and Wastewater*, 83, 28-39. (In Persian)
- 10- Afshar, M. (2010). "A parameter free continuous ant colony optimization algorithm for the optimal design of storm sewer networks: Constrained and unconstrained approach." *J. of Advances in Engineering Software*, 41(2), 188-195.
- 11- Afshar, M., Shahidi, M., Rohani, M., and Sargolzaei, M. (2011). "Application of cellular automata to sewer network optimization problems." *J. of Scientia Iranica*, 18(3), 304-312. (In Persian)
- 12- Eberhart, R.C., and Kennedy, J. (1995). "A new optimizer using particle swarm theory." *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE*, New York, 39-43.
- 13- Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., and Fuertes, V.S. (2008). "Design optimization of wastewater collection networks by PSO." *J. of Computers and Mathematics with Applications*, 56(3), 777-784.
- 14- Li, L., Huang, Z., Liu, F., and Wu, Q. (2007). "A heuristic particle swarm optimizer for optimization of pin connected structures." *J. of Computers and Structures*, 85(7), 340-349.
- 15- Moeini, R., and Afshar, M. (2012). "Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants." *J. of Advances in Engineering Software*, 51, 49-62.
- 16- He, S., Prempan, E., and Wu, Q. (2004). "An improved particle swarm optimizer for mechanical design optimization problems." *J. of Engineering Optimization*, 36(5), 585-605.
- 17- He, S., Wu, Q., Wen, J., Saunders, J., and Paton, R. (2004). "A particle swarm optimizer with passive congregation." *J. of Biosystems*, 78(1), 135-147.
- 18- Geem, Z.W., Kim, J.H., and Loganathan, G. (2001). "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search." *J. of Simulation*, 76(2), 60-68.
- 19- Afshar, M., and Rohani, M. (2012). "Optimal design of gravitational sewer networks with general cellular automata." *J. of Water and Wastewater*, 90, 12-25. (In Persian)
- 20- Trelea, I.C. (2003). "The particle swarm optimization algorithm: convergence analysis and parameter selection." *J. of Information Processing Letters*, 85(6), 317-325.
- 21- Mansouri, M.R., and Khanjani, M.J. (1999). "Optimization of sewer system by the nonlinear programming." *J. of Water and Wastewater*, 30, 20-30 (In Persian).