

Journal of Water and Wastewater, Vol. 30, No.5, pp: 44-60

# Hybrid Modified Particle Swarm Optimization Algorithm for Adjustment of Water Distribution Network Coefficients

**M. Dini**

Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, College of Engineering,  
Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran  
(Corresponding Author)m.dini@azaruniv.ac.ir

(Received July 30, 2018 Accepted Jan. 26, 2019)

### To cite this article:

Dini, M., 2019, "Hybrid modified particle swarm optimization algorithm for adjustment of water distribution network coefficients." Journal of Water and Wastewater, 30(5), 44-60. Doi: 10.22093/wwj.2019.142659.2727. (In Persian)

### Abstract

Regarding the complexity of WDNs, the need for computerized modelling of WDNs is felt more than ever for monitoring their performance at the operational stage. One of the most important issues in modelling is to adjust the results of modelling with the real status of the system. So it is necessary to calibrate the model by observed data. Finding a suitable method for adjusting the model's coefficients is one of the main challenges in computerized modelling. In this paper, a modified particle swarm method is presented for adjustment of water distribution network coefficients by modifying the velocity equation of the particle swarm and combining it with the mutation operator. Thus by defining the coefficients of the models, four models such as standard particle swarm optimization model (SPSO), modified standard particle swarm optimization model (MSPSO), standard particle swarm optimization model with a mutation (SPSOM) and modified standard particle swarm optimization model with a mutation (MSPSOM) are constructed. The Rastrigin test function is used for verification of the modified particle swarm equation and the two-loop network is used for verification of models and also the four-loop network and real water distribution network are used for detailed analysis. The optimization is done in MATLAB by combining the particle swarm optimization algorithm and the EPANET software. Comparison of the results of the standard particle swarm model and the modified standard particle swarm model for the Rastrigin test function showed that modifying the particle swarm velocity equation increased the model's ability to determine the actual answers and reduced the costs. The MSPSOM model finds the optimal answer for two-loop and four-loop networks with a probability of 96.7 and 95 percent respectively. So it is the best model among all models in this criteria. Also, the MSPSO model finds the optimal answer for two-loop and four-loop networks in the lowest time compared to other models. So it is the best model among all models in this criteria. Comparing the results of the models in the Ahar water distribution network showed that the modified standard particle swarm with the mutation model has the lowest minimum and average values of the modeling data error. So it has the best performance among the particle swarm models. In general, the correction of the particle swarm velocity equation in the form of the standard particle swarm model, and the correction of the particle swarm velocity and its integration with the mutation operator in the form of a modified standard particle swarm with a mutation has a higher ability to adjust the water distribution network coefficients.

**Keywords:** Particle Swarm Algorithm, Water Distribution Network, Adjustment of Coefficients, Mutation.



مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۵، صفحه: ۶۰-۴۴

## الگوریتم دسته ذرات اصلاح شده ترکیبی برای تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب

مهدی دینی

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران  
m.dini@azaruniv.ac.ir (نویسنده مسئول)

(دریافت ۹۷/۵/۸ پذیرش ۹۷/۱۱/۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

دینی، م.، ۱۳۹۸، "الگوریتم دسته ذرات اصلاح شده ترکیبی برای تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب" مجله آب و فاضلاب،

Doi: 10.22093/wwj.2019.142659.2727.۴۴-۶۰. (۵)۳۰.

### چکیده

با توجه به وسعت و پیچیدگی شبکه‌های توزیع آب، برای پایش عملکرد آنها در مرحله بهره‌برداری، نیاز به مدل‌سازی کامپیوتری است. از موضوعات بسیار مهم در مدل‌های کامپیوتری، تطبیق نتایج حاصل از مدل با واقعیت است که لازم است با تنظیم دقیق ضرایب مدل انجام شود. یافتن یک روش مناسب برای تنظیم ضرایب مدل یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌سازی کامپیوتری است. در این پژوهش، با اصلاح رابطه سرعت حرکت دسته ذرات و ترکیب آن با عملگر جهش، یک مدل دسته ذرات اصلاح شده با عملگر جهش برای تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب ارائه شد. با تعریف ضرایب مدل‌ها، چهار مدل شامل مدل بهینه‌سازی دسته ذرات استاندارد، مدل بهینه‌سازی دسته ذرات استاندارد اصلاح شده، مدل بهینه‌سازی دسته ذرات استاندارد با عملگر جهش و مدل بهینه‌سازی دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش ساخته شد. برای صحت‌سنجی معادله اصلاح شده از تابع محک ریاضی راسترین، برای صحت‌سنجی مدل‌ها از شبکه دوحلقه‌ای و برای بررسی تفصیلی آنها از شبکه چهار حلقه‌ای و شبکه واقعی استفاده شد. بهینه‌سازی در محیط MATLAB و با تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات و نرم‌افزار EPANET انجام شد. مقایسه نتایج مدل دسته ذرات استاندارد با مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده برای تابع محک ریاضی راسترین نشان می‌دهد که اصلاح معادله سرعت حرکت دسته ذرات، قابلیت مدل در تعیین جواب واقعی را افزایش و هزینه محاسبات را کاهش می‌دهد. مقایسه نتایج مدل‌ها برای شبکه دو حلقه‌ای و چهار حلقه‌ای نشان می‌دهد که مدل دسته ذرات اصلاح شده با عملگر جهش به ترتیب با ۹۶/۷ و ۹۵ درصد احتمال پیدا کردن جواب بهینه، بهترین عملکرد را در بین مدل‌های موجود بر اساس این شاخص دارد. همچنین مدل دسته ذرات اصلاح شده برای هر دو شبکه نمونه دوحلقه‌ای و چهار حلقه‌ای در کمترین زمان جواب بهینه را پیدا کرده است و بهترین مدل بر اساس این شاخص در بین مدل‌های موجود است. مقایسه نتایج مدل‌ها در شبکه توزیع آب اهر نشان می‌دهد مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش با داشتن کمترین مقدار حداقل و متوسط خطای داده‌های ساخت، بهترین عملکرد را در بین مدل‌های دسته ذرات دارد. به‌طور کلی، اصلاح معادله سرعت حرکت دسته ذرات در قالب مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش، توانمندی بیشتری را برای تنظیم ضرایب شبکه توزیع آب به‌وجود می‌آورد.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم دسته ذرات، شبکه توزیع آب، تنظیم ضرایب، جهش

### ۱- مقدمه

است که نیاز به تنظیم ضرایب مدل دارد. ضرایب قابل تنظیم مدل شبکه‌های توزیع آب شامل ضرایب زبری لوله‌ها، تقاضای گره‌های شبکه، ضریب الگوی مصرف و ضریب نشت در گره‌های شبکه

با توجه به وسعت و گستردگی شبکه‌های توزیع آب، بهره‌برداری از آنها بدون مدل‌سازی ممکن نیست. از موضوعات بسیار مهم در مدل‌سازی، تطبیق نتایج حاصل از مدل با وضعیت واقعی سیستم

(Kumar et al., 2010, Faghfoor Magherbi et al., 2013, Cheng and He, 2011, Sanz and Perez, 2013) و در

پژوهش‌های دیگر، ترکیبی از ضرایب در کنار هم تنظیم شده است (Fiorini Morosini et al., 2013, Borzi et al., 2005, Dini and Tabesh, 2014, Asadzadeh et al., 2011)

روش‌های غیرصریح برگرفته از طبیعت‌اند و به‌عنوان روش‌های تکاملی<sup>۴</sup> یا روش‌های فراکاشی<sup>۵</sup> شناخته می‌شوند (Blum and Roli, 2003). از جمله الگوریتم‌های فراکاشی، الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات است که در آن، موقعیت اولیه ذرات به صورت تصادفی انتخاب می‌شود و موقعیت جدید بر اساس معادله بردار سرعت که تابعی از سرعت فعلی ذره، بهترین موقعیت کلی و محلی است، تعیین می‌شود (Kennedy and Eberhart, 1995)

ژانگ و همکاران الگوریتم دسته ذرات را برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب به‌کار بردند. ایشان الگوریتم دسته ذرات باینری گسسته<sup>۶</sup> را برای پیدا کردن موقعیت مناسب ایستگاه‌های مانیتورینگ کیفی استفاده کردند (Zhang et al., 2007).

وانگ و همکاران کالیبراسیون ضریب زوال دیواره را با استفاده از ترکیبی از الگوریتم دسته ذرات با الگوریتم ژنتیک بررسی کردند و نشان دادند که عملکرد الگوریتم دسته ذرات ترکیبی بهتر از الگوریتم جهش قورباغه و الگوریتم جامعه مورچگان است (Wang et al., 2010).

نیو و همکاران الگوریتم دسته ذرات را برای کالیبراسیون ضریب افت لوله‌ها و موقعیت یابی نشت از شبکه به‌کار بردند. در پژوهش ایشان یک مدل برای تنظیم همزمان ضریب افت لوله‌ها و موقعیت نشت در کنار هم و دو مدل مجزا برای هر کدام ساخته شد. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی در حالت تنظیم همزمان بهتر از دو حالت دیگر است (Niu et al., 2011).

میرلیس و همکاران کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب را با استفاده از الگوریتم دسته ذرات و بر اساس تخمین مقدار فشار در گره‌های شبکه انجام دادند. ایشان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در برخی گره‌ها، مقدار فشار در سایر گره‌ها را تخمین زده و از این داده‌ها در مدل کالیبراسیون

است. مقادیر مدل‌سازی عمدتاً شامل فشار گرهی، تراز تانک‌ها، دبی جریان در لوله‌ها و مقدار نشت از شبکه است که می‌تواند به صورت استاتیک در یک زمان خاص و یا دینامیک (دوره گسترده در طول ۲۴ ساعت) مدل شود (Dini and Tabesh, 2014)

برای تنظیم ضرایب مدل شبکه‌های توزیع آب، از سه روش روند تکرار<sup>۱</sup> (Walski, 1983)، روش صریح<sup>۲</sup> (Shamir and Howard, 1968) و روش غیرصریح<sup>۳</sup> استفاده می‌شود (Ormsbee, 1989)

ماهیت روش روند تکرار مبتنی بر ساده‌سازی است و فقط در مسائل کوچک قابل استفاده است. در مورد روش صریح نیز چنانچه تعداد ضرایب قابل تنظیم از تعداد مشاهدات بیشتر باشد، مسئله نامعین تلقی می‌شود و حل معادلات امکان‌پذیر نخواهد بود.

در روش غیر صریح، تنظیم ضرایب در قالب بهینه‌سازی یک تابع هدف با قیود خاص انجام می‌شود. تابع هدف در پژوهش‌های مختلف، متفاوت بوده است مانند: حداقل‌سازی خطای بین فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌های شبکه (Ormsbee and Wood, 1986)، حداقل‌سازی خطای بین فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها و دبی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در لوله‌های شبکه (Borzi et al., 2005)، حداقل‌سازی خطای فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها و دبی در لوله‌ها و تراز در تانک‌ها (Yu et al., 2009) و حداقل‌سازی خطای فشار مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها، دبی جریان مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در لوله‌ها و دبی تقاضای مشاهده‌ای و محاسبه‌ای در گره‌ها (Kumar et al., 2010).

در ارتباط با شرایط بارگذاری شبکه‌ها، در تعدادی از پژوهش‌ها، کالیبراسیون شبکه در شرایط ماندگار مانند مصرف نرمال، حداکثر و حداقل (Tabesh et al., 2011, Kang and Lansey, 2011) و در تعدادی دیگر، کالیبراسیون شبکه در شرایط دوره گسترده انجام شده است (Dini and Tabesh, 2016, Fiorini Morosini et al., 2013, Behzadian et al., 2008)

همچنین در ارتباط با تنظیم ضرایب مدل شبکه‌های توزیع آب، در بعضی از پژوهش‌ها، تنها یکی از ضرایب

<sup>4</sup> Evolutionary Methods

<sup>5</sup> Metaheuristic Methods

<sup>6</sup> Discrete Binary Particle Swarm Optimization (DBPSO)

<sup>1</sup> Iterative Procedure Method

<sup>2</sup> Explicit Methods

<sup>3</sup> Implicit Methods

$$X_i = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (1)$$

(2)

$$V_i(t+1) = C_1 \text{Rand}_1(P_{i.\text{best}} - X_i(t)) + C_2 \text{Rand}_2(P_{g.\text{best}} - X_i(t)) + WV_i(t)$$

که در آن

W ضریب وزنی حرکت در مسیر خودی که نشان‌دهنده میزان تأثیر بردار سرعت تکرار قبلی ( $V_i(t)$ ) بر روی بردار سرعت در تکرار بعدی ( $V_i(t+1)$ ) است،  $C_1$  ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین ذره مورد بررسی،  $C_2$  ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین ذره یافت‌شده در بین کل جمعیت،  $P_{g.\text{best}}$  بهترین مقدار ذره مورد بررسی در طول عمر ذره،  $P_{i.\text{best}}$  بهترین مقدار در بین کل ذرات،  $\text{Rand}_1$  و  $\text{Rand}_2$ : دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۰ تا ۱،  $V_i(t)$  بردار سرعت و  $X_i(t)$  بردار موقعیت در تکرار قبلی می‌باشد. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد سرعت حرکت یک ذره در حرکت از یک محل به محل دیگر، تغییرات سرعت در بازه  $V_{\min}$  تا  $V_{\max}$  محدود می‌شود که حد بالا و پایین سرعت با توجه به نوع مسئله تعیین می‌شود. در این پژوهش، رابطه سرعت حرکت ذرات به صورت معادله ۳ اصلاح شد

$$V_i(t+1) = (C_1 \text{Rand}_1(P_{i.\text{best}} - X_i(t)) + C_2 \text{Rand}_2(P_{g.\text{best}} - X_i(t))(-1)^\alpha + WV_i(t))(-1)^\alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \text{Round}(\text{Rand}_3 + \beta)$$

که در آن

$\alpha$  ضریبی است که مقدار آن برابر ۱ یا ۲ است. مقدار ضریب  $\alpha$  از معادله بالا به دست می‌آید.  $\text{Round}$  تابع گرد کردن عدد،  $\text{Rand}_3$  عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۰ تا ۱ و  $\beta$  یک عدد در بازه ۱ تا ۱/۵ است.

در این پژوهش، چهار مدل الگوریتم دسته ذرات تعریف شد که مدل اول همان الگوریتم دسته ذرات استاندارد است و در آن موقعیت و سرعت ذرات بر اساس معادلات ۱ و ۲ بروز شد. مدل دوم الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده<sup>۳</sup> است و در آن موقعیت و سرعت ذرات بر اساس معادلات ۱ و ۳ بروز شد.

<sup>3</sup> Modified Standard Particle Swarm Optimization (MSPSO)

استفاده کردند. این روش به دلیل کمک در کاهش درجه آزادی مسئله، دقت مدل کالیبراسیون را افزایش داده است (Meirelles et al., 2017)

الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات استاندارد<sup>۱</sup>، با وجود تمامی پارامترهای تعریف شده که هدف آنها مدیریت سرعت همگرایی و جلوگیری از افتادن مدل در جواب‌های بهینه محلی است، در مواردی در بهینه‌های محلی محبوس می‌شود و یا نمی‌تواند فضای جستجوی مسئله را به‌طور کامل کاوش نماید. این مسئله در تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب بسیار محسوس است زیرا این نوع مدل‌ها به دلیل غیرخطی بودن معادلات و گسسته در نظر گرفتن ضرایب و اعمال قیود مختلف بقای جرم و انرژی یک مسئله غیرخطی، مقید، غیرهموار، نامحدب و از نوع NP-Hard هستند.

در این پژوهش با اصلاح معادله بردار سرعت حرکت ذرات و تلفیق آن با عملگر جهش، یک مدل جدید ارائه شده است که در کنار داشتن سرعت همگرایی مناسب، بتواند فضای جستجوی مسئله را کامل‌تر جستجو کند و از افتادن در جواب‌های محلی محفوظ بماند. برای بررسی کارایی مدل ارائه شده، از دو شبکه نمونه و یک شبکه واقعی استفاده شد. اصلاح معادله بردار سرعت حرکت دسته ذرات استاندارد و ارائه یک مدل دسته ذرات ترکیبی جدید در قالب اصلاح معادله بردار سرعت و تلفیق آن با عملگر جهش، از نوآوری‌های پژوهش حاضر محسوب می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات با شبیه‌ساز EPANET (Rossman, 2000) در محیط MATLAB برای ساخت مدل‌های بهینه‌سازی استفاده شد.

### ۲-۱- الگوریتم دسته ذرات

در الگوریتم دسته ذرات استاندارد هیچ عملگر تکاملی مانند هم‌گذری و جهش وجود ندارد. موقعیت و سرعت ذرات در این الگوریتم بر اساس بهترین موقعیت کلی و محلی ذرات و همچنین سرعت حرکت فعلی آنها به دست می‌آید (Eberhart and Shi, 2001)

<sup>1</sup> Standard PSO (SPSO)

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

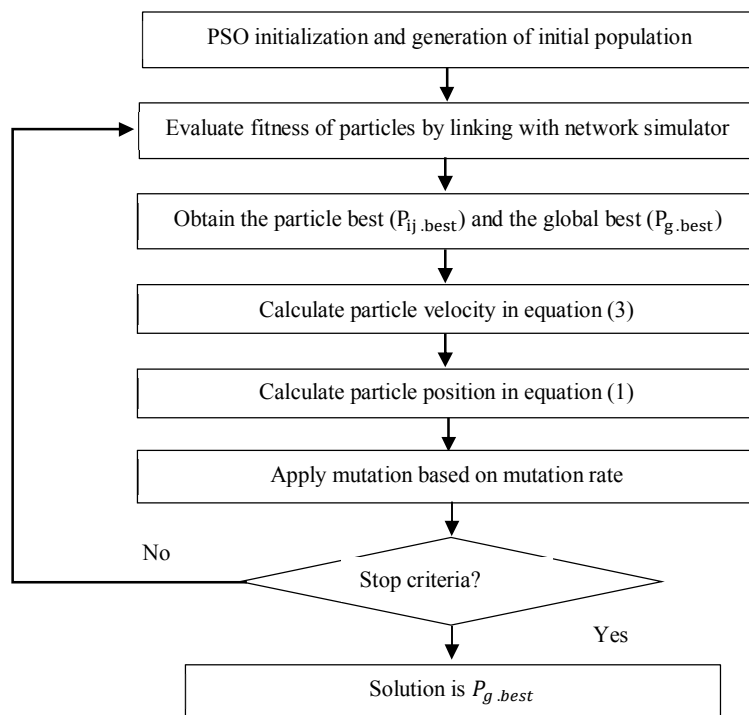


Fig. 1. Flowchart of the MSPSOM model

شکل ۱- روندنمای مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش

(Vassiljev et al., 2005)

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T (PO_{ij} - PS_{ij})^2 + \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^T (QO_{ij} - QS_{ij})^2 \quad (4)$$

$$CHW_{min} \leq CHW_i \leq CHW_{max}$$

که در آن

N تعداد گره‌های نمونه برداری، T کل ساعت‌های نمونه برداری، M تعداد لوله‌های نمونه برداری،  $PO_{ij}$  فشار مشاهداتی و  $PS_{ij}$  فشار محاسباتی در گره jام در زمان t،  $QO_{ij}$  دبی جریان مشاهداتی و  $QS_{ij}$  دبی جریان محاسباتی در لوله jام در زمان t و F مقدار تابع هدف،  $CHW_i$  ضریب هیزن ویلیامز لوله jام و متغیر تصمیم مسئله است.  $CHW_{min}$  و  $CHW_{max}$  به ترتیب حدود پایین و بالای ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها هستند. همچنین سایر محدودیت‌ها شامل پیوستگی جریان در گره‌ها، افت هد در حلقه‌ها به صورت معادلات ۵ و ۶ است

$$\sum_{i=1}^{MJ} Q_i - q_j = 0 \quad (5)$$

مدل سوم الگوریتم دسته ذرات با عملگر جهش<sup>۱</sup> است که در آن عملگر جهش به الگوریتم دسته ذرات استاندارد اضافه شد. در این مدل، نرخ جهش ذرات<sup>۲</sup> تعیین کننده میزان تغییرات تصادفی در ژن‌های ذرات است. مدل چهارم الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش<sup>۳</sup> است که ترکیبی از الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده و الگوریتم دسته ذرات با عملگر جهش است. در شکل ۱ فلوچارت الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش نشان داده شده است که در آن معادله سرعت حرکت اصلاح شده ذرات (معادله ۳) برای محاسبه سرعت ذرات استفاده می‌شود و موقعیت جدید ذرات با استفاده از معادله ۱ به دست می‌آید و در ادامه عملگر جهش با نرخ جهش مشخص بر روی موقعیت جدید ذرات اعمال می‌شود.

## ۲-۲- تابع هدف و محدودیت‌ها

تابع هدف و محدودیت‌های مدل به صورت معادله ۴ است

<sup>1</sup> Particle Swarm Optimization with Mutation (PSOM)

<sup>2</sup> Mutation Rate (Rm)

<sup>3</sup> Modified Standard Particle Swarm Optimization with Mutation (MSPSOM)

(Alperovits and Shamir, 1977). مقدار بهینه تابع هدف برای شبکه دو حلقه‌ای برابر  $5/81 \times 10^{-5}$  است که برای بزرگنمایی مقدار تابع هدف به توان  $0/2$  و برابر  $0/142$  در نظر گرفته شد. همچنین طرح کلی شبکه چهار حلقه‌ای در شکل ۳ و مشخصات شبکه در جدول ۲ نشان داده شده است (Lensey et al., 2001). مقدار بهینه تابع هدف برای شبکه چهار حلقه‌ای برابر  $7/03 \times 10^{-5}$  است که برای بزرگنمایی مقدار تابع هدف با توان  $0/2$  و برابر  $0/148$  در نظر گرفته شد.

شهر اهر در استان آذربایجان شرقی و در ۹۰ کیلومتری شهر تبریز واقع شده است. ساختار ساده شده شبکه شامل ۱۹۲ لوله، ۱۶۹ گره و یک مخزن، پنج تانک و سه ایستگاه پمپاژ در شکل ۴ نشان داده شده است.

$$\sum_{i=1}^{M1} \Delta H_i = 0 \quad \Delta H = \frac{10.67 L_i}{CHW_i^{1.852} D_i^{4.87}} Q_i^{1.852} \quad (6)$$

که در آن

$Q_i$  دبی جریان در لوله  $i$ ام که برای جریان ورودی به گره، مثبت و برای جریان خروجی از گره، منفی است.  $q_j$  میزان برداشت از گره  $j$ ام،  $MJ$  تعداد لوله‌های متصل به گره  $j$ ام،  $\Delta H_i$  افت هد در لوله  $i$ ام و  $L_i$  و  $D_i$  به ترتیب طول و قطر لوله  $i$ ام است.

### ۳-۲- مطالعه موردی

در این پژوهش از شبکه نمونه دو حلقه‌ای، شبکه نمونه چهار حلقه‌ای و شبکه توزیع آب اهر استفاده شد. طرح کلی شبکه دو حلقه‌ای در شکل ۲ و مشخصات شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است

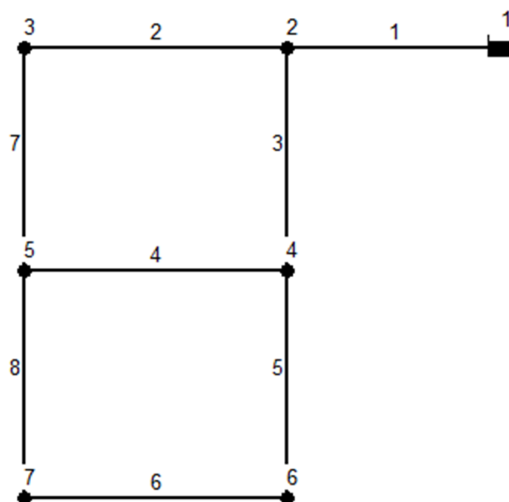


Fig. 2. Two-loop network (Alperovits and Shamir, 1977)  
شکل ۲- شبکه دو حلقه‌ای (Alperovits and Shamir, 1977)

جدول ۱- مشخصات شبکه دو حلقه‌ای

Table 1. Two-loop network data

No	Pipes			Nodes	
	Length (m)	Diameter (mm)	HW Coefficient	Elevation (m)	Demand (L/s)
1	1000	450	130	210	0
2	1000	350	80	150	25
3	1000	350	130	160	30
4	1000	150	70	155	35
5	1000	350	100	150	75
6	1000	100	80	165	90
7	1000	350	100	160	55
8	1000	250	70		

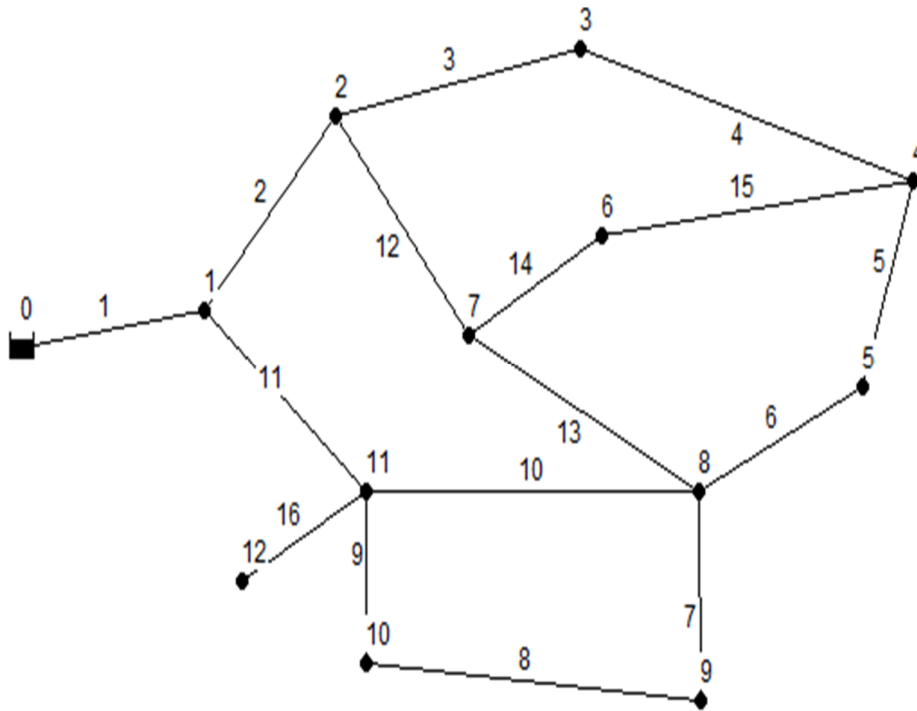


Fig. 3. Four-loop network (Lensey et al., 2001)  
 شکل ۳- شبکه چهار حلقه‌ای (Lensey et al., 2001)

جدول ۲- مشخصات شبکه چهار حلقه‌ای

Table 2. Four-loop network data

No	Pipes			Nodes	
	Length (m)	Diameter (mm)	HW Coefficient	Elevation (m)	Demand (L/s)
1	3048	610	110	45.7	0
2	1524	457	110	48.7	44
3	1524	406	100	50.3	41
4	1676.4	356	100	48.7	37
5	1066.8	305	120	45.7	31
6	1676.4	356	120	47.2	24
7	1371.6	305	90	44.2	24
8	762	152	90	42.7	0
9	305	90	100	39.6	27
10	670.6	381	90	41.1	22
11	1981.2	457	110	44.2	0
12	1524	356	100	39.6	17
13	1676.4	305	120		
14	914.4	356	100		
15	1219.2	305	100		
16	1219.2	406	90		

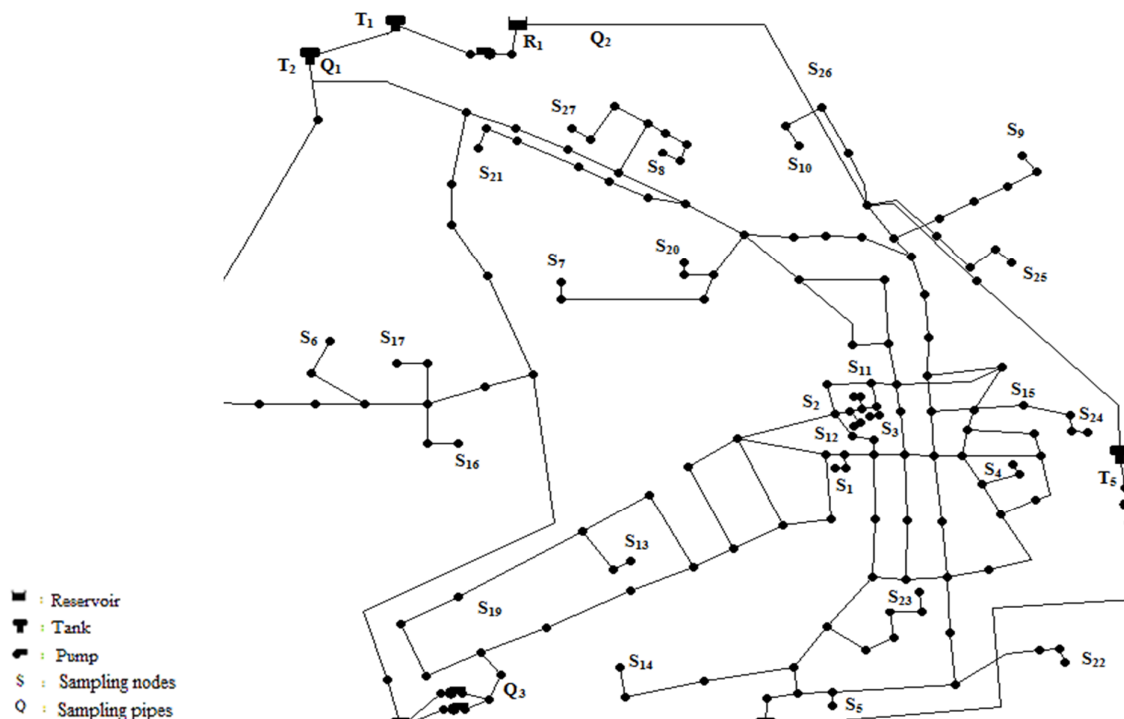


Fig. 4. Ahar water distribution network's layout

شکل ۴ - نقشه شماتیک شبکه توزیع آب اهر

جدول ۳ - ضرایب الگوی مصرف شبکه توزیع آب اهر (Dini and Tabesh, 2014)

Table 3. Demand pattern coefficient of Ahar network (Dini and Tabesh, 2014)

t(hr)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DP	0.64	0.42	0.19	0.15	0.15	0.35	0.83	1.22	1.4	1.5	1.54	1.54
t(hr)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
DP	1.49	1.41	1.34	1.3	1.24	1.25	1.22	1.13	1.08	1	0.87	0.74

الگوی مصرف ساعتی شبکه توزیع آب اهر آورده شده است (Dini and Tabesh, 2014).

### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش ابتدا ضرایب مدل‌های بهینه‌سازی تعیین شد، این ضرایب شامل تعداد ذرات در هر تکرار ( $n_{swarm}$ )، ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین موقعیت هر ذره ( $C_1$ )، ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین موقعیت ذرات ( $C_2$ )، ضریب وزنی حرکت در مسیر بردار سرعت تکرار قبلی ( $W$ )، حد حداکثر سرعت ذرات در هر تکرار ( $V_{max}$ )، ضریب توان رابطه اصلاح شده سرعت ذرات در

در شکل ۴، مخزن موجود در محل تصفیه‌خانه اهر،  $T_1$  تا  $T_5$ ، تانک‌های ذخیره آب،  $Q_1$ ،  $Q_2$  و  $Q_3$ ، موقعیت اندازه‌گیری دبی آب ورودی به شبکه و  $S_1$  تا  $S_{27}$ ، مکان‌های نمونه‌برداری فشار است. برای تنظیم ضرایب شبکه توزیع آب اهر، داده‌های اندازه‌گیری شده شبکه که شامل فشار در گره‌ها و دبی در لوله‌ها است به دو بخش داده‌های ساخت و تست تقسیم شد. از بین مقدار فشار در گره‌ها که ۲۲ دسته داده است، ۱۸ مورد برای ساخت مدل و ۴ مورد برای تست و از بین مقدار دبی جریان در لوله‌ها، ۲ مورد برای ساخت مدل و ۱ مورد برای تست به کار برده شد. مقادیر به کار رفته برای تست شامل گره‌های ۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۷ و لوله ۳ بود. در جدول ۳



از  $\beta$  ۱/۴۲ به ۱/۳۵، درصد رسیدن مدل به جواب بهینه کاهش یافته است. لذا مقدار ضریب  $\beta$  برابر ۱/۴۲ انتخاب شد. در مدل SPSOM عددی بین ۰ تا ۱ است که در این پژوهش مقدار آن بین ۰ تا ۰/۰۶ تغییر داده شد. نتایج در شکل ۷ آورده شده است.

بر اساس نتایج شکل ۷، درصد رسیدن به جواب بهینه برای مدل SPSOM با افزایش نرخ جهش از صفر به ۰/۰۴ افزایش و سپس کاهش یافته است. به همین دلیل، بهترین مقدار برای نرخ جهش برابر ۰/۰۴ است. در مجموع ضرایب مدل‌های بهینه‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده است.

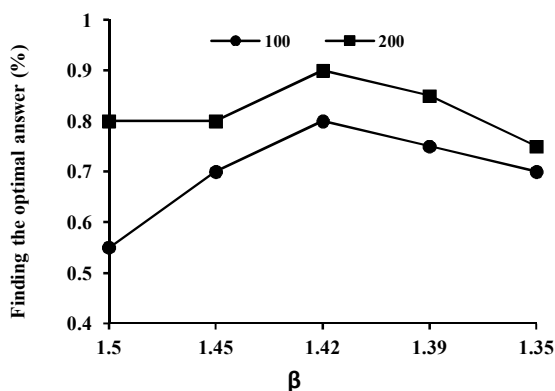


Fig. 6. MSPSO sensitivity analysis diagram by variation of  $\beta$

شکل ۶- نمودار تحلیل حساسیت مدل MSPSO با تغییرات  $\beta$

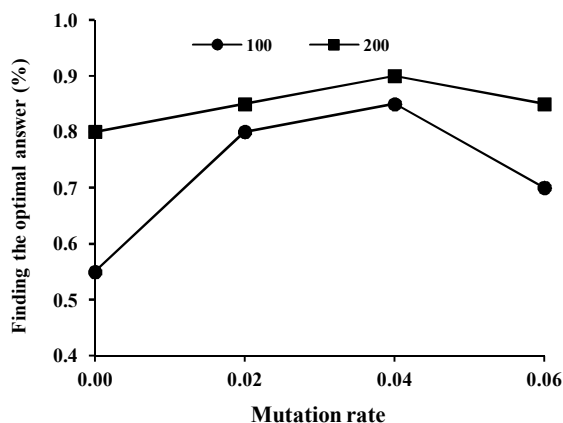


Fig. 7. SPSOM sensitivity analysis diagram by variation of mutation rate

شکل ۷- نمودار تحلیل حساسیت مدل SPSOM با تغییرات نرخ جهش

الگوریتم دسته ذرات استاندارد ( $\beta$ ) و نرخ جهش ذرات ( $R_m$ ) است. تعدادی از ضرایب الگوریتم دسته ذرات از جمله  $C_1$ ,  $n\_swarm$ ,  $C_2$  و  $W$  به صورت مقادیر پیشنهادی (Sedki and Ouazar, 2012) در نظر گرفته شد و برای سایر ضرایب، تحلیل حساسیت انجام شد. با تغییر ضرایب، هر یک از مدل‌های بهینه‌سازی ۲۰ بار متوالی اجرا شدند و بر اساس بالاترین درصد رسیدن به جواب بهینه، مقدار ضرایب تعیین شد. تحلیل حساسیت برای تعداد ذرات برابر ۱۰۰ و ۲۰۰ انجام شد. نمودار تحلیل حساسیت مدل دسته ذرات استاندارد برای شبکه دو حلقه‌ای و تغییرات حداکثر سرعت در شکل ۵ نشان داده شده است. تغییرات کمینه سرعت، به صورت قرینه بیشینه سرعت است. روند تغییرات نمودارها در شکل ۵ نشان می‌دهد که برای بیشینه سرعت برابر ۳، مدل دسته ذرات استاندارد در هیچکدام از اجراها نتوانسته است به جواب بهینه دست پیدا کند. با افزایش بیشینه سرعت، تعداد رسیدن به جواب بهینه افزایش یافته و این عدد در بیشینه سرعت برابر ۱۲ به بیشترین مقدار رسیده و دوباره کاهش یافت، بنابراین عدد ۱۲ به عنوان حد بیشینه سرعت و عدد ۱۲- به عنوان حد کمینه سرعت انتخاب شد.

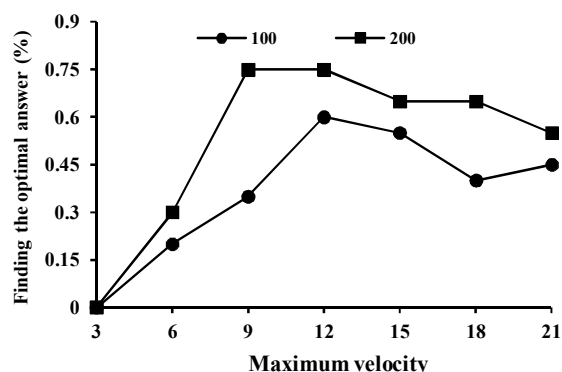


Fig. 5. SPSO sensitivity analysis diagram by variation of maximum velocity

شکل ۵- نمودار تحلیل حساسیت مدل SPSO با تغییرات حداکثر سرعت

در شکل ۶ نمودار درصد دست‌یابی مدل MSPSO به جواب بهینه با تغییرات ضریب  $\beta$  نشان داده شده است. مقدار ضریب  $\beta$  برابر ۱ تا ۱/۵ است که در این پژوهش بین ۱/۳۵ تا ۱/۵ تغییر داده شد.

بر اساس نتایج شکل ۶، با کاهش ضریب  $\beta$  از ۱/۵ به ۱/۴۲، درصد رسیدن مدل به جواب بهینه افزایش و با کاهش مجدد ضریب

حالی است که برای تابع با تعداد متغیر تصمیم زیاد، این موضوع برعکس است. به طور مثال برای معادله ۷ با ۵ متغیر تصمیم، مدل دسته ذرات با معادله ۲ به طور متوسط در ۳۰۰۳ گام محاسباتی، تنها در ۳ مورد از ۵ اجرای متوالی جواب واقعی را پیدا کرد و مدل دسته ذرات با معادله ۳ به طور متوسط در ۵۱۵ گام محاسباتی در تمامی ۵ اجرای متوالی جواب واقعی را پیدا کرد. این موضوع در حالت‌های ۸ و ۱۲ متغیر تصمیم، بسیار مشهود است. در مجموع، اصلاح معادله سرعت حرکت دسته ذرات، قابلیت مدل در تعیین جواب واقعی را افزایش و هزینه محاسبات را کاهش داد.

کارایی مدل‌های معرفی شده، در تنظیم ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در شبکه دو حلقه‌ای برای بررسی کارایی مدل‌های ساخته شده، هر یک از مدل‌ها برای ۶۰ بار متوالی اجرا شدند. در هر بار اجرای مدل، ۲۰۰ تکرار اعمال شد. خلاصه نتایج مدل‌ها در جدول ۶ آورده شده است. بر اساس نتایج، مدل دسته ذرات استاندارد در ۴۶ مورد از ۶۰ اجرای متوالی توانست جواب بهینه را پیدا کند و در ۱۴ مورد در جواب‌های بهینه محلی محبوس شد. حداقل و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در ۴۶ اجرای موفق این مدل برابر ۱۰ و ۶۱ است. متوسط تعداد ارزیابی توابع هدف برابر ۱۳۰۰۰ و متوسط زمان اجرای مدل نیز برابر ۶۴/۳ ثانیه است. در مجموع، مدل دسته ذرات استاندارد به شکلی عمل می‌کند که اگر در تعداد گام‌های کم، جواب بهینه را پیدا نکند، در جواب بهینه محلی محبوس می‌شود که این مسئله یکی از مشکلات الگوریتم دسته ذرات استاندارد است. برای رفع این مشکل، راهکارهای مختلفی پیشنهاد شده است. استفاده از روش‌های ترکیبی و همچنین عملگرهای سایر الگوریتم‌ها از جمله آنها می‌باشند. در این پژوهش روش دیگری پیشنهاد شد. ایده اولیه

جدول ۴- ضرایب الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات

Table 4. Particle swarm optimization algorithms coefficients

Parameters	n swarm	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	W	Vmin	Vmax	β	Rm
Value	200	2.0	2.0	0.8	-12	12	1.42	0.04

به عنوان نوآوری انجام شده در این پژوهش، برای بررسی مجدد تغییر معادله ۲ به صورت معادله ۳، یک تابع محک ریاضی انتخاب شد که قابلیت تغییر ابعاد برای آن ممکن است. برای این منظور تابع محک ریاضی راسترین انتخاب شد. این تابع برای اولین بار توسط (Rastrigin, 1974) ارائه شد و توسط (Muhlenbein, et al., 1991) کامل شد. فرم عمومی تابع در معادله ۷ آورده شده است.

$$f(x) = A d + \sum_{i=1}^d (x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)) \quad (7)$$

که در آن

A عدد ثابت و برابر ۱۰ است، d تعداد متغیر تصمیم و xi متغیر تصمیم نام است. برای مقایسه عملکرد معادله ۲ و معادله اصلاح شده ۳ چندین حالت برای تعداد متغیرهای تصمیم ۳، ۵، ۸ و ۱۲ در نظر گرفته شد. نتایج برای دو مدل بالا، در جدول ۵ آورده شده است. همانطور که از نتایج جدول ۵ مشخص است، عملکرد مدل دسته ذرات با معادله ۲ در تابع محک با سه متغیر تصمیم بهتر از مدل دسته ذرات با معادله ۳ است. به طوری که مدل دسته ذرات با معادله ۲ به طور متوسط در ۹۰ گام اجرای مدل در تمامی ۵ اجرای متوالی به جواب واقعی (صفر با چهار رقم دقت) دست پیدا کرد ولی مدل دسته ذرات با معادله ۳ به طور متوسط در ۲۳۳ گام اجرای مدل در تمامی ۵ اجرای متوالی به جواب واقعی دست یافت. این در

جدول ۵- مقایسه عملکرد معادله و معادله اصلاح شده ۳ برای تابع محک ریاضی راسترین

Table 5. Performance comparison of formula 2 and corrected formula 3 for the Rastrigin test function

N	SPSO				MSPSO			
	3	5	8	12	3	5	8	12
1	88	5000	5000	5000	200	315	749	1982
2	86	150	5000	5000	220	699	1275	4293
3	51	5000	5000	5000	234	548	1422	2846
4	81	626	5000	5000	156	670	1437	1852
5	146	4237	5000	5000	357	344	352	1732
Average step	90	3003	5000	5000	233	515	1047	2541
Average(f(x))	0.00	0.40	2.18	5.77	0.00	0.00	0.00	0.00

جدول ۶- خلاصه نتایج مدل‌ها برای ۶۰ اجرای متوالی (شبکه دو حلقه‌ای)

Table 6. Summary of model results for 60 consecutive runs (two-loop network)

	SPSO	MSPSO	SPSOM	MSPSOM
Number of consecutive runs	60	60	60	60
Number of finding optimal answer	46	54	54	58
Minimum steps to find optimal answer	10	14	13	12
Maximum steps to find optimal answer	61	105	132	169
Average evaluation of the objective function	13000	10200	11200	12800
Average Runtime (s)	64.3	48.5	52.9	61.1

شاید در نگاه اول قضاوت بر این باشد که مدل دسته ذرات استاندارد بهتر از مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده است، زیرا در تعداد گام کمتری به جواب بهینه رسیده است؛ ولی واقعیت این است که در یکی از ۱۲ اجرایی که مدل دسته ذرات استاندارد در مقایسه با مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده به جواب بهینه نرسیده است، مدل دسته ذرات استاندارد ۲۰۰ گام حل را طی کرده است و نتوانسته است جواب بهینه را به دست آورد ولی مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده در گام ۱۰۵ جواب بهینه را به دست آورده است.

بررسی عملکرد مدل دسته ذرات استاندارد با عملکرد جهش نشان داد که این مدل نیز در ۵۴ اجرا از ۶۰ اجرای متوالی توانسته است جواب بهینه را پیدا کند که از این نظر مشابه مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده بوده و بهتر از مدل دسته ذرات استاندارد است. حداقل و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در ۵۴ اجرای موفق این مدل برابر ۱۳ و ۱۳۲ و متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف برابر ۱۱۲۰۰ و متوسط زمان اجرای مدل نیز ۵۲/۹ ثانیه بود. مقایسه متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف و متوسط زمان اجرای مدل برای مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل دسته ذرات استاندارد با عملکرد جهش نسبت به مدل دسته ذرات استاندارد عملکرد بهتری داشته است. در بین سه مدل بررسی شده، عملکرد مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده و دسته ذرات استاندارد با عملکرد جهش بهتر از مدل دسته ذرات استاندارد بود. برای هم‌افزایی توان آنها، دو مدل با هم تلفیق شد و مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملکرد جهش ساخته شد. بررسی عملکرد این مدل نشان می‌دهد که مدل در ۵۸ اجرا از ۶۰ اجرای متوالی توانسته است جواب بهینه را پیدا کند و تنها در ۲ اجرا در جواب بهینه محلی محبوس شد. همچنین حداقل

این مسئله در رفتار پرنندگان یا حرکت دسته‌جمعی ماهی‌ها نیز وجود دارد به طوری که در ضمن حرکت دسته‌جمعی به سوی هدف، احتمال دارد تعدادی از آنها به دلیل ازدحام جمعیت، تصمیم به تغییر جهت داشته باشند و یا حرکت فعلی آنها متوقف شده و یا در جهت خلاف اتفاق افتد. اصلاح رابطه دسته ذرات استاندارد با ضرب فاکتور اصلاحی  $\alpha^{-1}$  بر روی مؤلفه بردار سرعت تکرار بعدی انجام شده است. با توجه به اینکه مقدار ضریب  $\alpha$  تنها برابر ۱ یا ۲ است، لذا فاکتور اصلاحی ۱ یا ۱- خواهد بود. احتمال منفی بودن این فاکتور، بسیار پایین‌تر از احتمال مثبت بودن آن است و این مسئله با مقدار ضریب  $\beta$  کنترل می‌شود؛ اگر  $\beta$  برابر ۱/۵ باشد، احتمال منفی بودن صفر است و اگر  $\beta$  برابر یک باشد، احتمال منفی بودن با احتمال مثبت بودن برابر خواهد بود. بررسی نتایج مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده نشان داد که این مدل در ۵۴ اجرا از ۶۰ اجرای متوالی توانسته است جواب بهینه را پیدا کند و در ۶ مورد در جواب‌های بهینه محلی محبوس شده است. حداقل و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در ۵۴ اجرای موفق این مدل به ترتیب برابر ۱۴ و ۱۰۵ است. متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف برابر ۱۰۲۰۰ و متوسط زمان اجرای مدل نیز ۴۸/۵ ثانیه است. در مقایسه با الگوریتم دسته ذرات استاندارد، کارایی الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده بهبود یافته است به طوری که نسبت به آن در تعداد بیشتری از اجراها، متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف و متوسط زمان اجرای مدل کمتر جواب بهینه را پیدا کرد. همچنین در این مدل به دلیل عملکرد فاکتور اصلاحی، مدل فضای بیشتری را می‌تواند جستجو کند به طوری که در حداکثر ۱۰۵ گام از ۲۰۰ گام نتوانسته است جواب بهینه را به دست آورد در حالی که مدل دسته ذرات استاندارد در حداکثر ۶۱ گام از ۲۰۰ گام نتوانسته است جواب بهینه را به دست آورد.



را پیدا کنند؛ به طوری که همین مسئله، عامل اصلی افزایش تعداد گام‌های مدل برای پیدا کردن جواب بهینه است. به طور کلی مدل دسته ذرات استاندارد در بازه گام‌های ۱۳ تا ۵۵ برای ۴۱ گام متوالی، مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده در بازه گام‌های ۳۱ تا ۹۱ برای ۶۰ گام متوالی، مدل دسته ذرات استاندارد با عملگر جهش در بازه گام‌های ۲۶ تا ۱۰۸ برای ۸۲ گام متوالی و مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش برای گام‌های ۵۴ تا ۱۵۰ برای ۹۶ گام متوالی در همسایگی یک دسته جواب بهینه محلی محبوس هستند و در نهایت بعد از خروج از آن، جواب بهینه را پیدا می‌کنند. به عبارت دیگر می‌توان استنباط نمود که هر چقدر مدل در گام‌های متوالی بیشتری در همسایگی یک جواب بهینه محلی محبوس مانده باشد و بتواند از آن رهایی پیدا کند، انعطاف‌پذیری مدل بیشتر است.

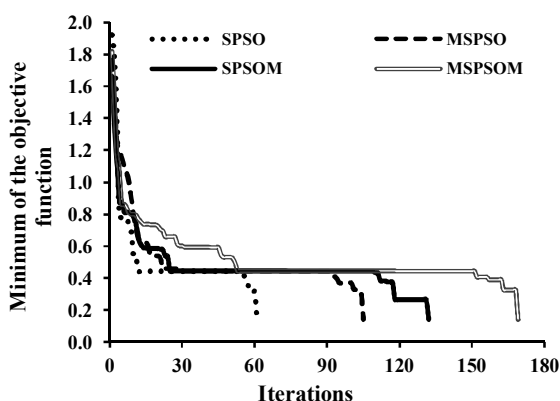


Fig. 8. Convergence diagram of PSO models for maximum step (two-loop network)

شکل ۸- نمودار همگرایی مدل‌های PSO در حالت حداکثر گام تکرار (شبکه دو حلقه‌ای)

در ادامه، کارایی مدل‌های ساخته شده برای روی شبکه چهار حلقه‌ای (Lensley et al. 2001) بررسی شد. شبکه چهار حلقه‌ای شامل ۱۶ لوله و ۱۳ گره در نظر گرفته شد و بر اساس پژوهش لنزی و همکاران، لوله‌های شبکه به هشت دسته تقسیم شد (Lensley et al., 2001). به طوری که لوله ۸، لوله ۱۰ و لوله ۱۱ هر کدام در یک دسته و لوله‌های ۱ و ۲، لوله‌های ۱۴ و ۱۵، لوله‌های ۳، ۴ و ۱۲، لوله‌های ۵، ۶ و ۱۳ و لوله‌های ۷، ۹ و ۱۶ نیز در دسته‌های دیگر مرتب شدند.

و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در ۵۸ اجرای موفق این مدل برابر ۱۲ و ۱۶۹ و متوسط تعداد ارزیابی توابع هدف برابر ۱۲۸۰۰ ارزیابی و متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه نیز ۶۱/۱ ثانیه بود. مدل دسته ذرات اصلاح شده با عملگر جهش از نظر تعداد دفعات رسیدن به جواب بهینه در بین همه مدل‌های بررسی شده، بهترین عملکرد را داشت، زیرا به غیر از دو مورد، در سایر اجراها توانست جواب بهینه را پیدا کند. این مدل از نظر متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف و متوسط زمان اجرای مدل نسبت به مدل دسته ذرات استاندارد عملکرد بهتر ولی نسبت به مدل دسته ذرات اصلاح شده و مدل دسته ذرات با عملگر جهش، عملکرد بدتری را نشان داد. همچنین حداکثر تعداد گام این مدل برای یافتن جواب بهینه نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بود که این مسئله ناشی از توان جستجوی مدل در فضای بیشتری از فضای جواب مدل است که از همگرا شدن سریع به یک جواب بهینه (بهینه کلی یا محلی) جلوگیری می‌کند و همین موضوع شانس مدل در پیدا کردن جواب بهینه را افزایش می‌دهد؛ هر چند متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف و متوسط زمان اجرای مدل را نیز افزایش می‌دهد.

در شکل ۸ نمودار همگرایی این مدل‌ها برای حالت حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه نشان داده شده است. برای بزرگنمایی محور قائم، اعداد آن به توان ۰/۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است در بین اجراهای موفق این مدل‌ها، به ترتیب مدل دسته ذرات استاندارد با حداکثر ۶۱ گام، مدل دسته ذرات استاندارد با اصلاح شده با حداکثر ۱۰۵ گام، مدل دسته ذرات استاندارد با عملگر جهش با حداکثر ۱۳۲ گام و مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش با حداکثر ۱۶۹ گام توانسته‌اند به جواب بهینه دست پیدا کنند. به همین ترتیب که حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه افزایش پیدا می‌کند، عملکرد مدل در تعداد دفعات پیدا کردن جواب بهینه نیز بهبود می‌یابد. به طوری که می‌توان استنباط نمود که هر چقدر حداکثر گام دستیابی به جواب بهینه افزایش یابد، مقاومت مدل در مقابل محبوس شدن در جواب بهینه محلی نیز افزایش پیدا می‌کند و مدل، کمتر در جواب‌های بهینه محلی محبوس می‌شود.

در بررسی دقیق‌تر منحنی‌ها مشخص شد که هر یک از مدل‌ها در بازه‌ای از گام‌های حل مسئله در همسایگی یک دسته جواب بهینه محلی محبوس هستند و بعد با رهایی از آن توانسته‌اند جواب بهینه

است، ولی مدل SPSO در این اجراها تمامی ۴۰۰ تکرار را پیش رفته است و نتوانسته است جواب بهینه را پیدا کند. این موضوع در مقایسه متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه نیز واضح است، به طوری که مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش نسبت به مدل دسته ذرات استاندارد عملکرد بهتری داشت، هر چند نسبت به مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده و مدل دسته ذرات با عملگر جهش، عملکرد نسبتاً بدتری نشان داد. در ارتباط با شاخص تعداد دفعات رسیدن به جواب بهینه، در بین چهار مدل ارائه شده، مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده در مقایسه با سایر مدل‌ها بهترین عملکرد را داشت.

برای تعیین ضرایب هیزن- ویلیامز لوله‌ها در شبکه توزیع آب اهر با توجه به تعداد زیاد لوله‌ها، لوله‌های شبکه بر اساس قطر و سن، در دسته‌های محدودی دسته‌بندی شدند. در جدول ۸ نحوه دسته‌بندی ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها نشان داده شده است که در آن A نشان‌دهنده تغییرات سن دسته‌ها و D نشان‌دهنده تغییرات قطر دسته‌ها است.

مدل‌سازی شبکه توزیع آب اهر بر عکس دو شبکه نمونه که در آنها مدل‌سازی به صورت استاتیک (در حالت متوسط مصرف از شبکه) انجام شد، به صورت دینامیک و در یک بازه ۲۴ ساعته انجام

هر یک از مدل‌ها برای ۶۰ بار متوالی اجرا شد. در هر بار اجرای مدل، ۴۰۰ تکرار اعمال شد. خلاصه نتایج مدل‌ها در جدول ۷ آورده شده است.

همانطور که از نتایج جدول ۷ معلوم است، مدل‌های SPSO، MSPSO، MSPSO و MSPSO به ترتیب در ۲۹، ۴۶، ۵۴ و ۵۷ اجرا از ۶۰ اجرای متوالی توانسته‌اند جواب بهینه را پیدا کنند که نشان‌دهنده این است که مدل دسته ذرات اصلاح شده با عملگر جهش نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد مناسبی در رسیدن به جواب بهینه دارد. همچنین بررسی حداقل و حداکثر گام‌های رسیدن به جواب بهینه در مورد این چهار مدل، نشان داد که در مدل MSPSO تعداد گام‌های رسیدن به جواب بهینه نسبت به مدل SPSO افزایش یافته است. به طوری که مدل SPSO در حداقل و حداکثر گام‌های به ترتیب ۲۳ و ۶۱ به جواب بهینه رسید در حالی که مدل MSPSO در حداقل و حداکثر گام‌های به ترتیب ۴۴ و ۳۹۳ توانست به جواب بهینه برسد. علت این مسئله ناشی از این است که در ۲۷ اجرای که مدل SPSO در مقایسه با مدل MSPSO در بهینه موضعی محبوس شده و به جواب بهینه نرسیده است، مدل MSPSO ناشی از تأثیر اصلاح معادله سرعت حرکت ذرات و عملگر جهش، با محاسبات بیشتر جواب بهینه را به دست آورده

جدول ۷- خلاصه نتایج مدل‌ها برای ۶۰ اجرای متوالی (شبکه چهارحلقه‌ای)

Table 7. Summary of model results for 60 consecutive runs (four-loop network)

	SPSO	MSPSO	SPSOM	MSPSOM
Number of consecutive runs	60	60	60	60
Number of finding optimal answer	29	46	54	57
Minimum steps to find optimal answer	23	29	37	44
Maximum steps to find optimal answer	61	132	326	393
Average evaluation of the objective function	45000	27200	42000	42400
Average Runtime (s)	224.4	132.1	204.6	207.1

جدول ۸- دسته‌بندی لوله‌های شبکه توزیع آب اهر بر اساس قطر و سن لوله‌ها (شبکه اهر)

Table 8. Classification of HW coefficients based on the pipe diameter and age (Ahar WDN)

Order	Diameter (mm)	Age (yr)	Categories		
1	20	0-10	A2,D1	A2,D4	A4,D5
2	75-90	10-20	A1,D2	A3,D4	A5,D5
3	100	20-30	A2,D3	A4,D4	A2,D6
4	150	30-40	A3,D3	A5,D4	A4,D6
5	200	50-60	A4,D3	A2,D5	A5,D6
6	300		A5,D3	A3,D5	

شده است.

بر اساس نتایج جدول ۹، با توجه به اینکه در مدل‌های بهینه‌سازی، جواب‌های بهینه محلی زیادی وجود دارد که می‌توانند شرایط مشابه و یا نزدیک به هم در برآورد تابع هدف داشته باشند، هر کدام از مدل‌ها به دسته جواب متفاوتی دست یافته‌اند که مقادیر تابع هدف برای آنها تقریباً نزدیک به هم می‌باشند و نتایج با توجه به مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در پژوهش دینی و تابش که با الگوریتم جامعه مورچگان انجام شده است، قابل قبول است (Dini and Tabesh, 2016).

مقایسه کارایی مدل‌ها بر اساس حداقل مقدار خطای داده‌های ساخت نشان داد که نتایج مدل‌ها بسیار به همدیگر نزدیک است ولی مدل MSPSO، MSPSOM، SPSO و SPSOM به ترتیب کمترین مقدار معادل ۲۷۴۲/۱۴، ۲۷۴۲/۲۳، ۲۷۴۲/۵۵ و ۲۷۴۲/۷۶ را داشتند. همچنین بر اساس متوسط مقدار خطای داده‌های ساخت نیز مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملکرد جهش، مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده، مدل دسته ذرات استاندارد با عملکرد جهش و مدل دسته ذرات استاندارد

شد. برای ایجاد تعادل هیدرولیکی در شبکه، مدل‌سازی در یک بازه زمانی ۷۲ ساعته انجام و ۲۴ ساعت آخر در مدل‌سازی استفاده شد. تنظیم ضرایب شبکه توزیع آب اهر با استفاده از چهار مدل دسته ذرات معرفی شده انجام و نتایج با نتایج الگوریتم جامعه مورچگان ارائه شده در پژوهش (Dini and Tabesh, 2016) مقایسه شد. برای مشابه‌سازی فضای جواب و نتایج در دو الگوریتم، با توجه به اینکه در الگوریتم جامعه مورچگان، بازه تغییرات ضرایب هیزن-ویلیامز برابر یک انتخاب شده بود، در الگوریتم دسته ذرات نیز با استفاده از تابع گرد کردن اعداد، فضای جستجوی مسئله از فضای اعداد حقیقی به فضای اعداد صحیح تغییر یافت. همچنین حد پایین و حد بالای ضریب هیزن-ویلیامز برابر ۷۰ و ۱۴۰ در نظر گرفته شد، به طوری که در هر بار انتخاب برای هر دسته، امکان انتخاب ۷۱ حالت برای ضرایب هیزن-ویلیامز وجود داشت. هر یک از مدل‌های دسته ذرات، برای ۱۰ اجرای متوالی و هر اجرا ۳۰۰ تکرار انجام شد و بهترین مقدار به همراه متوسط مقدار تابع هدف برای ۱۰ اجرای متوالی گزارش شد. خلاصه نتایج به دست آمده برای هر یک از مدل‌ها و خطای داده‌های ساخت و تست مدل در جدول ۹ آورده

جدول ۹- خلاصه نتایج مدل‌ها برای شبکه توزیع آب اهر

Table 9. Summary of the models results of the Ahar water distribution network

Categories	ACO	SPSO	MSPSO	SPSOM	MSPSOM
C1- A2,D1	72	103	115	97	115
C2- A1,D2	108	92	93	101	95
C3- A2,D3	115	115	115	115	115
C4- A3,D3	92	92	93	93	93
C5- A4,D3	88	87	87	87	87
C6- A5,D3	106	115	115	115	115
C7- A2,D4	99	103	105	104	104
C8- A3,D4	81	115	115	115	115
C9- A4,D4	89	97	97	97	97
C10- A5,D4	108	115	115	115	115
C11- A2,D5	113	115	115	115	115
C12- A3,D5	79	81	81	81	81
C13- A4,D5	87	65	64	65	65
C14- A5,D5	64	60	60	60	60
C15- A2,D6	111	109	109	109	109
C16- A4,D6	101	100	100	101	100
C17- A5,D6	86	85	85	85	85
Min model data error	2791.42	2742.76	2742.23	2742.55	2742.14
Max model data error	2807.64	2759.13	2746.44	2746.90	2744.53
Test data error	774.97	777.84	777.61	777.95	778.03

مجموع ده اجرای متوالی مدل، متوسط خطای داده‌های ساخت کمتری را به دست آورند. به همین دلیل مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش با کمترین مقدار حداقل و متوسط خطای داده‌های ساخت، بهترین عملکرد را در بین مدل‌های دیگر دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج مدل دسته ذرات استاندارد با مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده برای تابع محک ریاضی راستین نشان می‌دهد که مدل دسته ذرات استاندارد در تعداد متغیرهای تصمیم کم (۳ متغیر)، عملکرد بهتری نسبت به مدل دسته ذرات استاندارد دارد. در حالی که برای تعداد متغیرهای تصمیم زیاد (۵، ۸ و ۱۲ متغیر)، الگوریتم دسته ذرات استاندارد اصلاح شده، عملکرد بهتری نسبت به مدل دسته ذرات استاندارد نشان داد.

به طور کلی اصلاح معادله سرعت حرکت دسته ذرات، قابلیت مدل در تعیین جواب واقعی را افزایش و هزینه محاسبات را کاهش داد.

بررسی نتایج مدل‌ها در شبکه دو حلقه‌ای و چهار حلقه‌ای نشان می‌دهد که مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش، بیشترین دفعات رسیدن به جواب بهینه را داشت به طوری که به ترتیب در ۹۶/۷ و ۹۵ درصد موارد جواب بهینه را یافت. همچنین مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده کمترین متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه را داشت به طوری که به ترتیب و با متوسط زمان ۴۸/۵ و ۱۳۲/۴ ثانیه جواب بهینه را به دست آورد.

در مجموع اصلاح معادله سرعت حرکت ذرات و همچنین اعمال عملگر جهش و در نهایت تلفیق آنها با یکدیگر در کاهش زمان رسیدن به جواب بهینه در مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده و افزایش قدرت مدل در پیدا کردن جواب بهینه در مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش مؤثر است. مقایسه نتایج مدل‌ها در شبکه توزیع آب اهر نشان داد که مدل‌های بهینه‌سازی دسته ذرات در مقایسه با مدل بهینه‌سازی جامعه مورچگان عملکرد مطلوبی در تنظیم ضرایب مدل دارند. در عین حال مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش، با کمترین مقدار حداقل و متوسط خطای داده‌های ساخت، بهترین عملکرد را در بین مدل‌های دسته ذرات نشان داد.

به ترتیب کمترین مقدار را داشتند که مقدار آنها برابر ۲۷۴۴/۵۳، ۲۷۴۶/۴۴، ۲۷۴۶/۹۰ و ۲۷۵۹/۱۳ بود. این مدل‌ها در مقایسه با مدل جامعه مورچگان، به دلیل برازش بیشتر به داده‌های ساخت، از داده‌های تست دور شدند و مقدار آنها برای مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده، مدل دسته ذرات استاندارد، مدل دسته ذرات استاندارد با عملگر جهش و مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش، کمترین مقدار و به ترتیب برابر ۷۷۷/۶۱، ۷۷۷/۸۴، ۷۷۷/۹۵ و ۷۷۸/۰۳ بود.

برای بررسی روند همگرایی این مدل‌ها به جواب نهایی، نمودار همگرایی برای بهترین اجرای مدل در ده اجرای متوالی در شکل ۹ نشان داده شده است. در این نمودار برای بزرگنمایی محور قائم، مقدار این محور به توان ۰/۲ نشان داده شده و مقادیر بزرگ‌تر از ۴/۹۸ فیلتر شدند. همانطور که مشخص است، مدل‌های مبتنی بر الگوریتم دسته ذرات بسیار سریع‌تر نسبت به الگوریتم جامعه مورچگان به مقادیر نزدیک به مقدار بهینه، همگرا شدند. در بین مدل‌های دسته ذرات، مدل دسته ذرات استاندارد در گام‌های اولیه به مقدار جواب نهایی همگرا شده و بعد در آن محبوس می‌شود و به همین دلیل مقدار متوسط خطای داده‌های ساخت برای این مدل بیشترین مقدار است. با اصلاح معادله سرعت حرکت ذرات در مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده، اعمال عملگر جهش در مدل دسته ذرات استاندارد با عملگر جهش و تلفیق آنها در مدل دسته ذرات استاندارد اصلاح شده با عملگر جهش، مدل‌ها در تعداد گام‌های بیشتری فضای جواب مسئله را جستجو کرده‌اند و به همین دلیل کمتر در جواب بهینه اولیه محبوس شده‌اند و توانسته‌اند در

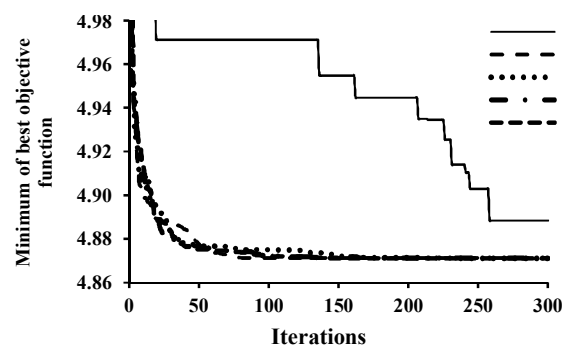


Fig. 9. Convergence diagram of models in Ahar water distribution network

شکل ۹- نمودار همگرایی مدل‌ها در شبکه توزیع آب اهر

## ۵- قدردانی

به این وسیله از حمایت مدیریت شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

## References

- Alperovits, E. & Shamir, U. 1977. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.
- Asadzadeh, M., Tolson, B. & McKillop, R. 2011. A two stage optimization approach for calibrating water distribution systems. *Proceedings of the 12th Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis (WDSA)*, Tucson, Arizona, United States, 1682-1694.
- Blum, C. & Roli, A. 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268-308.
- Behzadian, K., Ardeshtir, A., Jalilsani, F. & Sabour, F. 2008. A comparative study of stochastic and deterministic sampling design for model calibration. *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*, Honolulu, Hawaii, United States, 1-11.
- Borzi, A., Gerbino, E., Bovis, S. & Corradini, M. 2005. Genetic algorithms for water distribution network calibration: a real application. *Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, University of Exeter, UK, 149-154.
- Cheng, W. & He, Z. 2011. Calibration of nodal demand in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 31-40.
- Dini, M. & Tabesh, M. 2014. A new method for simultaneous calibration of demand pattern and hazen-williams coefficients in water distribution systems. *Water Resources Management*, 28, 2021-2034.
- Dini, M. & Tabesh, M. 2016. Water distribution network modeling by considering the effect of material, diameter and age of pipes in Hazen williams coefficients adjustment. *9th National Congress on Civil Engineering*, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian)
- Eberhart, R.C. & Shi Y. 2001. Particle swarm optimization: developments, applications and resources. *Proceeding Congress on Evolutionary Computation*, Seoul, Korea.
- Fiorini Morosini, A., Veltri, P., Costanzo F., Savic, D. 2013. Identification of leakages by calibration of WDS models. *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI*, Perugia, Italy, 660-667.
- Kang, D. & Lansey, K. 2011. Demand and roughness estimation in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 20-30.
- Kennedy, J. & Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia.
- Kumar, S.M., Narasimhan, S. & Bhallamudi, S.M. 2010. Parameter estimation in water distribution networks. *Journal of Water Resources Management*, 24, 1251-1272.
- Lansey, E., El-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J. & Haan, T. 2001. Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(4), 270-279.



- Faghfoor Maghrebi, M., Hasanzadeh, Y. & Yazdani, S. 2013. Calibration of water supply systems based on ant colony optimization. *Journal of Water and Wastewater*, 24(1), 101-111. (In Persian)
- Meirelles, G., Manzi, D., Brentan, B., Goulart, T. & Luvizotto, J. E. 2017. Calibration model for water distribution network using pressures estimated by artificial neural networks. *Water Resources Management*, 31(13), 4339-4351.
- Mühlenbein, H., Schomisch, D. & Born, J. 1991. The parallel genetic algorithm as function optimizer. *Parallel Computing*, 17, 619-632.
- Niu, Z.G., Wang, Y.F., Zhang, T. & Zhang, H.W. 2011. Calibration of friction resistance coefficient and calculation method of leakage localization of water supply network. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 44(4), 364-368.
- Ormsbee, L.E. 1989. Implicit network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 115(2), 243-257.
- Ormsbee L.E. & Wood D.J. 1986. Explicit pipe network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 112(2), 166-182.
- Rastrigin, L.A. 1974. *Systems of external control*, Nauka Publishing House, Moscow, Russia.
- Rossman, L.A. 2000. *EPANET2: user's manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Sanz, G. & Perez, R. 2013. Demand pattern calibration in water distribution networks, *12<sup>th</sup> International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, CCWI, Perugia, Italy, 1495-1504.
- Sedki, A. & Ouazar, D. 2012. Hybrid particle swarm optimization and differential evolution for optimal design of water distribution systems. *Advanced Engineering Informatics*, 26, 582-591.
- Shamir, U. & Howard, C.D.D. 1968. Water distribution system analysis. *Journal of the Hydraulic Division*, 94(1), 219-234.
- Tabesh, M., Jamasb B. & Moeini, R. 2011. Calibration of water distribution hydraulic models: a comparison between pressure dependent and demand driven analyses. *Urban Water Journal*, 8(2), 93-102.
- Vassiljev, A., Koppel T. & Puust R. 2005. Calibration of the model of an operational water distribution system. *Proceedings of the 8th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, University of Exeter, UK, 155-159.
- Walski, T.M. 1983. Technique for calibrating network models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 109(4), 360-372.
- Wang, H.X., Guo, W., Xu, J. & Gu, H. 2010. A hybrid PSO for optimizing locations of booster chlorination stations in water distribution systems. *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, IEEE Computer Society, Washington DC, USA.
- Yu, Zh., Tian, Y., Zheng, Y. & Zhao, X. 2009. Calibration of pipe roughness coefficient based on manning formula and genetic algorithm. *Transactions of Tianjin University*, 15(6), 452-456.
- Zhang, T.Q., Huang, Y.D. & Wu, X.G. 2007. Optimal locations of water quality monitoring stations in water distribution systems. *Journal of Zhejiang University*, 41(1), 1-5.