

بررسی کارایی الگوریتم دسته ذرات در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز مدل شبکه توزیع آب

مه‌دی دینی*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

(دریافت: ۹۶/۵/۶، پذیرش: ۹۸/۴/۲۶، نشر آنلاین: ۹۸/۴/۲۶)

چکیده

هدف این مقاله بررسی کارایی الگوریتم دسته ذرات در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز (Hazen Williams) لوله‌های شبکه توزیع آب می‌باشد. برای مقایسه، الگوریتم جامعه مورچگان انتخاب شده است. در مجموع با تلفیق الگوریتم بهینه‌ساز دسته ذرات و جامعه مورچگان با مدل شبیه‌ساز EPANET در محیط متلب پنج مدل الگوریتم دسته ذرات و سه مدل الگوریتم جامعه مورچگان ساخته شده است. برای صحت‌سنجی و ارزیابی اولیه مدل‌ها، از شبکه دو حلقه‌ای و برای بررسی تفصیلی آن‌ها از شبکه توزیع آب اهر استفاده شده است. مقایسه نتایج برای ۲۰ اجرای متوالی مدل‌ها در شبکه دو حلقه‌ای نشان می‌دهد که از بین مدل‌های دسته ذرات، مدل SPSO با ۱۱ مورد رسید به جواب واقعی بدترین و مدل HMPSO2 با ۲۰ بار رسیدن به جواب واقعی بهترین عملکرد را دارد. همچنین از بین مدل‌های جامعه مورچگان، مدل ACO1 با یک بار رسیدن به جواب واقعی بدترین و مدل ACO3 با ۲۰ بار رسیدن به جواب واقعی بهترین عملکرد را دارد با این تفاوت که فضای جستجوی مدل ACO3 بسیار کوچک‌تر از مدل ACO1 می‌باشد. مقایسه نتایج مدل HMPSO2 و ACO1 برای شبکه توزیع آب اهر نشان می‌دهد که هر دو مدل به خوبی توانسته‌اند ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌های شبکه را تعیین کنند، با این تفاوت که HMPSO2 از نظر تعداد ارزیابی توابع هدف ۵ برابر کم‌تر و از نظر زمان رسیدن به جواب بهینه ۶ برابر سریع‌تر نسبت به ACO1 توانسته است جواب بهینه را پیدا کند و از عملکرد بهتری برخوردار است.

کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع آب اهر، ضرایب هیزن ویلیامز، الگوریتم دسته ذرات، الگوریتم جامعه مورچگان.

۱- مقدمه

به صورت ماندگار در یک یا چند زمان خاص و یا دوره گسترده (ساعتی در طول ۲۴ ساعت) اندازه‌گیری شود. برای تنظیم ضرایب مدل شبکه توزیع آب سه روش به کار گرفته شده است. اولین روش، روش روند تکراری^۱ است برای اولین بار توسط Walski (۱۹۸۳) به کار برده شد. استفاده است. روش دوم، روش صریح^۲ است.

Shamir و Howard (۱۹۶۸) از پیشگامان ارائه این روش هستند روش سوم، روش غیرصریح^۳ است. در این روش، فرایند تنظیم ضرایب به صورت انجام بهینه‌سازی یک تابع هدف با قیود خاص می‌باشد، که حل آن‌ها منجر به تعیین ضرایب مجهول می‌شود. این شیوه، پرطرفدارترین و به عبارتی مؤثرترین راه ممکن برای تعیین ضرایب است.

با توجه به وسعت و پیچیدگی شبکه‌های توزیع آب، نیاز به مدل‌سازی کامپیوتری شبکه‌های توزیع آب شهری برای شناسایی رفتار هیدرولیکی آن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. از موضوعات بسیار مهم در مدل‌سازی، تطبیق نتایج مدل با وضعیت واقعی سیستم می‌باشد. برای این منظور لازم است ضرایب مدل تنظیم شود. تنظیم ضرایب عبارت است از تعیین ضرایب مدل به گونه‌ای که مقادیر مشاهداتی با مقادیر محاسباتی تا حد امکان تطابق داشته باشند. ضرایب قابل تنظیم مدل شبکه توزیع آب شامل ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها و تقاضای گره‌های شبکه، ضریب الگوی مصرف و ضریب نشت در گره‌های شبکه می‌باشد. مقادیر مشاهداتی یا محاسباتی عمدتاً شامل فشار گرهی، تراز تانک‌ها، دبی جریان در لوله‌ها و مقادیر کل نشت شبکه می‌باشد که می‌تواند

3. Implicit methods

1. Iterative procedure method
2. Explicit Methods

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۴۱-۳۱۴۵۲۵۸۰

آدرس ایمیل: m.dini@azaruniv.ac.ir (م. دینی).

و Hoos (۱۹۹۷)، سامانه مورچه‌های ترتیبی (ASrank)^۷ و Bullnheimer و همکاران، (۱۹۹۹) و سامانه مورچه‌های بهترین و بدترین^۸ (Cordon و همکاران، ۲۰۰۰) اشاره نمود.

Maier و همکاران (۲۰۰۱) و (۲۰۰۳) برای اولین بار این الگوریتم را برای طراحی شبکه‌های توزیع آب به کار برده‌اند و در سال‌های اخیر این الگوریتم برای کاربردهای مختلف در شبکه توزیع آب به کار گرفته شده است. در مورد تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب فغفورمغربی و همکاران (۱۳۹۲)، کالیبراسیون شبکه توزیع آب را با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک و با هدف تعیین نشت از شبکه مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از شبکه نمونه برای صحت‌سنجی نتایج مدل استفاده شده است. بر اساس نتایج، روش جامعه مورچگان و کالیبراسیون شبکه توزیع آب، روشی مناسب برای نشت‌یابی در شبکه توزیع آب می‌باشد. در ادامه این تحقیقات عطاری و همکاران (۱۳۹۶)، روش اندازه‌گیری فشار گرهی در قالب تحلیل اختلاف فشار گرهی در حالت نشت‌دار و بدون نشت را برای شناسایی نشت استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش می‌تواند با حداقل برداشت مقادیر فشار گرهی، علاوه بر تعیین موقعیت نشت، مقدار نشت را نیز شناسایی کند.

Tabesh و Dini (۲۰۱۴) کالیبراسیون هم‌زمان ضریب هیزن ویلیامز و ضریب الگوی مصرف شبکه را با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان مطرح کردند. در این تحقیق، یک روش جایگزین برای تعیین ضرایب الگوی مصرف در ساختار الگوریتم تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز به کار گرفته شده است که کمک می‌کند هر دو ضریب با دقت و سرعت بهتری نسبت به روش‌های معمولی تعیین شوند.

دینی و تابش (۱۳۹۵) مدل‌سازی شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن تأثیر جنس، قطر و سن لوله‌ها در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز شبکه را با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان بررسی کردند. نتایج نشان داد که ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها تابع عوامل مختلفی از جمله قطر، جنس و سن لوله‌ها می‌باشد که هرکدام از آن‌ها به تنهایی یا در ترکیب با همدیگر در تعیین دقیق‌تر ضریب مؤثر می‌باشد.

الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات (PSO)^۹ اولین بار توسط Kennedy و Eberhart (۱۹۹۵) ارائه شده است این الگوریتم با الهام از رفتار اجتماعی حیوانات مانند پرواز گروهی پرندگان و حرکت گروهی ماهی‌ها ارائه شده است. Zhang و همکاران (۲۰۰۷) الگوریتم DBPSO^{۱۰} را برای پیدا کردن موقعیت مناسب

برای تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب محققین زیادی، توابع هدف مختلفی را ارائه نموده‌اند. از جمله آن‌ها می‌توان به تحقیقات Ormsbee (۱۹۸۹) اشاره نمود که هنوز هم مورد استفاده است. ایشان برای تنظیم ضرایب مدل، حداقل‌سازی خطای بین فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌های شبکه را به عنوان تابع هدف در نظر گرفت.

Greco و همکاران (۱۹۹۹) روش جدیدی برای تنظیم ضریب مدل ارائه نمودند. در واقع به نظر آن‌ها حل توابع هدف، منوط به ارائه تخمین‌های اولیه مناسب از ضرایب است. لذا تابع هدف را بر اساس حداقل‌سازی مقادیر تخمینی و مقادیر به‌دست آمده برای ضرایب زبری لوله‌ها ارائه نمودند، به طوری که اختلاف فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌ها از یک مقدار قابل قبول کوچک‌تر شود.

Borzi و همکاران (۲۰۰۵) برای تنظیم ضرایب مدل شبکه توزیع آب، حداقل‌سازی مجموع اختلاف فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌های شبکه و اختلاف دبی مشاهداتی و محاسباتی در لوله‌های شبکه و Yu و همکاران (۲۰۰۹) حداقل‌سازی مجموع اختلاف فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌ها و دبی در لوله‌ها و تراز در تانک‌ها را به عنوان تابع هدف در نظر گرفتند. همچنین Kumar و همکاران (۲۰۱۰) حداقل‌سازی مجموع اختلاف فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌ها، دبی جریان مشاهداتی و محاسباتی در لوله‌ها و دبی تقاضای مشاهداتی و محاسباتی در گره‌ها و Maskit و Ostfeld (۲۰۱۴) حداقل‌سازی خطای بین فشار مشاهداتی و محاسباتی در گره‌های شبکه و مجموع کل نشت مشاهداتی و محاسباتی در شبکه را به عنوان تابع هدف مدل تعریف کرده‌اند.

در سال‌های اخیر روش‌های زیادی برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، کارایی الگوریتم دسته ذرات در مقایسه با الگوریتم جامعه مورچگان در تنظیم ضرایب شبکه بررسی می‌شود. به همین دلیل در ادامه صرفاً تحقیقات مرتبط با این دو الگوریتم مرور می‌شود.

الگوریتم جامعه مورچگان که با الهام از رفتار اجتماعی مورچه‌ها در هنگام جستجوی غذا توسعه یافته، به عنوان یک روش فراکاوشی توسط Dorigo (۱۹۹۲) پیشنهاد گردیده است. در سال‌های بعد انواع مختلفی از این الگوریتم ارائه شده است. الگوریتم سامانه مورچه‌ها (AS)^۴ (Dorigo و همکاران (۱۹۹۶))، سامانه جامعه مورچه‌ها (ACS)^۵ (Dorigo و Gambardella، ۱۹۹۷)، سامانه مورچه‌های بیشینه و کمینه (MMAS)^۶ (Stutzle

8. Best-Worst Ant System

9. Particle Swarm Optimization

10. Discrete Binary Particle Swarm Optimization

4. Ant System

5. Ant Colony System

6. Max-Min Ant System

7. Ranked Ant System

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، از تلفیق الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات و جامعه مورچگان با شبیه‌ساز EPANET در محیط متلب برای ساخت مدل‌های بهینه‌سازی استفاده شده است. برای مدل‌سازی از کامپیوتر Intel(R)Core(TM)i3-2100CPU@3.10GHz استفاده گردیده است.

۲-۱- الگوریتم دسته ذرات

الگوریتم دسته ذرات از مجموعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیوسته است که بر مبنای تولید تصادفی جمعیت اولیه عمل می‌کنند. در الگوریتم دسته ذرات ساده هیچ عملگر تکاملی مانند هم‌گذری و جهش وجود ندارد. موقعیت و سرعت ذرات در الگوریتم دسته ذرات ساده بر اساس بهترین موقعیت کلی و محلی به‌دست می‌آید (Kennedy و Eberhart، ۱۹۹۵).

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

$$V_i(t+1) = C_1 * Rand_1 * (P_{i.best} - X_i(t)) + C_2 * Rand_2 * (P_{g.best} - X_i(t)) + W * V_i(t) \quad (2)$$

که در آن W : ضریب وزنی حرکت در مسیر قبلی که نشان دهنده 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 یافت شده در بین کل جمعیت $P_{i.best}$: بهترین مقدار ذره مورد بررسی در طول عمر ذره، $P_{g.best}$: بهترین مقدار در بین کل ذرات، $Rand_1, Rand_2$: 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 را در بازه V_{min} تا V_{max} محدود می‌کنند که حد بالا و پایین سرعت با توجه به نوع مسئله تعیین می‌گردد. در الگوریتم دسته ذرات ترکیبی (HPSO)، عملگر جهش الگوریتم ژنتیک به مدل دسته ذرات ساده اضافه می‌شود و مدل ترکیبی دسته ذرات جهش‌دار ایجاد می‌شود (Wang و همکاران، ۲۰۱۰).

در مدل دسته ذرات چند گروهی، چند دسته ذره در کنار هم حرکت می‌کنند که در کنار استقلال گروهی فرمان‌پذیری جمعی نیز دارند و به عنوان الگوریتم دسته ذرات چند گروهی (MPSO)^{۱۲} شناخته می‌شود. هر ذره در این الگوریتم دارای دو اندیس است که اندیس اول، شماره گروه ذره و اندیس دوم، شماره ذره در گروه را مشخص می‌کند. سرعت ذرات در این الگوریتم از

ایستگاه‌های مانیتورینگ کیفی در شبکه‌های توزیع آب استفاده کردند. Montalvo و همکاران (۲۰۰۸) الگوریتم DPSO را برای طراحی شبکه‌های توزیع آب به کار گرفت. Zhang و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از الگوریتم PSO مدل بهینه بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب را ساختند.

Wang و همکاران (۲۰۱۰) الگوریتم ترکیبی دسته ذرات (HPSO)^{۱۱} را برای پیدا کردن موقعیت مناسب ایستگاه‌های مانیتورینگ کیفی در شبکه‌ها به کار بردند. در الگوریتم HPSO خصوصیات الگوریتم دسته ذرات با خصوصیات الگوریتم ژنتیک از جمله توزیع و جهش ترکیب شده است. Montalvo و همکاران (۲۰۱۰) الگوریتم چند هدفه PSO را مطرح کرده‌اند و آن را برای طراحی شبکه‌های توزیع آب به کار برده‌اند. مینیمم کردن هزینه‌ها شبکه و کمبود فشار در گره‌ها به عنوان اهداف بهینه‌سازی مطرح بوده است.

محمدی‌اقدم و همکاران (۱۳۹۴) الگوریتم دسته ذرات دینامیکی جهشی را برای طراحی شبکه توزیع آب مطرح کردند. در این مدل، در ابتدا جمعیت اولیه الگوریتم زیاد است و با پیشرفت الگوریتم جمعیت کاهش پیدا می‌کند. همچنین عملگر جهش نیز برای جلوگیری از گیرافتادن مدل در کمینه محلی به کار گرفته شده است. در ارتباط با تنظیم ضرایب مدل شبکه تحقیقات زیادی انجام نشده است و Niu و همکاران (۲۰۱۱) برای اولین بار الگوریتم PSO را برای کالیبراسیون ضریب افت لوله‌ها و موقعیت‌یابی نشت از شبکه‌ها استفاده نمودند یک مدل ترکیبی به صورت ضریب افت لوله‌ها و موقعیت نشت در کنار هم و دو مدل مجزا برای هر کدام ساخته شد و با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی گردید. نتایج نشان می‌داد که بهینه‌سازی در حالت ترکیبی نتایج بهتری به‌دست می‌آورد.

هدف از این تحقیق، بررسی کارایی الگوریتم دسته ذرات در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌های شبکه توزیع آب است، برای این منظور پنج مدل از الگوریتم دسته ذرات ساخته شده است. در ادامه برای ارزیابی قابلیت الگوریتم دسته ذرات و مقایسه آن با سایر الگوریتم‌ها، الگوریتم جامعه مورچگان انتخاب و سه مدل از آن ساخته شده است. به منظور ارزیابی نتایج مدل‌های بهینه‌سازی از یک شبکه کوچک دوحلقه‌ای و یک شبکه توزیع آب واقعی استفاده شده است. برای ساخت مدل‌های بهینه‌سازی از تلفیق مدل شبیه‌ساز EPANET (Rossman، ۲۰۰۰) با الگوریتم دسته ذرات و جامعه مورچگان در محیط MATLAB استفاده شده است. به‌کارگیری روش‌های مختلف الگوریتم دسته ذرات در تنظیم ضرایب مدل شبکه توزیع آب و پیاده‌سازی آن برای یک شبکه توزیع آب واقعی در ایران از نوآوری‌های تحقیق می‌باشد.

۳-۲- تابع هدف و محدودیت‌ها

تابع هدف و محدودیت‌های مدل به صورت رابطه (۶) می‌باشد (Ormsbee و همکاران، ۱۹۸۹).

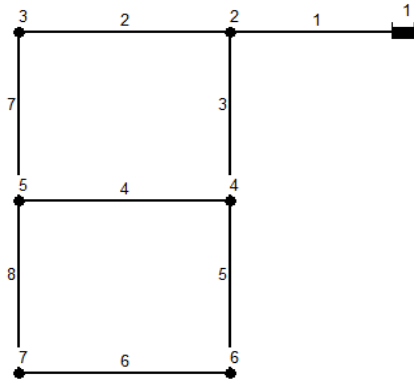
$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T (PO_{tj} - PS_{tj})^2 \quad (۶)$$

$CHW_{min} < CHW < CHW_{max}$

که در آن N تعداد گره‌های نمونه‌برداری، T کل ساعت‌های نمونه‌برداری، PO_{tj} فشار مشاهداتی و PS_{tj} فشار محاسباتی در گره j ام در زمان t ، F مقدار تابع هدف، CHW ضریب هیزن ویلیامز لوله‌های شبکه و CHW_{min} و CHW_{max} به ترتیب حدود پایین و بالای ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها می‌باشد.

۴-۲- مطالعه موردی

در بخش مطالعه موردی، از شبکه نمونه دوحلقه‌ای و شبکه توزیع آب اهر استفاده شده است. طرح کلی شبکه دوحلقه‌ای در شکل (۱)، مشخصات لوله‌ها و گره‌های شبکه در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- شبکه دوحلقه‌ای با ۸ لوله و ۷ گره

(Alperovits و Shamir، ۱۹۷۷)

جدول ۱- مشخصات لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای

لوله یا گره	طول (m)	قطر (mm)	ضریب زبری	ارتفاع (m)	تقاضا (l/s)
۱	۱۰۰۰	۴۵۰	۱۳۰	۲۱۰	۰
۲	۱۰۰۰	۳۵۰	۸۰	۱۵۰	۲۷/۸
۳	۱۰۰۰	۳۵۰	۱۳۰	۱۶۰	۲۷/۸
۴	۱۰۰۰	۱۵۰	۷۰	۱۵۵	۳۳/۴
۵	۱۰۰۰	۳۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۷۵
۶	۱۰۰۰	۱۰۰	۸۰	۱۶۵	۹۱/۷
۷	۱۰۰۰	۳۵۰	۱۰۰	۱۶۰	۵۵/۶
۸	۱۰۰۰	۲۵۰	۷۰	-	-

رابطه زیر به دست می‌آید که متأثر از بهترین موقعیت ذره، بهترین موقعیت ذرات در گروه و بهترین موقعیت کل ذرات می‌باشد (Wang و همکاران، ۲۰۱۰).

$$V_{ij}(t+1) = C_1 * Rand_1 * (P_{ij}.best - X_{ij}(t)) + C_2 * Rand_2 * (P_g.best - X_{ij}(t)) + C_3 * Rand_3 * (S_{gj}.best - X_{ij}(t)) + W_{ij} * V_{ij}(t) \quad (۳)$$

که در آن W_{ij} ضریب وزنی اینرسی ذره i ام در گروه j ام، C_1 ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین مقدار ذره i ام در گروه j ام، C_2 ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین ذره یافت شده در بین همه گروه‌ها، C_3 ضریب ثابت حرکت در مسیر بهترین ذره یافت شده در بین ذرات گروه j ام، $P_{ij}.best$ ذره i ام در گروه j ام، $P_g.best$ بهترین مقدار در بین ذرات همه گروه‌ها، $S_{gj}.best$ بهترین مقدار در بین ذرات گروه j ام، $Rand_1$ ، $Rand_2$ ، $Rand_3$ اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه ۰ تا ۱، $V_i(t)$ بردار سرعت در تکرار t ام، $X_i(t)$ بردار موقعیت در تکرار t ام می‌باشد. در الگوریتم دسته ذرات چندگروهی ترکیبی (HMPSO)، عملگر جهش الگوریتم ژنتیک به مدل دسته ذرات چندگروهی اضافه شده و مدل ترکیبی الگوریتم دسته ذرات چندگروهی جهش‌دار را ایجاد می‌کند.

۲-۲- الگوریتم جامعه مورچگان

الگوریتم دسته ذرات از مجموعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی گسسته است. تابع احتمال تعریف شده برای این روش به صورت رابطه (۴) می‌باشد (Zecchin و همکاران، ۲۰۰۵).

$$P_{i,j}(k,t) = \frac{[T_{i,j}(t)]^\alpha [U_{i,j}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^J [T_{i,j}(t)]^\alpha [U_{i,j}(t)]^\beta} \quad (۴)$$

که $P_{i,j}(k,t)$ احتمال انتخاب گزینه j وقتی که مورچه k در دوره t و نقطه تصمیم i قرار دارد، $T_{i,j}(t)$ غلظت فرومون^{۱۴} مسیر ij در دوره t ، $U_{i,j}(t)$ هدایت‌کننده کاوشی مسیر ij و α ، β مقادیر ضرایب وزن فرومون و هدایت‌کننده کاوشی می‌باشند. رابطه بهنگام‌سازی فرومون به صورت رابطه (۵) می‌باشد (Zecchin و همکاران، ۲۰۰۵).

$$T_{i,j}(t+1) = \rho T_{i,j}(t) + \Delta T_{i,j}(t) \quad (۵)$$

که در آن ρ ضریب تبخیر فرومون، $T_{i,j}(t)$ غلظت فرومون مسیر ij در دوره t ، $T_{i,j}(t+1)$ غلظت فرومون مسیر ij در دوره $(t+1)$ و $\Delta T_{i,j}(t)$ اضافه فرومون مسیر ij در دوره t می‌باشند.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های بهینه‌سازی دسته ذرات

HMPSO2	HMPSO1	MPSO	HSPSO	SPSO	
۵۰	۵۰	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	Ns
۶	۶	۶	۱	۱	Nm
۲	۲	۲	۲	۲	$C1$
۲	۲	۲	۳	۲	$C2$
۲	۲	۲	۰	۰	$C3$
۰/۶-۰/۸	۰/۶-۰/۸	۰/۶-۰/۸	۰/۸	۰/۸	W
۱	۰/۲	۰	۱	۰	Nmu
۰/۰۲	۰/۲	۰	۰/۰۲	۰	Rmu

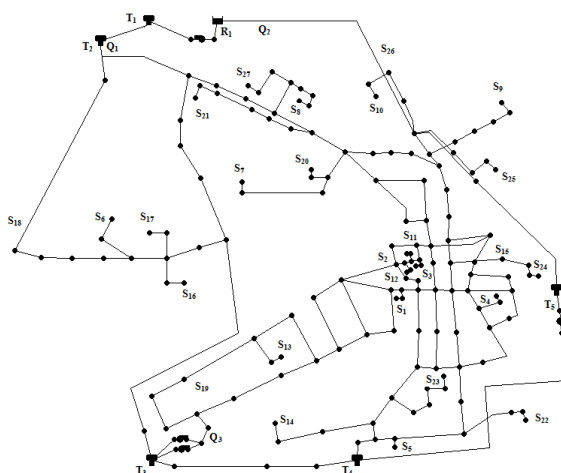
در مجموع هر یک از مدل‌ها سه بار و هر بار ۲۰ تکرار اجرا شده و بهترین نتیجه به دست آمده از سه اجرای مدل به عنوان خروجی مدل‌ها گزارش شده است. برای تمامی مدل‌های شبکه دوحلقه‌ای، حدود حداقل و حداکثر ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها برابر ۷۰ و ۱۳۰ انتخاب شده و با اعمال تابع اعداد صحیح حدود تغییرات ضریب هیزن ویلیامز یک می‌باشد. همچنین با تحلیل حساسیت بر روی مدل SPSO^{۱۵} و MPSO^{۱۶}، حدود حداقل و حداکثر تغییرات سرعت در تابع به‌روزرسانی موقعیت ذرات برابر ۲۰ درصد اختلاف حدود حداکثر و حداقل ضریب هیزن ویلیامز لوله‌ها و به ترتیب برابر ۱۲- و ۱۲ در نظر گرفته شده است. بر اساس توضیحات فوق و با توجه به این‌که تعداد لوله‌های شبکه برابر ۸ است. فضای جستجوی مدل دسته ذرات برای شبکه دوحلقه‌ای برابر ۶۰۸ (۱۴×۱۶۸) می‌باشد. خلاصه نتایج مدل‌ها برای یکی از سه اجرا و ۲۰ تکرار متوالی در جدول (۳) ارائه شده است.

به‌طور کلی مدل دسته ذرات ساده (SPSO) از تعداد ۲۰ اجرای متوالی، در ۱۱ مورد جواب بهینه را پیدا کرده و در ۹ مورد در جواب محلی گیر افتاده است. حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در این مدل به ترتیب، ۱۹، ۳۰ و ۴۴ و حداقل، متوسط و حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف نیز به ترتیب ۱۹۰۰، ۳۰۰۰، ۴۴۰۰ می‌باشد، روند همگرایی مدل SPSO برای حالت حداقل و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در شکل (۳) نشان داده شده است.

در مدل HSPSO، عملگر جهش به مدل دسته ذرات ساده اضافه شده و مدل دسته ذرات ساده ترکیبی را به وجود آورده است. در این مدل، برای ۲۰ اجرای متوالی، مدل در ۱۵ مورد جواب بهینه را پیدا کرده که نشان دهنده عملکرد بهتر نسبت به مدل دسته ذرات ساده است. حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در این مدل به ترتیب ۱۵، ۲۹ و ۵۶ و حداقل، متوسط و حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف نیز به ترتیب ۱۵۰۰، ۲۹۰۰ و ۵۶۰۰ می‌باشد.

شهر اهر با جمعیتی بالغ بر ۱۰۰ هزار نفر در استان آذربایجان شرقی و در ۹۰ کیلومتری شهر تبریز واقع شده است. با ساده‌سازی شبکه توزیع آب اهر و حذف لوله‌های فرعی و غیرضروری، ساختار ساده شده شبکه توزیع آب اهر با ۱۹۲ لوله، ۱۶۹ گره و یک مخزن، پنج تانک و سه ایستگاه پمپاژ در شکل (۲) نشان داده شده است. اطلاعات این شبکه از شرکت آب و فاضلاب شهر اهر تهیه شده است. تقاضای گره‌های شبکه در شرایط مصرف نرمال بر اساس توزیع یکنواخت و مصرف واحد طول لوله‌های شبکه اعمال شده است (دینی، ۱۳۹۷).

در شکل (۲)، R_1 مخزن موجود در محل تصفیه‌خانه اهر است که تنها منبع تأمین آب شهر به حساب می‌آید. این مخزن بعد از ذخیره آب تصفیه‌شده، آن را در شبکه و سایر مخازن موجود در شهر توزیع می‌کند. T_1 تا T_5 به ترتیب مخازن ذخیره آب موجود در شهر است، Q_1 ، Q_2 و Q_3 موقعیت اندازه‌گیری دبی آب و S_1 تا S_{27} موقعیت نمونه‌برداری فشار گرهی در شبکه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- جانمایی شبکه توزیع آب اهر (دینی، ۱۳۹۷)

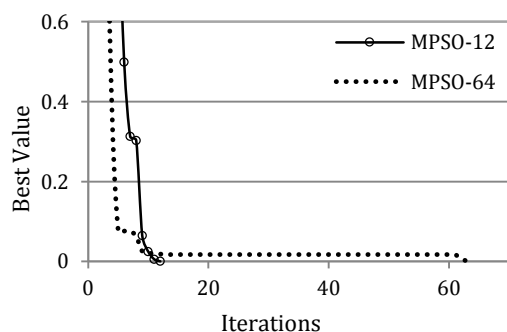
۳- بحث و نتایج

در بخش اول بحث و نتایج، ابتدا با استفاده از شبکه دوحلقه‌ای، مدل‌های صحت‌سنجی ساخته می‌شوند و سپس کارایی مدل‌ها در تنظیم ضرایب شبکه ارزیابی می‌شود. در این تحقیق ۵ مدل الگوریتم دسته ذرات و ۳ مدل الگوریتم جامعه مورچگان ساخته شده است. مشخصات مدل‌های الگوریتم دسته ذرات که با تحلیل حساسیت در شبکه دوحلقه‌ای به دست آمده، به صورت جدول (۲) می‌باشد. در جدول (۲)، Ns : تعداد ذرات، Nm : تعداد گروه‌های ذرات، Nmu : تعداد ذراتی که در آن‌ها عملگر جهش اعمال می‌شود و Rmu : نرخ تغییرات جهشی در هر ذره می‌باشد.

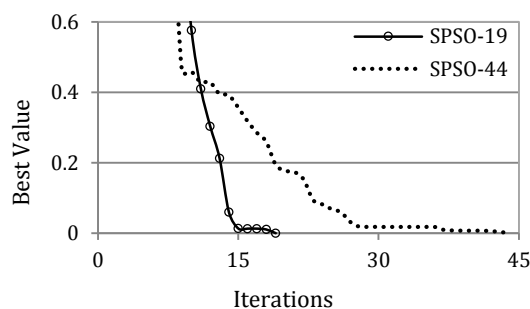
جدول ۳- خلاصه نتایج مدل‌های بهینه‌سازی دسته ذرات

HMPSO2	HMPSO1	MPSO	HSPSO	SPSO	شاخص‌ها
۱۶۷۹۶۱/۶	۱۶۷۹۶۱/۶	۱۶۷۹۶۱/۶	۱۶۷۹۶۱/۶	۱۶۷۹۶۱/۶	فضای جستجوی مسئله * ۱۰ ^۶
۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	تعداد اجرای متوالی مدل
۲۰	۱۹	۱۸	۱۵	۱۱	تعداد رسیدن به جواب بهینه
۲۷	۴۸	۲۴	۲۹	۳۰	متوسط گام رسیدن به جواب بهینه
۹۶	۱۳۴	۶۴	۵۶	۴۴	حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه
۹	۱۲	۱۲	۱۵	۱۹	حداقل گام رسیدن به جواب بهینه
۸۱۰۰	۱۴۴۰۰	۷۲۰۰	۲۹۰۰	۳۰۰۰	متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف
۲۸۸۰۰	۴۰۲۰۰	۱۹۲۰۰	۵۶۰۰	۴۴۰۰	حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف
۲۷۰۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۱۵۰۰	۱۹۰۰	حداقل تعداد ارزیابی تابع هدف
۲۴	۴۷	۲۱	۲۰	۲۰	متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه (ثانیه)
۸۹	۱۳۱	۵۷	۴۰	۳۰	حداکثر زمان رسیدن به جواب بهینه (ثانیه)
۸	۱۲	۱۱	۱۱	۱۳	حداقل زمان رسیدن به جواب بهینه (ثانیه)

در مدل MPSO بجای یک گروه ذرات ۶ گروه ذرات وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که مدل در ۱۸ اجرا از ۲۰ اجرای متوالی، جواب بهینه را پیدا کرده است. همچنین حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب واقعی در این مدل به ترتیب برابر ۱۲، ۲۴ و ۶۴ و حداقل و متوسط و حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف برای رسیدن به جواب بهینه به ترتیب برابر ۱۹۲۰۰، ۷۲۰۰، ۳۶۰۰ است. با توجه به این که در این مدل در هر گام اجرای مدل، تابع هدف مدل ۳۰۰ بار و در مدل دسته ذرات ساده ۱۰۰ بار ارزیابی می‌شود، مدل در تعداد ارزیابی توابع هدف بیشتری نسبت به مدل دسته ذرات ساده، جواب بهینه واقعی را پیدا می‌کند. در مجموع مدل دسته ذرات چندگروهی به دلیل وجود چندین گروه ذره، در مقابل حبس شدن در جواب بهینه محلی مقاومت بیشتری دارد. در شکل (۵) روند همگرایی مدل MPSO به جواب بهینه واقعی نشان داده شده است. مطابق شکل (۵)، هر دو نمودار MPSO-12 و MPSO-64 خیلی سریع‌تر نسبت به مدل‌های قبلی به مقادیر کمینه تابع هدف همگرا می‌شوند.

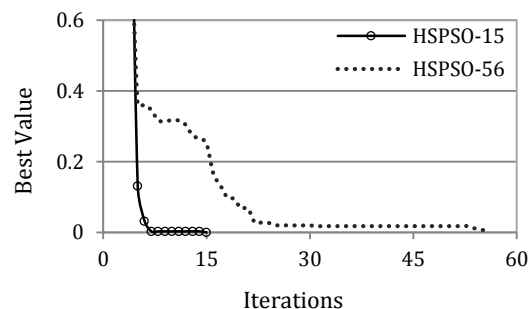


شکل ۵- روند همگرایی مدل MPSO به جواب بهینه

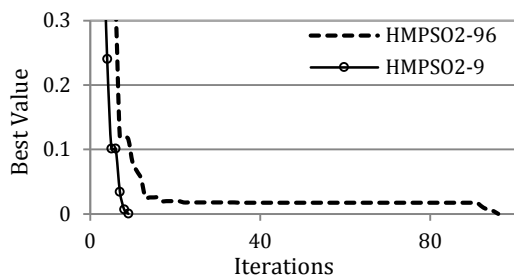


شکل ۳- روند همگرایی مدل SPSO به جواب بهینه

نقش عملگر جهش در مدل HSPSO در تعداد دفعات رسیدن به جواب بهینه کاملاً مشهود می‌باشد، به طوری که کمک می‌کند تا مدل در تعداد دفعات کم‌تری در بهینه محلی گیر کند. روند همگرایی مدل HSPSO برای حالت حداقل و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه در شکل (۴) نشان داده شده است. بر اساس نمودار HSPSO-56، مدل در گام‌های ۳۰ تا ۵۳ در اطراف یک مقدار بهینه محلی محبوس شده است که وجود عملگر جهش کمک می‌کند تا از این موقعیت محلی رها شده و به مقدار بهینه دست یابد.



شکل ۴- روند همگرایی مدل HSPSO به جواب بهینه



شکل ۷- روند همگرایی مدل HMP SO2 به جواب بهینه

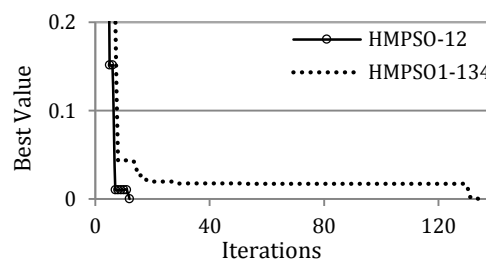
مطابق شکل (۷)، در نمودار HMP SO2-9، مدل در کمترین گام نسبت به سایر مدل‌ها جواب بهینه را پیدا کرده است و در نمودار HMP SO2-96 در گام ۹۶ جواب بهینه را پیدا کرده است. مقایسه مدل‌های دسته ذرات با یکدیگر نشان می‌دهد که با توجه به فضای جستجوی مسئله ($10^{14} \times 1/68$)، تمامی مدل‌ها در تعداد ارزیابی بسیار کمی نسبت به کل فضای جستجو و مدت زمان بسیار کم توانسته‌اند، جواب بهینه واقعی را پیدا کنند. همچنین در مجموع مدل‌های چندگروهی نسبت به مدل‌های ساده، مدل‌های دارای عملگر جهش نسبت به مدل‌های بدون عملگر جهش و مدل‌های با عملگر محدود جهش برای همه ذرات نسبت به مدل‌های با عملگر کلی جهش برای بخشی از ذرات از عملکرد بهتری برخوردار هستند. در مجموع مدل HMP SO2 تمامی ویژگی‌های خوب مطرح شده برای الگوریتم دسته ذرات را به همراه دارد و نتایج نیز نشان می‌دهد که این مدل در رسیدن به جواب بهینه بسیار پایدار عمل می‌کند، لذا مدل HMP SO2 می‌تواند به عنوان یک مدل مناسب برای تنظیم ضرایب شبکه مطرح شود. پارامترهای الگوریتم جامعه مورچگان با تحلیل حساسیت مدل بر روی شبکه دوحلقه‌ای به دست آمد و در جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول Nant: جمعیت مورچه‌ها در هر گام حل مسئله می‌باشد (Dini و Tabesh، ۲۰۱۷).

جدول ۴- پارامترهای مدل بهینه‌سازی جامعه مورچگان

پارامتر	U_0	β	T_0	α	ρ	$\Delta T_{i,j}$	Nant
مقدار	۱	۱	۴۰	۱	۰/۹۸	۱	۱۰۰

مدل‌های الگوریتم جامعه مورچگان، از نوع الگوریتم سامانه مورچه‌ها (Dorigo و همکاران، ۱۹۹۶) می‌باشد، در مدل اول، بازه تغییرات متغیر تصمیم برابر ۱ و در مدل دوم و سوم به ترتیب برابر ۲ و ۵ انتخاب شده است. در جدول (۵) خلاصه نتایج مدل‌ها آورده شده است. همان‌طوری که از نتایج جدول (۶) معلوم است، مدل ACO1 برای ۲۰ اجرای متوالی، تنها در یک مورد جواب بهینه را پیدا کرده است که در آن تعداد گام رسیدن به جواب بهینه ۴۱۵ گام، تعداد ارزیابی توابع هدف ۴۱۵۰۰ و مدت زمان رسیدن به جواب بهینه ۳۶۳ ثانیه می‌باشد. مدل ACO2 برای ۲۰ اجرای

اولین دلیل این مسئله، چندگروهی بودن مدل است که مدل بهترین مقدار همه گروه‌ها را به عنوان مقدار بهینه در نظر می‌گیرد و دومین دلیل این مسئله، این است که مدل با تعداد ذرات بیشتری نسبت به مدل‌های قبلی، جستجو در هر گام را انجام می‌دهد. در نمودار HMP SO2-64، مدل از گام‌های ۱۳ تا ۶۱ در اطراف یک بهینه محلی محبوس است و به دلیل تنوع گروه‌ها و ارتباط بین آن‌ها توانسته است از منطقه کمینه محلی بیرون بیاید و به بهینه واقعی دست یابد. در مدل HMP SO1 علاوه بر این که مدل چند گروهی است، عملگر جهش نیز به مدل اضافه شده است. به طوری که در هر گام، به طور متوسط ۲۰ درصد جمعیت و در هر تغییر نیز به طور متوسط ۲۰ درصد ژن‌ها تحت تأثیر جهش قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که مدل HMP SO1 در ۱۹ مورد از ۲۰ اجرای متوالی، جواب واقعی را پیدا کرده و تنها در یک مورد در جواب محلی حبس شده است. حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب در این مدل ۱۲، ۴۸، ۱۳۴ و حداقل، متوسط و حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف برای رسیدن به جواب بهینه نیز ۳۶۰۰، ۱۴۴۰۰ و ۴۰۲۰۰ می‌باشد که نشان می‌دهد به طور متوسط نسبت به مدل‌های دیگر در تعداد گام‌های بیشتر و تعداد ارزیابی توابع هدف بیشتری جواب بهینه واقعی را پیدا کرده است. در شکل (۶) روند همگرایی مدل HMP SO1 به جواب بهینه واقعی نشان داده شده است. مطابق شکل، نمودار HMP SO1-134 در گام ۱۳۴ و در بین مدل‌های الگوریتم دسته ذرات در بیشترین گام به جواب بهینه دست یافته است. در این نمودار، با این که مدل در بازه طولانی از گام ۲۹ تا ۱۲۹ در اطراف یک بهینه محلی محبوس شده است ولی به دلیل عملکرد چندگروهی ذرات و عملگر جهش توانسته است از آن بیرون بیاید و به مقدار بهینه دست پیدا کند. در مدل HMP SO2 عملگر جهش در هر گام اجرای مدل به طور متوسط به حدود ۲ درصد ژن‌های ذرات اعمال می‌شود. این مدل، در تمامی ۲۰ اجرای متوالی، جواب واقعی را پیدا کرده است و در آن حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب به ترتیب ۹، ۲۷ و ۹۶ و حداقل، متوسط و حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف برای رسیدن به جواب بهینه به ترتیب برابر ۲۷۰۰، ۸۱۰۰ و ۲۸۸۰۰ است. روند همگرایی مدل HMP SO2 به جواب بهینه واقعی در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۶- روند همگرایی مدل HMP SO1 به جواب بهینه

به طوری که الگوریتم جامعه مورچگان مقادیر مطلوب را در مسیرهای حرکت نگه می‌دارد به جای این که مشابه الگوریتم دسته ذرات در ذرات آن‌ها را جمع نماید و این باعث می‌شود تمامی مسیرها در کل فرایند حل همچنان حضور و شانس انتخاب داشته باشند که باعث کندی همگرایی الگوریتم می‌شود. مقایسه مدل‌های الگوریتم دسته ذرات با مدل‌های الگوریتم جامعه مورچگان نشان می‌دهد که هر چند همه مدل‌های توانسته‌اند در ۲۰ اجرای متوالی جواب واقعی را پیدا کنند ولی مدل‌های دسته ذرات خیلی سریع‌تر و با تعداد ارزیابی توابع هدف کم‌تر نسبت به مدل‌های جامعه مورچگان، جواب واقعی را به دست آورده‌اند.

در بخش دوم بحث و نتایج، به بررسی تفصیلی کارایی مدل‌های HMPSo2 و ACO1 در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز مدل شبکه توزیع آب اهر پرداخته می‌شود. تنظیم ضرایب در زمان حداکثر مصرف از شبکه انجام شده است. علت انتخاب این زمان بر اساس سوابق مطالعات قبلی است که نشان می‌دهد استفاده از حداکثر مصرف برای تنظیم ضریب منجر به دقت بیشتری در نتایج تنظیم ضرایب مدل شبکه می‌شود (Tabesh و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین تحقیقات انجام شده بر روی شبکه فوق نشان می‌دهد که مقدار ضریب الگوی مصرف در زمان حداکثر مصرف از شبکه برابر ۱/۵۴ می‌باشد (Dini و Tabesh، ۲۰۱۴). در جدول (۶) فشار مشاهداتی در تعدادی از گره‌های شبکه توزیع آب اهر در زمان حداکثر مصرف نشان داده شده است. علامت ستاره به معنی عدم قرائت درست در گره‌ها است که در مرحله تنظیم ضرایب از بین داده‌ها حذف شده است. همچنین داده‌های S_3 ، S_{16} و S_{20} برای تست مدل و سایر داده‌ها برای آموزش مدل استفاده شده است. تنظیم ضرایب شبکه توزیع آب اهر با دسته‌بندی ضرایب انجام شده است. نحوه دسته‌بندی ضرایب در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۶- فشار مشاهداتی در برخی گره‌های شبکه آب اهر

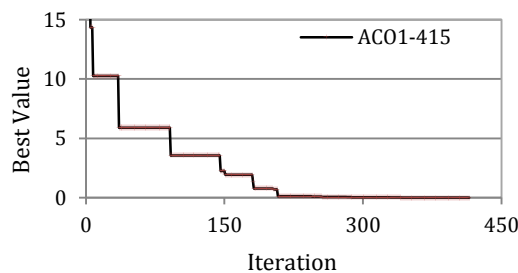
محل	فشار (m)	محل	فشار (m)
S_1	*	S_{15}	*
S_2	۴۴/۳	S_{16}	۳۰/۳
S_3	۴۲	S_{17}	۳۵/۳
S_4	۳۲/۵	S_{18}	*
S_5	۱۸/۱	S_{19}	*
S_6	۲۹/۳	S_{20}	۴۸/۱
S_7	۲۵/۹	S_{21}	۲۰/۸
S_8	۱۸/۸	S_{22}	۴۶/۱
S_9	۴۲/۶	S_{23}	۳۱/۹
S_{10}	۱۵/۴	S_{24}	۲۰/۹
S_{11}	*	S_{25}	۱۷/۴
S_{12}	۴۲/۲	S_{26}	*
S_{13}	۳۱/۳	S_{27}	۲۲/۳
S_{14}	۱۰/۳	-	-

متوالی، ۱۳ بار جواب بهینه را به دست آورده است که در آن حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه به ترتیب برابر ۲۸۷، ۳۴۸ و ۴۴۶، متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف ۳۴۸۰۰ و متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه ۲۵۹ می‌باشد. مدل ACO3 در تمامی ۲۰ اجرای متوالی جواب بهینه را پیدا کرده است. در این مدل، حداقل، متوسط و حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه به-ترتیب برابر ۱۴۸، ۱۹۳ و ۲۲۶، متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف برابر ۱۹۳۰۰ و متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه ۱۳۵ ثانیه است.

جدول ۵- خلاصه نتایج مدل‌های بهینه‌سازی جامعه مورچگان

شاخص‌ها	ACO1	ACO2	ACO3
فضای جستجوی مسئله * ۱۰ ^۹	۱۶۷۹۶۱/۶	۶۵۶/۱	۱۱/۰۲
تعداد اجرای متوالی مدل	۲۰	۲۰	۲۰
تعداد رسیدن به جواب بهینه	۱	۱۳	۲۰
متوسط گام رسیدن به جواب بهینه	۴۱۵	۳۴۵	۱۹۳
حداکثر گام رسیدن به جواب بهینه	-	۴۴۶	۲۲۶
حداقل گام رسیدن به جواب بهینه	-	۲۸۷	۱۴۸
متوسط تعداد ارزیابی تابع هدف	۴۱۵۰۰	۳۴۸۰۰	۱۹۳۰۰
حداکثر تعداد ارزیابی تابع هدف	-	۴۴۶۰۰	۲۲۶۰۰
حداقل تعداد ارزیابی تابع هدف	-	۲۸۷۰۰	۱۴۸۰۰
متوسط زمان رسیدن به جواب بهینه (ثانیه)	۳۶۳	۲۵۹	۱۳۵
حداکثر زمان رسیدن به جواب بهینه (ثانیه)	-	۳۳۲	۱۵۷
حداقل زمان رسیدن به جواب بهینه (ثانیه)	-	۲۱۴	۱۰۳

در مدل‌های فوق به ترتیب فضای جستجوی مسئله ۶۰۸، ۳۰۸ و ۱۲۸ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با کوچک‌تر شدن فضای جستجو، مدل در تعداد دفعات بیشتر و متوسط گام‌ها و زمان کم‌تر توانسته است جواب بهینه را به دست آورد. در بین مدل‌های فوق تنها مدل ACO1 از نظر حجم فضای جستجوی مسئله، مشابه الگوریتم‌های دسته ذرات معرفی شده می‌باشد در شکل (۸)، روند همگرایی مدل ACO1 به جواب بهینه نشان داده شده است. بر اساس شکل (۸)، در مدل ACO1 نمودار ACO1-415 خیلی کند و در گام ۴۱۵ به جواب بهینه واقعی همگرا شده است. این مسئله در سایر مدل‌های الگوریتم جامعه مورچگان نیز وجود دارد که ناشی از طبیعت الگوریتم می‌باشد.



شکل ۸- روند همگرایی مدل ACO1 به جواب بهینه

جدول ۷- نحوه دسته‌بندی لوله‌های شبکه توزیع آب اهر به تعداد دسته‌های محدود

دسته‌بندی اول		دسته‌بندی دوم		دسته‌بندی سوم				
ضریب لوله‌ها	ضریب	شماره لوله‌ها	ضریب	شماره لوله‌ها	ضریب			
C ₁	C ₁	(D ≤ 100mm)	C ₁	(D = 100mm)	C ₁			
		۸-۱۰-۵۴-۹۶-۹۷-۹۸-۹۹-۱۰۰-۱۰۴-۱۱۶-۱۱۸-۱۱۹-۱۲۳-۱۲۴-۱۲۵-۱۲۶-۱۲۷-۱۲۸-۱۲۹-۱۳۰-۱۳۱-۱۳۳-۱۳۴-۱۳۵-۱۳۶-۱۳۷-۱۳۸-۱۴۰-۱۴۱-۱۴۵-۱۴۹-۱۵۱-۱۵۲-۱۵۵-۱۵۸-۱۵۶-۱۷۷		۸-۱۰-۵۴-۹۶-۹۷-۹۸-۹۹-۱۰۰-۱۰۴-۱۱۶-۱۱۸-۱۱۹-۱۲۳-۱۲۴-۱۲۵-۱۲۶-۱۲۷-۱۲۸-۱۲۹-۱۳۰-۱۳۱-۱۳۳-۱۳۴-۱۳۵-۱۳۶-۱۳۷-۱۳۸-۱۴۰-۱۴۱-۱۴۵-۱۴۹-۱۵۱-۱۵۲-۱۵۵-۱۵۸-۱۵۶-۱۷۷-۴-۵-۶-۱۱-۱۴-۵۷-۵۸-۷۹-۸۰-۱۰۳-۱۱۱-۱۱۲-۱۱۵-۱۱۷-۱۴۷-۱۴۸-۱۵۰-۱۵۳-۱۵۴-۱۵۹-۱۶۸-۱۸۵-۱۸۶-۱۸۷-۱۹۱-۱۹۲				
		(D = 150mm)		(100mm < D ≤ 200mm)		(D = 200mm)	C ₃	
		۷-۹-۱۵-۲۱-۲۸-۲۹-۳۰-۴۵-۴۷-۴۸-۵۰-۵۳-۵۵-۵۶-۶۲-۶۴-۶۵-۶۶-۶۷-۶۸-۷۰-۷۱-۷۲-۷۷-۱۰۵-۱۱۳-۱۱۴-۱۳۹-۱۴۶-۱۶۲-۱۷۰-۱۹۰		۷-۹-۱۵-۲۱-۲۸-۲۹-۳۰-۴۵-۴۷-۴۸-۵۰-۵۳-۵۵-۵۶-۶۲-۶۴-۶۵-۶۶-۶۷-۶۸-۷۰-۷۱-۷۲-۷۷-۱۰۵-۱۱۳-۱۱۴-۱۳۹-۱۴۶-۱۶۲-۱۷۰-۱۹۰-۱۹۲-۲۴-۲۵-۳۶-۳۷-۶۹-۷۳-۷۴-۷۵-۸۱-۸۲-۸۳-۸۴-۹۱-۹۲-۹۵-۱۶۳-۱۶۴-۱۶۵-۱۶۶-۱۶۷-۱۸۸-۱۸۹		۱۹-۲۰-۲۴-۳۵-۳۶-۳۷-۶۹-۷۳-۷۴-۷۵-۸۱-۸۲-۸۳-۸۴-۹۱-۹۲-۹۵-۱۶۳-۱۶۴-۱۶۵-۱۶۶-۱۶۷-۱۸۸-۱۸۹		
		(D = 200mm)		(D < 200mm)		(D < 300mm)		C ₄
		۱۲-۳-۱۰-۱۲-۱۳-۱۶-۱۷-۱۸-۲۲-۲۳-۲۵-۲۶-۲۷-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۶-۴۹-۵۱-۵۲-۵۹-۶۰-۶۱-۶۳-۷۶-۷۸-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۴-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۲۰-۱۲۲-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۵۶-۱۵۷-۱۶۰-۱۶۱-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳		۱۰-۲-۳-۱۰-۱۲-۱۳-۱۶-۱۷-۱۸-۲۲-۲۳-۲۵-۲۶-۲۷-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۶-۴۹-۵۱-۵۲-۵۹-۶۰-۶۱-۶۳-۷۶-۷۸-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۴-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۲۰-۱۲۲-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۵۶-۱۵۷-۱۶۰-۱۶۱-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳-۱۰۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴		۱۰۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴		
(D = 300mm)	(D < 200mm)	(D < 300mm)	C ₅					
۱-۲-۳-۱۰-۱۲-۱۳-۱۶-۱۷-۱۸-۲۲-۲۳-۲۵-۲۶-۲۷-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۶-۴۹-۵۱-۵۲-۵۹-۶۰-۶۱-۶۳-۷۶-۷۸-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۴-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۲۰-۱۲۲-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۵۶-۱۵۷-۱۶۰-۱۶۱-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳	۱۰-۲-۳-۱۰-۱۲-۱۳-۱۶-۱۷-۱۸-۲۲-۲۳-۲۵-۲۶-۲۷-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴-۳۸-۳۹-۴۰-۴۱-۴۲-۴۳-۴۴-۴۶-۴۹-۵۱-۵۲-۵۹-۶۰-۶۱-۶۳-۷۶-۷۸-۸۵-۸۶-۸۷-۸۸-۸۹-۹۰-۹۴-۱۰۷-۱۰۸-۱۰۹-۱۱۰-۱۲۰-۱۲۲-۱۴۲-۱۴۳-۱۴۴-۱۵۶-۱۵۷-۱۶۰-۱۶۱-۱۷۶-۱۷۷-۱۷۸-۱۷۹-۱۸۰-۱۸۱-۱۸۲-۱۸۳-۱۰۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴	۱۰۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴						
(D < 300mm)	(D < 200mm)	(D < 300mm)		C ₆				
۱۰۲-۱۰۶-۱۲۱-۱۷۲-۱۷۳-۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴	۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴	۱۷۴-۱۷۵-۱۸۴						

نوع لوله‌های شبکه

جدول ۸- ضرایب هیزن و ویلیامز لوله‌های شبکه توزیع آب

ضرایب	دسته اول	دسته دوم	دسته سوم		
			۱	۲	۳
C ₁	۱۰۳	۱۰۴	۱۰۴	۱۰۳	۱۰۴
C ₂	۹۷	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱	۱۰۱
C ₃	۱۰۵	۸۶	۸۵	۸۷	۸۷
C ₄	۹۴	۹۴	۹۵	۹۴	۹۴
C ₅	۱۰۷	۱۰۷	۱۰۷	۱۰۷	۱۰۷
C ₆	۱۵۰	۱۵۰	۱۴۹	۱۴۹	۱۴۹
Ec	۱۹/۱۱	۱۶/۶۹	۱۴/۵۷	۱۴/۶۲	۱۴/۶۰
Et	۶/۲۵	۵/۴۵	۵/۲۲	۴/۶۰	۵/۴۴

در دسته‌بندی اول همه لوله‌ها به یک دسته و در دسته‌بندی دوم و سوم لوله‌ها بر اساس قطرشان به ۳ دسته و ۶ دسته تقسیم شدند بدین‌وسیله ضرایب تنظیمی از ۱۹۲ ضریب به‌ترتیب به یک ضریب (C₁)، ۳ ضریب (C₁ تا C₃) و ۶ ضریب (C₁ تا C₆) کاهش یافته است. بررسی نتایج مدل‌های HMP SO2 و ACO1 در شبکه توزیع آب اهر نشان می‌دهد که در بیشتر موارد هر دو مدل ضرایب هیزن ویلیامز یکسانی را به‌دست آورده‌اند. در جدول (۸) ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها برای سه دسته‌بندی و خطای داده‌های ساخت مدل (Ec) و داده‌های تست (Et) آورده شده است.

به‌طور کلی از نظر داده‌های ساخت و تست مدل، بدترین حالت، مربوط به دسته‌بندی اول و بهترین حالت مربوط به دسته جواب اول و دوم دسته‌بندی سوم می‌باشد. در شکل (۹) مقادیر داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای داده‌های تست مقایسه شده است. بر اساس جدول و شکل (۹)، نتایج به‌دست آمده برای مدل شبکه توزیع آب اهر انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد و تنظیم ضرایب مناسبی توسط هر دو مدل بهینه‌ساز HMP SO2 و ACO1 انجام شده است.

به‌طوری‌که در دسته جواب دوم حداکثر خطای داده‌های مشاهداتی و محاسباتی در گره S20 اتفاق افتاد و برابر ۳/۹ درصد و متوسط خطای داده‌های مشاهداتی و محاسباتی نیز ۲/۶ درصد می‌باشد. برای بررسی کارایی دو مدل فوق در تنظیم ضرایب، هر یک از مدل‌ها برای ۵ تکرار متوالی اجرا شده و خلاصه نتایج مربوط به مدل‌های HMP SO2 و ACO1 برای دسته‌بندی دوم و سوم در جدول (۹) ارائه شده است.

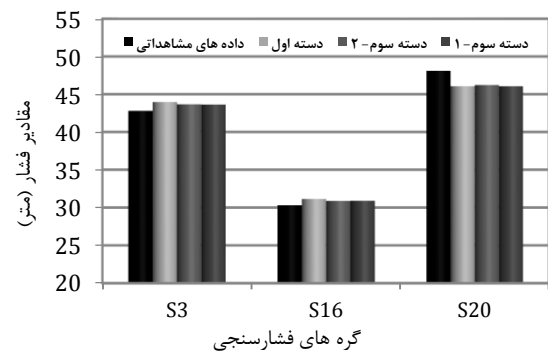
جدول ۱۰- خلاصه نتایج اجرای مدل‌ها برای پنج تکرار متوالی

تکرار	AC01			HMPSO2		
	دسته‌بندی دوم	دسته‌بندی سوم	تعداد گام	ارزیابی (S)	دسته‌بندی دوم	دسته‌بندی سوم
۱	۲۱۴	۲۱۴۰۰	۳۱۷/۹	۴۲۴	۶۲۲/۹	۴۲۴۰۰
۲	۱۵۱	۱۵۱۰۰	۲۲۳/۰	۴۷۹	۷۰۴/۷	۴۷۹۰۰
۳	۲۱۰	۲۱۰۰۰	۳۱۸/۴	۴۸۴	۷۱۲/۵	۴۸۴۰۰
۴	۲۰۲	۲۰۲۰۰	۳۰۲/۰	۳۹۶	۵۹۱/۳	۳۹۶۰۰
۵	۲۴۴	۲۴۴۰۰	۳۷۵/۵	۳۴۵	۵۱۳/۳	۳۴۵۰۰
متوسط	۲۰۴	۲۰۴۲۰	۳۰۷	۴۲۶	۶۲۹	۴۲۵۶۰

بهینه‌ساز با مدل EPANET به عنوان شبیه‌ساز شبکه در محیط متلب تلفیق شده‌اند. برای صحت‌سنجی و ارزیابی اولیه مدل‌ها، از شبکه دوحلقه‌ای و برای بررسی تفصیلی آن‌ها از شبکه توزیع آب اهر استفاده شده است.

مقایسه نتایج مدل‌های الگوریتم دسته‌ذرات و الگوریتم جامعه مورچگان در شبکه دوحلقه‌ای نشان می‌دهد که از نظر تعداد رسیدن به جواب بهینه مدل‌های چندگروهی بهتر از مدل‌های ساده و مدل‌های دارای عملگر جهش بهتر از مدل‌های بدون عملگر جهش عمل می‌کنند، به طوری که مدل HSPSO، MPSO و SPSO به ترتیب در ۹۰، ۷۵ و ۵۵ درصد اجراها جواب بهینه را پیدا کرده‌اند. در بین این مدل‌ها، مدل HMPSO2 که چندگروهی است و عملگر جهش نیز در آن حضور دارد در تمامی اجراها توانسته است جواب بهینه را پیدا کند و بهترین عملکرد را دارد. مدل‌های جامعه مورچگان در مقایسه با مدل‌های دسته ذرات معمولاً در مدت زمان نسبتاً بیشتر و با جستجو در بخش نسبتاً بزرگ‌تری از فضای جستجو جواب بهینه را به دست می‌آورند. همچنین از نظر رسیدن به جواب بهینه مدل‌های AC01 که دارای فضای جستجوی برابر مدل‌های دسته ذرات است، تنها در ۵ درصد اجراها جواب بهینه را پیدا کرده است.

مقایسه نتایج مدل‌های HMPSO2 و AC01 در شبکه توزیع آب اهر نشان می‌دهد که هر دو مدل تخمین مناسبی برای ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌ها انجام داده‌اند. به طوری که حداکثر خطای داده‌های تست ۴/۳ درصد و متوسط خطای داده‌های تست نیز ۲/۶ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل‌ها می‌باشد. مقایسه عملکرد مدل‌ها از نظر سرعت و تعداد ارزیابی توابع هدف برای رسیدن به جواب بهینه نشان می‌دهد که مدل HMPSO2 از نظر سرعت رسیدن به جواب بهینه به طور متوسط ۹ برابر سریع‌تر و از نظر تعداد ارزیابی توابع هدف برای رسیدن به جواب بهینه ۵ برابر کم‌تر نسبت به مدل AC01 به جواب بهینه دست یافته است. در مجموع مدل‌های بهینه‌سازی دسته ذرات در تنظیم ضرایب شبکه‌های توزیع آب بر مدل‌های جامعه مورچگان ارجحیت دارند.



شکل ۹- مقادیر فشار مشاهده‌شده و محاسباتی داده‌های تست

در شبکه توزیع آب اهر، برای دسته‌بندی دوم، مدل AC01 به طور متوسط در ۲۰۴ گام اجرا با ۲۰۴۲۰ بار ارزیابی تابع هدف و در مدت زمان ۳۰۷ ثانیه و مدل HMPSO2 در ۷ گام اجرا با ۲۱۶۰ بار ارزیابی تابع هدف و در مدت زمان ۱۸ ثانیه جواب واقعی را پیدا کرده است، به طوری که مدل HMPSO2 از نظر تعداد ارزیابی تابع هدف با ۹ برابر تعداد ارزیابی کم‌تر و از نظر زمان اجرای مدل ۱۷ برابر سریع‌تر نسبت به مدل AC01 توانسته، جواب واقعی را پیدا کند. برای دسته‌بندی سوم مدل AC01 به طور متوسط در ۴۲۶ گام اجرا با ۴۲۵۶۰ بار ارزیابی تابع هدف و در مدت زمان ۶۲۹ ثانیه و مدل HMPSO2 در ۳۶ گام اجرا با ۱۰۸۰۰ بار ارزیابی تابع هدف و در مدت زمان ۸۴ ثانیه جواب واقعی را پیدا کرده است، به طوری که مدل HMPSO2 از نظر تعداد ارزیابی تابع هدف با ۴ برابر تعداد ارزیابی کم‌تر و از نظر زمان اجرای مدل ۷ برابر سریع‌تر نسبت به مدل AC01 توانسته، جواب واقعی را پیدا کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله کارایی الگوریتم دسته ذرات در تنظیم ضرایب هیزن ویلیامز لوله‌های شبکه در مقایسه با الگوریتم جامعه مورچگان بررسی شده است. در مجموع پنج مدل الگوریتم دسته ذرات و سه مدل الگوریتم جامعه مورچگان ساخته شده است. برای ساخت مدل‌ها، الگوریتم دسته ذرات و جامعه مورچگان به عنوان

۵- مراجع

- IEEE Transactions on Systems, Part B: Cybern, 1996, 26 (1), 29-41.
- Dorigo M, Gambardella LM, "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1 (1), 53-66.
- Greco M, Del-Giudice, G, "New approach to water distribution network calibration", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125 (8), 849-854.
- Kennedy J, Eberhart RC, "Particle swarm optimization", IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 27 November-1 December, 1995.
- Kumar SM, Narasimhan S, Bhallamudi SM, "Parameter Estimation in Water Distribution Networks", Journal of Water Resources Management, 2010, 24, 1251-1272.
- Maier HR, Simpson AR, Zecchin AC, Foong WK, Phang KY, Seah HY, Tan CL, "Ant Colony optimization for the design of water distribution systems", Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress ASCE, Orlando, Florida, May 20-24, 2001.
- Maier HR, Simpson AR, Zecchin AC, Foong WK, Phang KY, Seah HY, Tan CL, "Ant colony optimization for design of water distribution systems", Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129 (3), 200-209.
- Maskit M, Ostfeld A, "Leakage Calibration of Water Distribution Network", Procedia Engineering 89, 2014, 89, 664-671.
- Montalvo I, Izquierdo J, Pérez R, Iglesias PL, "A diversity-enriched variant of discrete PSO applied to the design of water distribution networks", Engineering Optimization, 2008, 40 (7), 655-668.
- Niu ZG, Wang YF, Zhang T, Zhang HW, "Calibration of friction resistance coefficient and calculation method of leakage localization of water supply network", Journal of Tianjin University Science and Technology, 2011, 44 (4), 364-368.
- Ormsbee LE, Wood DJ, "Explicit pipe network calibration", Journal of Water Resources planning and Management, ASCE, 1986, 112 (2), 166-182.
- Rossman LA, "EPANET2: user's manual", U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, Ohio, 2000.
- Shamir U, Howard CDD, "Water distribution system analysis", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 1968, 94 (1), 219-234.
- Stutzle T, Hoos HH, "Improvements on the ant system: Introducing MAX-MIN ant system", Proceedings of the International Conference on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, Norwich, U.K, 10-12 July, 1997.
- Tabesh M, Jamasb M, Moeini R, "Calibration of water distribution hydraulic models considering different decision variables and consumption scenarios", Journal of Hydraulics, Iranian Hydraulic Association (in Persian), 2010, 4 (3), 69-78.
- Yu Zh, Tian Y, Zheng Y, Zhao X, "Calibration of pipe roughness coefficient based on manning formula and genetic algorithm", Tianjin University and Springer-Verlag, 2009, 15, 452-456.
- دینی م، تابش م، "مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری با در نظر گرفتن تاثیر جنس، قطر و سن لوله‌ها در تنظیم ضرایب هیزن‌ویلیامز شبکه"، نهمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۲۱ و ۲۲ اردیبهشت، ۱۳۹۵.
- دینی م، "ارزیابی عملکرد شبکه توزیع آب اهر بعد از بلندمرتبه سازی‌های مضاعف"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۷، ۴۸ (۱)، ۸۹-۱۰۰.
- فغفور مغربی م، حسن‌زاده ی، یزدانی س، "کالیبراسیون شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از روش بهینه‌یابی کلونی مورچه‌ها"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۹۲، ۲۴ (۱)، ۱۰۱-۱۱۱.
- محمدی‌اقدم ک، میرزایی ا، پورمحمد ن، پورمحمد آقابابا م، "الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات دینامیکی جهشی برای طراحی شبکه‌های توزیع آب"، مجله آب و فاضلاب، ۱۳۹۴، ۲۶ (۴)، ۸۸-۹۹.
- عطاری م، فغفور مغربی م، منوریان ع. ر، "کاربرد روش اندازه‌گیری گرهی فشار در شناسایی نشت"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۴۷ (۲)، ۵۳-۶۲.
- Alperovits E, Shamir U, "Design of optimal water distribution systems", Water Resources Research, 1977, 13 (6), 885-900.
- Bullnheimer B, Hartl RF, Strauss C, "A new rank-based version of the ant colony system: A computational study", Central European Journal for Operations Research and Economics, 1999, 7 (1), 25-38.
- Borzi A, Gerbino E, Bovis S, Corradini M, "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, 5-7 September, 2005.
- Cordon O, Fernandez DVI, Herrera F, Moreno L, "A new ACO model integrating evolutionary computation concepts: the best-worst ant system", Proceedings of ANTS from Ant Colonies to Artificial Ants, Second International Workshop on Ant Algorithms, Brussels, Belgium, 5-8 September, 2000.
- Dini M, Tabesh M, "A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems", Journal of Water Resources Management, 2014, 28, 2021-2034.
- Dini M, Tabesh M, "Water distribution network quality model calibration; a case study: Ahar", Water Supply, 2017, 16 (5), 1-13.
- Dorigo M, "Optimization, learning and natural algorithms", PhD Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 1992.
- Dorigo M, Maniezzo V, Colnari A, "The ant system: Optimisation by a colony of cooperating agents",

- Zhang TQ, Huang YD, Wu XG, "Optimal locations of water quality monitoring stations in water distribution systems", Journal of Zhejiang University, 2007, 41 (1), 1-5.
- Zhang Q, Wang XH, "Region water supply system optimization based on Binary and continuous Ant colony algorithms", International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, IEEE, IEEE Computer Society, Hunan, China 20-22 Oct, 2008.
- Walski TM, "Technique for calibrating network models", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 1983, 109 (4), 360-372.
- Wang HX, Guo W, Xu J, Gu H, "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, 11-12 May, 2010.

EXTENDED ABSTRACT

Performance Analysis of PSO Algorithm for Setting the Hazen Williams Coefficients of Water Distribution Network Models

Mehdi Dini *

Civil Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Received: 29 July 2017; Accepted: 18 July 2019

Keywords:

Ahar water distribution network, PSO algorithm, Hazen williams coefficients, ACO algorithm.

1. Introduction

Gradually, with the urban population growth and development of cities, water distribution networks (WDNs) gain significant importance. So the need for computerized modeling of WDNs is felt more than ever to understand the behavior of these systems. The most important problem with modeling of WDNs is consistency between the calculated and measured data. Setting the coefficients of the model via measured data is necessary. Model parameters include Hazen-Williams coefficients in the pipes, base demand and demand pattern coefficients at the nodes. The calculated and measured data mainly include pressure head at nodes, tank levels, and flow in pipes, that can be considered either in steady state or in an extended period condition. The aim of this paper is to investigate the performance of PSO algorithm for setting the Hazen Williams coefficients of WDN Models. For this purpose, five models of the PSO algorithm and three models of the ACO algorithm were made. The proposed method tested on a two-loop test example and a real water distribution network.

2. Methodology

In this paper, the particle swarm optimization algorithm and ant colony optimization algorithm are used to adjust the model parameters by minimizing the Errors between the model-predicted and the field-observed data that are coupled with EPANET. In the PSO algorithms, the position and velocity of each particle ($X_i(t)$ and $V_i(t)$) are initialized by random vectors. The new position and velocity of the particles ($X_i(t+1)$ and $V_i(t+1)$) in the simple PSO algorithm are updated by these equations (Kennedy and Eberhart, 1995):

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

$$V_i(t+1) = C_1 * \text{Rand}_1 * (P_{i.\text{best}} - X_i(t)) + C_2 * \text{Rand}_2 * (P_{g.\text{best}} - X_i(t)) + W * V_i(t) \quad (2)$$

Where C_1 and C_2 are called the acceleration coefficients, Rand_1 and Rand_2 are two uniformly distributed random numbers, $P_{i.\text{best}}$ denotes the personal historically best particle for the i th particle, $P_{g.\text{best}}$ denotes the best position that the whole swarm has found. In the hybrid SPSO (HSPSO) model, the genetic algorithm mutation operator is added to the SPSO model. In the meta PSO model, the model has several particle swarm instead of one particle swarm. The new velocities of the particles in this model are updated by this equation (Wang et al, 2010):

$$V_{ij}(t+1) = C_1 * \text{Rand}_1 * (P_{ij.\text{best}} - X_{ij}(t)) + C_2 * \text{Rand}_2 * (P_{g.\text{best}} - X_{ij}(t)) + C_3 * \text{Rand}_3 * (S_{gij.\text{best}} - X_{ij}(t)) + W_{ij} * V_{ij}(t) \quad (3)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.dini@azaruniv.ac.ir (Mehdi Dini).

Where S_{gj_best} denotes the best position that the j th swarm has found. In the hybrid MPSO (HMPSO) model, the genetic algorithm mutation operator is added to the MPSO model. In the HMPSO1 model, the mutation operator is added to some particles, but in the HMPSO2 model the mutation operator is added to all particles.

The probability function of the ACO algorithms (Zecchin et al., 2006) is as following equation:

$$P_{ij}(k, t) = \frac{[T_{ij}(t)]^\alpha [U_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^J [T_{ij}(t)]^\alpha [U_{ij}(t)]^\beta} \tag{4}$$

Where $P_{ij}(k, t)$: is the probability of the k th ant situated at node j at stage t , to choose an edge i , $T_{ij}(t)$: is the pheromone intensity present on the edge i at node j and stag t , $U_{ij}(t)$: is the desirability factor present on the edge i at node j and stage t , and α, β are the parameters controlling the relative importance of pheromone intensity and desirability for each ant's decision. The pheromone intensity function is as following equation:

$$T_{i,j}(t + 1) = \rho T_{i,j}(t) + \Delta T_{i,j}(t) \tag{5}$$

Where ρ : is the pheromone evaporation rate (note: $0 < \rho < 1$); $\Delta T_{i,j}(t)$: is the pheromone addition on edge i at node j and stage t . The objective function is written as following equation: (Ormsbee, 1989).

$$F = \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T (PO_{tj} - PS_{tj})^2 \tag{6}$$

where N : is the number of observation locations; T : is the number of times that field data has been collected; PO_{tj} : is the observed pressure head; and PS_{tj} : is the calculated pressure head at node j during time t ;

In this paper, for verifying and analyzing the performance of the models, a two-loop test example network (Alperovits and Shamir 1977) and a real water distribution network (Dini and Tabesh 2014) were used.

3. Results and discussion

In this paper, to investigate the performance of PSO algorithm for setting the Hazen Williams coefficients of water distribution network models five PSO models and also there ACO models were made. The characteristics of these models are shown in table 1. To set the Hazen Williams coefficients, a combination of EPANET simulator with PSO and ACO algorithms has been used by programming in MATLAB software. All models were investigated in a two-loop test example network. All models were executed three times and each time 20 repetitions. The best results for 20 repetitions are presented in Table 2.

Table 1. The characteristics of five PSO models and there ACO models

parameter	SPSO	HSPSO	MPSO	HMPSO1	HMPSO2	parameter	ACO1	ACO2	ACO3
$Ss * 10^9$	167961.6	167961.6	167961.6	167961.6	167961.6	$Ss * 10^9$	167961.6	656.1	11.02
N_s	100	100	50	50	50	N_{ant}	100	100	100
N_m	1	1	6	6	6	T_0	40	40	40
C_1	2	2	2	2	2	U_0	1	1	1
C_2	2	2	2	2	2	α	1	1	1
C_3	0	0	2	2	2	β	1	1	1
W	0.8	0.8	0.6-0.8	0.6-0.8	0.6-0.8	ρ	0.98	0.98	0.98
N_{mu}	0	1	0	0.2	1	$\Delta T_{i,j}$	1	1	1
R_{mu}	0	0.02	0	0.2	0.02				

Table 2. The characteristics of five PSO models and there ACO models

Indices	SPSO	HSPSO	MPSO	HMPSO1	HMPSO2	ACO1	ACO2	ACO3
Number of consecutive runs	20	20	20	20	20	20	20	20
The number of achievement to optimal answer	11	15	18	19	20	1	13	20
Average step to achieve optimum answer	30	29	24	48	27	415	348	193
Maximum step to achieve optimum answer	44	56	64	134	96	-	446	226
Minimum step to achieve optimum answer	19	15	12	12	9	-	287	148
Average evaluation number of the objective function	3000	2900	7200	14400	8100	41500	34800	19300
Maximum evaluation number of the objective function	4400	5600	19200	40200	28800	-	44600	22600
Minimum evaluation number of the objective function	1900	1500	3600	3600	2700	-	28700	14800
Average Time to Achieve Optimum Answer (s)	20	20	21	47	24	363	259	135
Maximum Time to Achieve Optimum Answer (s)	30	40	57	131	87	-	332	157
Minimum Time to Achieve Optimum Answer (s)	13	11	11	12	8	-	214	103

Comparison of the results for five PSO models showed that the performance of the models with mutation operator or with a multi particle swarm is better than the simple models. For example, the HSPSO and MPSO models find the optimal answer respectively in 15 and 18 runs of 20 consecutive runs, while the SPSO model

finds the optimal answer in 11 runs of 20 consecutive runs. All PSO based models have found the optimal answer with a low evaluation of the objective function and in a short time. Among these models, model HMPSO2 has had the best performance, because in all 20 consecutive runs, it has found the optimal answer.

Comparison of the results for three ACO models showed that the performance of the ACO3 is better than ACO2 and ACO1, while the search space of ACO3 is very smaller than the ACO2 and ACO1. Among these models, only ACO1 has a search space similar to PSO models. Comparison of the results for ACO1 and HMPSO2 models showed that the performance of the HMPSO2 is very better than the ACO1. For example, the HMPSO2 finds the optimal answer in 20 runs of 20 consecutive runs, while the ACO1 finds the optimal answer in only one run of 20 consecutive runs.

In the second case study, the Ahar water distribution network was investigated. The Ahar water distribution network has been reduced in size by excluding dispensable pipes. The simplified network includes 192 pipes, 169 nodes, one reservoir, 5 tanks and 3 pumping stations. To simplify the problem, pipe roughness coefficients were classified into limited categories, based on the pipe diameter. HMPSO2 and ACO1 Models are used to setting the Hazen Williams coefficients of water distribution network models. Both models were able to find the optimal answer. Table 3 illustrates the results in three categories and some best optimal answers. The results of some best optimal answers for three categories showed that the minimum calibration data error belonged to the answer 1 of category C3 and the minimum testing data error belonged to the answer 2 of category C3. The value of testing data in answer 2 of category 3 showed that the maximum testing error is 3.9% and the average testing error is 2.6%, which indicate that the proper adjustment of coefficients has been done. To investigate the performance of HMPSO2 and ACO1 for setting the Hazen Williams coefficients of the real water distribution network, each model was executed five times and the results showed in table 4.

Table 3. The results of some best optimal answers for three categories

Coefficients	Category 1	Category 2	Category 3		
			Ans1	Ans2	Ans3
C1	103	104	104	103	104
C2		97	101	101	101
C3		105	86	85	87
C4			94	95	94
C5			107	107	107
C6			150	150	149
E_c	19.11	16.69	14.57	14.62	14.60
E_t	6.25	5.45	5.22	4.60	5.44

Table 4. The results of some best optimal answers for three categories

Run	HMPSO2						ACO1					
	Category 2			Category 3			Category 2			Category 3		
	SN	EN	Time(s)	SN	EN	Time(s)	SN	EN	Time(s)	SN	EN	Time(s)
1	5	1500	11.7	31	9300	72.6	424	42400	622.9	214	21400	317.9
2	6	1800	14.9	32	9600	74.8	479	47900	704.7	151	15100	223.0
3	8	2400	19.6	33	9900	76.7	484	48400	712.5	210	21000	318.4
4	7	2100	18.3	30	9000	69.2	396	39600	591.3	202	20200	302.0
5	10	3000	26.3	54	16200	124.8	345	34500	513.3	244	24400	375.5
Average	7	2160	18	36	10800	84	426	42560	629	204	20420	307

The results of the HMPSO2 and ACO1 for 5 consecutive runs showed that in average model HMPSO2 finds the best answer in less time and the number of evaluations of objective function compared with ACO1. Therefore, PSO algorithm has better performance than the ACO algorithm for setting the Hazen Williams coefficients of water distribution network models.

4. Conclusions

The aim of this paper is to study the performance of PSO algorithm for setting the Hazen Williams coefficients of WDN Models. For this purpose, five PSO algorithm models and three ACO algorithm models were made. The proposed method tested on a two-loop test example network and a real water distribution network. All models were investigated in a two-loop test example network. Comparison of the results for five PSO models showed that the performance of the models with mutation operator or with a multi particle swarm is better than the simple models. Also, all PSO based models have found the optimal answer with a low evaluation of the objective function and in a short time. Among these models, model HMPSO2 has had the best performance. Comparison of the results for three ACO models showed that the performance of the ACO3 is better than the ACO2 and ACO1. Among these models, only ACO1 has a search space similar to PSO models. Comparison of the results for ACO1 and HMPSO2 models showed that the performance of the HMPSO2 is very better than the ACO1. In the second case study, HMPSO2 and ACO1 Models are used to setting the Hazen Williams coefficients

of water distribution network models. Results showed that both models were able to find the optimal answer, so that the maximum and the average testing error for answer 2 of category 3 are respectively 3.9% and 2.6%. Also a comparison of the HMPSO2 and ACO1 results for 5 consecutive runs in Ahar water distribution network showed that in average, the HMPSO2 finds the best answer in less time and the number of evaluations of the objective function than the ACO1. Therefore, the PSO algorithm has better performance than the ACO algorithm.

5. References

- Alperovits E, Shamir U, "Design of optimal water distribution systems", *Water Resources Research*, 1977, 13 (6), 885-900.
- Dini M, Tabesh M, "A New Method for Simultaneous Calibration of Demand Pattern and Hazen-Williams Coefficients in Water Distribution Systems", *Journal of Water Resources Management*, 2014, 28, 2021-2034.
- Kennedy J, Eberhart RC, "Particle swarm optimization", *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia, 27 November-1 December, 1995.
- Zecchin AC, Simpson AR, Maier H, Leonard M, Roberts AJ, Berrisford MJ, "Application of two ant colony optimization algorithms to water distribution system optimization", *Journal of Mathematical and Computer Modeling*, 2006, 44, 451-468.
- Wang HX, Guo W, Xu J, Gu H, "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, 11-12 May, 2010.