Journal of Water & Wastewater Science & Engineering (jwwse)
Spring 2017, Vol. 2, No. 1.
Doi: 10.22112/jwwse.2017.87910.1006

علوم و مهندسی آب و فاضلاب

نشریه علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال دوم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶

Optimizing Energy Consumption in Pumping Stations Using Darwin Scheduler

Javad Karami[1*], AlirezaMoghadam[2], Alireza Farid-Hosseini[3], Hossein Sanaee-Nejad[3] and Ali Naghi Ziaei[4]

1- M.Sc. Student, Water Resources Engineering, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran.
2- Ph.D. Candidate, Water Resources Engineering, Urmiyeh University, Urmiyeh, Iran.
3, 4- Associate Professor and Assistant Prefessor, Department of Water Resources Engineering, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran.
*Corresponding Author, Email: jkkormanje@gmail.com

Received: 31/5/2017
Revised: 11/10/2017
Accepted: 11/10/2017

Abstract

Todays, in addition to the optimal hydraulic design of water distribution networks, the optimization of energy consumption in pumping station is more important for researchers. Due to the energy costs include the major part of operation cost at a water network, in this paper study the optimization of daily energy cost of pumping station with five parallel pumps, using by Darwing scheduler at WaterGEMS V8i software based on Simple Genetic Algorithm (SGA) and Fast Messy Genetic Algorithm (FMGA). The hydraulic constraints include the minimum and maximum pressure of junctions, maximum velocity of pipes and maximum number of economic off and on of pumps. The results showed that the energy costs reduced 15 and 10 percent using by SGA and FMGA, respectively, with regard to electricity tariffs.

Keywords: Darwin Scheduler, Genetic Algorithm, Optimization, Water Distribution Networks.

بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ با استفاده از ابزار Darwin Scheduler

جواد کرمی[۱*]، علیرضا مقدم[۲]، علیرضا فریدحسینی[۳]، حسین ثنایی‌نژاد[۳]، علی‌نقی ضیایی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه، ایران
۳ و ۴- دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
* نویسنده مسئول، ایمیل: jkkormanje@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۰
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۶/۷/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۷/۱۹

چکیده

امروزه در شبکه‌های توزیع آب شهری علاوه بر انجام طراحی بهینه هیدرولیکی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ در راس الزامات محققان قرار گرفته است. با توجه به این‌که هزینه‌های انرژی سهم بالایی از هزینه بهره‌برداری از شبکه را شامل می‌شود، در این پژوهش به کمک ابزار Darwin Scheduler در نرم‌افزار WaterGEMS V8i نسبت به بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن هزینه انرژی مصرفی روزانه یک ایستگاه پمپاژ شامل پنج عدد پمپ موازی در یک شبکه توزیع آب شهری، به کمک الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) و الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع (FMGA) اقدام شده است. قیود هیدرولیکی شامل حداقل و حداکثر فشار در هر گره، سرعت حداکثری در هر لوله و تعداد دفعات خاموش و روشن شدن اقتصادی پمپ‌ها می‌باشد که در نتیجه کاهش هزینه‌های انرژی با استفاده از الگوریتم‌های SGA و FMGA به‌ترتیب به میزان ۱۵ و ۱۰ درصد با اعمال تعرفه برق مصوب، نسبت به عملکرد پمپ‌ها بدون اعمال بهینه‌سازی حاصل شد.

کلمات کلیدی: شبکه‌های توزیع آب، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، Darwin Scheduler

۱- مقدمه

رشد روزافزون جمعیت و تجمع آن‌ها در نقاط شهری، استفاده از شبکه‌های گسترده و پیچیده آبرسانی را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل‌کرده است. هزینه‌های بسیار سنگین سیستم‌های توزیع آب (WDSs)[1]، سبب شده است تا افزایش بهره‌وری در تجهیزات و تاسیسات صنعت آب از جمله خواست‌گاه‌های ذی‌نفعان این صنعت به‌شمار آید. با توجه به سهم ۶۵ درصدی هزینه‌های انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ از کل هزینه‌های بهره‌برداری، پرداختن به بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ با اهمیت است.

رفتار عمومی سیال در سیستم‌های آبرسانی وابسته به زمان خواهد بود، بنابراین ارزیابی صحیح یک سیستم توزیع آب در گرو مطالعه رفتار سیال به کمک مدل‌های دینامیکی است. از طرفی می‌توان با بهینه‌سازی مدل مذکور اقدامات موثری را در کاهش هزینه‌ها انجام داد به‌گونه‌ای که قیدهای طراحی و نیاز مصرف‌کنندگان با حدود اطمینان خاصی تامین شود. در این راستا با توجه به نوع طراحی انتخاب شده، می‌توان توابع هدف متفاوتی تعریف کرد. مشخص است مجموعه معینی از فاکتورهای اساسی برای حل یک مسئله وجود ندارد بنابراین اکثر روش‌های بهینه‌سازی قابلیت تطبیق با توابع هدف گوناگون را دارا می‌باشند.

در طول نیم‌قرن اخیر، تحقیقات بسیاری بر روی بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی در منابع مختلف دیده می‌شود. به‌طور مثال در زمینه بهینه‌سازی شبکه آبرسانی برای قطرهای پیوسته محققینی چون Jacoby (1968) و Varma et al. (1997) تحقیق کرده‌اند و همین‌طور برای بهینه‌سازی قطرهای گسسته می‌توان به تحقیقات Quindry et al. (1979)، Kessler and Shamir (1989) و Bhave and Sonak (1992) اشاره‌کرد. با ارائه مدل الگوریتم ژنتیک برای مسائل بهینه‌سازی، Savic and Walters (1997) و Vairavamoorthy and Ali (2000, 2005) از الگوریتم ژنتیک در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌ها استفاده کردند. همچنین Keedwell et al. (2005) با ترکیب الگوریتم ژنتیک و اتوماسیون سلولی، سرعت و قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک را بهبود بخشیدند و Neelakantan and Suribabu (2005) و Kadu et al. (2008) اقدام به اصلاح در الگوریتم ژنتیک و استفاده از الگوریتم ژنتیک اصلاح شده برای بهینه‌سازی مسائل مربوط به آب کردند. با پیشرفت علم بهینه‌سازی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی معرفی گردید و Cunha and Sousa (1999) این الگوریتم را برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب به‌کار بردند. با گذشت زمان، الگوریتم‌های جدیدی، در رابطه با حل مسائل مربوط به آب استفاده شدند. از جمله می‌توان به بهینه‌سازی شبکه آبرسانی توسط Eusuff and Lansey (2003) با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه (SFL) و Keedwell and Khu (2006) با استفاده از الگوریتم اوتاماتای سلولی Suribabu and Neelakantan (2006) با استفاده از الگوریتم ازدحام جمعیت (PSO) اشاره کرد. استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان (ACO) برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب توسط Maier et al. (2003) و Zecchin et al. (2007) صورت گرفت. Coelho et al. (2012) در مقاله‌ای مبنی بر بهینه‌سازی ایستگاه پمپاژ، با مقایسه مدل هیدرولیکی EPANET و الگوریتم ژنتیک به این نتیجه رسیدند که ۳۴ درصد از انرژی سیستم طبق مدل الگوریتم ژنتیک قابل صرفه‌جویی است. Mackle et al. (1995) نیز در مقاله‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک، اقدام به بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ در جهت کاهش هزینه برق مصرفی نموده‌اند.

Hashemi et al. (2014) به منظور بهینه‌سازی برنامه ایستگاه‌های پمپاژ شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از پمپ‌های دور متغیر[2] (VSP) ترکیبی از الگوریتم بهترین تکرار کلونی مورچگان[3] (AS_{ib}) و EPANET 2.0 را به‌کار گرفتند. پمپ‌های دور متغیر موجب انعطاف‌پذیری برنامه پمپاژ ضمن بهینه‌سازی مصرف انرژی و تأمین نیاز مصرف‌کنندگان با توجه به تغییرات تقاضا در طول شبانه‌روز می‌شود. نتایج اعمال مدل فوق در شبکه‌ای شاخص حاکی از تقلیل هزینه‌های پمپاژ نسبت به به‌کارگیری پمپ‌های دور ثابت[4] (SSP) است. Mala-Jetmarova et al. (2014) مدلی طراحی کردند تا هم‌زمان با ارائه کم‌ترین انحراف از استاندارد کیفی، نتایج مناسبی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ حاصل شود. آنها از نرم‌افزاری که با نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب[5] (NSGA-II) لینک شده بود برای دو نوع شبکه متفاوت برای ایجاد تعادل بین کیفیت آب و هزینه‌های پمپاژ تحت ۱۴ سناریوی متفاوت استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که چگونه در هر دو شبکه تغییر در کیفیت آب منبع و یا کیفیت آب مورد نیاز شبکه، می‌تواند بر عملکرد و بهره‌برداری سیستم تاثیر بگذارد. Menke et al. (2015) با

بهره‌گیری از معادلات ریاضی و روش‌های غیرخطی نسبت به بهینه‌سازی مصرف انرژی ایستگاه پمپاژ یک شبکه توزیع آب شاخص اقدام کردند. آن‌ها با اعمال تعرفه‌های مشخص، ۱۰ تا ۲۰ درصد کاهش هزینه مصرف انرژی در این شبکه را به‌دست آوردند. آن‌ها همچنین نشان دادند روش‌های غیرخطی نسبت به روش‌های خطی، از نظر مقدار بسیار بهتر و از لحاظ دقت اندکی پایین‌تر هستند. Price and Ostfeld (2016) با علم به این که دست‌یابی به بهره‌برداری بهینه از ایستگاه پمپاژ با توجه به محدویت‌های هیدرولیکی و کیفی از جمله رابطه غیرخطی افت فشار دینامیکی با جریان آب و رابطه کاهش غلظت کلر با عمر آب یک مسئله بسیار پیچیده است، از الگوریتم بهینه‌سازی گراف کاربردی[۶] (OGO) برای کمینه نمودن هزینه‌های پمپاژ اقدام نمودند.

در این پژوهش، به کمک ابزار Darwin Scheduler در نرم افزار WaterGEMS V8i نسبت به بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن هزینه انرژی مصرفی روزانه یک ایستگاه پمپاژ شامل پنج عدد پمپ موازی در یک شبکه توزیع آب شهری، به کمک الگوریتم ژنتیک ساده (SGA)[۷] و الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع (FMGA)[۸] اقدام شده و نتایج آن با سناریوی بدون اعمال بهینه‌سازی (Base) مقایسه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

در بین روش‌های بهینه‌سازی فرابتکاری، مدل‌های مبتنی‌بر الگوریتم ژنتیک برای تحقق، به چهار عنصر اصلی زیر نیازمندند:

• جمعیت اولیه: یک مجموعه اولیه از اعضاء (کروموزوم‌ها) که معمولا به‌صورت رشته‌هایی از ژن‌ها (بیت‌ها) کد می‌شوند و جواب‌هایی از مسئله را ارائه می‌نمایند.

• تابع هدف: روشی برای اندازه‌گیری میزان برازندگی هر عضو (جواب) می‌باشد و به هر فرد برازندگی بر اساس تابع هدف صورت می‌گیرد.

• عمل‌گر انتخاب: اعضای مورد نظر برای والد شدن در نسل آینده را تعیین می‌کند. طبیعی است که اعضایی که برازندگی بالایی دارند، احتمال بیشتری برای تولیدمثل دارند. چند روش از انواع متداول عمل‌گر انتخاب عبارتند از: روش چرخ گردان[۹]، روش تورنمنت[۱۰]، روش انتخاب تصادفی[۱۱].

• عمل‌گرهای آمیزش[۱۲]: عمل‌گر اصلی الگوریتم ژنتیک برای تولید کروموزوم جدید، عمل‌گر آمیزش است. عمل‌گر آمیزش فرد جدیدی را تولید می‌کند که برخی ژن‌های هر دو والد را دارد. عمل‌گر آمیزش در حقیقت مشابه همانی است که در طبیعت روی می‌دهد، به این ترتیب که ژن‌های دو کروموزوم والد مبادله می‌شود تا دو کروموزوم جدید به نام کروموزوم‌های فرزند ایجاد شود. به‌دلیل تغییراتی که روی کروموزوم‌های والد بر اثر تبادل ژن‌ها صورت می‌گیرد، کروموزم‌های فرزند ویژگی‌های ژنتیکی مشترکی با دو والد خود دارد.

• عمل‌گر جهش[۱۳]: در تکامل طبیعی، جهش، فرایندی تصادفی است که یک ژن را با ژن دیگری برای تولید یک ساختار ژنتیکی جدید تعویض می‌کند. در واقع جهش سازوکاری است که بر اثر آن، تغییری سازمان نیافته و کاملاً تصادفی در رشته ایجاد می‌شود. وجود این عمل‌گر از این نظر مهم است که عمل‌گر آمیزش، با وجود آنکه کروموزوم‌های متفاوت با کروموزوم‌های والد را ایجاد می‌کند، اما کروموزوم‌های فرزند دارای ژن‌های مشترکی از هر دو والد است. در حالی که عمل‌گر جهش، مشخصه‌هایی را ایجاد می‌کند که در جمعیت والدین وجود ندارد.

الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) یکی از روش‌های فرا ابتکاری است که با مشخص کردن چند ترکیب (معمولاً تصادفی) با طول رشته‌های برابر به عنوان جمعیت اولیه، جواب بهینه را در فضای راه‌حل‌های ممکن جستجو می‌کند. در صورتی که یک الگوریتم ژنتیک آشفته (FMGA)، از ترکیب‌هایی با طول رشته‌های متغیر استفاده می‌کند، به طوری‌که طول رشته‌ها هم در طول هر نسل و هم از یک رشته به رشته دیگر متفاوت است. ایجاد این آشفتگی و بی‌نظمی در فضای حل مسئله، تاثیر مثبتی در تسریع بهینه‌سازی دارد.

در این پژوهش پس از انجام فرایند سعی‌وخطا، مقدار عددی پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل اندازه جمعیت برابر ۱۰۰، احتمال آمیزش ۹۵ درصد، احتمال جهش، ۱/۵ درصد، تعداد نقاط آمیزش، ۴ و حداکثر تکرار برابر ۱۰۰ هزار حاصل شد.

۲-۲- مدل ریاضی بهینه‌سازی ایستگاه پمپاژ

در این مقاله قبل از کاربرد الگوریتم‌ها نیاز به معرفی مدل برنامه‌ریزی ریاضی مسئله بهینه‌سازی پمپ‌ها است. عملکرد بهینه پمپ‌ها از یک رابطه غیرخطی تبعیت می‌کند، زیرا توابع هدف و قیود غیرخطی بوده و پارامترهای تصمیم نیز بسیار زیاد

می‌باشد. در این پژوهش ایستگاه پمپاژی متشکل از پنج عدد پمپ موازی برای توزیع آب در یک شبکه گسترده است و تابع هدف، به حداقل رساندن هزینه‌های مصرف انرژی در طول افق بهره‌برداری است (روابط ۱ و ۲).

$$Min(EC) = \rho g \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{C_E} \frac{\mathrm{Q_{j,i}H_{j,i}}}{\eta_{\mathrm{j,i}}(\mathrm{Q_{j,i}})} \Delta \mathrm{t_j} + \rho g \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} \mathrm{C_D} \frac{\mathrm{Q_{j,i}H_{j,i}}}{\eta_{\mathrm{j,i}}(\mathrm{Q_{j,i}})} \quad (۱)$$

$$\eta_{j,i}(Q_{j,i}) = a_{j,i}Q_{j,i}^2 + b_{j,i}Q_{j,i} + c_{j,i} \quad i = 1,2,3,\dots,n \quad (۲)$$

که $Q_{j,i}$: دبی پمپاژ، $H_{j,i}$: فشار، $\eta_{j,i}$: راندمان پمپ i در زمان j، C_E: تعرفه مصوب انرژی در ساعات مختلف شبانه روز و C_D : هزینه دیماند قدرت است.

دبی پمپاژ پمپ‌ها در ساعات مختلف شبانه‌روز به عنوان متغیر تصمیم به‌کار می‌رود. قیود مسئله به‌شرح زیر است:

دبی پمپ‌های موجود:

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} Q_{\mathrm{j,i}} = \sum_{j=1}^{m} Q_{Dj} \quad (۳)$$

در رابطه فوق Q_{Dj}: مقدار دبی مورد نیاز شبکه در هر دوره زمانی j در شبانه روز است.

سرعت سیال در لوله‌ها:

$$V \le 2\frac{m}{s} \quad (۴)$$

فشار هیدرولیکی در هر گره:

$$20\ mH_2O \le H \le 60\ mH_2O \quad (۵)$$

تغییرات ارتفاع آبگیری مخزن: در بازه بهینه‌سازی هرچه ارتفاع اولیه مخزن و تغییرات ارتفاع کم‌تر باشد، در مصرف انرژی صرفه‌جویی بیشتر خواهد بود.

$$h_{\mathrm{s,j}} = h_{\mathrm{s,j-1}} + \frac{\sum_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{n}} \mathrm{Q_{i,j}} - \mathrm{Q_{D,j}}}{\mathrm{A_S}} \quad (۶)$$

$$h_{Min} \le h_{s,j} \le h_{Max} \quad (۷)$$

که $h_{s,j}$: ارتفاع سطح آب داخل مخزن در فاصله زمانی j و A_s : مساحت مخزن ذخیره است.

دفعات روشن و خاموش شدن پمپ‌ها: تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ تاثیر بسیاری بر استهلاک و افزایش هزینه‌های ایستگاه پمپاژ دارد، بنابراین با توجه به نوع پمپ مورد استفاده حداکثر مجاز دفعات روشن و خاموش شدن، به عنوان آخرین قید لحاظ می‌شود.

$$N_s \le 3 \quad (۸)$$

که N_s: تعداد دفعات روشن و خاموش شدن هر پمپ است.

معادلات حاکم در نرم‌افزار WaterGEMS برای انجام محاسبات هیدرولیکی به‌شرح زیر است:

۱- قانون بقای جرم: برای هر گره قانون بقای جرم باید برقرار باشد.

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = Q_e \quad (۹)$$

که Q_{in} و Q_{out} : به ترتیب جریان ورودی و خروجی به گره می‌باشند و Q_e : میزان جریان مصرفی یا تقاضا در هر گره است.

۲- قانون بقای انرژی: در هر حلقه از شبکه، قانون بقای انرژی می‌تواند به شکل زیر نوشته شود.

$$\sum_{k\in Loop\ l} \Delta H_k = 0, \quad \forall l \in NL \quad (۱۰)$$

که ΔH_k : افت فشار در لوله k، و N_L: تعداد کل حلقه‌ها در سیستم است. افت فشار در هر لوله تفاوت هد بین گره‌های متصل به هم دیگر است و با استفاده از رابطه هیزن - ویلیامز محاسبه می‌شود:

$$\Delta H_{k=} H_{1,k} - H_{2,k} = \omega L\left(\frac{Q}{C}\right)^{1.85} D^{-4.87}, \quad \forall k \in NP \quad (۱۱)$$

که $H_{1,k}$ و $H_{2,k}$: هد در دو انتهای لوله k هستند؛ ω : ثابت تبدیل عددی معادله است (که بستگی به واحدها دارد) و C: ضریب زبری لوله k (که وابسته به جنس لوله است) می‌باشند.

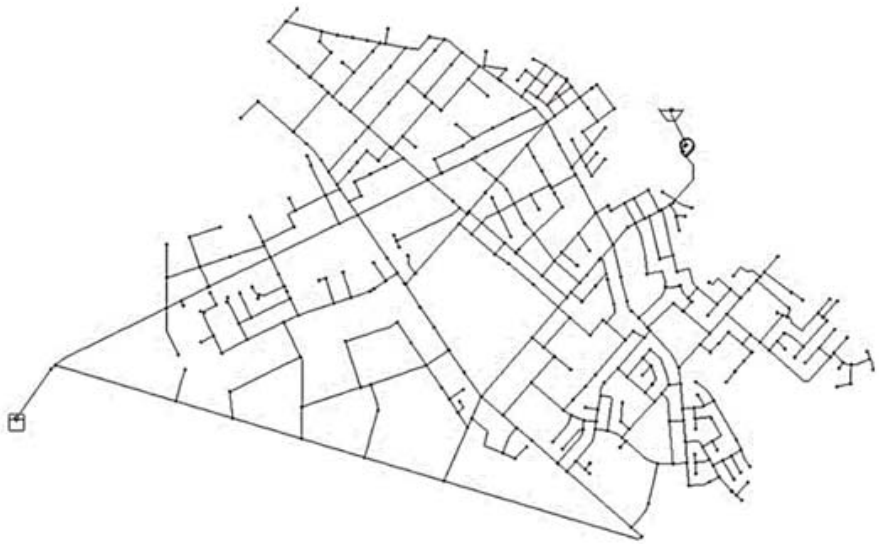
مجموعه معادلات بقای جرم و بقای انرژی برای یک سیستم توزیع آب در نرم افزار WaterGEMS با استفاده از روش الگوریتم گرادیان حل می‌شود که قادر است هد و جریان را مدل نماید. از آن‌جایی‌که معادله پیوستگی و بقای جرم با هم دیگر در تعامل هستند و در هر تکرار حل می‌شوند، روش الگوریتم گرادیان از لحاظ تئوری همان دقت الگوریتم‌های معتبر مانند روش اصلاح مسیر شبیه‌سازی[۱۴] و روش تئوری خطی[۱۵] را دارد (WaterGEMS, 2005; Moghaddam et al., 2014).

۲- نتایج و بحث

در این مقاله نسبت به مطالعه یک شبکه توزیع آب موردی اقدام شد (شکل ۱). این شبکه شامل تعداد ۵۵۵ لوله به اقطار مختلف و با ضریب هیزن ویلیامز ۱۳۰، ۴۵۹ گره، ۵ عدد پمپ و یک عدد مخزن به ارتفاع ۱۸۴ متر است.

شکل ۳ نمودار جریان خروجی از مخزن در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بیشینه مصرف شبکه در ساعت ۲۲:۰۰ و به‌مقدار حدود ۱۹۴ لیتر در ثانیه است.

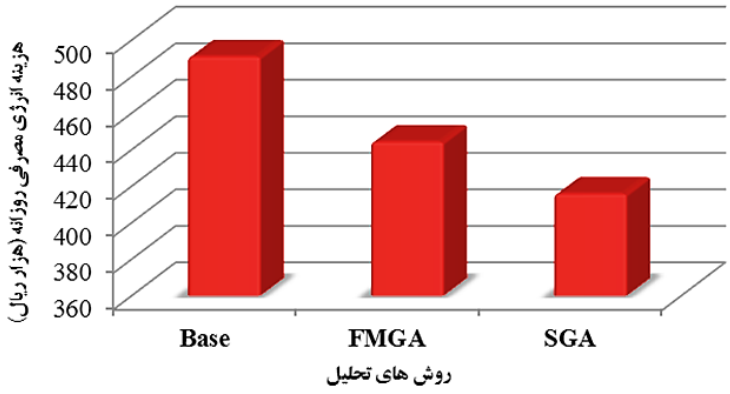
در هر شبکه، کمینه فشار در گره‌ها در ساعت بیشینه مصرف و بیشینه فشار در ساعت حداقل مصرف، به‌وقوع می‌پیوندد.



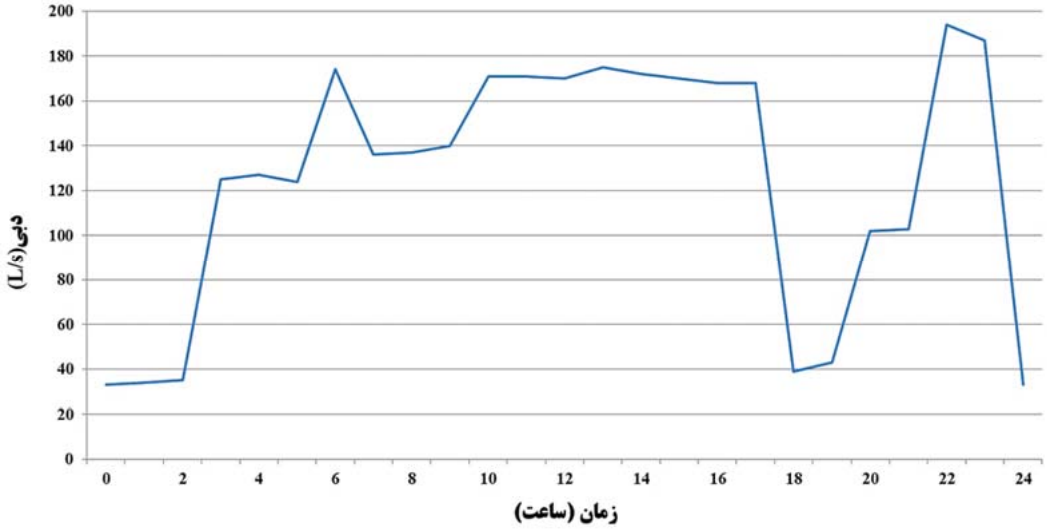
شکل ۱- شبکه توزیع آب مورد مطالعه

شکل ۲، هزینه انرژی مصرفی روزانه در سناریوهای مورد بحث را در ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از انجام بهینه‌سازی با کمک ابزار Darwin Scheduler هزینه انرژی مصرفی روزانه در ایستگاه پمپاژ به‌وسیله الگوریتم‌های SGA و FMGA به‌ترتیب به میزان حدود ۱۵ و ۱۰ درصد در مقایسه با هزینه انرژی مصرفی پیش از اعمال بهینه‌سازی (Base)، کاهش یافته است.

بنابراین در جدول ۱، فراوانی تعداد گره‌ها در سه دامنه مختلف در ساعت بیشینه مصرف (۲۲:۰۰) و حداقل مصرف (۱۸:۰۰)، ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تعداد گره‌های موجود در دامنه مطلوب (۳۰-۵۰ متر آب) در ساعت بیشینه مصرف تغییر معناداری ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم‌های FMGA و SGA تاثیر منفی بر فشار در گره‌ها و خروج از بازه مطلوب



شکل ۲- نمودار مقایسه هزینه انرژی مصرفی روزانه به‌دست آمده در ایستگاه پمپاژ برای روش‌های SGA، FMGA و Base



شکل ۳- نمودار دبی خروجی از مخزن در طول شبانه‌روز

نداشته است. باید متذکر شد که در الگوریتم FMGA حدود ۶ گره از شبکه با کاهش فشار و ۱۱۸ گره با افزایش فشار نسبت به حالت Base به‌ترتیب در ساعات بیشینه مصرف (۲۲:۰۰) و حداقل مصرف (۱۸:۰۰) مواجه شده‌اند.

همچنین شکل‌های ۴ و ۵ فشار گره‌ها را در شبکه به‌ترتیب در ساعات بیشینه مصرف و کمینه مصرف به‌صورت ترکیب رنگی در گره‌ها نشان می‌دهد. رنگ سبز، قرمز، آبی و صورتی به‌ترتیب بیان‌گر فشار کم‌تر از ۲۰، بین ۲۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۶۰ متر می‌باشد.

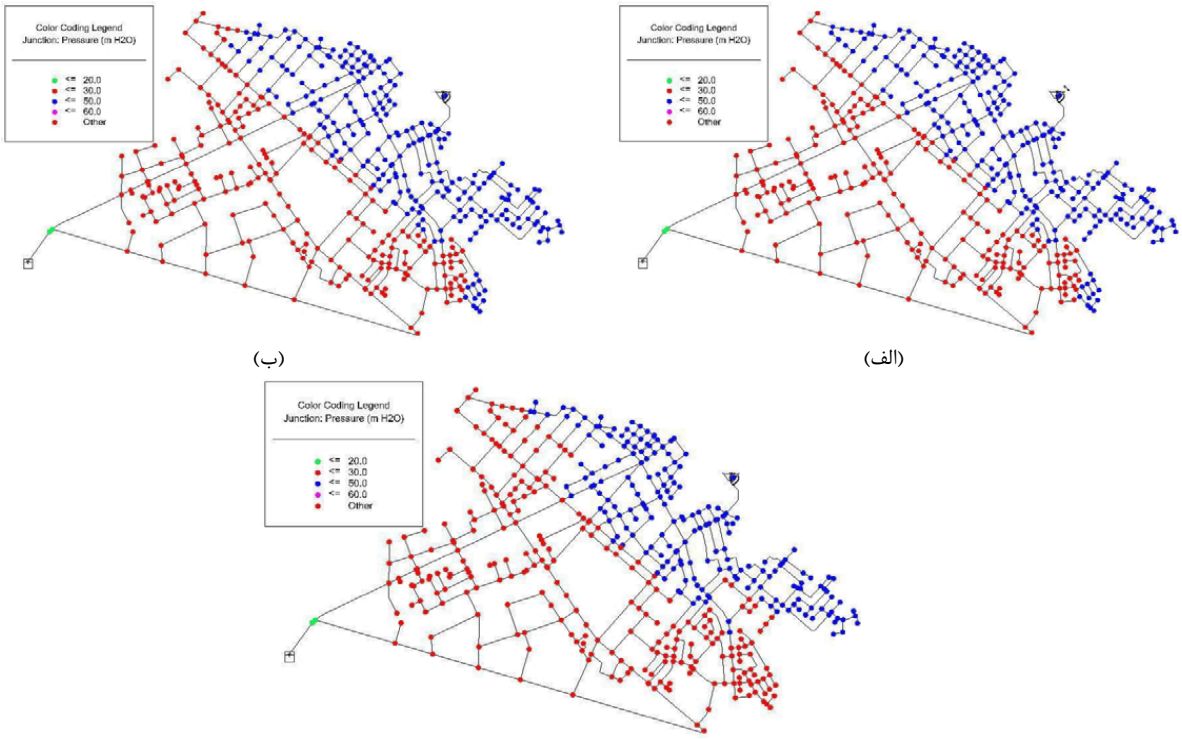
پس از اجرای مدل در سه حالت Base، FMGA و SGA حداکثر سرعت شبیه‌سازی شده به ترتیب ۰/۷۶، ۱/۰۶ و۱/۱۷ متر بر ثانیه است. بنابراین اعمال بهینه‌سازی در ارضای قید سرعت ($V<2$ m/s) نه‌تنها تاثیر منفی نداشته است، بلکه سرعت‌های مطلوب‌تری را نیز حاصل نموده است.

منحنی مشخصه - راندمان پمپ‌های موجود در ایستگاه پمپاژ مذکور در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، نقطه‌ی کار ایده‌آل پمپ در دبی حدود ۳۴ لیتر در ثانیه و با راندمان حدود ۵۷ درصد حاصل می‌شود.

در شکل ۷ نمودارهای دبی خروجی پمپ‌های ایستگاه مورد نظر یا به‌عبارت دیگر الگوی ورود و خروج پمپ‌ها به مدار در سناریوهای مختلف در سه سناریوی Base، FMGA و SGA در ساعات شبانه‌روز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پمپ شماره ۳ در سناریوی Base به مدت ۱۵ ساعت با دبی حدود ۶۰ لیتر در ثانیه کار می‌کندکه با توجه به منحنی

جدول ۱- فراوانی گره‌ها در بازه‌های مختلف فشاری در ساعات بیشینه مصرف و حداقل مصرف

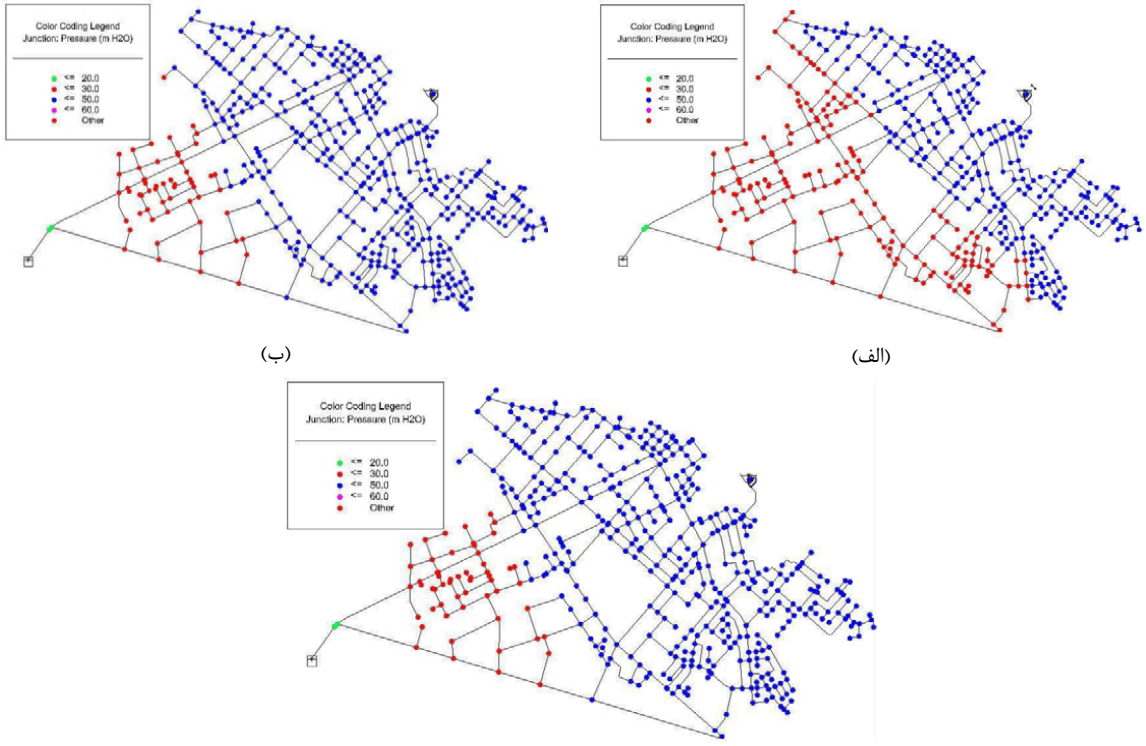
ساعت بیشینه مصرف: ۲۲:۰۰				ساعت کمینه مصرف: ۱۸:۰۰			
فشار (متر)	تعداد گره‌ها			فشار (متر)	تعداد گره‌ها		
	SGA	FMGA	Base		SGA	FMGA	Base
<= ۲۰	۲	۲	۲	<= ۲۰	۲	۲	۲
۳۰-۲۰	۲۰۰	۲۲۳	۲۱۷	۳۰-۲۰	۲۶۱	۵۷	۱۷۵
۵۰-۳۰	۲۵۷	۲۳۴	۲۴۰	۵۰-۳۰	۱۹۶	۴۰۰	۲۸۲
۶۰-۵۰	۰	۰	۰	۶۰-۵۰	۰	۰	۰



(ب) (الف)

(ج)

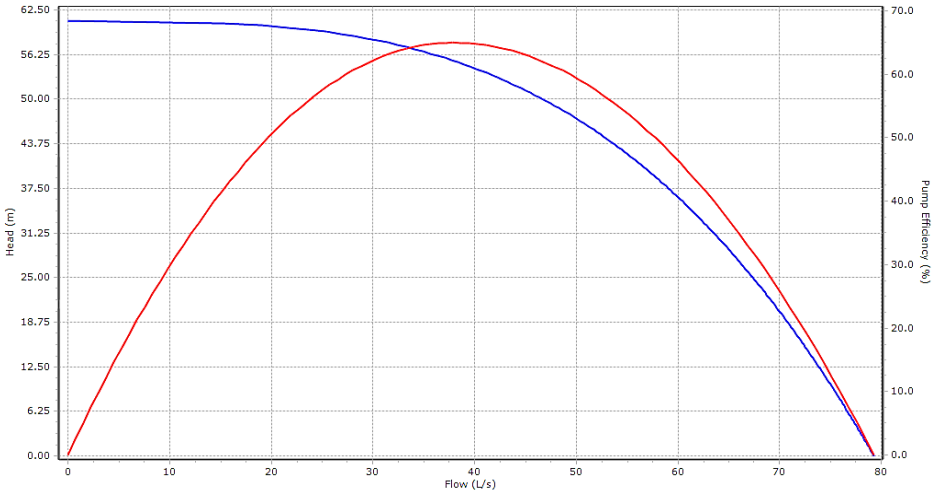
شکل ۴- فشار گره‌ها به صورت ترکیب رنگی در ساعت بیشینه مصرف برای سناریوهای الف) Base، ب) FMGA و ج) SGA



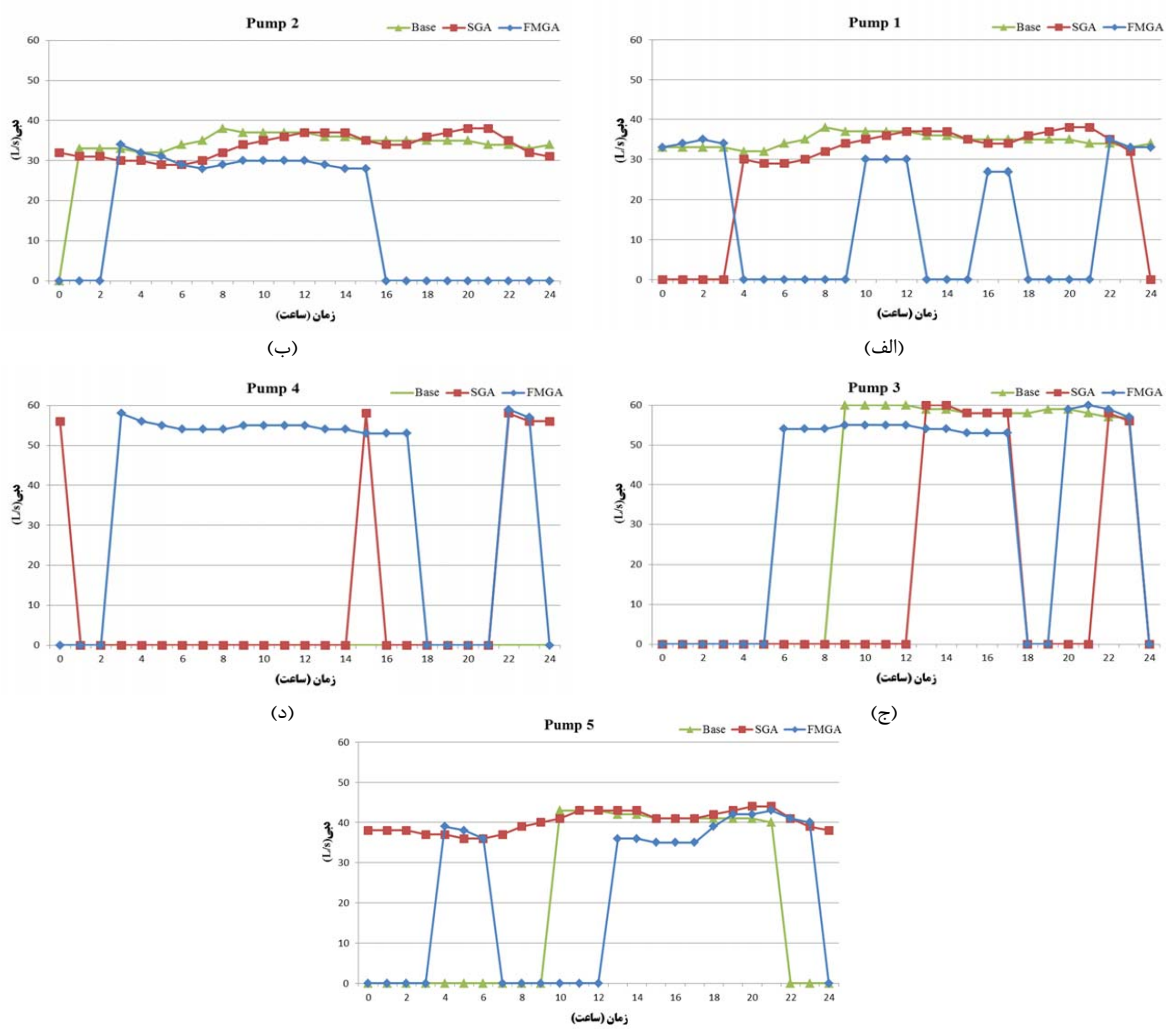
(ب) (الف)

(ج)

شکل ۵- فشار گره‌ها به صورت ترکیب رنگی در ساعت کمینه مصرف برای سناریوهای الف) Base، ب) FMGA و ج) SGA



شکل ۶- منحنی مشخصه – راندمان پمپ



(ب) (الف)

(د) (ج)

شکل ۷- نمودار دبی خروجی پمپ‌ها در سناریوهای Base، FMGA و SGA در ساعات شبانه‌روز
برای الف) پمپ۱، ب) پمپ ۲، ج) پمپ ۳، د) پمپ ۴ و ه) پمپ ۵

مشخصه – راندمان (شکل ۴)، راندمان این پمپ برای تامین این دبی به حدود ۳۸ درصد کاهش خواهد یافت.

پس از انجام بهینه‌سازی در ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه، ساعات کار پمپ مذکور با راندمان پایین (حدود ۳۸ درصد) در دو سناریوی FMGA و SGA به ترتیب به ۱۲ و ۶ ساعت تقلیل می‌یابد. پس از بهینه‌سازی، کلیه پمپ‌ها در تامین نیاز شبکه به‌کار گرفته می‌شود که این امر موجب افزایش طول عمر مجموعه ایستگاه پمپاژ و جلوگیری از استهلاک و خرابی هریک از پمپ‌ها می‌شود.

۳- نتیجه‌گیری

در حال حاضر، روش‌های متعددی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ وجود دارد که پیچیدگی و غیرخطی بودن الگوی جریان در برخی از شبکه‌های توزیع آب استفاده از روش‌های فراابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک را در ارجحیت قرار می‌دهد. در این مقاله از دو نوع از الگوریتم‌های خانواده الگوریتم ژنتیک به نام‌های الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) و الگوریتم ژنتیک با آشفتگی سریع (FMGA) به‌کمک ابزار Darwin Scheduler در نرم‌افزار WaterGEMS V8i استفاده شد و نتایج آن با روش بدون تحلیل بدون بهینه‌سازی (سناریوی Base) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ضمن حفظ و بهبود شرایط هیدرولیکی مجاز در شبکه توزیع آب، هزینه انرژی مصرفی روزانه در روش‌های FMGA و SGA به‌ترتیب به‌میزان حدود ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش پیدا کرد. همین‌طور استفاده از دو سناریوی مذکور به‌ترتیب، موجب کاهش ۲۰ و ۶۰ درصدی ساعات کار پمپ شماره ۳ با راندمان پایین (۳۸ درصد) و بکارگیری پمپ‌های شماره ۴ و ۲ شد که تاثیر به‌سزایی در کاهش استهلاک و افزایش طول عمر ایستگاه پمپاژ دارد.

۴- پی‌نوشت‌ها

1- Water Distribution Systems
2- Variable-Speed Pump
3- Ant System iteration best algorithm
4- Single-Speed Pump
5- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm -II
6- Operational Graph Optimization
7- Simple Genetic Algorithm
8- Fast Messy Genetic Algorithm
9- Roulette Wheel Selection Method
10- Tournament Selection Method
11- Random Selection Method
12- Crossover
13- Mutation
14- Simultaneous Path Adjustment Method
15- Linear Theory Method

۵- مراجع

Bhave, P.R. and Sonak, V.V., (1992), "A critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks", *Water Resources Research*, 28(6), 1577-1584.

Coelho, B., Tavares, A. and Andrade-Campos, A., (2012), "Analysis of diverse optimisation algorithms for pump scheduling in water supply systems", *Proceedings of 3rd International Conference on Engineering Optimization (EngOpt2012)*, July, Rio de Janeiro, Brazil.

Cunha, M. and Sousa, J., (1999), "Water distribution network design optimization: simulated annealing approach", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 215-221.

Eusuff, M.M. and Lansey, K.E., (2003), "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3), 210-225.

Hashemi, S.S., Tabesh, M. and Ataeekia, B., (2014), "Ant colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable speed pump in water distribution networks", *Urban Water Journal*, 11(5), 334-347.

Jacoby, S.L., (1968), "Design of optimal hydraulic networks", *Journal of the Hydraulics Division*, 94(3), 641-662.

Kadu, M.S., Rajesh, G. and Bhave, P.R., (2008), "Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 147-160.

Kessler, A. and Shamir, U., (1989), "Analysis of linear programming gradient method for optimal design of water supply networks", *Water Resources Research*, 25(7), 1469-1480.

Keedwell, E. and Khu, S.-Th., (2005), "A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution network", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18, 461-472.

Keedwell, E. and Khu, ST., (2006), "Novel cellular

automata approach to optimal water distribution network design", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 20(1), 49-56.

Mackle, G., Savic, G.A. and Walters, G.A., (1995), "Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply", *First International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications (GALESIA)*, September 12-14, IET, 400-405.

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

Mala-Jetmarova, H., Barton, A. and Bagirov, A., (2014), "Exploration of the trade-offs between water quality and pumping costs in optimal operation of regional multiquality water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(6), 342-368.

Menke, R., Abraham, E., Parpas, P. and Stoianov, I., (2015), "Approximation of system components for pump scheduling optimisation", *Procedia Engineering*, 119, 1059-1068.

Moghaddam, A., Alizadeh, A., Ziaei, A., Farid Hosseini, A. and Falah Heravi, D., (2014), "Convergence rate improvement in water distribution network optimization using Fast Messy Genetic Algorithm (FMGA)", *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 28(1), 22-34.

Neelakantan, T.R. and Suribabu, C.R., (2005), "Optimal design of water distribution networks by a modified genetic algorithm", *Journal of Civil Environmental Engineering*, 1(1), 20-34.

Price, E. and Ostfeld, A., (2016), "Optimal pump scheduling water distribution systems using graph theory under hydraulic and chlorine constraints", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(10), 885-900.

Quindry, G., Brill, E.D. and Lienman, J., (1979), "Water distribution system design criteria", Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Savic, D.A. and Walters, GA., (1997), "Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77.

Suribabu, C.R., and Neelakantan, T.R., (2006), "Design of water distribution networks using particle swarm optimization", *Urban Water Journal,* 3(2), 111-120.

Vairavamoorthy, K. and Ali, M., (2005), "Pipe index vector, a method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization", *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12), 1117-1125.

Vairavamoorthy, K. and Ali, M., (2000), "Optimal design of water distribution systems using genetic algorithms", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(2), 374-382.

Varma, K.V., Narasimhan, S. and Bhallamudi, S.M., (1997), "Optimal design of water distribution systems using an NLP method", *Journal of Environmental Engineering*, 123(4), 381-388.

WaterGEMS User's Manual, (2005), Bentley Systems Inc., http://docs.bentley.com/.

Zecchin, A.C., Maier, H.C., Simpson, A.R., Leonard, M. and Nixon, J.B., (2007), "Ant colony optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1), 87-92.