

## 1071O-NWWCE

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

جواد کرمی<sup>۱</sup>، علیرضا مقدم<sup>۲</sup>، علیرضا فرید حسینی<sup>۳</sup>، حسین ثنائی نژاد<sup>۴</sup>، علی نقی ضیایی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه ارومیه

۳ و ۴- دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد

jjkormanje@gmail.com

#### خلاصه

امروزه در شبکه‌های توزیع آب شهری علاوه بر انجام طراحی بهینه هیدرولیکی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ در رأس 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 آشفتنی 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 به ترتیب به میزان ۱۵ و ۱۰ درصد با اعمال تعرفه برق مصوب، نسبت به عملکرد پمپ‌ها بدون اعمال بهینه‌سازی حاصل گردید.

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

#### ۱. مقدمه

رشد روز افزون جمعیت و تجمع آن‌ها در نقاط شهری، استفاده از شبکه‌های گسترده و پیچیده آبرسانی را به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل کرده است. هزینه‌های بسیار سنگین سیستم‌های توزیع آب<sup>۱</sup> (WDSs)، سبب شده است تا افزایش بهره‌وری در تجهیزات و تأسیسات صنعت آب از جمله خواستگاه‌های ذینفعان این صنعت به شمار 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، لذا ارزیابی صحیح یک سیستم توزیع آب در گرو مطالعه رفتار سیال به کمک مدل‌های دینامیکی می‌باشد. از طرفی می‌توان با بهینه‌سازی مدل مذکور اقدامات مؤثری را در کاهش هزینه‌ها انجام داد به گونه‌ای که قیودهای طراحی و نیاز مصرف کنندگان با حدود اطمینان خاصی تأمین گردد. 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 لذا اکثر روش‌های بهینه‌سازی قابلیت تطبیق با توابع هدف گوناگون را دارا می‌باشند.

در طول نیم قرن اخیر، تحقیقات بسیاری بر روی بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی در منابع مختلف دیده می‌شود. به طور مثال در زمینه بهینه‌سازی شبکه آبرسانی برای قطره‌های پیوسته محققینی مانند جاکوبی (۱۹۶۸) [1] و وارما و همکاران (۱۹۹۷) [2] تحقیق کرده‌اند و همینطور جهت بهینه‌سازی قطره‌های

<sup>1</sup> Water Distribution Systems

گسسته می‌توان به تحقیقات کوآندری و همکاران (۱۹۷۹) [3]، کسلر و شمیر (۱۹۸۹) [4] و بی‌های و سوناک (۱۹۹۲) [5] اشاره کرد. با ارائه مدل الگوریتم ژنتیک برای مسائل بهینه‌سازی، ساویک و والتر (۱۹۹۷) [6] و وایراوامورسی و علی (۲۰۰۰، ۲۰۰۵) [7، 8] از الگوریتم ژنتیک در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌ها استفاده کردند. همچنین کیدول و همکاران (۲۰۰۵) [9] با ترکیب الگوریتم ژنتیک و اتوماسیون سلولی، سرعت و قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک را بهبود بخشیدند و نیلاکانتن و سوربابو (۲۰۰۵) [10] و کادوو و همکاران (۲۰۰۸) [11] اقدام به اصلاح در الگوریتم ژنتیک و بکاربردن الگوریتم ژنتیک اصلاح شده برای بهینه‌سازی مسائل مربوط به آب کردند. با پیشرفت علم بهینه‌سازی، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی معرفی گردید و چون‌ها و سوسا (۱۹۹۹) [12] این الگوریتم را برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب به کار بردند. با گذشت زمان، الگوریتم‌های جدیدی، در رابطه با حل مسائل مربوط به آب استفاده شدند. از جمله می‌توان به بهینه‌سازی شبکه آبرسانی توسط ایوسف و لانس (۲۰۰۳) [13] با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه (SFL) و کیدول و خو (۲۰۰۶) [14] با استفاده از الگوریتم اوتاماتی سلولی و سوربابو و نیلاکانتن (۲۰۰۶) [15] با استفاده از الگوریتم ازدحام جمعیت (PSO) اشاره کرد. استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان (ACO) برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب توسط مایر و همکاران (۲۰۰۳) [16] و زکچین و همکاران (۲۰۰۷) [17] صورت گرفت. اندرید (۲۰۱۲) [18] در مقاله‌ای مبنی بر بهینه‌سازی ایستگاه پمپاژ، با مقایسه مدل هیدرولیکی Epanet و الگوریتم ژنتیک به این نتیجه رسید که ۳۴ درصد از انرژی سیستم طبق مدل الگوریتم ژنتیک قابل صرفه‌جویی می‌باشد. ماکل و همکاران (۱۹۹۵) [19] نیز در مقاله‌ای، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، اقدام به بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ در جهت کاهش هزینه برق مصرفی نموده‌اند.

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)<sup>۲</sup> و الگوریتم ژنتیک با آشفته‌گی سریع (FMGA)<sup>۳</sup> اقدام شده و نتایج آن با سناریوی بدون اعمال بهینه‌سازی (Base) مقایسه شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

در بین روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری، مدل‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای تحقق، به چهار عنصر اصلی زیر نیازمندند:

• جمعیت اولیه: یک مجموعه اولیه از اعضاء (کروموزم‌ها) که معمولاً بصورت 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 اعضای که برازندگی بالایی دارند، احتمال بیشتری برای تولید مثل دارند. چند روش از انواع متداول عملگر انتخاب عبارتند از: روش چرخ گردان<sup>۴</sup>، روش تورنمنت<sup>۵</sup>، روش انتخاب تصادفی<sup>۶</sup>.

• عملگرهای آمیزش<sup>۷</sup>: 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. به دلیل تغییراتی که روی کروموزوم‌های والد بر اثر تبادل ژن‌ها صورت می‌گیرد، کروموزوم‌های فرزند ویژگی‌های ژنتیکی مشترکی با دو والد خود دارد.

<sup>2</sup> Simple Genetic Algorithm

<sup>3</sup> Fast Messy Genetic Algorithm

<sup>4</sup> Roulette Wheel Selection Method

<sup>5</sup> Tournament Selection Method

<sup>6</sup> Random Selection Method

<sup>7</sup> Crossover

• عملگر جهش<sup>۸</sup>: در تکامل طبیعی، جهش، فرایندی تصادفی است که یک ژن را با ژن دیگری برای تولید یک ساختار ژنتیکی جدید تعویض می کند. در واقع جهش سازوکاری است که بر اثر آن، تغییری سازمان نیافته و کاملاً تصادفی در رشته ایجاد می شود. وجود این عملگر از این نظر مهم است که عملگر آمیزش، با وجود آنکه کروموزوم های متفاوت با کروموزوم های والد را ایجاد می کند، اما کروموزوم های فرزند دارای ژن های مشترکی از هر دو والد است. در حالی که عملگر جهش، مشخصه هایی را ایجاد می کند که در جمعیت والدین وجود ندارد. الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) یکی از روش های فرا ابتکاری است که با مشخص کردن چند ترکیب (معمولاً تصادفی) با طول رشته های برابر به عنوان جمعیت اولیه، جواب بهینه را در فضای راه حل های ممکن جستجو می کند. در صورتی که یک الگوریتم ژنتیک آشفته (FMGA)، از ترکیب هایی با طول رشته های متغیر استفاده می کند به طوری که طول رشته ها هم در طول هر نسل و هم از یک رشته به رشته دیگر متفاوت می باشد. ایجاد این آشفستگی و بی نظمی در فضای حل مسئله، تاثیر مثبتی در تسریع بهینه سازی دارد.

## ۲.۲. مدل ریاضی بهینه سازی ایستگاه پمپاژ

در این مقاله قبل از کاربرد الگوریتم ها نیاز به معرفی مدل برنامه ریزی ریاضی مسئله بهینه سازی پمپ ها می باشد. عملکرد بهینه پمپ ها از یک رابطه غیر خطی تبعیت می کند زیرا توابع هدف و قیود غیر خطی بوده و پارامترهای تصمیم نیز بسیار زیاد می باشد. مورد تحقیق در این پژوهش ایستگاه پمپاژی متشکل از پنج عدد پمپ موازی جهت توزیع آب در یک شبکه گسترده می باشد و تابع هدف، به حداقل رساندن هزینه های مصرف انرژی در طول افق بهره برداری است (رابطه ۱ و ۲).

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

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

که در این روابط  $Q_{j,i}$  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 پمپ ها در ساعات مختلف شبانه روز به عنوان متغیر تصمیم به کار می رود. قیود مسئله به شرح ذیل می باشد:

۱- دبی پمپ های موجود:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Q_{j,i} = \sum_{j=1}^m Q_{Dj} \quad (3)$$

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

۲- سرعت سیال در لوله ها:

$$V \leq 2 \frac{m}{s} \quad (4)$$

۳- فشار هیدرولیکی در هر گره:

$$20 \text{ mH}_2\text{O} \leq H \leq 60 \text{ mH}_2\text{O} \quad (5)$$

۴- تغییرات ارتفاع آبگیری مخزن: در بازه بهینه سازی هر چه ارتفاع اولیه مخزن و تغییرات ارتفاع کمتر باشد، در مصرف انرژی صرفه جویی بیشتر خواهد بود.

$$h_{s,j} = h_{s,j-1} + \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,j} - Q_{D,j}}{A_s} \quad (6)$$

$$h_{\text{Min}} \leq h_{s,j} \leq h_{\text{Max}} \quad (7)$$

در روابط مذکور  $h_{s,j}$  ارتفاع سطح آب داخل مخزن در فاصله زمانی  $j$  و  $A_s$  مساحت مخزن ذخیره می باشد.

۵- دفعات روشن و خاموش شدن پمپ ها: تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ تاثیر بسیاری بر استهلاک و افزایش هزینه های ایستگاه پمپاژ دارد، لذا با توجه به نوع پمپ مورد استفاده حداکثر مجاز دفعات روشن و خاموش شدن، به عنوان آخرین قید لحاظ می گردد.

<sup>8</sup> Mutation

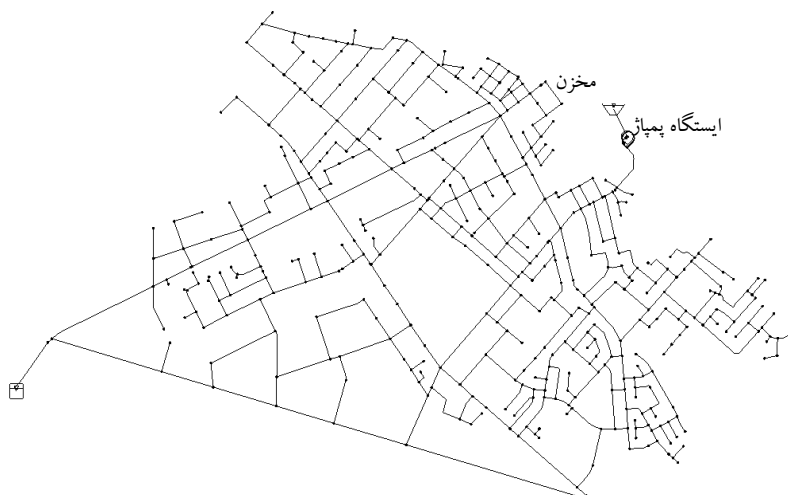
$$N_s \leq 3$$

(۸)

در رابطه فوق  $N_s$  تعداد دفعات روشن و خاموش شدن هر پمپ می باشد.

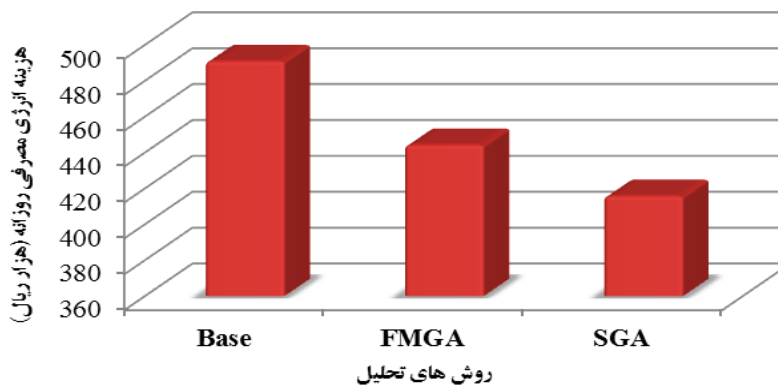
### ۳. نتایج و بحث

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.



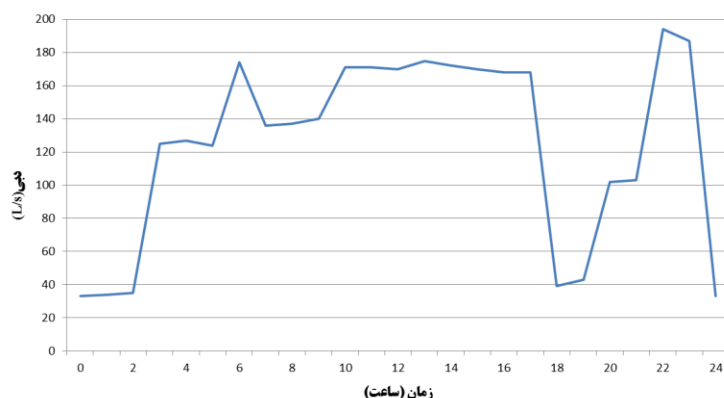
شکل ۱. شبکه توزیع آب مورد مطالعه

شکل ۲، هزینه انرژی مصرفی روزانه در سناریوهای مورد بحث را در ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پس از انجام بهینه سازی با کمک ابزار Darwin Scheduler هزینه انرژی مصرفی روزانه در ایستگاه پمپاژ به وسیله الگوریتم های SGA و FMGA به ترتیب به میزان حدود ۱۵ و ۱۰ درصد در مقایسه با هزینه انرژی مصرفی پیش از اعمال بهینه سازی (Base)، کاهش یافته است.



شکل ۲. نمودار مقایسه هزینه انرژی مصرفی روزانه بدست آمده در ایستگاه پمپاژ برای روش های SGA، FMGA و Base

شکل ۳ نمودار جریان خروجی از مخزن در طول ۲۴ ساعات شبانه روز را نشان می دهد. با توجه به این شکل بیشینه مصرف شبکه در ساعت ۲۲:۰۰ و به مقدار حدود ۱۹۴ لیتر در ثانیه می باشد.



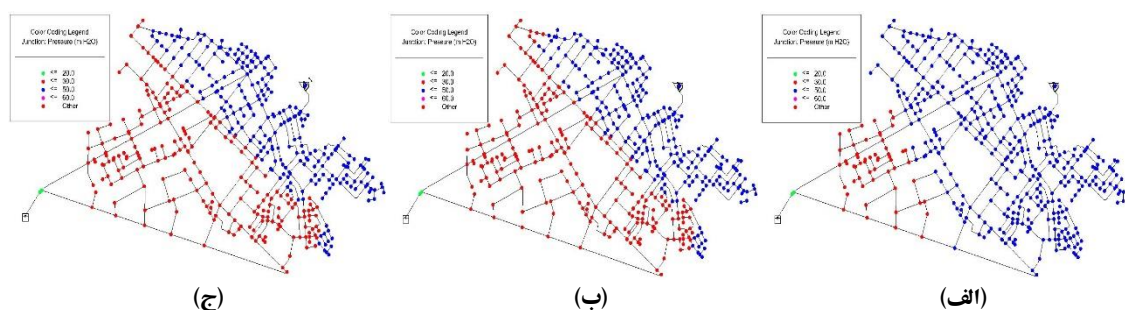
شکل ۳. نمودار دبی خروجی از مخزن در طول شبانه روز

در هر شبکه، کمینه فشار در گره ها در ساعت بیشینه مصرف و بیشینه فشار در ساعت حداقل مصرف، به وقوع می پیوندد. لذا در جدول ۱، فراوانی تعداد گره ها در سه دامنه ی مختلف در ساعت بیشینه مصرف (۲۲:۰۰) و حداقل مصرف (۱۸:۰۰)، ارائه شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می شود، تعداد گره های موجود در دامنه مطلوب (۳۰-۵۰ متر آب) در ساعت بیشینه مصرف تغییر معناداری ندارد. لذا می توان نتیجه گیری نمود که فرآیند بهینه سازی با الگوریتم های FMGA و SGA تاثیر منفی بر فشار در گره ها و خروج از بازه ی مطلوب 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 به ترتیب در ساعات بیشینه مصرف (۲۲:۰۰) و حداقل مصرف (۱۸:۰۰) مواجه شده اند. همچنین شکل های ۴ و ۵ فشار گره ها را در شبکه به ترتیب در ساعات بیشینه مصرف و کمینه مصرف به صورت ترکیب رنگی در گره ها نشان می دهد. رنگ سبز، قرمز، آبی و صورتی به ترتیب بیانگر فشار کمتر از ۲۰، بین ۲۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۵۰ و ۵۰ تا ۶۰ متر می باشد.

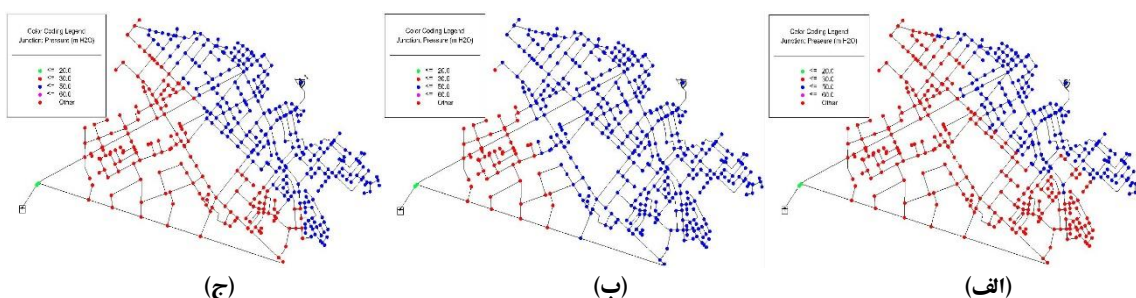
جدول ۱. فراوانی گره ها در بازه های مختلف فشاری در ساعات الف) بیشینه مصرف و ب) حداقل مصرف

| ساعت کمینه مصرف: ۱۸:۰۰ |              |      |     | ساعت بیشینه مصرف: ۲۲:۰۰ |              |      |     |
|------------------------|--------------|------|-----|-------------------------|--------------|------|-----|
| فشار (متر آب)          | تعداد گره ها |      |     | فشار (متر آب)           | تعداد گره ها |      |     |
|                        | Base         | FMGA | SGA |                         | Base         | FMGA | SGA |
| $\leq 20$              | ۲            | ۲    | ۲   | $\leq 20$               | ۲            | ۲    | ۲   |
| ۲۰-۳۰                  | ۱۷۵          | ۵۷   | ۲۶۱ | ۲۰-۳۰                   | ۲۱۷          | ۲۲۳  | ۲۰۰ |
| ۳۰-۵۰                  | ۲۸۲          | ۴۰۰  | ۱۹۶ | ۳۰-۵۰                   | ۲۴۰          | ۲۳۴  | ۲۵۷ |
| ۵۰-۶۰                  | ۰            | ۰    | ۰   | ۵۰-۶۰                   | ۰            | ۰    | ۰   |

کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران  
دانشگاه تهران، تهران  
۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵

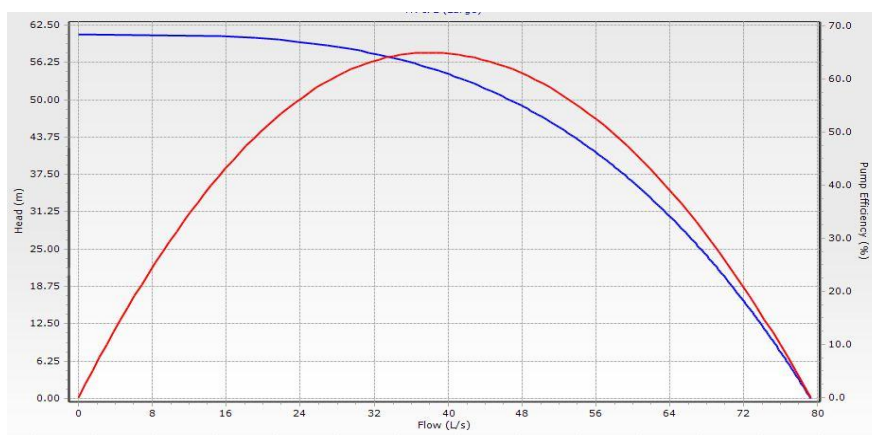


شکل ۴. فشار گره ها به صورت ترکیب رنگی در ساعت بیشینه مصرف برای سناریو های الف) Base، ب) FMGA و ج) SGA



شکل ۵. فشار گره ها به صورت ترکیب رنگی در ساعت کمینه مصرف برای سناریو های الف) Base، ب) FMGA و ج) SGA

پس از اجرای مدل در سه حالت Base، FMGA و SGA ماکزیمم سرعت شبیه سازی شده به ترتیب ۰/۷۶، ۱/۰۶ و ۱/۱۷ متر بر ثانیه می باشد. لذا اعمال بهینه سازی در ارضای قید سرعت ( $V \leq 2 \frac{m}{s}$ ) نه تنها تاثیر منفی نداشته است، بلکه سرعت های مطلوب تری را نیز حاصل نموده است. منحنی مشخصه-راندمان پمپ های موجود در ایستگاه پمپاژ مذکور در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، نقطه ی کار ایده آل پمپ در دبی حدود ۳۴ لیتر در ثانیه و با راندمان حدود ۵۷ درصد حاصل می گردد.

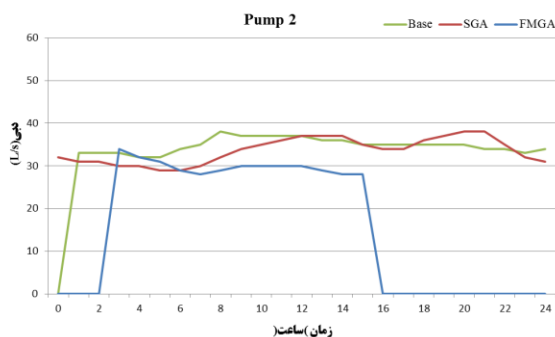


شکل ۶. منحنی مشخصه - راندمان پمپ

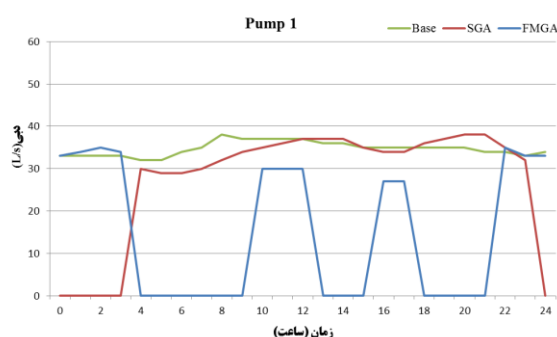


در شکل ۷ نمودارهای دبی خروجی پمپ‌های ایستگاه مورد نظر یا به عبارت دیگر الگوی ورود و خروج پمپ‌ها به مدار در سناریوهای مختلف در سه سناریوی Base، FMGA و SGA در ساعات شبانه‌روز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پمپ شماره ۳ در سناریوی Base به مدت ۱۵ ساعت با دبی حدود ۶۰ لیتر در ثانیه کار می‌کند که با توجه به منحنی مشخصه - راندمان (شکل ۴)، راندمان این پمپ برای تأمین این دبی به حدود ۳۸ درصد کاهش خواهد یافت.

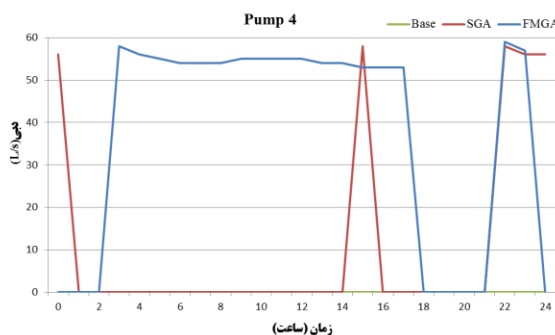
پس از انجام بهینه‌سازی در ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه ساعات کار پمپ مذکور با راندمان پایین (حدود ۳۸ درصد) در دو سناریوی FMGA و SGA به ترتیب به ۱۲ و ۶ ساعت تقلیل می‌یابد. پس از بهینه‌سازی، کلیه پمپ‌ها در تأمین نیاز شبکه بکار گرفته می‌شود که این امر موجب افزایش طول عمر مجموعه ایستگاه پمپاژ و جلوگیری از استهلاک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



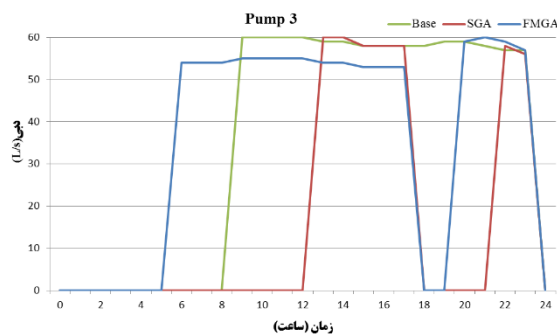
(ب)



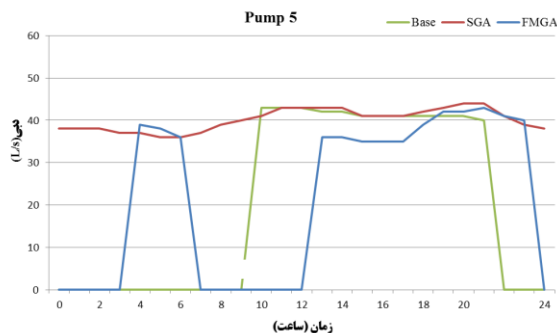
(الف)



(د)



(ج)



(ه)

شکل ۷. نمودار دبی خروجی پمپ‌ها در سناریوهای Base، FMGA و SGA در ساعات شبانه‌روز

برای الف) پمپ ۱، ب) پمپ ۲، ج) پمپ ۳، د) پمپ ۴ و ه) پمپ ۵

#### ۴. نتیجه گیری

در حال حاضر روش های متعددی در بهینه سازی مصرف انرژی در ایستگاه های پمپاژ وجود دارد که پیچیدگی و غیرخطی بودن الگوی جریان در برخی از شبکه های توزیع آب، استفاده از روش های فرا ابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک را در ارجحیت قرار می دهد. در این مقاله از دو نوع از الگوریتم های خانواده الگوریتم ژنتیک به نام های الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) و الگوریتم ژنتیک با آشفتنی سریع (FMGA) به کمک ابزار Darwin Scheduler در نرم افزار WaterGEMS V8i استفاده گردید و نتایج آن با روش بدون تحلیل بدون بهینه سازی (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 روش های FMGA و SGA به ترتیب به میزان حدود ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین استفاده از دو سناریوی مذکور به ترتیب، موجب کاهش ۲۰ و ۶۰ درصدی ساعات کار پمپ شماره ۳ با راندمان پایین (۳۸ درصد) و به کارگیری پمپ های شماره ۴ و ۲ گردید که تاثیر بسزایی در کاهش استهلاك و افزایش طول عمر ایستگاه پمپاژ دارد.

#### ۵. مراجع

1. Jacoby SLS, 1968. Design of optimal hydraulic networks. J Hydraul Div, 94(3): 641–661.
2. Varma KV, Narasimhan S and Bhallamudi SM, 1997. Optimal design of water distribution systems using an NLP method. J Environ Eng, 123(4): 381–388.
3. Quindry G, Brill ED and Lienman J, 1979. Water Distribution System Design Criteria. Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.
4. Kessler A and Shamir U, 1989. Analysis of linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. Water Resour Res, 25(7): 1469–1480.
5. Bhavé PR and Sonak VV, 1992. A critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks. Water Resour Res, 28(6): 1577–1584.
6. Savic DA and Walters GA, 1997. Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks. J Water Resour Plann Manage, 123(2): 67–77.
7. Vairavamoorthy K and Ali M, 2005. Pipe index vector: a method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization. J Hydraul Eng, 131(12): 1117–1125.
8. Vairavamoorthy K and Ali M, 2000. Optimal design of water distribution systems using genetic algorithms. Comput Aided Civil Infrastruct Eng, 15(2): 374–382.
9. Keedwell E., Khu S.-Th., (2005). A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution network. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 18, 461–472.
10. Neelakantan, T R and Suribabu, C R 2005. Optimal design of water distribution networks by a modified genetic algorithm. J Civil Environ Eng, 1 (1): 20–34.
11. Kadu, M S, Rajesh, G and Bhavé, P R 2008. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space. J Water Resour Plann Manage, 134 (2): 147–160.
12. Cunha M and Sousa J, 1999. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. J Water Resour Plann Manage, 125(4): 215–221.
13. Eusuff MM and Lansey KE, 2003. Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm. J Water Resour Plann Manage, 129(3): 210–225.
14. Keedwell E and Khu ST, 2006. Novel cellular automata approach to optimal water distribution network





کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران  
دانشگاه تهران، تهران  
۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۵



- design. J Comput Civil Eng, 20(1): 49–56.
15. Suribabu CR and Neelakantan TR, 2006a. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. J Urban Water, 3(2): 111–120.
  16. Maier HR, Simpson AR, Zecchin AC, Foong WK, Phang KY, Seah HY and Tan CL, 2003. Ant colony optimization for design of water distribution systems. J. Water Resour Plann Manage, 129(3): 200–209.
  17. Zecchin AC, Maier HC, Simpson AR, Leonard M and Nixon JB, 2007. Ant colony optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithms. J Water Resour Plann Manage, 133(1): 87–92.
  18. Andrade-Campo. Et al, 2012, Analysis of diverse optimisation algorithms for pump scheduling in water supply systems, International Conference on Engineering Optimization EngOpt 2012 – 3<sup>rd</sup>
  19. Mackle G, Savic D. A., Walters G. A, 1995. "Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply", GALESIA, 95. Conference publication 4/4,400-405, London: Institute of Electrical Engineering;.