

## تنظیم بهینه‌ی تلمبه‌های دور متغیر در شبکه‌ی توزیع آب با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی با استفاده از الگوریتم G-JPSO

رسول رجب پور<sup>۱\*</sup>، محمدحسین احمدی<sup>۲</sup>، ناصر طالب بیدختی<sup>۳</sup>، غلامرضا رخشنده رو<sup>۴</sup>

### چکیده

در این تحقیق با در نظر گرفتن تلمبه دور متغیر، تأثیر تغییر دور بر عملکرد تلمبه، هیدرولیک شبکه و میزان کارمایه مصرفی در شبکه توزیع آب در دو حالت تک هدفه و چندهدفه با استفاده از الگوریتم جدید G-JPSO بررسی شد. تابع هدف در مسئله‌ی تک هدفه به حداقل رساندن هزینه‌ی انرژی مصرفی در طول شبانه روز است و متغیرهای تصمیم میزان دور تلمبه در ساعات مختلف شبانه‌روز بود. در مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه، هدف اول حداقل ساختن هزینه کارمایه مصرفی و هدف دوم حداکثر نمودن قابلیت اطمینان هیدرولیکی تلمبه و گره و یا تلفیقی از آنها بود. جهت تعیین برنامه‌ی بهره‌برداری بهینه‌ی تلمبه‌ها یک شبیه بهینه‌یابی- شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌یابی G-JPSO تهیه شد. در این شبیه الگوریتم در محیط MATLAB با بخش هیدرولیکی شبیه EPANET به عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات تلفیق گردید. شبیه پیشنهادی در شبکه‌ی توزیع ونزیل استفاده شد و دستورالعمل بهره‌برداری بهینه‌ی استخراج و نتایج با الگوریتم JPSO و جامعه مورچگان مقایسه گردید. نتایج تحقیق نشان دادند که در مسئله‌ی تک هدفه جواب حاصله از الگوریتم G-JPSO نسبت به JPSO و ACO به ترتیب ۳/۲۸ و ۰/۳۸ درصد بهتر شد، و در حالت کلی هزینه‌ی کارمایه مصرفی تلمبه‌های دور متغیر نسبت به تلمبه‌های دور ثابت پایین‌تر گردید. در مسئله‌ی چند هدفه در تمام حالات بهینه‌سازی الگوریتم G-JPSO توانست در مقایسه با الگوریتم ACO به نقاطی دست یابد که علاوه بر کاهش هزینه، قابلیت اطمینان بالاتری را دارا باشند.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی چندهدفه، قابلیت اطمینان، بهره‌برداری، تلمبه دور متغیر، G-JPSO.

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بیضا، دانشگاه آزاد اسلامی، بیضا، ایران.

<sup>۲</sup> استاد، بخش مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۳</sup> استاد، بخش مهندسی راه و ساختمان، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

<sup>۴</sup> استاد، بخش مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

## مقدمه

در آغاز در طراحی و بهره برداری شبکه‌های توزیع آب، صرفاً قیود عرفی شبکه‌های توزیع آب ذکر شده در معیارها همانند حداقل و حداکثر سرعت و فشار، مثبت بودن بده‌ها و ارضا روابط پیوستگی در حل مسائل بهینه‌سازی مورد توجه بود. ولی از اواسط دهه‌ی هشتاد میلادی این واقعیت توجه شد که یک مسئله‌ی بهینه‌سازی باید علاوه بر شرایط بهنجار، رفتار شبکه در شرایط بحرانی را نیز مدنظر قرار دهد. با استفاده از مفهوم قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع آب، محققین زیادی به بررسی وضعیت شبکه در شرایط تحویلی پرداختند (تابش، ۱۳۹۵).

قابلیت اطمینان عبارت است از احتمال اینکه یک سامانه در یک دوره‌ی زمانی معین و در محیطی مشخص، وظیفه‌اش را در محدوده‌ی تعریف شده به خوبی انجام دهد (بازوسکی<sup>۱</sup>، ۱۹۶۱). با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان مسائل به صورت چندهدفه تعریف گردیدند. پاراسد و پارک<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) از ترکیب الگوریتم ژنتیک چندهدفه و EPANET برای طراحی بهینه شبکه‌های توزیع آب استفاده کردند. توابع هدف عبارت بودند از کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان. در این تحقیق از چند شاخص مختلف برای ارزیابی قابلیت اطمینان و افزونگی استفاده شده و نتایج حاصله از بهینه‌سازی با شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان با هم مقایسه گردیده است. در شاخص ارائه شده، اثرات قطر لوله‌های ورودی به هر گره در تخمین افزونگی گره و در نهایت شبکه در نظر گرفته شده است. این شاخص، از سیاست طراحان، برای فراهم کردن فشاری بیش از فشار حداقل، در نقاط مصرف و طراحی حلقه‌های مطمئن، تبعیت می‌کند.

رکا<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸) عملکرد روش‌های بهینه‌سازی فراکاوشی را برای طراحی بهینه‌ی شبکه‌های توزیع آب شهری با در نظر گرفتن دو تابع هدف کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی شاخص برگشت پذیری ارزیابی و مقایسه کردند. برای این منظور نرم افزاری به نام MENOME توسعه داده شد که از سه قسمت شبیه بهینه‌سازی، شبیه تحلیل هیدرولیکی

EPANET و رابط نموداری تشکیل شده است (تابش، ۱۳۹۵).

قاجارنیا (۲۰۰۹) روشی را برای طراحی بلندمدت شبکه‌های توزیع آب ارائه کرد. در این روش که طراحی پویا نامیده می‌شود، حالت‌های طراحی اولیه و طراحی عملیات ترمیم و نگهداری به طور همزمان صورت می‌گیرد. در این تحقیق از ترکیب شبیه تحلیل هیدرولیکی EPANET و الگوریتم چندهدفه جفت گیری زنبورعسل (MOHBM0) برای کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن قابلیت اطمینان شبکه استفاده شد.

دینی (۲۰۱۴) اطمینان کیفی را در شبکه‌ی توزیع آب به عنوان شاخصی جهت برنامه‌ریزی بهینه‌ی کیفی شبکه ارزیابی کرد. بررسی شاخص اطمینان کیفی به تنهایی نمی‌تواند قابلیت شبکه را ارزیابی کند و بایست به قابلیت اطمینان هیدرولیکی نیز توجه می‌شود؛ همچنین بررسی قابلیت اطمینان کیفی بدون در نظر گرفتن بحث طراحی بهینه‌ی شبکه خالی از اشکال نخواهد بود چراکه، طراحی شبکه با لوله‌های با قطر بزرگ و مخزن‌های ذخیره با حجم زیاد، اثر منفی بر کیفیت آب می‌گذارند، چون باعث می‌شوند که سرعت جریان و جابه‌جایی آب کم شود.

براردی و همکاران (۲۰۱۴) بهینه‌یابی کاهش آسیب‌پذیری در شبکه‌ی توزیع آب را با در نظر گرفتن سه قابلیت اطمینان مکانیکی انجام داد و به این نتیجه رسیدند که علاوه بر شکست‌هایی نظیر مخازن و تلمبه‌ها تغییرات پستی و بلندی نیز باعث اختلال در شبکه می‌شود.

قیسی و همکاران (۲۰۱۶) با ارائه‌ی یک شبیه رایانه‌ای جدید با دو هدف، پیدا کردن هزینه‌ی آبکشی کمتر و یافتن تلمبه کارآمدتر علاوه بر هزینه‌ی بهره برداری کمتر (برق مصرفی)، سامانه کاراتر (انتخاب تلمبه مناسب) گردید.

کارآموز و همکاران (۲۰۱۶) علاوه بر هزینه‌ی طراحی، با تکیه بر کیفیت زندگی طول عمر سامانه را تعیین نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان دادند که طول عمر کارایی بسیار کمتر از طول عمر طراحی است. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۱۷) به ارائه‌ی یک

3 Reza

1 Bazovski

2 Prasad Park

قابلیت اطمینان جدید مبتنی بر منطق فازی و بهینه یابی با روش جفت گیری زنبور عسل با حداقل سازی هزینه طراحی شبکه و افزایش قابلیت اطمینان هیدرولیکی پرداختند.

بخش عمده ای از کارمایه مصرفی در شبکه های توزیع آب مربوط به تلمبه های موجود در شبکه است. با تعیین برنامه ی زمانی مناسب بهره برداری از تلمبه های یک سامانه انتقال آب می توان صرفه جویی قابل توجهی را در میزان هزینه کارمایه مصرفی به دست آورد (رجب پور و همکاران، ۱۳۹۵).

مسئله بهره برداری بهینه ی پمپ ها در شبکه توزیع آب از لحاظ ریاضی، جزء مسائل غیرخطی بزرگ مقیاس می باشد، زیرا تابع هدف و قیود مسئله غیر خطی بوده و تعداد متغیرهای تصمیم و قیدهای مسئله نیز زیاد هستند. تابع هدف چنین مسئله ای به حداقل رساندن هزینه های بهره برداری از ایستگاه های پمپاژ در طول یک افق برنامه ریزی است که سامانه در طی آن مدت آب را آبکشی می کند (افشار و رجب پور، ۲۰۰۹).

در سال های اخیر تحقیقات زیادی درباره ی عملکرد بهینه ی تلمبه های دور ثابت و متغیر صورت گرفته است. رجب پور و افشار (۱۳۸۷) با استفاده از الگوریتم PSO برنامه بهره برداری بهینه از ایستگاه های آبکشی متوالی را با تلمبه های دور متغیر با هدف کمینه سازی هزینه د تلمبه ها می تواند به بهبود عملکرد منجر شود. و همکاران (۲۰۱۴) از الگوریتم اجتماع مورچگان جهت بهینه سازی برنامه ی پمپاژ در شبکه توزیع آب با استفاده از تلمبه دور متغیر در حالت تغییرات تقاضای آب در طول روز استفاده نمودند. آنها علاوه بر پیشنهادی جهت کاهش فضای جستجو نشان دادند که استفاده از تلمبه دور متغیر در برنامه ی بهره برداری از تلمبه می تواند به صرفه جویی بیشتر (در حدود ۱۰٪) در هزینه های کارمایه آبکشی در مقایسه با تلمبه های تک سرعت منجر شود.

در این پژوهش با در نظر گرفتن تلمبه دور متغیر و مقایسه ی آن با تلمبه دور ثابت، تأثیر تغییر دور بر عملکرد تلمبه، هیدرولیک شبکه و میزان کارمایه مصرفی در شبکه توزیع آب در دو حالت تک هدفه و چندهدفه با استفاده از الگوریتم جدید G-JPSO، با در نظر گرفتن قابلیت های اطمینان پمپ و گرهی و تلفیقی بررسی شده

کارمایه مصرفی ارائه نمودند. در ادامه ی این پژوهش، لویز<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۸) مسئله ی بهره برداری از تلمبه ها را با در نظر گرفتن تعداد روشن و خاموش کردن به عنوان یک محدودیت با استفاده از الگوریتم جامعه ی مورچگان انجام دادند. سانادا<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جفت گیری زنبور عسل دستورالعمل بهره برداری بهینه را از یک شبکه حلقوی با نیاز متغیر و تلمبه های دور متغیر تعیین نمودند.

هاشمی و همکاران (۲۰۱۱) از تلمبه های دور متغیر در شبکه های توزیع با هدف کاهش هزینه کارمایه مصرفی استفاده کردند. مطالعه آنها درباره ی شبکه توزیع و ردآور به موفقیت کاهش ۵/۴۳ درصدی در هزینه کارمایه مصرفی منجر شد. در ادامه مهزاد و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که استفاده از تلمبه های دور متغیر در شبکه های توزیع علاوه بر کاهش هزینه ی کارمایه، قابلیت اطمینان تامین آب را افزایش می دهد. هاشمی و همکاران (۲۰۱۲) با هدف بررسی کاهش سطح نشت و فشار بیش از حد در شبکه های توزیع آب برنامه ی بهینه ی بهره برداری از ایستگاه آبکشی (پمپاژ) را تعیین نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که از طریق برنامه ریزی هوشمند، علاوه بر صرفه جویی در هزینه های کارمایه، نشت و فشار موجود می تواند تا حد زیادی کاهش یابد. در این مقاله اشاره شده است که افزایش در تعداد هاشمی

است. در مطالعات قبلی چون پژوهش مهزاد (۲۰۱۴) اگرچه تلمبه دور متغیر در نظر گرفته شده است، ولی اثر آن با الگوریتم ACO در شبکه بررسی شده است. همچنین، در مطالعه فرماني و همکاران (۲۰۰۶) هرچند که هیدرولیک و سن آب شبکه مدنظر قرار گرفته است، ولی نوع تلمبه دور ثابت است. فتوحی و تابش (۱۳۹۵) بهینه یابی مصرف کارمایه در شبکه ی توزیع آب با در نظر گرفتن سه قابلیت اطمینان گرهی، تلمبه و کیفی را با الگوریتم ژنتیک انجام دادند.

## مواد و روش ها

### شبیه هیدرولیکی شبکه

جهت شبیه سازی هیدرولیکی شبکه و تعیین فراسنجهای هیدرولیکی لازم از شبیه EPANET2

<sup>1</sup> López

<sup>2</sup> Sanda

ماهیت پرش الگوریتم JPSO قابلیت حل مسائل گسسته نموداری را در آن ایجاد نموده و آنرا به عنوان G-JPSO<sup>۷</sup> نامیدند.

### تابع هدف

تابع هدف در مسئله بررسی شده به حداقل رساندن میزان هزینه‌ی کارمایه مصرفی در طول شبانه روز است. متغیرهای تصمیم میزان دور تلمبه در ساعات مختلف شبانه‌روز است. محدودیت‌های این مسئله را می‌توان به چند بخش، یکی مربوط به تلمبه‌های موجود و نیاز در پایین دست، و دیگری مربوط به مخازن ذخیره در هر ایستگاه و فشار گرهی تقسیم نمود. تابع هدف در این مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود (ون زیل، و همکاران ۲۰۰۴):

$$\text{MinCost} = \sum_{n=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_T} R_e(i).E_c(n,i).S(n,i) + \text{Penalty 1} + \text{Penalty 2} \quad (1)$$

در رابطه‌ی فوق  $N_p$  تعداد تلمبه‌ها،  $N_T$  تعداد بازه‌ی زمانی،  $S(n,i)$  مدت زمان بهره‌برداری تلمبه  $n$  در بازه زمانی  $i$ ،  $R_e(i)$  تعرفه انرژی در بازه  $i$  (\$/kWh)،  $E_c(n,i)$  انرژی مصرفی تلمبه  $n$  در بازه زمانی  $i$  (kW) هستند. انرژی مصرفی تلمبه به بده، ارتفاع آبکشی و بازده تلمبه بستگی دارد که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید (ون زیل و همکاران ۲۰۰۴):

$$E_c(n,i) = \frac{0.01019 \cdot Q(n,i) \cdot h(n,i)}{e(n,i)} \quad (2)$$

در این رابطه  $Q(n,i)$  بده آبدهی تلمبه  $n$  در بازه زمانی  $i$  (L/s)،  $h(n,i)$  ارتفاع آبدهی تلمبه  $n$  در بازه زمانی  $i$  (m)،  $e(n,i)$  بازده آبدهب تلمبه  $n$  در بازه زمانی  $i$  است. در پژوهش ون زیل و همکاران (۲۰۰۴) محدودیت مربوط به مخازن موجود در شبکه اعمال نشده است. در تابع هدف مذکور دو تابع جریمه جدید به تابع هدف اضافه گردیده است که در ادامه تشریح می‌شوند. Penalty 1: جریمه‌ای که برای عدول گزینه در نظر گرفته شده از تراز حداکثر و حداقل مجاز مخازن در نظر گرفته می‌شود. مقدار این جریمه از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

استفاده می‌شود. این شبیه به وسیله‌ی آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا و با استفاده از زبان برنامه نویسی C در چندین بخش برای شبیه‌سازی دوره زمانی طولانی (EPS<sup>۱</sup>) هیدرولیک و کیفیت آب در شبکه‌ی لوله‌های تحت فشار تهیه شده است. شبکه‌ی مورد تحلیل در این شبیه می‌تواند شامل لوله‌ها، گره‌ها، تلمبه‌ها، شیرها و مخزن‌ها و یا مخازن ذخیره‌ی آب باشد. شبیه EPANET مواردی را از قبیل جریان در لوله‌ها، فشار در هر گره، تراز آب در هر مخزن و غلظت مواد شیمیایی مختلف در کل شبکه از طریق شبیه‌سازی دوره زمانی طولانی شبیه‌سازی کند. علاوه بر غلظت مواد شیمیایی این شبیه از طریق شبیه‌سازی قادر است، سن آب و منبع آلودگی را نیز تعیین نماید (روسمن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۰).

### شبیه‌سازی

اولین بار کندی<sup>۳</sup> و ابره‌ارت<sup>۴</sup> (۱۹۹۷) با ایجاد تغییر ساده‌ای در ماهیت PSO معیار، این الگوریتم را برای حل مسائل ناپیوسته شناسه شده به صورت صفر و یک به کار بردند. در PSO معیار منظور از سرعت، بردار حرکت جزء در فضای جستجو است، اما در فضای گسسته دیگر نمی‌توان چنین معنایی را برای سرعت قائل بود. در این الگوریتم تحول یافته، سرعت آستانه‌ی احتمالی است که بر اساس آن متغیر  $x_{ij}$  مقدار صفر یا یک را اختیار می‌نماید.

مرونو-پرز<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۷) روش جدیدی را بر پایه‌ی PSO، برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی ابداع نمودند. آن‌ها با اشاره به این موضوع که در فضای گسسته سرعت به صورت بردار حرکت جزء در فضای جستجو قابل تعریف نیست، از وارد کردن آن در روش خود صرف نظر نمودند. در این روش حرکت یک جزء در فضای ناپیوسته به صورت پرش آن جزء از پاسخی به پاسخ دیگر، تعبیر می‌شود. چنین حرکتی را می‌توان به پرش قورباغه‌ها روی نیلوفرها تشبیه نمود. نام این الگوریتم PSO چنده<sup>۶</sup> (JPSO)، است. رجب‌پور و همکاران (۱۳۹۵) با اعمال تغییراتی در

<sup>5</sup> Morono-Perez

<sup>6</sup> Jumping Particle Swarm Optimization

<sup>7</sup> Graph-JPSO

<sup>1</sup> Extended Period Simulation

<sup>2</sup> Rossman

<sup>3</sup> Kennedy

<sup>4</sup> Eberhart

$$r_H(i, t) = \begin{cases} 0 & P(i, t) < P_{\min} \\ \frac{P(i, t) - P_{\min}}{P_{\text{des}} - P_{\min}} & P_{\min} < P(i, t) < P_{\text{des}} \\ \frac{P(i, t) - P_{\max}}{P_{\text{des}} - P_{\max}} & P_{\text{des}} < P(i, t) < P_{\max} \\ 0.25 & P(i, t) > P_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

که در آنها  $r_H(i, t)$  قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی در گره  $i$  و در زمان  $t$ ، فشار در گره  $i$  و در زمان  $t$   $P_{\min}$  فشار کمینه،  $P_{\text{des}}$  فشار مطلوب و  $P_{\max}$  فشار بیشینه می باشند.

آن گاه قابلیت اطمینان گرهی در زمان متوسط گیری رابطه ی فوق نسبت به تقاضای گره ها از معادلات زیر به دست  $Q_{i,t}^{\text{req}}$  می آید:

$$R_{H,t} = \frac{\sum_{i=1}^N r_H(i, t) \times Q_{i,t}^{\text{req}}}{\sum_{i=1}^N Q_{i,t}^{\text{req}}} \quad (8)$$

که در آن ها  $R_{H,t}$  قابلیت اطمینان گرهی در زمان  $t$  هست که با مبه وسیله ی گیری وزنی نسبت به تقاضای گره ها به دست می آید. در نهایت قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی از رابطه ی زیر قابل محاسبه هستند.

$$R_H = \frac{\sum_{t=1}^{NT} R_{H,t}}{NT} \quad (9)$$

که در آن  $R_H$  و  $N_T$  به ترتیب قابلیت اطمینان هیدرولیکی و تعداد کل بازه زمانی هستند.

هر تلمبه دارای منحنی بده - بارآبی می باشد که نقطه کار تلمبه از روی آن مشخص می شود و بسته به اینکه نقطه کار تلمبه در کدام قسمت منحنی بده - بارآبی قرار گیرد راندمان تلمبه متفاوت خواهد بود بنابراین از روی منحنی بازده تلمبه می توان مقدار قابلیت اطمینان تلمبه را در زمان  $t [R_{\text{pump}}(i, h)]$  را به دست آورد (فتوحی و تابش، ۱۳۹۵).

پس از محاسبه قابلیت اطمینان برای هر تلمبه و در هر زمان، قابلیت اطمینان تلمبه در زمان  $t$  از معادله زیر بدست می آید:

$$R_{\text{pump}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{NP} R_{\text{pump}}(i, t)}{NP} \quad (10)$$

$NP$  تعداد تلمبه های شبکه است. در نهایت قابلیت اطمینان تلمبه از رابطه ۱۱ قابل محاسبه است:

$$R_{\text{pump}} = \frac{\sum_{t=1}^{NT} R_{\text{pump}}(t)}{NT} \quad (11)$$

برای محاسبه ی قابلیت اطمینان تلفیقی، از رابطه ی زیر استفاده می شود:

$$\text{Penalty1} = \alpha \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{Nt} \sum_{t=1}^T \left( \frac{H_k^t}{H_{\min,k}} - 1 \right)^2 \\ + \\ \sum_{k=1}^{Nt} \sum_{t=1}^T \left( \frac{H_k^t}{H_{\max,k}} - 1 \right)^2 \end{array} \right\} \quad \forall \begin{cases} H_k^t < H_{\min,k} \\ H_k^t > H_{\max,k} \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه  $k$  شماره ی مخزن،  $Nt$  تعداد کل مخازن،  $t$  شماره ی بازه ی زمانی در نظر گرفته شده و  $T$  تعداد کل بازه های زمانی است که مقادیر عمق آب در مخازن محاسبه می شود.  $H_k^t$  مقدار عمق آب در مخزن  $k$ ام در دوره زمانی  $t$ ام است.  $H_{\min,k}$  و  $H_{\max,k}$  به ترتیب حداقل و حداکثر عمق مجاز آب در مخزن  $k$ ام هستند.

Penalty2: جریمه ای است که برای به وجود آمدن کمبود عمق در نظر گرفته می شود. کمبود عمق عبارت است از کمبود عمق مخزن ذخیره ای در انتهای دوره نسبت به عمق آن در ابتدای دوره. مقدار این جریمه از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\text{Penalty2} = \beta \left\{ \sum_{k=1}^{Nt} \left( \frac{H_k^T}{H_{\text{ini},k}} - 1 \right)^2 \right\} \quad (4)$$

در این رابطه  $H_k^T$  عمق آب مخزن  $k$ ام در انتهای دوره زمانی و  $H_{\text{ini},k}$  عمق اولیه ی آب در مخزن  $k$ ام می باشد. لازم به ذکر است که  $\alpha$  و  $\beta$  ضریب جریمه است و مقدار مناسب آن ها در مسئله بررسی شده پس از سعی و خطا به ترتیب برابر  $\alpha = 10^{10}$  و  $\beta = 10^{11}$  تعیین گردیده است.

قیدهای مربوط به ارتفاع معادل کارمایه حداقل و حداکثر گره ها و سرعت حداقل و حداکثر لوله ها به صورت روابط ۵ و ۶ بیان شوند. در آنها  $P_k$  ارتفاع معادل کارمایه در گره  $k$ ،  $P_{\min}$  و  $P_{\max}$  حداکثر ارتفاع معادل کارمایه مجاز در یک گره،  $V_{\min}$  و  $V_{\max}$  حداقل و حداکثر سرعت مجاز در لوله ها هستند.

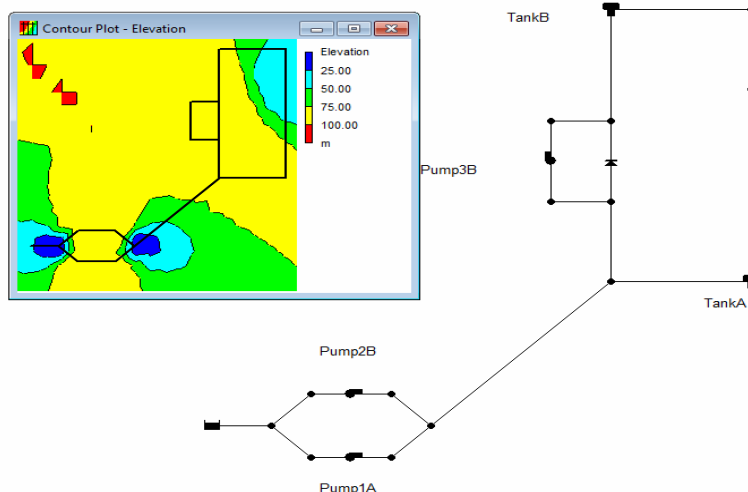
$$P_{\min} \leq P_k \leq P_{\max} \quad k = 1, \dots, K, \quad (5)$$

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

## روابط قابلیت اطمینان

هنگامی که دور تلمبه تغییر پیدا می کند، فشار در گره ها نیز دچار تغییر می شود. آن گاه می توان قابلیت اطمینان گرهی ناشی از تغییر فشار را در گره  $i$  و در زمان  $t$  از روابط زیر محاسبه نمود (فتوحی و تابش، ۱۳۹۵):

جانمایی شبکه و پستی و بلندی و موقعیت ارتفاعی هر نقطه نشان داده شده است. تلمبه 1A و 2B بصورت موازی به هم متصل شده‌اند. زمانی که هر کدام از تلمبه‌ها فعال می‌شود تلمبه 3B آب را از مخزن A به مخزن B منتقل می‌کند. ارتفاع مخزن B بالاتر از مخزن A قرار دارد. دوره برنامه‌ریزی تلمبه ۲۴ ساعت است که به ۲۴ دوره‌ی یک ساعته تقسیم می‌شود. در ابتدای دوره بهره‌برداری که مصادف با ابتدای دوره‌ی پیک هزینه‌ی برق (7:00 a.m) در نظر گرفته شده است، ۹۵ درصد حجم مخازن پر است. بنابراین ارتفاع اولیه‌ی آب مخزن A، ۴/۵ متر و ارتفاع اولیه‌ی آب مخزن B، ۹/۵ متر است (ون زیل و همکاران، ۲۰۰۴).



شکل ۱. جانمایی شبکه توزیع ون زیل در محیط EPANET

است، لذا لازم است در ابتدا این مسئله به یک مسئله گسسته تبدیل شده و سپس نمودار پاسخ اولیه تولید گردد.

قابل ذکر است با توجه به اینکه تلمبه دور متغیر در دوره‌های پایین تلمبه نمی‌تواند بارآبی لازم شبکه را تأمین کند، تلمبه خاموش می‌شود. به همین دلیل برای متغیر تصمیم دور تلمبه محدوده ۰/۸ تا یک در نظر گرفته شده است. البته در این محدوده باز هم ممکن است که در برخی زمانها تلمبه خاموش شود (فتوحی و تابش، ۱۳۹۵). لذا جهت گسسته سازی متغیر تصمیم دور تلمبه در محدوده ۰/۸ تا یک به فواصل ۰/۰۱ تعریف گردید یعنی برای هر تلمبه متغیر تصمیم به شکل (۱، ۰/۹۹، ۰/۹۸، ...، ۰/۸، ۰/۸، ۰) تعریف شد. دور صفر به منزله‌ی خاموش شدن تلمبه می‌باشد. قابل ذکر است با توجه به

$$R_{\text{pump,H,WA}} = \frac{\sum_{t=1}^{NT} \sqrt{R_{H,t} \times R_{\text{pump}}(t)}}{NT} \quad (12)$$

قابلیت اطمینان تلفیقی که در آن  $R_{\text{pump,H,WA}}$  قابلیت اطمینان تلفیقی (ترکیب قابلیت اطمینان تلمبه و هیدرولیک گرهی) می‌باشد.

## نتایج و بحث

### مطالعه نمونه‌ای

جهت بررسی عملکرد شبیه، شبکه‌ی توزیع آب ون زیل (۲۰۰۴) حل گردید (ون زیل و همکاران ۲۰۰۴). این شبکه شامل سه تلمبه و دو مخزن است. در شکل ۱

## مسئله‌ی بهینه سازی تک هدفه‌ی تنظیم بهینه تلمبه-

### ها در شبکه‌ی توزیع تلمبه‌های دور متغیر

برنامه‌ی زمانی مناسب بهره‌برداری شامل تعیین وضعیت بهینه‌ی دور تلمبه‌ها در طول ساعات شبانه‌روز می‌باشد. در این حالت محدودیت تعداد روشن و خاموش کردن هر تلمبه به تابع هدف اعمال نمی‌گردد و خود بهینه ساز مخیر به انتخاب دور مناسب یا خاموش کردن تلمبه در بازه‌ی زمانی مختلف خواهد بود. به نحوی که علاوه بر کاهش هزینه‌ی برق مصرفی نیاز گرهای مصرف و محدودیت‌های مسئله شامل حداقل فشار لازم در هر گره، حداقل و حداکثر ارتفاع مخازن و ... مرتفع گردد.

### اجرای شبیه و بررسی نتایج

مسئله‌ی تغییر دور در تلمبه‌ها یک مسئله‌ی پیوسته بوده و الگوریتم G-JPSO قادر به حل مسایل گسسته

محدوده ۰/۸ تا یک در نظر گرفته شده است (فتوحی و تابش، ۱۳۹۵).

اینکه تلمبه دور متغیر در دوره‌های پایین تلمبه نمی‌تواند بارآبی مورد نیاز شبکه را تأمین کند، تلمبه خاموش می‌شود. به همین دلیل برای متغیر تصمیم دور تلمبه

جدول ۱. مقایسه هزینه برق مصرفی پمپ‌های دور متغیر و ثابت

Algorithm						
ACO		JPSO		G-JPSO		هزینه (دلار)
دور متغیر	دور ثابت**	دور متغیر	دور ثابت*	دور متغیر	دور ثابت*	
۳۲۷/۷۹	۳۲۹/۱	۳۳۷/۲۵	۳۴۱/۴۱	۳۲۶/۵۳	۳۲۸/۶۹	The best
۳۴۹/۶۲	۳۵۷/۹	۳۴۱/۵۴	۳۴۷/۶۶	۳۳۱/۰۶	۳۳۶/۳۶	Median
۳۵۵/۴۹	۳۶۴/۷	۳۵۲/۸۷	۳۵۵/۸۱	۳۵۱/۵۲	۳۴۷/۵۸	The Worst
-۰/۳۸	-۰/۱۲	-۳/۲۸	-۳/۸۷	۰	۰	درصد بهبود پاسخها
۵۱۲	۴۲۵	۶۸۹	۵۱۹	۳۵۳	۳۳۷	میانگین زمان اجرای شبیه (ثانیه)

رجب پور و همکاران (۱۳۹۵) \*\* لوپز و همکاران (۲۰۰۸)

## مسئله بهینه سازی چند هدفه‌ی تنظیم بهینه‌ی تلمبه‌ها در شبکه‌ی توزیع

در این بخش مسئله بهینه سازی چندهدفه، که عملکرد شبکه‌های آبرسانی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی است، بررسی می‌شود که هدف اول حداقل ساختن هزینه انرژی مصرفی و هدف دوم حداکثر نمودن قابلیت اطمینان پمپ، فشار گرهی و یا تلفیقی هستند؛ یعنی در عمل لازم است تا برنامه کاری تلمبه‌ها در طول یک دوره زمانی بررسی عملکرد، مثلاً یک روز، به گونه ای تنظیم شود تا عمل آبدهی، با تغییرات تقاضا در طول روز، تغییر کند و تا حد ممکن با این تغییرات منطبق گردد. در کنار این امر لازم است تا قابلیت اطمینان تلمبه، فشار گرهی و یا تلفیقی در شبکه نیز حداکثر گردد. در سال‌های اخیر بهینه سازی شبکه‌های توزیع آب به منظور کاهش هزینه‌ها از اهداف اصلی مهندسان و مدیران می‌باشد. آبدهی آب بیشتر از حد لازم در شبکه‌های توزیع آب علاوه بر اینکه باعث مصرف بیش از اندازه کارمایه و افزایش هزینه‌های شبکه می‌گردد، باعث می‌شود که فشارهای گرهی بیشتر از فشار لازم گردد و این امر موجب افزایش نشت، شکست لوله‌ها و به تبع آن افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. از طرف دیگر در صورتی که ایستگاه آبدهی به خصوص در ساعات پرمصرف نتواند آب کافی را به مصرف کننده برساند از نقاط ضعف آن به حساب آمده و از قابلیت اطمینان آن کاسته می‌شود. به علاوه، تغییر کارکرد تلمبه می‌تواند سن آب در گره‌های شبکه را دستخوش تغییرات کند (فتوحی و تابش، ۱۳۹۵)

از مقایسه‌ی نتایج جدول ۱ می‌توان به چند نکته بارز پی برد:

- بهبود پاسخ‌های بهینه در الگوریتم G-JPSO نسبت به الگوریتم JPSO چه در تلمبه‌های دور متغیر و چه در تلمبه‌های دور ثابت و این بدین معناست که سازوکار پیشنهادی در بهبود ماهیت پرش کاملاً کارا بوده و همان طور که مشاهده می‌شود جوابهای حاصله از الگوریتم G-JPSO نسبت به الگوریتم JPSO به ترتیب ۳/۲۸ درصد در تلمبه‌های دور متغیر و ۳/۸۷ درصد در تلمبه‌های دور ثابت بهتر شده است.
  - جوابهای حاصله از الگوریتم G-JPSO نسبت به الگوریتم‌های ACO، ۰/۳۸ درصد در تلمبه‌های دور متغیر و ۰/۱۲ درصد در تلمبه‌های دور ثابت بهتر شده است که این مقادیر در اینگونه الگوریتم‌ها که کاملاً مبتنی بر تصادف است نمی‌تواند زیاد معنادار باشد.
  - استفاده از تلمبه‌های دور متغیر می‌تواند با افزایش قابلیت همپوشانی نمودار ستونی تولید و نمودار ستونی مصرف هزینه آبدهی را در شبکه پایین بیاورد. همانطور که مشاهده می‌شود در حالت کلی هزینه برق مصرفی تلمبه‌های دور متغیر نسبت به تلمبه‌های دور ثابت پایین‌تر است.
- در جدول ۲ فراسنجهای الگوریتم JPSO و G-JPSO در حل مسئله‌ی تنظیم بهینه تلمبه‌های دور متغیر ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ وضعیت دور تلمبه در ساعات مختلف برای پاسخ بهینه ارائه شده است.

جدول ۲. فراسنج‌های الگوریتم JPSO و G-JPSO در حل مسئله تنظیم بهینه تلمبه‌های دور متغیر

الگوریتم	تعداد تکرار	تعداد ذرات	C1	C2	C3	C4
G-JPSO	۱۲	۵۰۰	۰/۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱
JPSO	۴۰۰	۱۵	۰/۵۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵

جدول ۳. وضعیت دور تلمبه در ساعات مختلف برای پاسخ بهینه

ساعت	پمپ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
G-JPSO	1A	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۷	۰	۰	۰	۰	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۹
	2A	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹	۰/۸۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰/۸۸	۰
	3A	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۸۸
JPSO	1A	۰/۹۸	۰/۹۹	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۱	۰	۰/۹
	2A	۰	۰	۰/۹۳	۰/۹	۰/۸۲	۱	۱	۰	۰	۰	۰/۸۷	۰/۸۷
	3A	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹۹	۰/۹۴	۰/۹۸
ACO	1A	۰	۱	۰/۹۳	۰/۹	۰/۸۹	۰	۰	۰	۰	۰/۸۸	۱	۱
	2A	۱	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۴	۰	۰	۰	۱	۰/۹۹	۰/۹
	3A	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰/۸۹
G-JPSO	1A	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹۹	۱
	2A	۰	۰	۰	۰/۹۷	۱	۱	۰	۰	۱	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۸۹
	3A	۰	۰	۰/۹۳	۰/۹۳	۰	۰	۰	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۹	۰/۹۵	۱
JPSO	1A	۱	۱	۰/۹۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۹۷
	2A	۰	۰	۰	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۵	۰	۱	۱	۱	۰/۸۹
	3A	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۷	۰/۸۵	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۴
ACO	1A	۰	۰	۰	۰/۹۹	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱
	2A	۱	۰/۸۷	۰/۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۹
	3A	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹۳

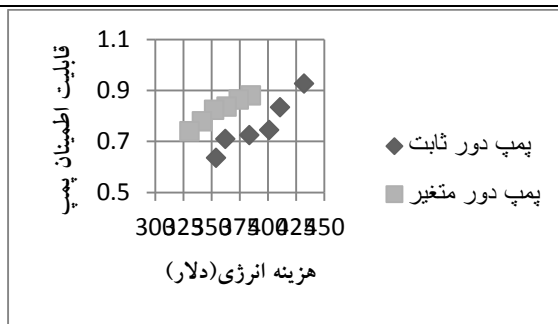
### بهینه‌سازی هزینه‌ی کارمایه و قابلیت اطمینان تلمبه

در جدول ۴ داده‌های بهینه‌ی دور هر سه تلمبه خروجی الگوریتم G-JPSO و ACO برای نقطه‌ی با بیشترین قابلیت اطمینان تلمبه دور متغیر ارائه شده است. در شکل ۲ منحنی تعامل بین هزینه‌ی انرژی و قابلیت اطمینان تلمبه بر اساس رابطه ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. از این شکل نتایج زیر را می‌توان استحصالی نمود:

- در حالت بهنجار که هر سه تلمبه ۲۴ ساعت شبانه روز روشن باشند، هزینه‌ی کارمایه برابر با ۴۳۲/۱ دلار است و قابلیت اطمینان تلمبه ۰/۹۲۸ است.
- با توجه به منحنی تعامل به دست آمده مشخص است که قابلیت اطمینان تلمبه با هزینه‌ی رابطه‌ی مستقیم

دارد یعنی هر چه هزینه بیشتر، قابلیت اطمینان تلمبه هم بیشتر. بدین معنی که هنگامی که نقطه‌ی کار تلمبه روی منحنی عملکرد در مکانی قرار گیرد که به ازای بارآبی و بده در آن بازده تلمبه حداکثر باشد، آنگاه قابلیت اطمینان تلمبه نیز حداکثر و برابر یک است؛ اما به هر میزان که نقطه‌ی کار تلمبه روی منحنی عملکرد از نقطه‌ای با حداکثر بازده فاصله بگیرد، از میزان قابلیت اطمینان تلمبه نیز کاسته می‌شود. مثلاً اگر به هر دلیلی یکی از پمپ‌های شبکه‌ی توزیع خاموش شده و یا اینکه دور تلمبه کاهش یابد، آن گاه ممکن است تلمبه دیگر برای جبران، بده بالایی را با بارآبی کم تولید نماید که این امر مطلوب نیست و از میزان قابلیت اطمینان تلمبه می‌کاهد.





شکل ۲. منحنی تعامل بین هزینه کارمایه و قابلیت اطمینان تلمبه (فتوحی و تابش، ۱۳۹۵)

جدول ۴. داده‌های بهینه دور هر سه تلمبه خروجی الگوریتم G-JPSO و ACO

ساعت	پمپ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
G-JPSO	1A	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰/۹
	2A	۰/۸۱	۱	۰/۹۰	۰/۸۷	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۹۷	۰	۰	۰	۰/۸۸	۰
	3A	۰/۸۷	۰/۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۸۹
ACO	1A	۰/۹۸	۰/۹۹	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۱	۰	۰/۹
	2A	۰/۹۷	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۲	۰/۹۳	۱	۰	۰	۰	۰/۹۸	۰
	3A	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۰/۸۹
ساعت	پمپ	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
G-JPSO	1A	۱	۰	۰/۹۳	۰/۹۵	۱	۰	۰	۰	۰	۰/۸۲	۰/۹	۰/۸۸
	2A	۰	۰	۱	۰/۹۷	۰/۹۷	۰	۰	۰	۱	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۸۲
	3A	۰	۰	۱	۰/۹۵	۰	۰	۰	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۳
ACO	1A	۱	۱	۰/۹۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۹۷
	2A	۰	۰	۰	۰/۹۷	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰/۹۸	۰/۸۹
	3A	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹۳

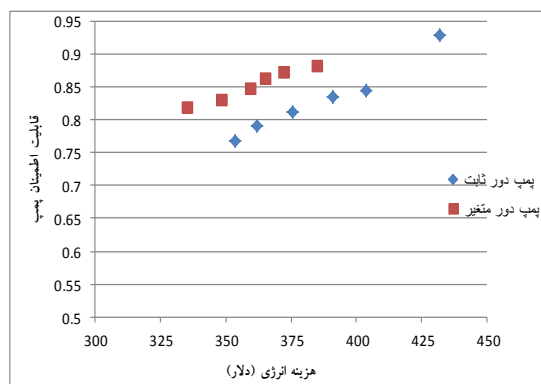
روابط ۱۰ و ۱۱ ارائه شده به وسیله ی فتوحی و تابش (۱۳۹۵) قابل نقد است چرا که در این رابطه زمانی که تلمبه خاموش است مقدار قابلیت اطمینان صفر خواهد شد و عملاً در خروجی شبیه، نقاط با قابلیت بالا هزینه بالاتری خواهند داشت. این در حالی است که منحنی بازده-بده یک منحنی صعودی نزولی است یعنی می‌توان با طراحی درست و یا بهره برداری مناسب و تغییر مناسب دور تلمبه نقطه کار تلمبه را به گونه ای تنظیم کرد که در حوالی بازده حداکثر قرار گیرد و این به معنی کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان تلمبه است؛ یعنی در عمل می‌توان نقاطی داشت که با صرف هزینه بهره‌برداری پایین قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند و منحنی تعامل دیگر آن شیب تند را نخواهد داشت. لذا رابطه قابلیت اطمینان تلمبه به شکل زیر اصلاح گردید:

- نقاط بهینه به دست آمده در تلمبه دور ثابت در قیاس با تلمبه دور متغیر هم دارای هزینه‌ی بیشتر و هم دارای قابلیت اطمینان تلمبه کمتری می‌باشد. بدین ترتیب، که با تغییر دور تلمبه قابلیت انطباق منحنی تولید آب با منحنی مصرف گره‌ها افزایش یافته و در نتیجه ضمن افزایش قابلیت اطمینان تلمبه، هزینه کارمایه مصرفی نیز کاهش می‌یابد. نکته مهم دیگر این است که نتایج تابع چند هدفه با تابع یک هدفه مشابه بود و در هر دو حالت هزینه‌های بهینه‌ی تلمبه‌های دور متغیر کمتر از تلمبه‌های دور ثابت شده است.

- شیب منحنی تعامل در هر دو حالت تلمبه دور ثابت و تلمبه دور متغیر بسیار تند است و این نشان می‌دهد که با افزایش اندکی در میزان هزینه کارمایه، قابلیت اطمینان تلمبه افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد.

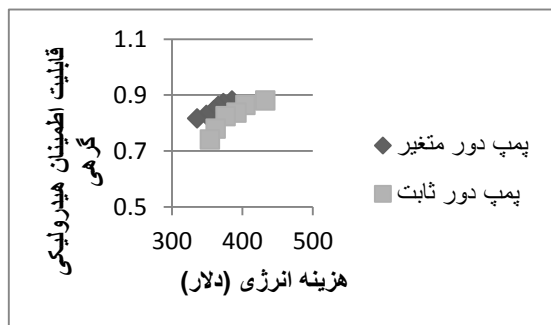
رابطه اصلاحی مجدداً شبیه اجرا گردید. در شکل ۳ منحنی تعامل جدید ارائه شده است. با توجه به منحنی نکات ذیل برداشت می‌شود:

- شیب منحنی تعامل در هر دو حالت تلمبه دور ثابت و تلمبه دور متغیر بسیار ملایم‌تر از حالت قبل شد.
- می‌توان نقاطی را داشت که با هزینه کم، قابلیت اطمینان بالا و قابل قبولی دارند.
- با رابطه اصلاحی نیز نقاط بهینه بدست آمده در تلمبه دور ثابت در قیاس با تلمبه دور متغیر هم دارای هزینه‌ی بیشتر و هم دارای قابلیت اطمینان تلمبه کمتری می‌باشد.



شکل ۳. منحنی تعامل بین هزینه کارمایه و قابلیت اطمینان تلمبه (رابطه اصلاحی)

در هر دو حالت دور متغیر و ثابت نسبت به الگوریتم جامعه مورچگان شده است.



شکل ۴. منحنی تعامل بین هزینه کارمایه و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی

$$R_{\text{pump}}(t_{on}) = \frac{\sum_{i=1}^{NP} R_{\text{pump}}(i, t)}{NP} \quad (13)$$

NP تعداد پمپ‌های شبکه و  $t_{on}$  ساعاتی است که

تلمبه روشن می‌باشد. در نهایت قابلیت اطمینان تلمبه‌ها را با رابطه ۱۴ قابل محاسبه است. در این رابطه  $NT_{on}$  تعداد کل ساعاتی است که تلمبه روشن است.

$$R_{\text{pump}} = \frac{\sum_{t=1}^{NT_{on}} R_{\text{pump}}(t_{on})}{NT_{on}} \quad (14)$$

همانطور که مشاهده می‌شود در این رابطه زمانیکه تلمبه روشن است و منحنی مدار سامانه قابل ترسیم است مقدار قابلیت اطمینان تلمبه محاسبه می‌شود. بر اساس

## بهینه‌سازی هزینه انرژی و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی

در جدول ۵ داده‌های بهینه دور هر سه تلمبه خروجی الگوریتم G-JPSO و ACO برای نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان گرهی تلمبه دور متغیر ارائه شده است. در شکل ۴ منحنی تعامل بین هزینه انرژی و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گرهی حاصل از دو الگوریتم G-JPSO و ACO نشان داده شده است. از این منحنی نتایج زیر را می‌توان استحصالی نمود:

نکته مهم و جالب بدست آمده این است که بسیاری از نقاط بدست آمده منحنی تعامل ناشی از الگوریتم G-JPSO هم دارای هزینه‌ی کمتر و هم دارای قابلیت اطمینان بیشتر

جدول ۵. داده‌های بهینه دور هر سه تلمبه خروجی الگوریتم G-JPSO و ACO برای نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان گرهی

ساعت	پمپ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
G-JPSO	1A	۰/۹۳	۱	۰/۹۱	۰/۸۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۱
	2A	۰/۸۵	۱	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۹۷	۰	۰	۰	۰/۸۸	۰
	3A	۱	۰/۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۸۹
ACO	1A	۰/۹۷	۰/۹۹	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۱	۰	۰/۹
	2A	۱	۰/۹۵	۰/۸۳	۰/۹۳	۰	۰/۹۳	۱	۰	۰	۰	۰/۹۸	۰
	3A	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۰/۸۹
ساعت	پمپ	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
G-JPSO	1A	۱	۰	۰/۸۸	۰/۸۵	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۸۳	۰/۹	۰/۸۱
	2A	۰	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۷	۰	۰	۱	۰/۹۱	۱	۰
	3A	۰	۰	۱	۰/۹۵	۰	۰	۰	۰/۸۷	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۸۹	۰
ACO	1A	۰/۸۹	۱	۰/۹۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰/۹۶	۱
	2A	۰	۰	۰	۰/۹۷	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰/۹۸	۱
	3A	۰	۰	۱	۰/۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹۲

ارتفاع نصب مخزن نیز خود مستلزم هزینه بیشتر در دوران ساخت است، لذا بایست تحلیل جامعی از طراحی و بهره‌برداری داشت که می‌تواند موضوعات جالب تحقیقاتی در ادامه این پژوهش باشد.

### بهینه‌سازی هزینه انرژی و قابلیت اطمینان تلفیقی

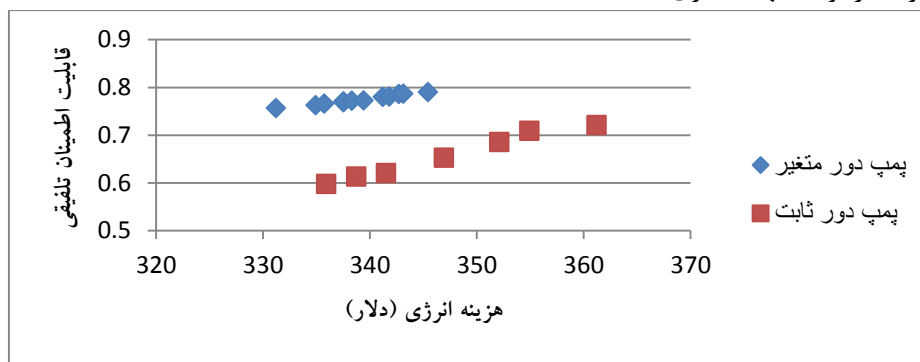
در جدول ۶ داده‌های بهینه دور هر سه تلمبه خروجی الگوریتم G-JPSO و ACO برای نقطه‌ای با بیشترین قابلیت اطمینان تلفیقی تلمبه دور متغیر ارائه شده است. در شکل ۵ منحنی تعامل بین هزینه کارمایه و قابلیت اطمینان تلفیقی (قابلیت اطمینان تلمبه و گره) حاصل از دو الگوریتم G-JPSO و ACO نشان داده شده است. از این منحنی نتایج زیر را می‌توان استحصالی نمود:

- مانند قابلیت اطمینان تلمبه و گره بسیاری از نقاط به دست آمده منحنی تعامل ناشی از الگوریتم G-JPSO هم دارای هزینه‌ی کمتر و هم دارای قابلیت اطمینان بیشتر در هر دو حالت دور متغیر و ثابت نسبت به الگوریتم جامعه مورچگان شده است.

حتی با هزینه بیشتر برای دور ثابت، قابلیت اطمینان در حالت دور متغیر از قابلیت اطمینان حالت دور ثابت بیشتر شده است. علت این امر در این است که ایستگاه آبدهی به خصوص در ساعات پرمصرف با تغییر مناسب دور تلمبه و استفاده کافی از ظرفیت مخزن توانسته است که آب کافی را به مصرف کننده برساند و فشار لازم در گره‌های پرمصرف را تامین نموده و قابلیت اطمینان گرهی را افزایش دهد.

در شبکه‌ها در صورت طراحی مناسب حجم و ارتفاع مخزن می‌توان به نقاط بهینه‌ای دست یافت که ضمن دارا بودن هزینه بهره‌برداری کمتر دارای قابلیت اطمینان گرهی بالایی باشند. زیرا در زمانی که ساعات پرباری برق می‌باشد طبیعتاً هزینه برق نیز بالا خواهد بود در صورتی که حجم مخزن مناسب باشد شبیه تمایل دارد که در ساعات کم باری مخزن را پر نموده و در ساعات پرباری تلمبه‌ها را خاموش نگه دارد و شبکه از ذخیره مخزن استفاده نماید. در این وضعیت در صورتی که مخزن در ارتفاع مناسبی ساخته شده باشد می‌تواند فشار گرهی مناسبی را تامین نماید و این یعنی در عین حالی که هزینه بهره‌برداری پایین است، قابلیت اطمینان بالایی بدست خواهد آمد. افزایش حجم مخزن یا تغییر در

- در حالت تلمبه دور متغیر و ثابت نقاط با قابلیت اطمینان تلفیقی بیشتر نیز وجود دارند، ولی به علت هزینه‌ی خیلی زیاد، از فرآیند بهینه سازی حذف شده اند.
- به طور کلی قابلیت اطمینان در حالت دور متغیر از قابلیت اطمینان حالت دور ثابت بیشتر شده است.



شکل ۵. منحنی تعامل بین هزینه کارمایه و قابلیت اطمینان تلفیقی

جدول ۶. داده‌های بهینه دور هر سه تلمبه خروجی الگوریتم G-JPSO و ACO برای نقطه با بیشترین قابلیت اطمینان تلفیقی

ساعت	پمپ	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
G-JPSO	1A	۱	۱	۰/۹۳	۰/۹۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹	۱
	2A	۰/۹۷	۱	۰/۸۱	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۹	۰/۹۲	۰	۰	۰	۰/۸۸	۰
	3A	۱	۰/۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۸۹
ACO	1A	۰/۸۵	۰/۸۷	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۹	۰	۰/۹
	2A	۰/۹۳	۰/۹۷	۰/۸۸	۱	۰	۰/۹۳	۱	۰	۰	۰	۰/۹۸	۰
	3A	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰/۹۹
ساعت	پمپ	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
G-JPSO	1A	۱	۰	۰/۸۸	۰/۹	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۸۱	۰/۹۶	۰/۹۳
	2A	۰	۰	۰/۸۸	۰/۹۷	۰	۰	۰	۰	۱	۰/۹۳	۱	۰
	3A	۰	۰	۱	۰/۹۵	۰	۰	۰	۰/۹۸	۰/۸۹	۰/۹۵	۰	۰
ACO	1A	۰/۸۹	۱	۰/۹۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۶	۰/۹۶	۱
	2A	۰	۰	۰/۹۷	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۰/۹۸	۱
	3A	۰	۰	۱	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۸۸

### نتیجه گیری

نیاز گره‌های مصرف و محدودیت‌های مسئله شامل حداقل فشار لازم در هر گره، حداقل و حداکثر ارتفاع مخازن و ... مرتفع گردد و متغیرهای تصمیم میزان دور تلمبه در ساعات مختلف شبانه‌روز بود. در این حالت محدودیت تعداد روشن و خاموش کردن هر تلمبه به تابع هدف اعمال نمی‌گردد و خود بهینه ساز مخیر به انتخاب دور مناسب یا خاموش کردن تلمبه در بازه زمانی مختلف بود. اما در مسئله بهینه سازی چندهدفه که عملکرد شبکه‌های آبرسانی با در نظر

در این تحقیق با در نظر گرفتن تلمبه دور متغیر و مقایسه‌ی آن با تلمبه دور ثابت، تأثیر تغییر دور در عملکرد پمپ، هیدرولیک شبکه و میزان کارمایه مصرفی در شبکه‌ی توزیع آب در دو حالت تک هدفه و چندهدفه با استفاده از الگوریتم جدید G-JPSO بررسی شد. تابع هدف در مسئله تک هدفه به حداقل رساندن هزینه انرژی مصرفی در طول شبانه روز به نحوی که علاوه بر کاهش هزینه‌ی برق مصرفی

قابلیت اطمینان تلمبه، شیب منحنی تعامل در هر دو حالت تلمبه دور ثابت و تلمبه دور متغیر بسیار ملایم تر شد. کمترین مقدار قابلیت اطمینان تلمبه در مسئله دور متغیر ۰/۷۴۱ با هزینه ۳۲۸/۲ دلار بود در حالی که این فراسنج در رابطه اصلاحی ۰/۸۱۷ با هزینه ۳۷۳/۳ دلار است. در تمام حالات بهینه‌سازی الگوریتم G-JPSO توانست در مقایسه با الگوریتم ACO به نقاطی دست یابد که علاوه بر کاهش هزینه‌ی قابلیت اطمینان بالاتری دارا باشد. مقایسه نتایج در مسائل مختلف حل شده نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای الگوریتم ارائه شده در پیدا کردن جواب‌هایی نزدیک به جواب بهینه با صرف هزینه محاسباتی مناسب است.

### مراجع

- ۱) تابش مسعود (۱۳۹۵). شبیه‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ اول. تهران.
- ۲) رجب‌پور، ر.، افشار، م. (۱۳۸۷). بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی با استفاده از الگوریتم PSO. مجله آب و فاضلاب، سال ۸۷، شماره ۶۶.
- ۳) رجب‌پور، ر.، طالب بیدختی، ن.، رخشنده‌رو، غ. (۱۳۹۵). ارائه الگوریتم جدید G-JPSO و توسعه آن در تنظیم بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع آب. مجله آب و فاضلاب، سال ۹۵، شماره ۶.
- ۴) فتوحی، م.، تابش، م. (۱۳۹۵). بهینه‌سازی هزینه انرژی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان. نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال ۹۵، شماره ۲.
- 5) Afshar, H., Rajabpour, R. (2009). Application of Local and Global Particle Swarm Optimization Algorithms to Optimal Design and Operation of Irrigation Pumping Systems. *Irrig. and Drain.* 58(3): 321-331.
- 6) Bazovski, I. (1961). Reliability theory and practice, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N J. Bhave, P.R., 1978, "Noncomputer optimization of single source networks", *Journal of Environmental Engineering*, 104, 799-813.

گرفتن هیدرولیک آب بررسی می‌شود هدف اول حداقل ساختن هزینه انرژی مصرفی و هدف دوم حداکثر کردن قابلیت اطمینان هیدرولیکی تلمبه و گره و یا تلفیقی بود؛ یعنی در عمل لازم است تا برنامه کاری تلمبه‌ها در طول یک دوره زمانی بررسی عملکرد، مثلاً یک روز، به گونه ای تنظیم شود تا عمل آبدهی، با تغییرات تقاضا در طول روز، تغییر کند و تا حد ممکن با این تغییرات منطبق گردد. در کنار این امر لازم است تا قابلیت اطمینان هیدرولیکی و تلفیقی در شبکه نیز حداکثر گردد. جهت تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه تلمبه‌ها یک شبیه بهینه‌یابی - شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌یابی G-JPSO تهیه شد. در این شبیه الگوریتم پیشنهادی در محیط MATLAB با بخش هیدرولیکی شبیه EPANET به عنوان مرجعی از فرمان‌ها و اطلاعات تلفیق گردید و شبیه پیشنهادی در شبکه توزیع ونزیل استفاده شد و دستورالعمل بهره‌برداری بهینه استخراج و نتایج با الگوریتم JPSO و جامعه مورچگان مقایسه گردید. نتایج تحقیق نشان داد در حالت کلی هزینه کارمایه مصرفی تلمبه‌های دور متغیر نسبت به پمپ‌های دور ثابت پایین تر است، مثلاً جواب‌های حاصله از الگوریتم G-JPSO در حالت دور متغیر حدود ۲ درصد نسبت به تلمبه دور ثابت بهتر شده است. در مسئله تک هدفه جواب حاصله از الگوریتم G-JPSO نسبت به JPSO و ACO به ترتیب ۳/۲۸ و ۰/۳۸ درصد بهتر شده است. میانگین زمان مورد نیاز برای اجرای برنامه با رایانه شبیه Core i5-2430M 2.4GHz برای الگوریتم G-JPSO ۳۵۳ ثانیه بود در حالی که این میانگین برای دو الگوریتم JPSO و ACO به ترتیب ۶۸۹ و ۵۱۲ ثانیه بوده است. در مسئله چند هدفه نقاط بهینه بدست آمده در بهینه‌سازی هزینه انرژی و قابلیت اطمینان تلمبه در تلمبه دور ثابت در مقایسه با تلمبه دور متغیر هم دارای هزینه‌ی بیشتر و هم دارای قابلیت اطمینان تلمبه کمتری می‌باشد به طوری که در میانه پاسخ‌ها هزینه کارمایه ۱۳ درصد کاهش و قابلیت اطمینان ۱۲ درصد افزایش یافته است. در بهینه‌سازی هزینه کارمایه و قابلیت اطمینان گره‌ی حتی با هزینه بیشتر، قابلیت اطمینان در حالت دور متغیر از قابلیت اطمینان حالت دور ثابت بیشتر شده است به طوری که در میانه پاسخ‌ها قابلیت اطمینان حدود ۷ درصد افزایش یافته است. همچنین با اصلاح رابطه

- 14) Hashemi, S. S., Tabesh, M., and Atae Kia, B. (2014). Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks. *Urban Water Journal*, 11(5):335-347.
- 15) Karamuz M., Yaseri K., Nazif S. (2016). Reliability-based assessment of lifecycle cost of urban water distribution infrastructures. *Journal of Infrastructure Systems*. Vol. 23. Iss. 2.
- 16) Kennedy, J. and R. Eberhart. (1995). Particle Swarm Optimization. Proceedings of the International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE, Piscataway: 1942-1948
- 17) López-Ibáñez, M., Prasad, T. D., and Paechter, B. (2008). Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 337–346.
- 18) Mehzad, N., Tabesh, M., and Hashemi, S. S. (2012). Reliability of water distribution networks due to pumps failure: comparison of VSP and SSP application. *Drinking Water Engineering and Science*, 5:351-373.
- 19) Moreno-Perez, J. A., Castro-Gutierrez, J. P., Martinez-Garcia F. J., Melian, B., Moreno-Vega, J. M. and Ramos, J. (2007), Discrete Particle Swarm Optimization for the p-median problem. In: Proceedings of the 7th Metaheuristics International Conference, Montreal, Canada.
- 20) Prasad, T.D. & Park, N.S. (2004). Multi objective genetic algorithm for design of water distribution networks., *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73-82.
- 21) Reza, J., J. Martnez, R. Baños, and C. Gil. (2008). Optimal design of gravity-fed looped water distribution networks
- 7) Berardi, L.; Ugarelli, R.; Røstum, J. Giustolisi, O. (2014). Assessing mechanical vulnerability in water distribution networks under multiple failures. *Water Resour. Res.*, 50, 2586–2599.
- 8) Dini, M. (2014). Quality based optimal renovation planning for water distribution networks considering reliability indices. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian).
- 9) Farmani, R., Walters, G. and Savic, D. (2006). Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality. *Journal of Hydroinformatics*, No 8 (3), pp. 165-179.
- 10) Ghajarnia, N., (2009)., Dynamic multi criteria design and development of urban water distribution network., MSc Thesis, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 11) Gheisi, A.; Forsyth, M.; Naser, G. (2016). Water Distribution Systems Reliability: A Review of Research Literature. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 142, 04016047.
- 12) Hashemi, S. S., Tabesh, M., and Atae Kia, B. (2011). Ant-Colony optimization of energy cost in water distribution systems using variable speed pumps, in: Proceedings of 4th ASCE-EWRI International Perspective on Water Resources and The Environment, 4–6 January, National University of Singapore, Singapore.
- 13) Hashemi, S. S., Tabesh, M., and Atae Kia, B. (2012). Scheduling and operating costs in water distribution networks. *Water Management*., 166(8):432-442.

considering the resilience index, J. Water Resour. Plann. Manage. Div., 134(3), 234–238.

22) Rossman, L. A. (2000). EPANET2 Users Manual, Risk Reduction Engineering Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

23) Sanda-Carmen, Radu P., Andrei M. (2010). Pumping Stations Scheduling for a Water Supply System With Multiple Tanks. U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 72, Iss. 3, 129-140.

24) Vanzyl, J. E., Savic, D. A., and Walters, G. A. (2004). Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. J. Water Resour. Plann. Manage., 130(2), 160–170.

