

ارائه الگوریتم جدید G-JPSO و توسعه آن در کنترل بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع آب

رسول رجب پور^۱، ناصر طالب بیدختی^۲، غلامرضا رخشنده‌رو^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (نویسنده مسئول) ۳۸۴۰۷۴۵۷ (۰۷۱) rasoul_1360@yahoo.com
۲- استاده، بخش مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه شیراز، شیراز

(دریافت ۹۳/۹/۱۰ پذیرش ۹۴/۳/۲۷)

چکیده

اخیراً از روش‌های فراکاوشی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای حل مسائل پیچیده مهندسی استفاده زیادی شده است. یکی از این روش‌ها الگوریتم JPSO است. در این پژوهش با اعمال تغییراتی ابتکاری در ماهیت پرسش این الگوریتم، امکان حل مسائل مبتنی بر ساخت گراف در آن فراهم شد و الگوریتم جدیدی به نام G-JPSO ارائه شد. در این پژوهش کاربرد الگوریتم جدید توسعه داده شده در حل تابع فلنچر-پاول و مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع آب مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. کنترل بهینه پمپ‌ها شامل برنامه زمانی مناسب بهره‌برداری از قبیل تعیین وضعیت روشن و خاموشی هر یک از پمپ‌ها در بازه زمانی مورد نظر بود، به نحوی که علاوه بر کاهش هزینه برق مصرفی نیاز گره‌های مصرف و محدودیت‌های مسئله شامل حداقل فشار مورد نیاز در هر گره، حداقل و حداکثر ارتفاع مخازن و غیره مرتفع شود. در این پژوهش محدودیت دیگری شامل حداکثر تعداد روشن و خاموش کردن هر پمپ نیز به تابع هدف اعمال شد. برای تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها یک مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی G-JPSO و JPSO تهیه شد. از مدل پیشنهادی برای تعیین برنامه بهره‌برداری شبکه توزیع ون زیل استفاده شد. مقایسه نتایج این الگوریتم در مسائل پیشنهادی با نتایج الگوریتم‌های جامعه مورچگان، ژنتیک و JPSO نشان‌دهنده توانایی بالای الگوریتم ارائه شده در پیدا کردن جواب‌هایی نزدیک به جواب بهینه با صرف هزینه محاسباتی مناسب است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، ایستگاه پمپاژ، بهره‌برداری، شبکه‌های توزیع آب، G-JPSO

۱- مقدمه

بهینه‌سازی در علوم ریاضی و کامپیوتر، فرایند انتخاب یا پیدا کردن بهترین عضو در مجموعه‌ای از گزینه‌های موجود است. هر فرایندی پتانسیل بهینه شدن دارد و مسائل پیچیده می‌توانند در زمینه‌های علوم مهندسی، اقتصادی و تجاری به صورت مسائل بهینه‌سازی، مدل‌سازی شوند. هدف از مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی، حداقل کردن زمان، هزینه و ریسک یا حداکثر کردن سود، کیفیت و اثربخشی است. در سال‌های اخیر پژوهشگران در اکثر مسائل پیچیده بهینه‌سازی با پیاده‌سازی روش‌های فرا ابتکاری به نتایج مناسبی دست یافته‌اند.

در دهه‌های اخیر برای حل مسائل بهینه‌سازی، روش‌های مختلفی توسعه داده شده است. این الگوریتم‌ها به دو دسته قطعی و احتمالی طبقه‌بندی می‌شوند [۱]. الگوریتم‌های قطعی روش‌های جستجوی محلی بر پایه گرادیان هستند که به اطلاعات اساسی

حرکتی برای پیدا کردن یک جواب شدنی نیاز دارند [۲]. در مسائلی که فضای حل غیر محدب باشد، پیدا کردن جواب بهینه سراسری با استفاده از این الگوریتم‌ها کار آسانی نیست. به عبارتی، برای بعضی از مسائل غیر محدب، چندین بهینه حل وجود دارد. در چنین مسائلی کیفیت جواب‌های نهایی به مقدار اولیه معینی نیاز دارد. به همین دلیل پژوهشگران، به استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی احتمالی روی آورده‌اند. این الگوریتم‌ها از پدیده‌های طبیعی الهام گرفته‌اند و به اطلاعات حرکتی برای پیدا کردن جواب نیاز ندارند. مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی احتمالی شامل الگوریتم ژنتیک، جستجوی ممنوع، بهینه‌سازی ذرات گروهی، شبیه‌سازی تبرید و کلونی مورچگان است. در سال‌های اخیر الگوریتم‌های ترکیبی محلی سراسری برای حل مسائل غیر محدب با موفقیت اجرا شده‌اند [۲]. این الگوریتم‌ها جنبه‌های جستجوی محلی و جستجوی سراسری را در ساختارشان برای جستجوی مؤثر ترکیب می‌کنند. در

این الگوریتم‌ها فرایند جستجوی سراسری با چندین نقطه آغاز و جستجوی فضای حل از این نقاط شروع می‌شود. سپس الگوریتم‌های جستجوی محلی، حل بهینه را در این فضاها پیدا می‌کنند. در این الگوریتم‌ها ممکن است فضای جستجو به صورت پیوسته و یا گسسته باشد. یکی از این الگوریتم‌ها که در سال‌های اخیر در حوزه مهندسی آب بسیار پرکاربرد بوده است، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات گروهی است که در این مقاله تلاش بر آن بود که اولاً آن را در فضای گسسته توسعه داد و قابلیت حل مسائل گرافی در آن ایجاد نمود و ثانیاً عملکرد آن را در مسئله بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع آب مورد سنجش قرار داد.

بخش عمده‌ای از انرژی مصرفی در شبکه‌های توزیع آب مربوط به پمپ‌های موجود در شبکه است. با تعیین برنامه زمانی مناسب بهره‌برداری از پمپ‌های یک سامانه انتقال آب می‌توان صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان هزینه انرژی مصرفی به دست آورد.

مسئله بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع آب از لحاظ ریاضی، از مسائل غیرخطی بزرگ مقیاس است، زیرا تابع هدف و قیود مسئله غیر خطی بوده و تعداد متغیرهای تصمیم و قیودات مسئله نیز زیاد است. تابع هدف چنین مسئله‌ای، حداقل کردن هزینه‌های بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ در طول یک افق برنامه‌ریزی است که سامانه در طی آن مدت آب را پمپاژ می‌کند [۳].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی عملکرد بهینه پمپ‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ صورت گرفته است. به‌عنوان مثال ماکل و همکاران^۱ در سال ۱۹۹۵ در زمینه بهره‌برداری بهینه یا کاهش هزینه برق مصرفی ایستگاه‌های پمپاژ، پژوهش‌هایی انجام دادند. در پژوهش مورد نظر از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم بهینه‌ساز استفاده شد [۴]. رودین و همکاران^۲ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ایستگاه‌های پمپاژ را برای کمینه کردن هزینه در طول یک شبانه‌روز انجام دادند [۵]. مرادی جلال و همکاران در سال ۲۰۰۳ با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مدل جدیدی را برای طراحی و بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ کشاورزی ارائه دادند. در این مدل با داشتن مشخصات پمپ‌های پیشنهادی و با توجه به منحنی نیاز در پایین دست، ترکیب مختلفی از پمپ‌ها که می‌توانستند نیاز را برطرف سازند، ساخته می‌شود و سپس با کمک الگوریتم ژنتیک برای هر مجموعه ساخته شده، بهینه‌سازی انجام شده و سپس گزینه‌ای که دارای کمترین هزینه است به‌عنوان گزینه نهایی انتخاب می‌شود [۶]. رجب‌پور و

افشار در سال ۱۳۸۷ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۳ برنامه بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی با پمپ‌های دور متغیر را با هدف کمینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی ارائه نمودند [۷]. ون زیل و همکاران^۴ در سال ۲۰۰۴ بهره‌برداری بهینه پمپ‌های شبکه توزیع را با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام دادند [۸]. در ادامه این پژوهش لوپز و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۸ مسئله بهره‌برداری از پمپ‌ها را با در نظر گرفتن تعداد روشن و خاموش کردن به‌عنوان یک محدودیت با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان انجام دادند [۹]. بزرگ حداد و مارینو^۶ در سال ۲۰۰۷ با استفاده از توابع جریمه پویا و ایستا و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل به بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری ایستگاه‌های پمپاژ پرداختند [۱۰]. سانادا و همکاران^۷ در سال ۲۰۱۰ با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل دستورالعمل بهره‌برداری بهینه از یک شبکه لوپ با نیاز متغیر و پمپ‌های دور متغیر را تعیین نمودند [۱۱]. رسول‌زاده غریب‌دوستی و بزرگ حداد در سال ۱۳۹۱ با ترکیب دو روش برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ژنتیک طراحی و بهره‌برداری بهینه ایستگاه‌های پمپاژ را انجام دادند. الگوریتم تلفیقی ایشان در مقایسه با الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل، ژنتیک و مضارب لاگرانژ نتایج بهتری حاصل نمودند [۱۲].

هاشمی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از پمپ‌های دور متغیر در شبکه‌های توزیع با هدف کاهش هزینه انرژی مصرفی استفاده نمودند. پژوهش آنها در شبکه توزیع ورداور به موفقیت کاهش ۵/۴۳ درصدی در هزینه انرژی مصرفی منجر شد [۱۳]. در ادامه مهزاد و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که استفاده از پمپ‌های دور متغیر در شبکه‌های توزیع علاوه بر کاهش هزینه انرژی، قابلیت اطمینان تأمین آب را افزایش می‌دهد [۱۴].

هاشمی و همکاران در سال ۲۰۱۲ با هدف بررسی کاهش سطح نشت و فشار بیش از حد در شبکه‌های توزیع آب، برنامه بهینه بهره‌برداری از ایستگاه پمپاژ را تعیین نمودند. نتایج پژوهش نشان داد که از طریق برنامه‌ریزی هوشمند علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی، نشت و فشار موجود تا حد زیادی می‌تواند کاهش یابد. در این مقاله اشاره شده است که افزایش در تعداد پمپ‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد منجر شود [۱۵]. مهزاد و همکاران در سال ۲۰۱۴ از الگوریتم کلونی مورچگان برای بهینه‌سازی برنامه پمپاژ

³ Particle Swarm Optimization (PSO)

⁴ Van Zyl et al.

⁵ Lopez et al.

⁶ Marino

⁷ Sanda et al.

¹ Mackle et al.

² Rodin et al.

برای تعیین مقدار جدیدی برای متغیر X_{ij} ، ابتدا لازم است مقدار سرعت به عددی بین صفر و یک تبدیل شود. برای این منظور از تابع زیگمید $S(x)$ استفاده می‌شود

$$S(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$

سپس مقدار متغیر X_{ij} به صورت تصادفی از رابطه ۳ انتخاب می‌شود

$$X'_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } (\text{rand}() < S(V_{ij})) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

یانگ و همکاران^۷ در سال ۲۰۰۴ و الکاظمی و موهان^۸ در سال ۲۰۰۲ بر پایه الگوریتم PSO ناپیوسته‌کنندگی و ابرهات، الگوریتم‌های PSO مشابهی را برای حل مسائل کدشده به صورت صفر و یک ارائه نمودند. نحوه به روز نمودن سرعت‌ها، تفاوت عمده این دو الگوریتم با الگوریتم PSO ناپیوسته‌کنندگی و ابرهات است [۲۲ و ۲۳].

مرونو-پرز و همکاران^۹ در سال ۲۰۰۷ روش جدیدی را بر پایه PSO، برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی ابداع نمودند [۲۴]. 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 صرف‌نظر 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 جهنده است.

۲-۱- PSO جهنده (JPSO)

در این روش موقعیت یک جزء $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{is})$ ، s تعداد متغیرهای تصمیم است) به صورت یک پاسخ قابل قبول برای مسئله بهینه‌سازی ترکیبی مورد بررسی کد می‌شود. موقعیت جزء در هر تکرار از طریق پرش از پاسخی به پاسخ دیگر تغییر می‌کند. در یک تکرار چهار نوع پرش می‌تواند وجود داشته باشد که یکی از آن‌ها انتخاب می‌شود. نوع اول، پرش کاملاً تصادفی است. نوع دوم، پرش به سمت بهترین موقعیت قبلی جزء $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{is})$ ، نوع سوم، پرش به سمت بهترین موقعیت در همسایگی محلی جزء $G_i = (G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{is})$ و نوع چهارم، پرش به سمت بهترین موقعیت در تکرار $G^* = (g_1, g_2, \dots, g_s)$ است. در این روش به B_i ، G_i و G^* اصطلاحاً هدایت‌کننده^{۱۰} گفته می‌شود. بهنگام‌سازی

در شبکه توزیع آب با استفاده از پمپ دور متغیر در حالت تغییرات تقاضای آب در روز استفاده نمودند. آنها علاوه بر پیشنهادی برای کاهش فضای جستجو نشان دادند که استفاده از پمپ دور متغیر در برنامه بهره‌برداری از پمپ می‌تواند به صرفه‌جویی بیشتری در حدود ۱۰ درصد در هزینه‌های انرژی پمپاژ در مقایسه با پمپ‌های تک سرعت منجر شود [۱۶]. همچنین در مورد برنامه زمان‌بندی بهره‌برداری پمپ‌ها در شبکه توزیع آب می‌توان به پژوهش‌های عبدالمجید در سال ۲۰۱۰، اسکورکو^۱ در سال ۲۰۱۰، فیورلی^۲ در سال ۲۰۱۲ و پالوزسزیزین^۳ در سال ۲۰۱۳ اشاره نمود [۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰].

در پژوهش حاضر با اعمال تغییراتی ابتکاری در ماهیت پرش الگوریتم الگوریتم ازدحام جهنده^۴ قابلیت حل مسائل گسسته‌گرافی در آن ایجاد شد. سپس به منظور بررسی قابلیت الگوریتم پیشنهادی، در ابتدا، تابع پیچیده ریاضی فلتچر-پاول^۵ پنج بعدی و در ادامه مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در شبکه‌های توزیع آب، به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی واقعی در حوزه مهندسی آب، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با الگوریتم ژنتیک و جامعه مورچگان مقایسه شد.

۲-۲- مروری بر الگوریتم‌های PSO ناپیوسته

اولین بار کندی و ابرهات^۶ در سال ۱۹۹۷ با ایجاد تغییر ساده‌ای در ماهیت PSO استاندارد، این الگوریتم را برای حل مسائل ناپیوسته کدشده به صورت صفر و یک به کار بردند [۲۱]. در PSO استاندارد منظور از سرعت، بردار حرکت جزء در فضای جستجو است، اما در فضای گسسته دیگر نمی‌توان چنین معنایی برای سرعت قائل بود. در این الگوریتم تحول یافته، سرعت آستانه احتمالی است که بر اساس آن متغیر X_{ij} مقدار صفر یا یک را اختیار می‌نماید.

در این الگوریتم نحوه بهنگام‌سازی سرعت تقریباً مشابه PSO استاندارد است، با این تفاوت که پارامتر اینرسی وزنی (ω) در آن اعمال نمی‌شود

$$V'_{ij} = V_{ij} + C_1 \text{rand}() (b_{ij} - x_{ij}) + C_2 \text{rand}() (g_j^* - x_{ij}) \quad (1)$$

¹ Skworcaw

² Fiorelli

³ Paluszczyszyn

⁴ Jumping Particle Swarm Optimization (JPSO)

⁵ Fletcher-Pwoell

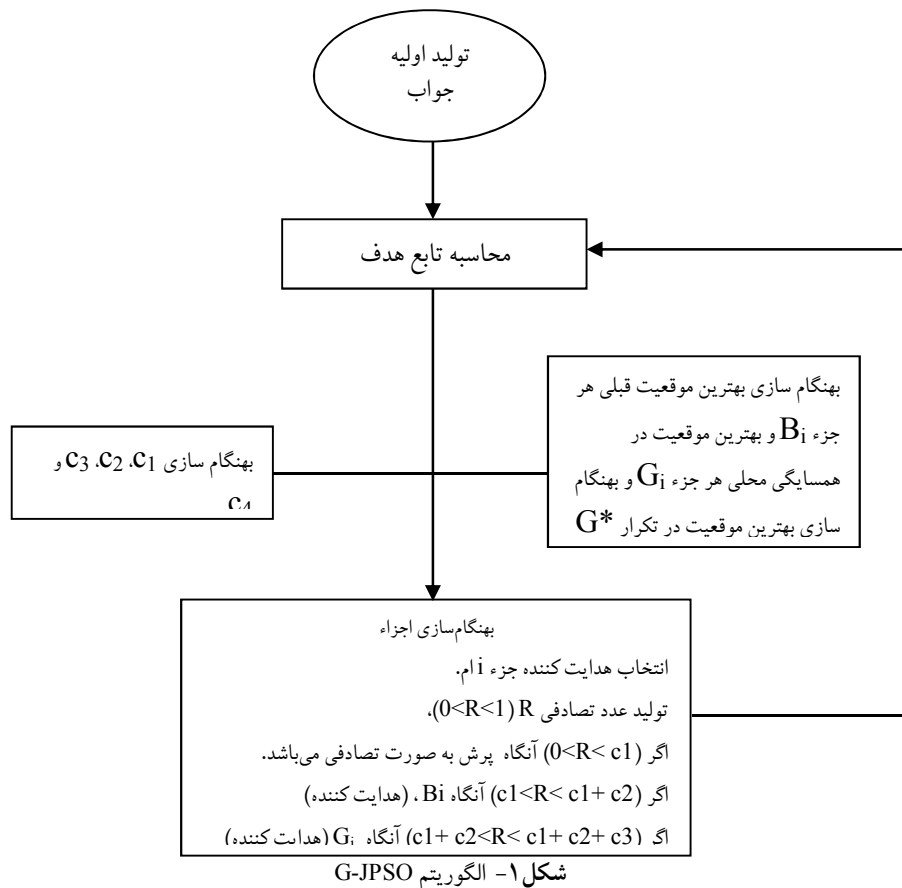
⁶ Kennedy and Eberhart

⁷ Yang et al.

⁸ Al- Kazemi and Mohan

⁹ Moreno-Perez et al.

¹⁰ Attractor



موقعیت اجزاء با رابطه ۴ بیان می شود

$$X_i = c_1 X_i \oplus c_2 B_i \oplus c_3 G_i \oplus c_4 G^* \quad (4)$$

این رابطه بیان می کند که با احتمال c_1 پرش به صورت تصادفی انجام می شود (پرش نوع اول)، با احتمال c_2 پرش به سمت B_i صورت می گیرد (پرش نوع دوم)، با احتمال c_3 پرش به سمت G_i صورت می گیرد (پرش نوع سوم) و با احتمال c_4 پرش به سمت G^* صورت می گیرد (پرش نوع چهارم). مجموعه مقادیر c_1 ، c_2 ، c_3 و c_4 برابر یک است و در هر مرحله صرفاً یکی از آن ها عمل می کنند. در هر مرحله، پرش به صورت گام به گام انجام می شود. چنانچه یکی از انواع پرش با احتمال انتخاب c_i ، برای جزء مورد نظر انتخاب شده باشد، در گام اول پرش، یکی از متغیرهای تصمیم به صورت تصادفی و با احتمالی یکنواخت انتخاب شده و مقدار آن تغییر داده می شود. در پرش نوع اول تغییر مقدار متغیر تصمیم کاملاً تصادفی است در حالی که در پرش های نوع دوم، سوم و چهارم مقدار متغیر تصمیم انتخاب شده با مقدار متناظر آن در هدایت کننده جایگزین می شود. پس از تکمیل گام اول، عدد تصادفی λ با احتمال یکنواخت، بین صفر و یک انتخاب می شود. اگر λ کوچک تر از c_i بود، آنگاه یکی

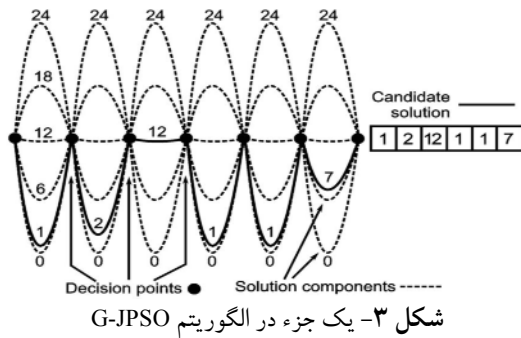
دیگر از متغیرهای تصمیم به صورت تصادفی و با احتمالی یکنواخت انتخاب شده و مقدار آن تغییر داده می شود و در غیر این صورت پرش متوقف می شود.

۳- مکانیسم الگوریتم پیشنهادی

اولین بار کشکولی و منعم در سال ۱۳۸۸ با اعمال تغییراتی ابتکاری در ماهیت پرش الگوریتم JPSO، الگوریتم رویش درخت را برای حل مسئله آرایش بهینه شبکه آبیاری تحت فشار آزمودند [۲۵]. در پژوهش حاضر با الگوبرداری از آن روش و با اعمال تغییرات دیگری، قابلیت حل مسائل گسسته گرافی در آن ایجاد شد. این الگوریتم به عنوان G-JPSO نامگذاری شد و اساس آن در شکل ۱ ارائه شده است. تغییرات ایجاد شده در الگوریتم JPSO، مربوط به ماهیت پرش در آن است که در ادامه نحوه اعمال پرش در G-JPSO شرح داده می شود.

در شکل ۱، یا مرحله انجام پرش در جزء i ام، ابتدا جزء i مطابق شکل ۲-الف و هدایت کننده (یک زیر مجموعه تصادفی از درون کل مجموعه گزینه های تصمیم) مطابق شکل ۲-ب بر هم نهی شده و

¹ Particle



یک آرایش پایه (زیر آرایشی از آرایش حداکثر) به دست می آید (شکل ۲-ج). سپس یک گراف پاسخ جدید از میان این آرایش پایه انتخاب می شود (شکل ۲-د). لازم به ذکر است که هر جزء و هر هدایت کننده ایجاد شده یک گراف پاسخ است. شکل ۲ تمامی مراحل انجام پرش به سمت هدایت کننده که در شکل ۱ تشریح شده است را نشان می دهد.

شکل ۳ یک جزء در الگوریتم G-JPSO است. همانطور که مشاهده می شود در هر نقطه تصمیم الگوریتم مختار است که یکی از اعداد یک تا ۲۴ (ساعات شبانه روز) را انتخاب کند که به ترتیب از نقطه تصمیم اول با وضعیت روشن شروع شده و تا انتها ادامه پیدا می کند. در هر نقطه تصمیم باید بررسی شود که مجموع اعداد انتخابی از ۲۴ کمتر باشد (تعداد کل ساعات شبانه روز ۲۴ ساعت است). به عنوان مثال جزء انتخابی در شکل ۳ نشان دهنده این است که پمپ در ساعت اول روشن، سپس ۲ ساعت خاموش، بعد ۱۲ ساعت روشن در ادامه یک ساعت خاموش و یک ساعت بعد روشن و نهایتاً ۷ ساعت خاموش می شود. این بدان معناست که این پمپ در شبانه روز سه بار روشن و خاموش می شود.

۴-۱- حداقل سازی تابع فلتچر-پاول

تابع فلتچر-پاول یک تابع غیرخطی و نسبت به متغیرهای خود نامتقارن و غیرقابل جداسازی^۱ است [۲۶]. از ویژگی های دیگر این تابع، توزیع نامنظم بهینه های موضعی است. شکل کلی تابع به صورت زیر است

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2$$

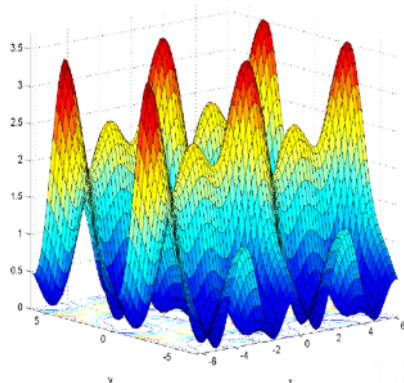
$$A_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \sin \alpha_j + b_{ij} \cos \alpha_j) \quad (5)$$

$$B_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \sin x_j + b_{ij} \cos x_j)$$

$$-\pi \leq x_j \leq \pi \quad (i=1,2,\dots,n)$$

که در آن

a_{ij} و b_{ij} اعداد صحیح تصادفی در محدوده مجاز $[-100,100]$ و α_j نیز مقادیر تصادفی در محدوده $[-\pi,\pi]$ است. همانگونه که مشخص است، مقدار بهینه مطلق این تابع برابر صفر است که به تبع آن مقدار متغیرهای تصمیم به صورت $x_j = \alpha_j$ ($j=1,2,\dots,n$) حاصل خواهد شد. اما به دلیل پیچیدگی های زیاد، عدم تقارن و غیرقابل جداسازی بودن متغیرها و نیز نامنظم بودن بهینه های موضعی، حل آن چه به صورت صریح و چه به صورت جستجو بسیار مشکل است. در شکل ۴ تابع مذکور به صورت دو بعدی ($n=2$) نمایش داده شده است.



شکل ۴- تابع دو بعدی فلتچر-پاول

۴- مسائل نمونه

به منظور بررسی قابلیت الگوریتم پیشنهادی، در ابتدا، تابع پیچیده ریاضی فلتچر-پاول پنج بعدی و در ادامه مسئله کنترل بهینه پمپ ها در شبکه های توزیع آب، به عنوان یک مسئله بهینه سازی واقعی در حوزه مهندسی آب، مورد بررسی قرار گرفت.

(الف) جزء

۱	۲	۱۲	۱	۱	۷
---	---	----	---	---	---

+

(ب) هدایت کننده

۵	۴	۱	۱۱	۱	۲
---	---	---	----	---	---

(ج) بر هم نهی جزء و هدایت کننده

۱	۲	۱۲	۱	۱	۷
۵	۴	۱	۱۱	۱	۲

الگوریتم G-JPSO

(د) گزینه تصمیم حاصل از الگوریتم

۵	۲	۱	۱۱	۱	۴
---	---	---	----	---	---

شکل ۲- نحوه اعمال پرش و بهنگام سازی یک جزء در G-JPSO

² Nonseparable

¹ Decision Point

متغیرهای تصمیم، وضعیت روشن و خاموش بودن پمپ‌های موجود در شبکه در ساعات مختلف شبانه روز بود.

تابع هدف در این مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]

(۶)

$$\text{MinCOST} = \sum_{n=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_T} \text{Re}(i) \cdot \text{Ec}(n, i) \cdot S(n, i) + \text{Penalty1} + \text{Penalty2}$$

که در این رابطه

N_p تعداد پمپ‌ها، N_T تعداد بازه زمانی، $S(n, i)$ مدت زمان بهره‌برداری پمپ n در بازه زمانی i ، $\text{Re}(i)$ تعرفه انرژی در بازه i ($\$/\text{kWh}$) و $\text{Ec}(n, i)$ انرژی مصرفی پمپ n در بازه زمانی i (kWh/h) است.

انرژی مصرفی پمپ به دبی، ارتفاع پمپاژ و راندمان پمپ بستگی دارد که از رابطه زیر به دست می‌آید [۹]

$$E_c(n, i) = \frac{0.01019 \cdot Q(n, i) \cdot h(n, i)}{e(n, i)} \quad (7)$$

که در این رابطه

$Q(n, i)$ دبی پمپاژ پمپ n در بازه زمانی i بر حسب لیتر در ثانیه، $h(n, i)$ ارتفاع پمپاژ پمپ n در بازه زمانی i بر حسب متر و $e(n, i)$ راندمان پمپاژ پمپ n در بازه زمانی i است.

در این مدل هزینه انرژی توسط مدل ایپانت به صورت مستقیم محاسبه می‌شود. همچنین جریمه‌ها شامل موارد زیر است Penalty1 : جریمه‌ای که برای عدول گزینه مورد نظر از تراز حداکثر و حداقل مجاز مخازن در نظر گرفته می‌شود. مقدار این جریمه از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$\text{Penalty 1} =$

$$\alpha \left\{ \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{t=1}^T \left(\frac{H_k^t}{H_{\min, k}} - 1 \right)^2 \\ \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{t=1}^T \left(\frac{H_k^t}{H_{\max, k}} - 1 \right)^2 \end{array} \right\} \quad \forall \begin{cases} H_k^t < H_{\min, k} \\ H_k^t > H_{\max, k} \end{cases} \quad (8)$$

که در این رابطه

k شماره مخزن، N_t تعداد کل مخازن، t شماره بازه زمانی مورد نظر و T تعداد کل بازه‌های زمانی است که مقدار عمق آب در مخازن محاسبه می‌شود. 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 است.

برای مدل نمودن این مسئله با الگوریتم G-JPSO، کل محدوده به ۱۱ دسته مساوی تقسیم شد. نتایج آماری ۱۵ اجرای مختلف با استفاده از الگوریتم G-JPSO در جدول ۱ نمایش داده شده است. در جدول ۲ پارامترهای الگوریتم G-JPSO مورد استفاده در حل این تابع ریاضی ارائه شده است.

جدول ۱- نتایج آماری تابع فلتچر-پاول (پنج بعدی)

الگوریتم	ACO*	G-JPSO
میان‌ه جواب	۳۲۲۷/۴۱	۲۱۹/۳۶۵۷
بهترین جواب	۷۲۳/۷۴	۵۰/۳۲۷۱
بدترین جواب	۷۶۲۵/۴۲	۳۴۱/۶۰۴۸

*مرجع [۲۷]

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم G-JPSO در حل تابع

تعداد تکرار	تعداد ذرات	c_1	c_2	c_3	c_4
۱۰۰۰	۲۰	۰/۵۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵

همانگونه که مشاهده می‌شود با اعمال مکانیسم پیشنهادی، جواب‌های حاصله نسبت به الگوریتم جامعه مورچگان بسیار بهتر شده است.

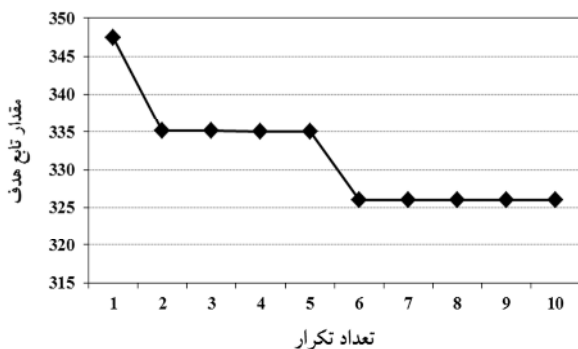
۴-۲- کنترل بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع

برای تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها یک مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی G-JPSO تهیه شد. در این مدل الگوریتم پیشنهادی در محیط متلب^۱ با بخش هیدرولیکی مدل ایپانت^۲ به عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات تلفیق شد. برنامه زمانی مناسب بهره‌برداری شامل تعیین وضعیت روشن و خاموشی هر یک از پمپ‌ها در بازه زمانی مورد نظر است. به نحوی که علاوه بر کاهش هزینه برق مصرفی، نیاز گره‌های مصرف و محدودیت‌های مسئله شامل حداقل فشار مورد نیاز در هر گره، حداقل و حداکثر ارتفاع مخازن و غیره مرتفع شود. محدودیت دیگر شامل تعداد روشن و خاموش کردن هر پمپ است که در دو حالت به تابع هدف اعمال شد. حالت اول وضعیت روشن-خاموش بودن هر پمپ دقیقاً سه بار و حالت دوم وضعیت روشن-خاموش بودن هر پمپ حداکثر سه بار تعیین شد. مدل پیشنهادی در شبکه توزیع ون زیل استفاده شد و دستورالعمل بهره‌برداری بهینه استخراج و نتایج با الگوریتم ژنتیک و جامعه مورچگان مقایسه شد.

تابع هدف در مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در شبکه توزیع به حداقل رساندن میزان هزینه انرژی مصرفی در طول شبانه روز بود.

^۱ MATLAB
^۲ EPANET

نشان داده شده است. پمپ 1A و 2B به صورت موازی به هم متصل شده‌اند. زمانی که هر کدام از پمپ‌ها فعال می‌شوند، پمپ 3B آب را از مخزن A به مخزن B منتقل می‌کند. ارتفاع مخزن B بالاتر از مخزن A قرار دارد. دوره برنامه‌ریزی پمپ ۲۴ ساعت است که به ۲۴ دوره یک ساعته تقسیم می‌شود. در ابتدای دوره بهره‌برداری که مصادف با ابتدای دوره پیک هزینه برق (7:00 a.m) در نظر گرفته شده است، ۹۵ درصد حجم مخازن پر است. بنابراین ارتفاع اولیه آب مخزن A، ۴/۵ متر و ارتفاع اولیه آب مخزن B، ۹/۵ متر است [۸]. مسئله مورد نظر در دو حالت $N_S \leq 9$ و $N_S = 9$ با دو الگوریتم JPSO و G-JPSO حل شد. در تحلیل نتایج الگوریتم، از نتایج ۲۵ بار اجرای مختلف الگوریتم استفاده شده است. در هر بار اجرای مدل تابع هدف ۶۰۰۰ بار محاسبه شد. جدول‌های ۳ و ۴ نتایج آماری هزینه برق مصرفی پمپ‌های شبکه توزیع در ۲۵ بار اجرای برنامه با $N_S \leq 9$ و $N_S = 9$ برای دو الگوریتم JPSO و G-JPSO را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در حالت $N_S \leq 9$ جواب تابع هدف الگوریتم JPSO، نسبت به الگوریتم Hybrid GA بهتر است. در هر دو حالت، الگوریتم JPSO دارای میانه جواب بهتر بوده و بدترین جوابی که در ۲۵ بار اجرای مدل نسبت به دو الگوریتم دیگر به دست آمد، کمتر است. اما قدرت الگوریتم جامعه مورچگان برای پیدا کردن جواب کمینه نسبت به دو الگوریتم دیگر در هر دو حالت بیشتر است. با ارائه مکانیسم پیشنهادی، الگوریتم G-JPSO در هر دو حالت، حتی نسبت به الگوریتم جامعه مورچگان نیز به جواب بهتری رسید. با به‌کار بردن مکانیسم پیشنهادی و ساخت گراف برای حل مسئله در واقع فضای جستجو کاهش یافت و امکان رسیدن به جواب بهینه بیشتر شد (فضای جستجو از $16,777,2162^{24}$ حالت به 290,998 حالت برای $N_S \leq 3$ برای هر پمپ کاهش می‌یابد). جدول‌های ۵ و ۶ نتایج آماری هزینه برق مصرفی پمپ‌های شبکه توزیع در ۲۵ بار اجرای برنامه با $N_S \leq 9$ و $N_S = 9$ برای دو الگوریتم JPSO و G-JPSO را



شکل ۵- جانمایی شبکه توزیع ون زیل در محیط ایپانت

Penalty2: جریمه‌ای است که برای به‌وجود آمدن کمبود عمق در نظر گرفته می‌شود. کمبود عمق عبارت است از کمبود عمق مخزن ذخیره‌ای در انتهای دوره نسبت به عمق آن در ابتدای دوره. مقدار این جریمه از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\text{Penalty2} = \beta \left\{ \sum_{k=1}^{N_t} \left(\frac{H_k^T}{H_{\text{Ini},k}} - 1 \right)^2 \right\} \quad (9)$$

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

از طرف دیگر هزینه بهره‌برداری دیگری مربوط به روشن و خاموش کردن پمپ‌ها به سیستم تحمیل می‌شود که با افزایش تعداد روشن و روشن کردن پمپ‌ها این هزینه افزایش می‌یابد. یکی از راه‌های اعمال این هزینه به تابع هدف، حداقل نمودن تعداد روشن و خاموش کردن پمپ‌ها است [۲۸]. محاسبه هزینه روشن و خاموش کردن پمپ‌ها کار دشواری است و در بسیاری از مواقع با دقت کافی انجام نمی‌شود، بنابراین می‌توان تعداد روشن و خاموش نمودن پمپ‌ها را به‌عنوان یک محدودیت برای تابع هدف اعمال نمود. این محدودیت با روابط زیر بیان می‌شود [۹]

$$N_S = N_p \times SW \quad (10)$$

$$N_S \leq N_p \times SW \quad (11)$$

که در این روابط NS تعداد کل روشن و خاموش کردن پمپ‌های سیستم و SW بیشینه تعداد روشن و خاموش کردن هر پمپ است. رابطه ۱۰ برای حالتی است که تعداد روشن و خاموش کردن هر پمپ دقیقاً برابر SW باشد و در رابطه ۱۱ روشن و خاموش کردن هر پمپ حداکثر SW قرار داده شده است.

۵- اجرای مدل و بررسی نتایج

۵-۱- شبکه توزیع آب ون زیل

برای بررسی عملکرد الگوریتم G-JPSO، شبکه توزیع آب ون زیل که در سال ۲۰۰۴ توسط ون زیل ارائه شده است، حل شد [۸]. این شبکه شامل سه پمپ و دو مخزن است. در شکل ۵ جانمایی شبکه

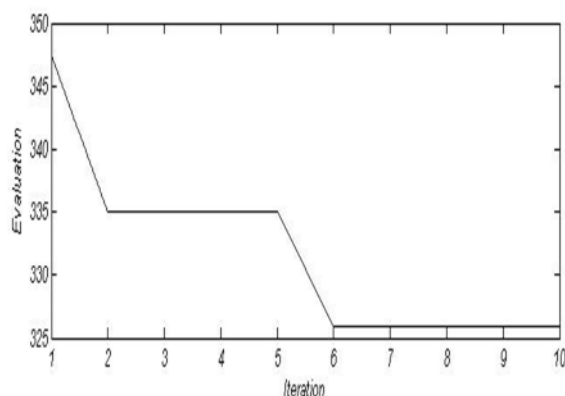
پمپ‌ها در الگوریتم G-JPSO و JPSO با $N_S \leq 9$ را نشان می‌دهد و نحوه همگرایی جواب بهینه در الگوریتم G-JPSO و JPSO با $N_S=9$ در شکل‌های ۸ و ۹ ترسیم شده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دستورالعمل بهره‌برداری از پمپ‌های موجود در شبکه در طول ۲۴ ساعت دوره بهره‌برداری با $N_S \leq 9$ و $N_S=9$ حاصل الگوریتم G-JPSO را نشان می‌دهد.

جدول ۶- هزینه برق مصرفی با تعداد تکرار و تعداد ذرات متفاوت ($N_S=9$)

الگوریتم	تعداد تکرار	تعداد ذرات	کمترین هزینه (دلار)
G-JPSO	۶۰۰	۱۰	۳۳۴/۶۳
	۵۰۰	۱۴	۳۳۷/۳۸
	۴۰۰	۱۵	۳۳۰/۹۷
	۲۰۰	۳۰	۳۳۵/۵۷
	۲۰	۳۰۰	۳۳۱
	۱۲	۵۰۰	۳۲۸/۶۹
JPSO	۶۰۰	۱۰	۳۴۸/۳۸
	۵۰۰	۱۴	۳۴۵/۶۳
	۴۰۰	۱۵	۳۴۱/۴۱
	۲۰۰	۳۰	۳۴۷/۱۷
	۲۰	۳۰۰	۳۴۵/۶۲
	۱۲	۵۰۰	۳۴۳/۵۷

جدول ۷- پارامترهای الگوریتم G-JPSO و JPSO در حل مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها ($N_S \leq 9$)

الگوریتم	تعداد تکرار	تعداد ذرات	c_1	c_2	c_3	c_4
G-JPSO	۱۰	۶۰۰	۰/۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱
JPSO	۴۰۰	۱۵	۰/۵۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵



شکل ۶- نحوه همگرایی جواب بهینه مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در الگوریتم G-JPSO ($N_S \leq 9$)

جدول ۳- هزینه برق مصرفی و تعداد روشن-خاموش شدن پمپ‌ها در ۲۵ بار اجرای مدل و ۶۰۰۰ بار محاسبه تابع هدف ($N_S \leq 9$)

	الگوریتم							
	Hybrid GA*		ACO*		JPSO		GJPSO	
	N_S	C_E	N_S	C_E	N_S	C_E	N_S	C_E
بهترین	۳	۳۴۴/۴	۳	۳۲۶/۵	۶	۳۴۱/۷	۶	۳۲۵/۹۶
میانه	۴	۳۴۸/۶	۴	۳۴۹/۲	۷	۳۴۴/۲۱	۶	۳۳۴/۹۱
بدترین	۵	۳۵۴/۸	۷	۳۵۷/۶	۹	۳۵۳/۱۱	۵	۳۴۹/۳۲

* مرجع [۹]

جدول ۴- هزینه برق مصرفی و تعداد روشن-خاموش شدن پمپ‌ها در ۲۵ بار اجرای مدل و ۶۰۰۰ بار محاسبه تابع هدف ($N_S=9$)

	الگوریتم					
	ACO**		JPSO		G-JPSO	
	N_S	C_E	N_S	C_E	N_S	C_E
بهترین	۹	۳۲۹/۱	۹	۳۴۱/۴۱	۹	۳۲۸/۶۹
میانه	۹	۳۵۷/۹	۹	۳۴۷/۶۶	۹	۳۳۶/۳۶
بدترین	۹	۳۶۴/۷	۹	۳۵۵/۸۱	۹	۳۴۷/۵۸

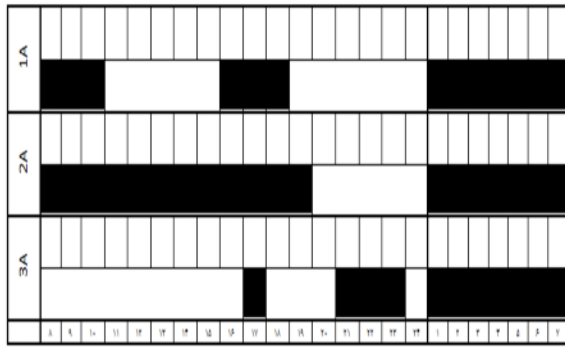
* مرجع [۹]

نشان می‌دهد. در جدول‌های ۷ و ۸ پارامترهای الگوریتم G-JPSO و JPSO در حل مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها با $N_S \leq 9$ و $N_S=9$ ارائه شده است.

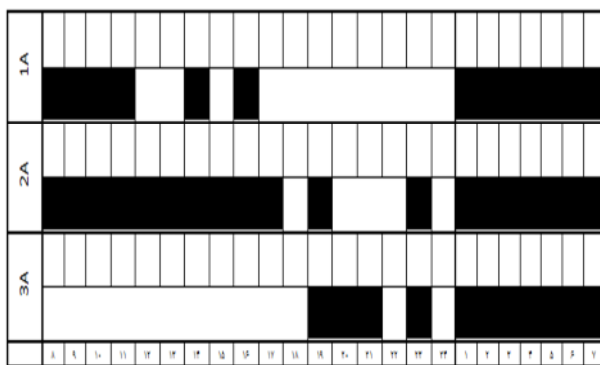
شکل‌های ۶ و ۷ نحوه همگرایی جواب بهینه مسئله کنترل بهینه

جدول ۵- هزینه برق مصرفی با تعداد تکرار و تعداد ذرات متفاوت ($N_S \leq 9$)

الگوریتم	تعداد تکرار	تعداد ذرات	کمترین هزینه (دلار)
G-JPSO	۶۰۰	۱۰	۳۳۰/۳
	۵۰۰	۱۴	۳۲۸/۵۹
	۴۰۰	۱۵	۳۳۳/۸۱
	۲۰۰	۳۰	۳۳۸/۳۲
	۱۲	۵۰۰	۳۳۰/۲۶
	۱۰	۶۰۰	۳۲۵/۹۶
JPSO	۶۰۰	۱۰	۳۴۴/۴
	۵۰۰	۱۴	۳۴۶/۱
	۴۰۰	۱۵	۳۴۱/۷
	۳۰۰	۳۰	۳۴۲/۷
	۲۰	۳۰۰	۳۴۳/۳
	۱۲	۵۰۰	۳۴۲/۵



شکل ۱۰- پاسخ بهینه وضعیت روشن خاموش پمپ‌ها در طول دوره ۲۴ ساعته ($N_S \leq 9$)



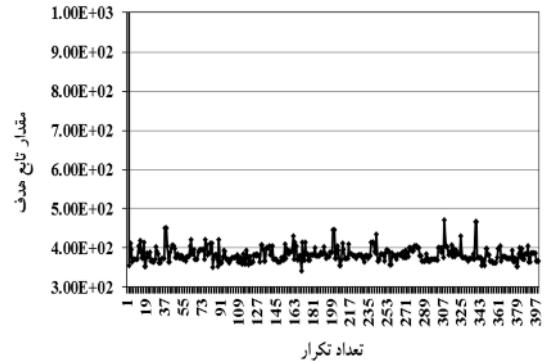
شکل ۱۱- پاسخ بهینه وضعیت روشن خاموش پمپ‌ها در طول دوره ۲۴ ساعته ($N_S = 9$)

۵-۲- شبکه واقعی ریچموند

برای آزمایش اثر بخشی مدل ارائه شده، از الگوریتم پیشنهادی در سیستم توزیع آب ریچموند، که یک سیستم واقعی در انگلستان است، استفاده شد [۸]. شبکه کالیبره دارای هفت پمپ، شش تانک، یک مخزن، ۹۴۸ لینک و ۸۳۶ گره است (شکل ۱۲). این شبکه برای اولین بار توسط اتکینسون و همکاران در سال ۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. همه مخازن در شبکه باید در آغاز دوره اوج برق (۷ صبح) تا ۹۵ درصد پر باشد [۲۹].

جدول ۹ نتایج آماری هزینه برق مصرفی پمپ‌های شبکه توزیع ریچموند در ۲۵ بار اجرای برنامه با $N_S \leq 21$ و $N_S = 12$ برای دو الگوریتم JPSO و G-JPSO را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج با الگوریتم‌های ژنتیک و مورچگان نشان‌دهنده برتری الگوریتم پیشنهادی G-JPSO است.

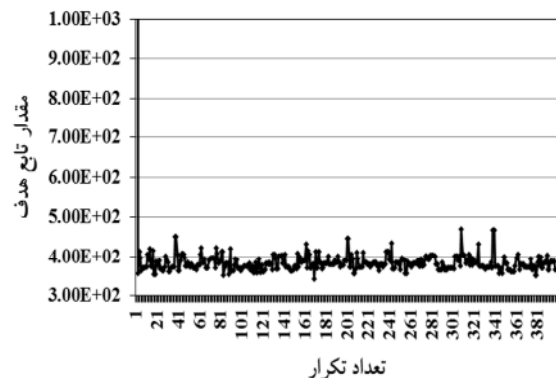
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دستورالعمل بهره‌برداری از پمپ‌های موجود در شبکه در طول ۲۴ ساعت بهره‌برداری با $N_S \leq 21$ و $N_S = 12$ حاصل الگوریتم G-JPSO نشان داده شده است.



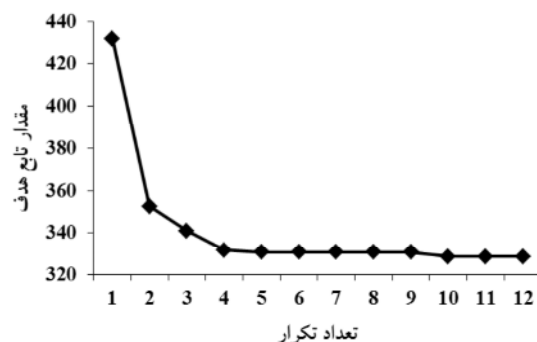
شکل ۷- نحوه همگرایی جواب بهینه مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در الگوریتم JPSO ($N_S \leq 9$)

جدول ۸- پارامترهای الگوریتم G-JPSO و JPSO در حل مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها ($N_S = 9$)

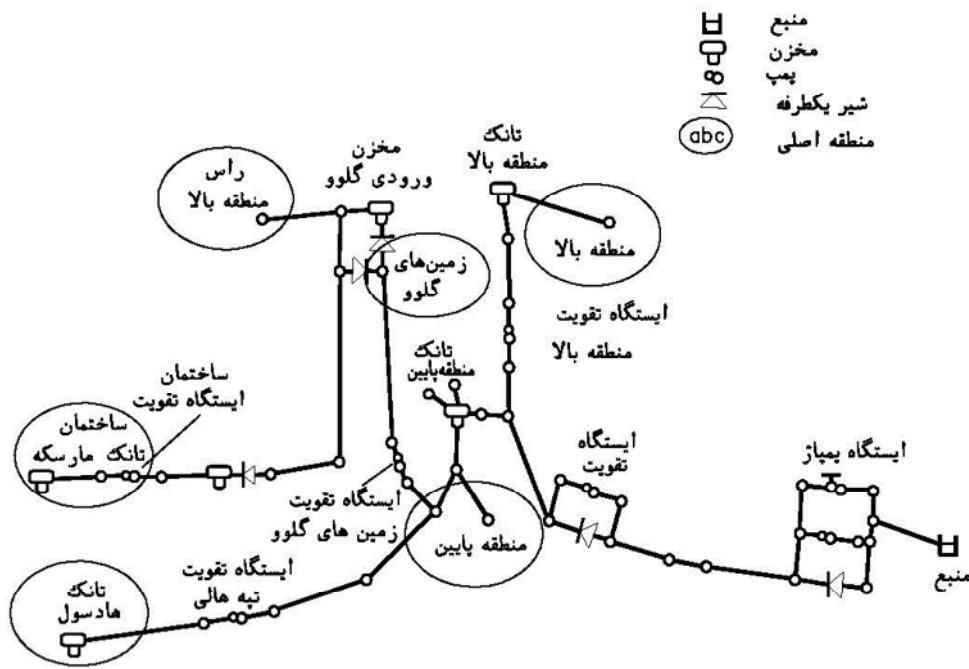
الگوریتم	تعداد تکرار	تعداد ذرات	c_1	c_2	c_3	c_4
G-JPSO	۱۲	۵۰۰	۰/۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱
JPSO	۴۰۰	۱۵	۰/۵۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵



شکل ۸- نحوه همگرایی جواب بهینه مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در الگوریتم G-JPSO ($N_S = 9$)



شکل ۹- نحوه همگرایی جواب بهینه مسئله کنترل بهینه پمپ‌ها در الگوریتم JPSO ($N_S = 9$)

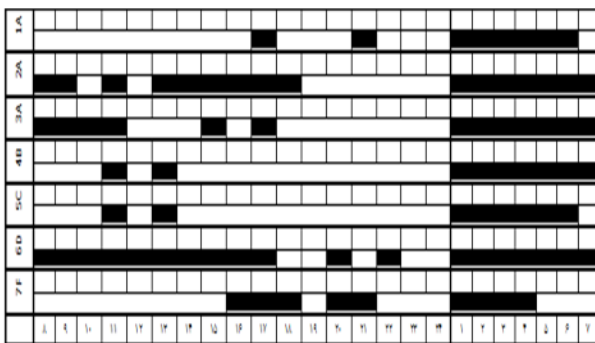


شکل ۱۲- شبکه واقعی ریچموند

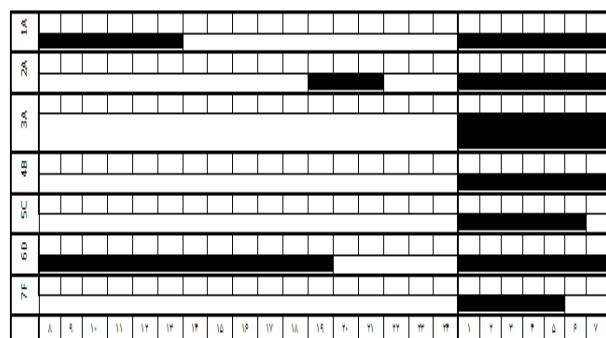
جدول ۹- هزینه برق مصرفی شبکه ریچموند

الگوریتم								
GA (100,000 evaluations) $N_S \leq 9$	ACO* (50,000 evaluations)		ACO* (8,000 evaluations)		JPSO (8,000 evaluations) $N_S \leq 21$	G-JPSO (8,000 evaluations)		
	$N_S=21$	$N_S \leq 21$	$N_S=21$	$N_S \leq 21$		$N_S=21$	$N_S \leq 21$	
۳۷۲۶۶/۵	۳۲۵۸۱/۴	۳۲۷۲۸/۵	۳۴۳۱۹/۹	۳۳۶۸۳/۳	۳۷۳۱۴/۷	۳۲۶۳۱	۲۴۸۰۵/۴	بهترین
۴۱۰۹۹	۳۳۶۳۴/۱	۳۳۷۴۷/۵	۳۶۶۹۹/۷	۳۶۰۶۹/۷	۳۷۶۹۷/۸	۳۵۵۷۶/۵	۳۰۱۱۶/۱	میانه
۴۳۵۰۸	۳۴۴۶۴/۸	۳۵۷۴۵/۵	۳۹۰۵۲/۴	۳۸۰۱۷/۳	۴۲۷۸۲/۳	۳۶۵۰۰	۳۳۶۸۹/۵	بدترین

* مرجع [۹]



شکل ۱۴- پاسخ بهینه وضعیت روشن - خاموش پمپ ها در طول دوره ۲۴ ساعته ($N_S=12$)



شکل ۱۳- پاسخ بهینه وضعیت روشن - خاموش پمپ ها در طول دوره ۲۴ ساعته ($N_S \leq 21$)

۶- نتیجه گیری

الگوریتم به عنوان G-JPSO نامگذاری شد. در ابتدا از الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله ریاضی حداقل سازی تابع پیچیده

در این پژوهش با اعمال تغییراتی در ماهیت پرش در الگوریتم JPSO، قابلیت حل مسائل گسسته گرافی در آن ایجاد شد. این

به دو الگوریتم دیگر در هر دو حالت بیشتر بود. اما به طور کلی در هر دو حالت الگوریتم JPSO دارای میانه جواب بهتری است و بدترین جوابی که در ۲۵ بار اجرای مدل نسبت به دو الگوریتم دیگر به دست آمد، کمتر بود. همچنین مدل پیشنهادی برای شبکه واقعی ریچموند نیز ارزیابی شد که برتری قابل توجه الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های ژنتیک و مورچگان قابل توجه بود. علت این امر این است که در حل این گونه مسائل با ساخت گراف در واقع فضای جستجو کاهش یافته و امکان رسیدن به جواب بهینه بیشتر خواهد شد که در این پژوهش با ایجاد این قابلیت در الگوریتم JPSO فضای جستجو کاهش یافت و قدرت الگوریتم برای پیدا کردن جواب بهینه افزایش یافت.

میانگین زمان مورد نیاز برای اجرای برنامه با لپ‌تاپ مدل Core i5-2430M 2.4GHz برای شبکه ون‌زیل با ۶۰۰۰ تکرار ۳۱۸ ثانیه و برای شبکه ریچموند ۷۸۱۶ ثانیه بوده است. پیشنهاد می‌شود که از الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل در مقیاس واقعی و سایر مسائلی که ماهیت گرافی دارند استفاده شود و عملکرد آن مورد ارزیابی بیشتر قرار گیرد.

فلتچر-پاول استفاده شد که در نهایت جواب‌های حاصله نسبت به الگوریتم جامعه مورچگان بسیار بهتر شد.

سپس برای تعیین برنامه بهره‌برداری بهینه پمپ‌ها یک مدل بهینه‌ساز-شبه‌ساز مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی JPSO و G-JPSO تهیه شد. برنامه بهره‌برداری شامل تعیین وضعیت روشن و خاموشی هر یک از پمپ‌ها در طول شبانه‌روز در بازه زمانی یک ساعته بود. به نحوی که علاوه بر کاهش هزینه برق مصرفی نیاز گره‌های مصرف و محدودیت‌های مسئله شامل حداقل فشار مورد نیاز در هر گره، حداقل و حداکثر ارتفاع مخازن و غیره مرتفع شود. محدودیت دیگر شامل تعداد روشن و خاموش کردن هر پمپ بود که در دو حالت به تابع هدف اعمال شد. حالت اول وضعیت روشن-خاموش بودن هر پمپ دقیقاً سه بار و حالت دوم وضعیت روشن-خاموش بودن هر پمپ حداکثر سه بار تعیین شد. مدل پیشنهادی در شبکه توزیع ون‌زیل استفاده شده و دستورالعمل بهره‌برداری بهینه استخراج شد. نتایج نشان داد در حالت $N_{s \leq 9}$ جواب تابع هدف الگوریتم JPSO نسبت به الگوریتم Hybrid GA بهتر است، اما قدرت الگوریتم جامعه مورچگان برای پیدا کردن جواب کمینه نسبت

۷- مراجع

1. Yeniay, O. (2005). "A comparative study on optimization methods for the constrained nonlinear programming problems." *Mathematical Problems in Engineering*, 2, 165-173.
2. Lee, K. S., Geem Z.W., Lee S. H., Bae K. W. (2005). The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization." *Eng. Optim.*, 37, 663-684.
3. Afshar, M.H., and Rajabpour, R. (2009). "Application of local and global particle swarm optimization algorithms to optimal design and operation of irrigation pumping systems." *J. of Irrig. and Drain. Eng.*, 58(3), 321-331.
4. Mackle, G., Savic., D. A. and Walters, G. A. (1995). "Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply." *Institute of Electrical Engineers Conference Publication*, 4(4), 400-405.
5. Rodin, S. I., and Moradi-Jalal, M. (2002). "Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations." <<http://stullia.t-k.ru/waterpump/waterpump.htm>>. (June 10, 2002).
6. Moradi-Jalal, M., Marino, M. A., and Afshar, A. (2003). "Optimal design and operation of irrigation pumping station." *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(3), 149-154.
7. Rajabpour, R., and Afshar, M. H. (1387). "Optimized operation of serial pump stations using the PSO algorithm." *Journal of Water and Wastewater*, Vol.19 No.2 (66), 56-66.
8. van Zyl, 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.
9. 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.*, 134(4), 337-346.
10. Bozorg Haddad, O., and Marino, M. A. (2007). "Dynamic penalty function as a strategy in solving water resources combinatorial optimization problems with honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm." *Journal of Hydroinformatics*, 9 (3), 233-250.

11. Sanda-Carmen, Radu P., and Andrei M. (2010). "Pumping stations scheduling for a water supply system with multiple tanks." *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, 72 (3), 129-140.
12. Rasoulzadeh Gharibdosti., S., and Bozorg Hadad., O. (2012). "Development and application of NLP-GA hybrid algorithm to optimize the design and operation of pumping stations." *Iranian Journal of Soil and Water Research.*, 43(2), 129-137.
13. Hashemi, S. S., Tabesh, M., and Ataee Kia, B. (2011). "Ant-colony optimization of energy cost in water distribution systems using variable speed pumps." *Proceedings of 4th ASCE-EWRI International Perspective on Water Resources and The Environment*, National University of Singapore, Singapore.
14. Hashemi, S. S., Tabesh, M., and Ataee Kia, B. (2012). "Scheduling and operating costs in water distribution networks." *Water Management*, 166(8), 432-442.
15. 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.
16. Hashemi, S. S., Tabesh, M., and Ataee 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.
17. Abdelmeguid, H., and Ulanicki, B. (2010). "Feedback rules for operation of pumps in a water supply system considering electricity tariffs." *Water Distribution Systems Analysis*, doi:10.1061/41203 (425)(08).
18. Skworcow, P., Ulanicki, B., AbdelMeguid, H., and Paluszczyszyn, D. (2010). "Model predictive control for energy and leakage management in water distribution systems." *UKACC International Conference on Control*, Coventry, UK.
19. Fiorelli, D., Schutz, G., Metla, N., and Meyers, J. (2012). "Application of an optimal predictive controller for a small water distribution network in luxembourg." *Journal of Hydroinformatics*, doi:10.2166/hydro.2012.117.
20. Paluszczyszyn, D., Skworcow, P., and Ulanicki, B. (2013). "Online simplification of water distribution network models for optimal scheduling." *Journal of Hydroinformatics*, doi:10.2166/hydro.2012.029.
21. Kennedy, J., and Eberhart, R. (1997). "A discrete binary version of the particle swarm algorithm." *IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 5, 4104-4108.
22. Yang, S., Wang, M., and Jiao, L. (2004). "A quantum particle swarm optimization." *Proceedings of CEC2004, the Congress on Evolutionary Computing, IEEE*, New York, 1, 320-324
23. Al-kazemi, B., and Mohan, C. K. (2002). "Multi-phase discrete particle swarm optimization." *Fourth International Workshop on Frontiers in Evolutionary Algorithms*, Kinsale, Ireland.
24. 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." *Proceedings of the 7th Metaheuristics International Conference*, Montreal, Canada.
25. Sami Kashkoli, B., and Monem, J. (2009). "Development and application of pressure irrigation systems using integrated optimization model JPSO / LIDM." *8th Iranian Hydraulic Conference*, Tehran. (In Persian)
26. Gen, M., and Cheng, R. W. (1997). *Genetic algorithm and engineering design*, John Wiley and Sons, Inc., N.Y.
27. Jalali, M. R., and Afshar, A. (2005). "Optimum design and operation of hydrosystem by ant colony optimization algorithm; A new metaheuristic approach." PhD Dissertation of Water Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran.
28. Lansley, K. E., and Awumah, K. (1994). "Optimal pump operations considering pump switches." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 120(1), 17-35.
29. Atkinson, R., van Zyl, J. E., Walters, G. A., and Savic, D. A. (2000). "Genetic algorithm optimization of level-controlled pumping station operation." *Proc. Water Network Modelling for Optimal Design and Management*, Centre for Water Systems, Exeter, U.K., 79-90.