نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال یازدهم. شماره چهل و سوم. بهار۱۴۰۰

بهره‌برداری چندهدفه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی در سامانه‌های انتقال آب (مطالعه موردی: سامانه‌ی خط انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز)

جعفر جعفری‌اصل[۱]، غلامرضا عزیزیان[۲]*، سید آرمان هاشمی‌منفرد[۳]، محسن راشکی[۴]

تاریخ ارسال:۱۳۹۸/۰۹/۰۹
تاریخ پذیرش:۱۳۹۸/۱۰/۱۴

مقاله پژوهشی بر گرفته از رساله دکتری

چکیده

امروزه با افزایش هزینه‌های انرژی، بررسی فرآیندهای پر مصرف انرژی در جهت بهینه‌سازی آنها بیش از هر زمان دیگر مورد توجه قرار گرفته است. بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی در سامانه‌های انتقال آب، که از جمله زیر ساخت‌های اصلی شهری محسوب می شوند، هزینه‌ی زیادی جهت تأمین انرژی و نیز تعمیر و نگهداری به بهره برداران تحمیل می نماید. لذا توسعه روش‌های بهره‌برداری بهینه از این ایستگاه‌ها در راستای کاهش هزینه‌های مصرف انرژی و جلوگیری از استهلاک پمپ‌ها امری ضروری است. در این مطالعه، مسئله بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ با توابع هدف کمینه کردن هزینه‌های انرژی و تعمیر و نگهداری به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مورد توجه قرار گرفت. بدین منظور، یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) در ارتباط با مدل هیدرولیکی EPANET توسعه داده شد و سپس برای تعیین برنامه بهره‌برداری روزانه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی سامانه‌ی انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز استفاده گردید. نتایج نشان داد ضمن رعایت قیود مسئله، هزینه‌ی انرژی مصرفی در حالت بهره‌برداری بهینه چندهدفه علاوه بر کاهش اثرات استهلاک پمپ‌ها ناشی از سوئیچ های تک ساعته، حدود ۳۰ درصد نسبت به بهره‌برداری عادی و ۵ درصد نسبت به بهره‌برداری تک هدفه با الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و جامعه زنبورهای عسل مصنوعی (ABC) داشته است.

واژه‌های کلیدی: برنامه زمان‌بندی پمپ، سامانه‌های انتقال آب، بهینه‌سازی چندهدفه، هزینه‌های انرژی، سد درودزن.

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. Jafar.Jafariasl@pgs.usb.ac.ir

[۲] دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران(نویسنده مسئول: g.azizyan@eng.usb.ac.ir).

[۳]دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.Hashemi@eng.usb.ac.ir

[۴] استادیار گروه مهندسی معماری، دانشکده هنر و معماری ، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.MRashki@eng.usb.ac.ir

مقدمه

قسمت قابل توجهی از هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع آب مربوط به هزینه‌های انرژی مصرفی در ایستگاه‌های پمپاژ این سامانه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال طبق مطالعه‌ی (Savic et al. 1997) ، هزینه بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ سامانه‌های انتقال آب در مدت یکسال برای کشور انگلستان در حدود ۷۰۰ ملیون پوند تخمین زده شد. اصلاح رویکردها و انجام فرآیندهای بهینه‌سازی به‌منظور کاهش هزینه‌های مصرف انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ، در دهه‌های اخیر بیش از هر زمان دیگر مورد توجه محققان قرار گرفته و مطالعات بسیاری به‌منظور برنامه‌ریزی هوشمند عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ انجام شده است که اهمیت و نقش آن را در به ثمر رسیدن فرآیندهای بهینه‌سازی و دستیابی به نتایج هرچه بهتر به اثبات می‌رساند (اکبری و بنازاده، ۱۳۹۶). لذا می‌توان با تعیین برنامه زمانی مناسب برای بهره‌برداری از ایستگاههای پمپاژ در سیستم‌های توزیع آب به صرفه‌جویی قابل توجهی در میزان هزینه‌های انرژی مصرفی دست یافت. در واقع هدف اصلی برنامه‌های زمان‌بندی پمپاژ حداقل‌سازی هزینه‌های بهره برداری از ایستگاههای پمپاژ، در عین تأمین آب با فشار مناسب و حفظ ذخیره روزانه مخازن هدف اصلی تلقی می شود (سامی کشکولی وبهرامی، ۱۳۹۵؛ سامی کشکولی و بهرامی، ۱۳۹۵).

اما واقعیت این است که به دلایل مختلفی نظیر پیچیدگی و گستردگی سامانه‌های انتقال آب، تغییرات زیاد الگوی مصارف و پیچیده بودن تعرفه‌های زمانی قیمت انرژی مصرفی، یافتن برنامه‌ی زمان‌بندی بهینه پمپ‌ها بسیار دشوار بوده و سال‌هاست که ذهن مدیران و محققین را به خود معطوف کرده است. مسئله‌ی بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌ها از لحاظ ریاضی یک مسئله ریاضی غیرخطی بزرگ مقیاس است، زیرا تابع هدف و قیدهای مسئله غیرخطی بوده و تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری زیاد است. در تحقیقات اولیه، محققین برای بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌ها از روش‌های بهینه سازی سنتی نظیر برنامه‌ریزی خطی(Juwit and Germanopoulos, 1992)، برنامه‌ریزی غیرخطی (C bee 1993؛ hase & OrmsOrmsbee et al. 1989) و برنامه‌ریزی پویا (Lansey and Awumah, 1994؛Nitivattananon et al. 1996) استفاده کردند. هدف اصلی در مسئله بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌ها کمینه‌کردن هزینه‌های انرژی مصرفی برای پمپاژ آب در یک افق زمانی خاص می‌باشد.

در چند دهه‌ی اخیر، تلاش‌هایی جهت استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی نظیر GA، SA، ACO و ... برای حل مسئله بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌ها صورت گرفته است. به‌عنوان مثال (Goldman and Mays, 1999) با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی فلزات (SA)، مدلی جهت تعیین برنامه‌ی زمانی بهینه کارکرد پمپ‌ها با هدف حداقل نمودن هزینه‌های بهره‌برداری به‌عنوان تابع هدف، ارائه نمودند، و با حل یک مثال ساده نشان دادند SA نتایج قابل قبولی به‌دست می‌دهد. در ادامه (Boulos et al, 2001) با استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی(DE) و (Rodin and Moradijalal, 2002) با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی برنامه‌ی بهره‌برداری را از ایستگاه پمپاژ با چند پمپ در یک سیستم توزیع آب شهری واقعی در جهت کمینه کردن هزینه‌های بهره‌برداری در طول یک شبانه روز انجام دادند، و نشان دادند کهDE و GA در حل مسئله بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ با ابعاد واقعی از قابلیت مطلوب برخوردار می‌باشند.

(Van Zyl et al. 2004) مطالعه‌ای در خصوص بهره‌برداری بهینه از ایستگاههای پمپاژ با هدف حداقل نمودن هزینه انرژی مصرفی با استفاده از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و الگوریتم جستجوی تپه نوردی انجام دادند. آنها از الگوریتم ژنتیک برای یافتن فضای جستجوی سراسری و از توانایی الگوریتم تپه نوردی برای جستجوی فضای محلی بهینه استفاده کردند. آنها در مطالعه خودشان برای ارائه برنامه زمانبندی پمپ‌ها از روش ضمنی راه‌اندازی با کنترل سطح آب مخزن استفاده کردند.

(López-Ibáñez et al. 2008) از الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان برای حل مسئله بهره‌برداری بهینه از ایستگاههای پمپاژ استفاده کردند. آنها در این مطالعه یک روش جدید صریح بر پایه راه اندازی با زمان برای بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌ها ارائه نمودند. از مزایای این روش کاهش تعداد متغیرهای تصمیم و همین طور رعایت

قید حداکثر تعداد سوئیچینگ مجاز به‌صورت خودکار حین بهینه‌سازی می‌باشد.

(Bagirov et al. 2013) الگوریتمی بر اساس روش جستجوی شبکه ای و جستجوی الگوی Hooke-Jeeves برای حل مسئله برنامه‌ریزی پمپ‌ها، با در نظر گرفتن متغیرهای تصمیم به‌صورت ترکیبی از باینری و پیوسته ارائه دادند. بدین گونه که، از متغیرهای باینری برای مشخص کردن وضعیت روشن و خاموش بودن هر پمپ ابتدای برنامه و از متغیرهای پیوسته جهت تعیین زمان شروع و پایان کار هر پمپ استفاده شد. رجب‌پور و همکاران (۱۳۹۴) با ارائه الگوریتم جدید G-JPSO و توسعه آن در کنترل بهینه پمپ‌ها با در نظر گرفتن تعداد دفعات خاموش و روشن بودن پمپ‌ها به‌عنوان قید در کنار سایر قیدها به بهینه‌سازی برنامه زمانی روشن و خاموش بودن پمپ‌ها در راستای کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های توزیع آب پرداختند. (Fatemi et al, 2016) در مطالعه‌ای به بررسی عملکرد پمپ‌های نوع ثابت و نوع متغیر در سیستم‌های توزیع آب پرداختند. به‌گونه‌ای که اگر پمپ‌های دور ثابت مد نظر قرار گیرند مقادیر دبی پمپ‌ها یا مقدار صفر و یا مقادیر دبی پمپ‌ها می‌تواند باشد و در صورتیکه پمپ دور متغیر مورد استفاده قرار گیرد، مقادیر دبی پمپ‌ها می‌تواند هر عدد حقیقی مثبت کوچکتر از ظرفیت پمپ‌ها را اختیار کنند. . (Menke et al, 2016) در مطالعه‌ای به بررسی تاثیرات پیش‌بینی دقیق تقاضا بر روی هزینه‌های ایستگاههای پمپاژ انجام دادند. آن‌ها با ارائه یک مدل جدید برا فرمولاسیون ریاضی مسئله بهره‌برداری از پمپ‌ها در سیستم‌های توزیع آب، نشان دادند با پیش‌بینی دقیق تقاضا علاوه بر هزینه‌های انرژی مصرفی اثرات تولید گازهای گلخانه‌ای نیز کاهش یافت.

(Castro-Gama, 2017) با استفاده از NSGA-II بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌ها تحت توابع هدف کمینه کردن هزینه‌های انرژی و کمبود برگشت‌پذیری سیستم توزیع آب را مد نظر قرار دادند. آنها با استفاده از مدل توسعه داده شده بر روی شبکه آب میلان توانستند هزینه انرژی را به ۲۶ درصد کاهش دهند (Bonvin et al, 2019) با استفاده از الگوریتم شاخه و حد یک روش جدیدی برای بهینه‌سازی برنامه زمانی کارکرد پمپ‌ها ارائه دادند. برای نشان دادن کارایی مدل خود از شبکه‌های موجود در مقالات پیشین استفاده کردند. نتایج نشان داد روش ارائه شده توانایی بالایی برای حل مسئله بهره‌برداری از ایستگاههای پمپاژ را در حالت بزرگ مقیاس دارد.

هزینه‌ی بهره‌برداری از ایستگاههای پمپاژ، شامل دو بخش هزینه‌ی انرژی مصرف شده در فرآیند پمپاژ و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری می‌شود. در بیشتر مطالعاتی که تا کنون در زمینه بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ صورت گرفته است، کمینه کردن هزینه‌های انرژی مصرفی مورد توجه بوده است. سوئیچینگ‌های تک ساعته مداوم پمپ‌ها از مهم‌ترین عوامل فرسودگی پمپ‌ها می‌باشد که منجر به افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. هدف از مطالعه حاضر، بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی سامانه‌ی انتقال سد درودزن به شهر شیراز به‌صورت چندهدفه می‌باشد به‌گونه‌ای که علاوه بر کمینه کردن هزینه‌های انرژی مصرفی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز از طریق کاهش سوئیچ‌های تک ساعته کمینه شود. مزیت اصلی استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه دستیابی به مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه می‌باشد که تعادل مطلوبی بین اهداف مسئله در اختیار تصمیم گیرندگان قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه مسئله بهینه‌سازی برنامه‌زمانبندی پمپ‌ها به‌صورت یک مسئله چند هدفه با دو تابع هدف هزینه‌های انرژی مصرفی و تعمیر و نگهداری مورد توجه قرار گرفته است. متغیرهای تصمیم مسئله (برنامه بهره‌برداری پمپ‌ها) برای یک دوره ۲۴ ساعته به‌صورت رشته‌ای از اعداد باینری (خاموش و روشن بودن پمپ در طول یک شبانه روز) تعیین شد. در ادامه فرمول‌بندی ریاضی مسئله تشریح شده است.

مدل شبیه‌سازی

تابع هدف اصلی مسئله بهینه‌سازی برنامه زمانی کار پمپ‌ها، هزینه انرژی مصرفی ($C_E(s)$) آنها برای پمپاژ آب می‌باشد، که از طریق شبیه‌سازی برای یک دوره زمانی با

استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود(Lansey and Awumah, 1994):

$$C_E(s) = C_D + C_c \quad (۱)$$

$$C_D = \sum_{n=1}^{NP}(P_D \times E_D(n)) \quad (۲)$$

$$C_c = \sum_{n=1}^{NP}\sum_{t=0}^{NT-1}(P_c(t) \times E_c(n,t) \times S(n,t)), \quad (۳)$$

که در روابط فوق، C_D شارژ مصرف انرژی، و C_c شارژ تقاضا می‌باشد. s معرف برنامه‌ی مشخص برای یک ایستگاه، NP تعداد پمپ‌های ایستگاه، NT بازه‌ی زمانی برنامه‌ریزی، $S(n,t)$ مدت زمان کار n ام در طول زیربازه‌ی زمانی t ام، $P_c(t)$ تعرفه‌ی مصرف انرژی در زیربازه‌ی t، $E_c(n,t)$ نرخ مصرف انرژی پمپ n ام در زیربازه‌ی زمانی t ام، P_D هزینه تقاضا و $E_D(n)$ حداکثر توان مصرفی پمپ n ام می‌باشد. نرخ مصرف انرژی در هر زیربازه‌ی زمانی به دبی عبوری، هد دینامیکی کل و راندمان کارکرد پمپ وابسته است.

$$E_c(n,t) = \frac{10^{-3}.\gamma.Q(n,t).h(n,t)}{e(n,t)} \quad (۴)$$

که $Q(n,t)$ دبی جریان پمپ n ام در زیربازه‌ی t ام، $h(n,t)$ هد دینامیکی کل پمپ n ام در زیربازه‌ی t ام، $e(n,t)$ راندمان کلی پمپ n ام در زیربازه‌ی t ام و γ وزن مخصوص آب می‌باشد.

تابع هدف دیگر، هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری می‌باشد. روشن و یا خاموش نمودن متوالی پمپ‌ها عامل اصلی فرسایش و از کارافتادگی پمپ‌ها به حساب می‌آید که در نهایت به افزایش هزینه‌های نگهداری منجر خواهد شد(Lansey and Awumah, 1994). کاهش دادن روشن/ خاموش‌های متوالی و تک ساعته موجب کاهش اثرات منفی بر روی پمپ‌ها می‌شود. در این مطالعه، تابع جریمه سوئیچینگ پمپ‌ها که تقریبی از هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد به‌عنوان تابع هدف دیگر در نظر گرفته شده است. تابع هدف تعداد دفعات سوئیچینگ تک ساعته پمپ‌ها را به‌صورت رابطه زیر می‌توان بیان کرد:

$$C_s(s) = \sum_{n=1}^{n=NP} P_s \sum_{t=1}^{t=NT} \left(I_{(n,t)} - I_{(n,t-1)}\right)^2 \quad (۵)$$

که P_s مقدار جریمه سوئیچ تکی پمپ و $I_{(n,t)} \in \{0,1\}$ بیانگر وضعیت روشن و یا خاموش شدن پمپ n ام در بازه‌ی زمانی t ام می‌باشد.

محدودیتهای این مسأله را می توان به سه قسمت تقسیم نمود. بخش اول قیدها شامل قانون پیوستگی (رابطه ۶) و قانون بقای انرژی (رابطه ۷) می باشد که به صورت ضمنی در فرآیند شبیه سازی توسط مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET لحاظ می‌شوند.

$$\sum Q_{in,i} - \sum Q_{out,i} = 0 \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، $Q_{in,i}$ میزان جریان ورودی به گره i و $Q_{out,i}$ میزان جریان خروجی از گره i می‌باشد که باید اختلاف این مقادیر برای همه گره‌های برداشت برابر صفر باشد.

$$H_{i,t} - H_{j,t} = h_{ij,t} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، $H_{i,t}$ و $H_{j,t}$ به‌ترتیب هد در گره‌های i و j ، $h_{ij,t}$ افت انرژی بین گره‌های i و j در بازه زمانی t ام منحنی تغییرات نیاز آبی است. $h_{ij,t}$ بر اساس رابطه ۸ محاسبه می‌گردد که در آن C_{ij} ثابت هیزن- ویلیامز، d_{ij} قطر لوله، L_{ij} طول لوله و Q_{ij} جریان بین نقطه i و j می‌باشد.

$$h_{ij,t} = \frac{10.668 L_{ij} Q_{ij,t}^{1.852}}{C_{ij}^{1.852} d_{ij}^{4.871}} \quad (۸)$$

بخش دوم قیدها، قید تأمین نیاز پایین‌دست می‌باشد که به‌صورت ارضاء قید حداقل فشار برای تامین نیاز گره‌ها در پائین دست در نظر گرفته می‌شود، در صورت لزوم یک حد بالا برای فشار در گره‌ها نیز می‌توان در نظر گرفت:

$$H_{i,t} \geq H_i^{min} \quad (۹)$$

که $H_{i,t}$ هد گره i در بازه زمانی t ام و H_i^{min} حداقل هد مورد نیاز برای تامین دبی در گره i ام می‌باشند.

بخش سوم قیدها مربوط به مخازن ذخیره است. که عمق آب مخازن در طول بازه‌ی بهره‌برداری نباید از حداقل و حداکثر ظرفیت مجاز مخزن تجاوز کند. همچنین برای جلوگیری از خالی شدن مخزن در انتهای بازه‌ی بهره‌برداری، قید کمبود حجم نیز لحاظ می شود به‌گونه‌ای که عمق آب ذخیره شده در مخازن در انتها نسبت به ابتدای بازه‌ی زمانی

بهره‌برداری نباید کاهش داشته باشد. این قیدها را می توان به‌صورت رابطه زیر نوشت:

$$V_k^t \le V_{Max,k}, V_k^t \ge V_{Min,k}, V_k^t \ge V_{Ini,k}, \quad (۱۰)$$

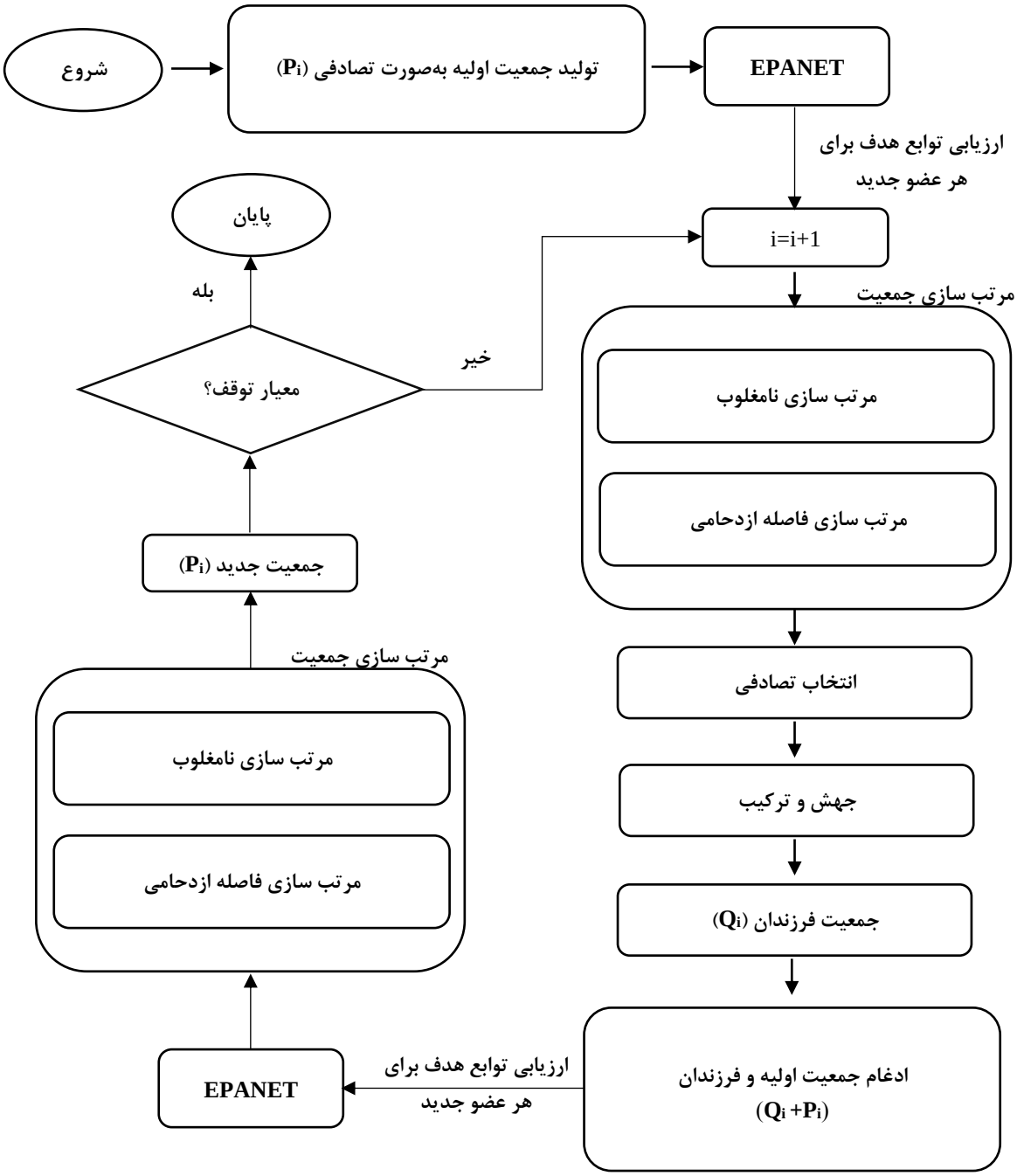
که در آن $V_{Max,k}$، $V_{Min,k}$ و $V_{Ini,k}$ به‌ترتیب حجم حداکثر مجاز ، حداقل مجاز و حجم ذخیره آب در ابتدای دوره بهره‌برداری و V_k^t حجم ذخیره آب در زمان t در داخل مخزن k ام می‌باشند.

مدل بهینه‌سازی:

برای تعیین وضعیت بهینه پمپ‌ها در یک دوره زمانی ۲۴ ساعته با توابع هدف و قیود مذکور، از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک چندهدفه با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) استفاده شد. NSGA-II یکی از الگوریتم‌های فراتکاملی با توانایی بالا برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد که توسط (Deb et al, 2002) پیشنهاد گردید. در واقع این الگوریتم ایرادهای الگوریتم‌های کلاسیک چندهدفه از جمله حجم بالای محاسبات در هر تکرار که موجب افزایش اجرای زمان مدل می‌گردید و همچنین عدم نگهداری مقادیر برتر در طول زمان اجرای مدل را با اضافه کردن دو عملگر که که یکی از آنها یک معیار برتری بر اساس مرتب سازی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد و دیگری که تنوع راه حل را در میان راه حل‌های با رتبه‌ای برابر حفظ می‌کند برطرف کرده است (Deb et al, 2002). به‌طور کلی می‌توان مراحل اجرای الگوریتم NSGA-II را به‌صورت زیر بیان کرد:

۱- تولید جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی (P_i).
۲- ارزیابی جمعیت تولید شده.
۳- اعمال روش مرتب‌سازی نامغلوب.
۴- محاسبه معیار فاصله ازدحام.
۵- مرتب‌سازی اعضا بر اساس معیارهای مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله‌ی ازدحامی.
۶- انتخاب جمعیت والدین برای تولید مثل.
۷- انجام تقاطع، جهش و تولید جمعیت.
۸- ادغام جمعیت نسل قبلی و فرزندان.
۹- اعمال روش مرتب سازی نامغلوب بر جمعیت.
۱۰- محاسبه معیار فاصله‌ی ازدحامی بر جمعیت.
۱۱- مرتب سازی اعضای جمعیت.
۱۲- انتخاب اعضای نسل جدید از میان جمعیت و تشکیل جمعیت جدید.
۱۳- همگرایی.

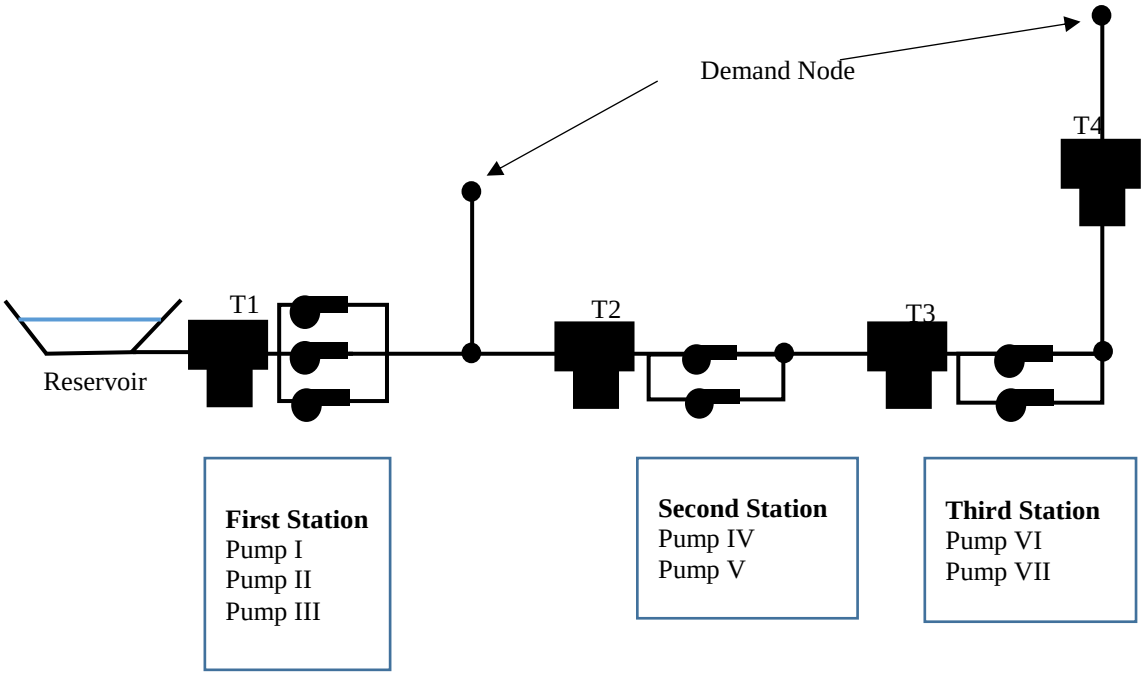
مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی در محیط MATLAB با تلفیق EPANET به عنوان مرجعی از فرامین و اطلاعات توسعه داده شد. به‌طور کلی در شکل (۱) فلوچارت اجرای بهینه‌سازی با NSGA-II در ارتباط با مدل شبیه‌سازی EPANET نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت تلفیق مدل بهینه‌سازی NSGA-II و مدل شبیه‌سازی EPANET جهت بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ.

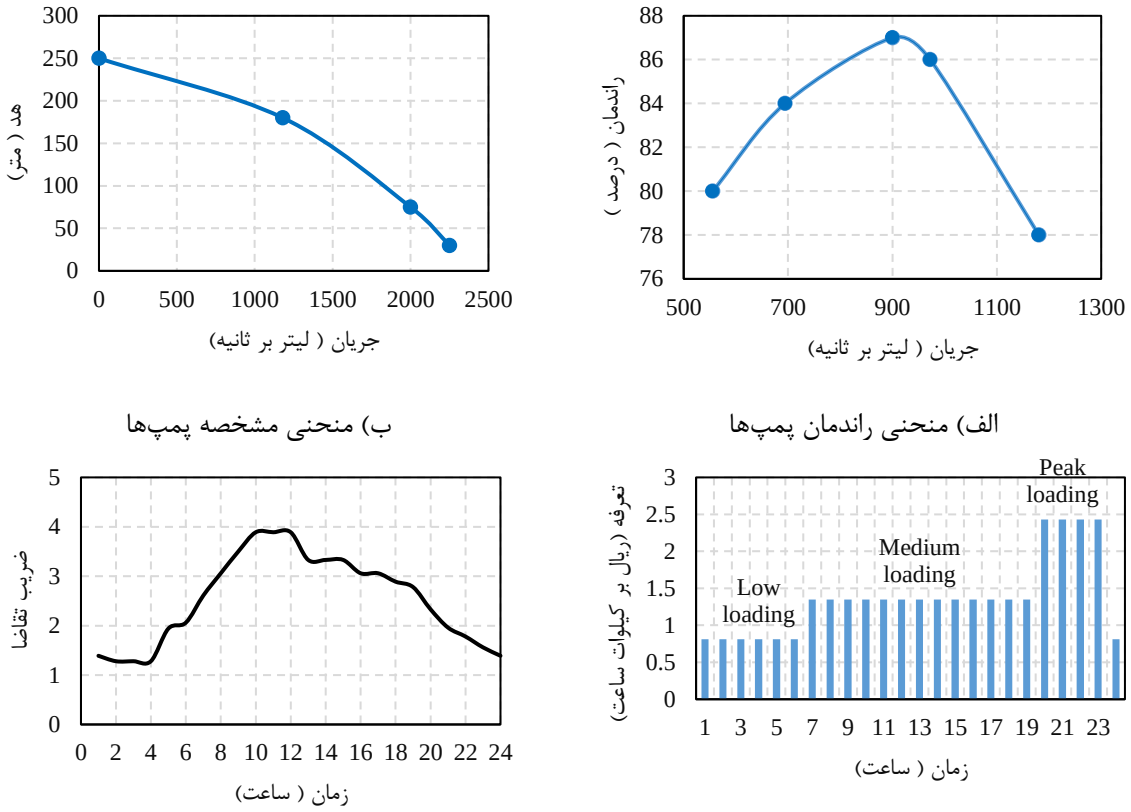
مطالعه موردی

برای ارزیابی مدل توسعه داده شده، سامانه‌ی انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفت. سد درودزن در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شهر شیراز قرار دارد که سالانه در حدود ۶۷ میلیون متر مکعب آب شرب و صنعتی شهر شیراز را تامین می‌کند. انتقال آب از سد درودزن از طریق سه ایستگاه پمپاژ متوالی صورت می‌گیرد. شکل (۲) شماتیک مدل این سامانه‌ی انتقال را نشان می‌دهد.



شکل (۲): شماتیک سامانه‌ی خط انتقال آب سد درودزن به شهر شیراز (سامی‌کشکولی و بهرامی، ۱۳۹۵).

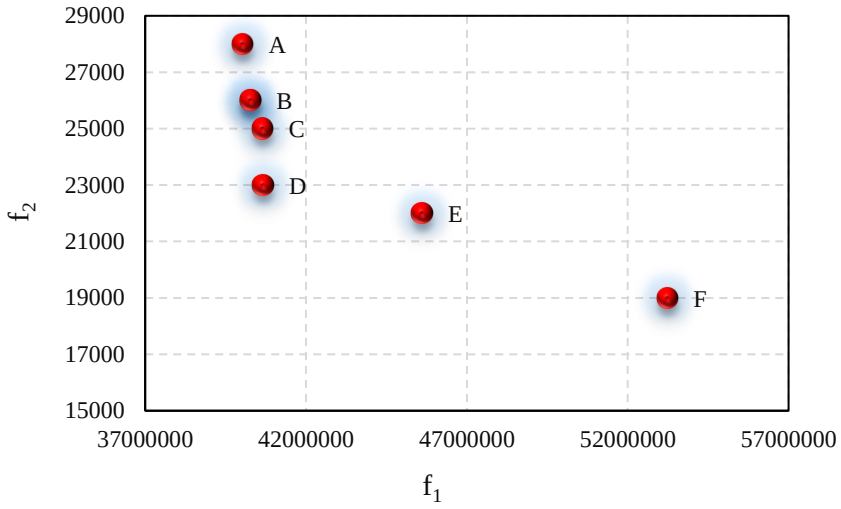
عمق نرمال مخزن ۱۶۷۶/۵ متر از سطح دریا می‌باشد که آب با دبی ثابت ۷۶۴۸ متر مکعب در ساعت را به‌صورت ثقلی به مخزن ذخیره ایستگاه پمپاژ شماره (۱) انتقال می‌دهد. سپس از طریق سه پمپ در ایستگاه پمپاژ اول آب به مخزن ذخیره ایستگاه دوم پمپاژ و از آنجا به ایستگاه سوم و در نهایت به مخزن مرتفع پمپ می‌شود. از مخزن مرتفع به‌صورت ثقلی با توجه به منحنی نیاز به شهر می‌رسد. لازم به‌ذکر است که میزان ۳۰۸۲ متر مکعب آب به صورت ثابت در بین ایستگاه پمپاژ شماره (۱) و ایستگاه پمپاژ شماره (۲) توسط یک لوله‌ی فرعی به طول ۱۰۰۰ متر در اختیار شرکت پترو شیمی قرار می‌گیرد. جزئیات مربوط به منحنی عملکرد پمپ‌ها، تعرفه‌های انرژی مصرفی و دبی تقاضا در سامانه‌ی آب مورد مطالعه در شکل (۳) ارائه شده است(سامی‌کشکولی و بهرامی، ۱۳۹۵).



شکل (۳): اطلاعات بهره‌برداری از ایستگاه‌های پمپاژ سامانه‌ی آب درودزن به شهر شیراز(سامی‌کشکولی و بهرامی، ۱۳۹۵).

نتایج و بحث

به منظور دستیابی به نتایج بهتر پس از آنالیز حساسیت مقادیر پارامترهای مدل بهینه‌سازی NSGA-II، شامل جمعیت اولیه، تعداد نسل، نرخ تزویج و جهش به ترتیب برابر با ۲۰۰، ۳۰۰، ۰/۸ و ۰/۲ در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن مقادیر فوق مدل بهینه‌سازی NSGA-II با اتصال به مدل شبیه‌سازی EPANET اجرا گردید. پس از همگرایی مدل بهینه‌سازی ۶ نقطه بر روی منحنی تعامل بین دو تابع هدف به‌دست آمد. منحنی تعامل بهینه به‌دست آمده برای بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی قرار گرفته در مسیر انتقال آب از سد درود زن به شهر شیراز با استفاده از مدل توسعه داده شده در این پژوهش بین اهداف مذکور در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل (۴) منحنی تعامل به‌دست آمده برای بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ متوالی سامانه انتقال آب سد درودزن به شهر شیراز.

در نمودار فوق، تعامل دو هدفه بین هزینه‌های انرژی مصرفی (f_1) و هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری (f_2) ایستگاه‌های پمپاژ برقرار شده است که می‌تواند در اتخاذ تصمیم مناسب به تصمیم گیرندگان کمک کند. همانطور که قابل مشاهده است می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که با محدود کردن تعداد سوئیچینگ تک ساعته و متوالی پمپ‌ها هزینه‌های انرژی مصرفی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به فواصل کم هزینه انرژی در نمودار تعامل به‌دست آمده، باید این نکته را مدنظر داشت که با صرف میزان کمی هزینه جهت تعمیر و نگهداری می‌توان به کاهش هزینه‌ی انرژی مصرفی دست یافت. نکته‌ی قابل بحث دیگر وجود پاسخ‌هایی با هزینه انرژی مصرفی مشابه و هزینه تعمیر و نگهداری متفاوت می‌باشد. وجود چنین پاسخ‌هایی این امکان را برای طراحان فراهم می‌سازد که با توجه به شرایط موجود مناسب‌ترین پاسخ را انتخاب نمایند. جزئیات هزینه بهره‌برداری بهینه تمامی راه‌حل‌های موجود بر روی منحنی تعامل در جدول ۱ ارائه شده است.

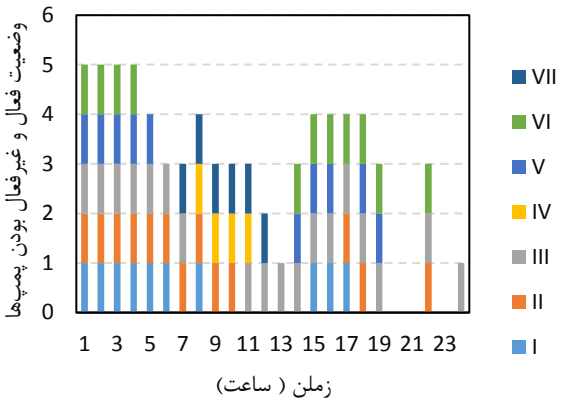
جدول (۱): جزئیات پاسخ‌های بهینه موجود بر روی منحنی تعامل

شماره راه‌حل	جریمه سوئیچینگ تک ساعته پمپ‌ها	هزینه انرژی مصرفی (ریال در روز)
A	۲۸۰۰۰	۴۰۰۵۳۴۳۶
B	۲۶۰۰۰	۴۰۲۹۰۱۲۴
C	۲۵۰۰۰	۴۰۶۶۸۲۹۲
D	۲۳۰۰۰	۴۰۶۸۵۰۰۴
E	۲۲۰۰۰	۴۵۶۲۸۸۴۰
F	۱۹۰۰۰	۵۳۲۵۲۵۶۰

.

با توجه به اینکه تمامی پاسخ‌های موجود بر روی نمودار تعامل، پاسخ بهینه بوده و در شرایط ارضاء تمامی قیود به‌دست آمده‌اند، هیچ ارجحیتی بین آن‌ها وجود ندارد و تنها انتخاب هر کدام بستگی به طراح و شرایط طرح دارد. برای نشان دادن کارایی مدل توسعه داده شده پاسخ‌های دارای بیشترین(A)، متوسط(D) و کمترین(F)

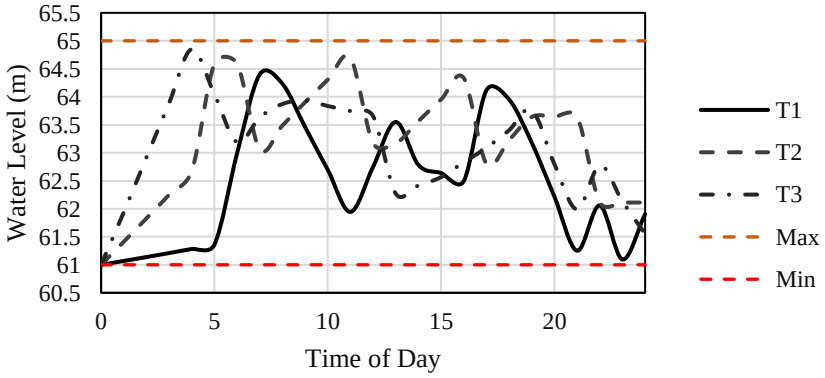
هزینه انرژی از مجموعه‌پاسخ های موجود بر روی جبهه پرتو انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات مربوط به راه‌حل بهینه (A) در ادامه تشریح شده است



شکل (۵): برنامه زمانی روشن/خاموش بودن پمپ‌ها در طول روز برای راه‌حل A.

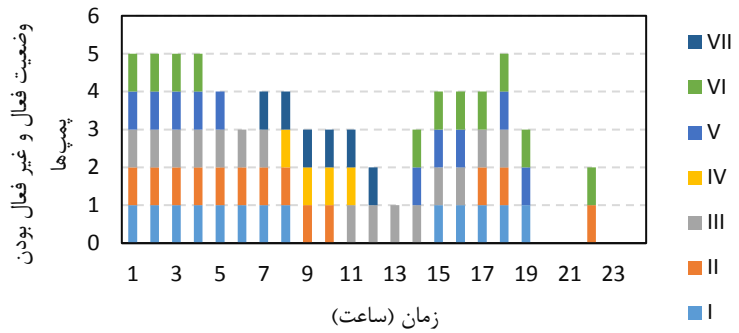
با توجه به شکل (۷)، مشخص است که مدل توانسته است به خوبی تعداد دفعات سوئیچینگ پمپ‌ها را کاهش دهد. همچنین پمپ‌های شماره (۱)، (۳) و (۶) دارای یک سوئیچ تک ساعته در طول روز بوده و بقیه پمپ‌ها و سوئیچ‌های دیگر به‌صورت پیوسته می‌باشد. در شکل (۸) نیز نمودار مربوط به عمق آب در مخازن ذخیره موجود در ایستگاه‌ها ارائه شده است. همانگونه که مشخص است، در طول دوره بهره‌برداری ارتفاع آب در مخزن بین محدوده حداقل و حداکثر مجاز بوده است

.



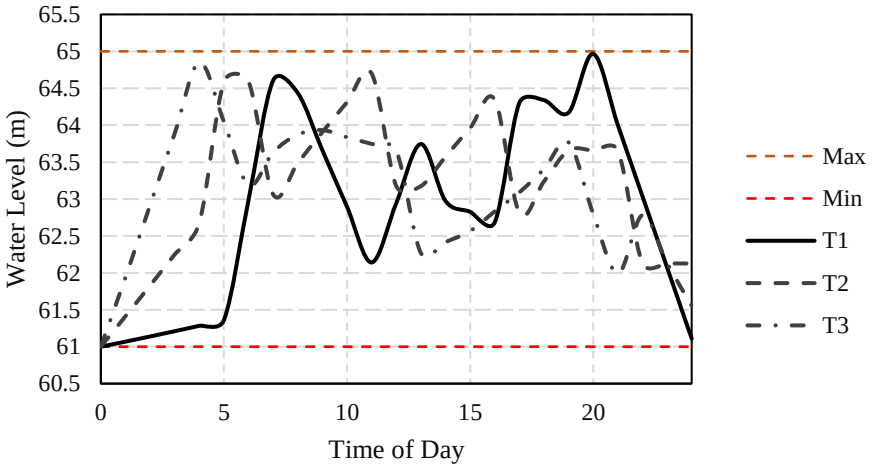
شکل (۸): عمق آب در مخازن ذخیره در دوره بهره‌برداری A.

جزئیات مربوط به راه‌حل بهینه (D) در شکل (۸)و شکل (۹) ارائه شده است.



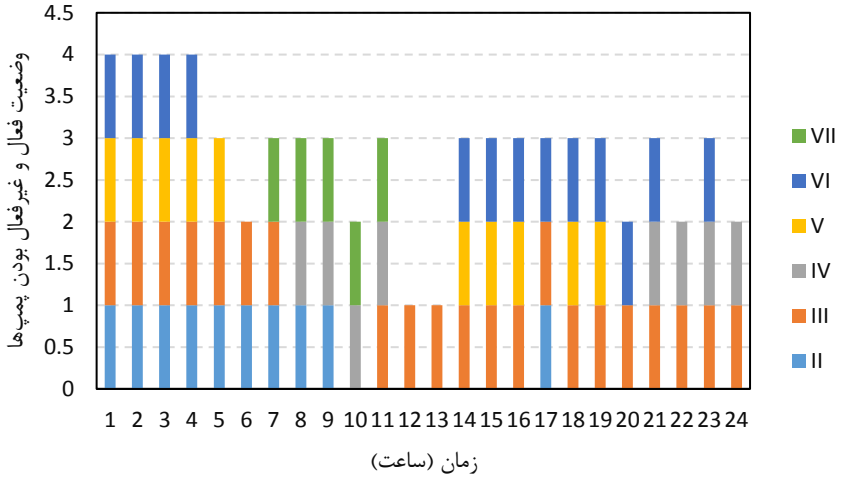
شکل (۹): برنامه زمانی روشن/ خاموش بودن پمپ‌ها در طول روز برای راه‌حل D.

طبق راه‌حل بهینه ارائه شده در شکل (۹) برای بهره‌برداری از پمپ‌ها، تنها یک سوئیچ تک ساعته برای پمپ شماره (۶) در ساعت ۲۲ می‌باشد و مابقی پمپ‌ها به‌صورت پیوسته روشن / خاموش می‌گردند که این عمل موجب کاهش هزینه‌های استهلاک پمپ‌ها خواهد شد. همچنین در ادامه تغییرات آب در مخازن ذخیره نیز برای راه‌حل مذکور در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است قیود مربوط به ارتفاع آب مخزن در تمام مدت بهره‌برداری رعایت شده است.

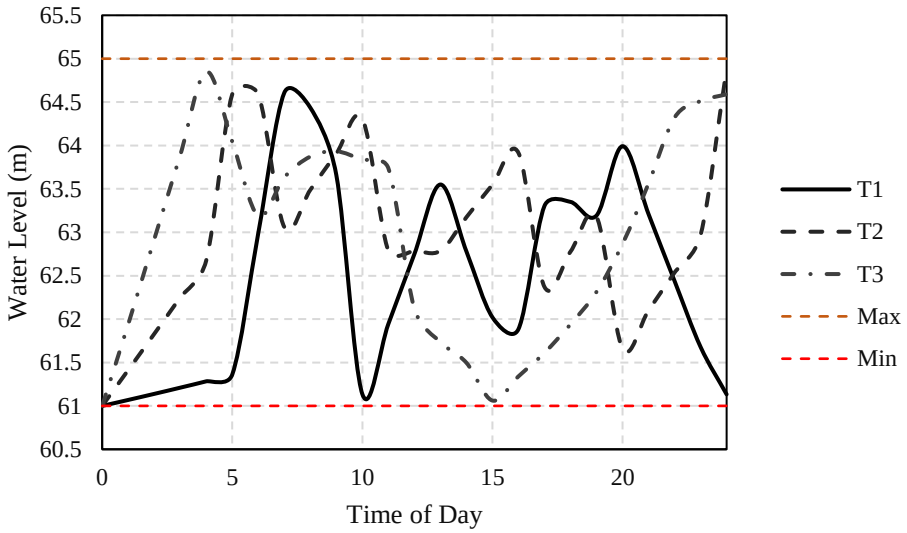


شکل (۱۰): عمق آب در مخازن ذخیره در دوره بهره‌برداری D.

برنامه بهینه بهره‌برداری مربوط به راه حل (F) که بیشترین هزینه طراحی را در بین راه‌حل‌های موجود دارد در شکل (۱۱) و شکل شماره (۱۲) ارائه شده است. طبق برنامه زمانی بهینه راه‌حل (F) یک سوئیچ تک ساعتی برای پمپ (۲) در ساعت ۱۸ و یک خاموش تک ساعته در ساعت ۱۷ برای پمپ (۵) می‌باشد. ارتفاع آب مخزن نیز در شکل(۱۲) نشان دهنده‌ی رعایت قید مخزن در این راه‌حل می‌باشد که در دوره بهره‌برداری بین محدوده حداقل و حداکثر عمق مجاز می‌باشد.



شکل (۱۱): برنامه زمانی روشن/خاموش بودن پمپ‌ها در طول روز برای راه‌حل F.



شکل (۱۲): عمق آب در مخازن ذخیره در دوره بهره‌برداری F.

کشکولی و بهرامی (۱۳۹۵) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه زنبورهای عسل مصنوعی اقدام به بهینه‌سازی برنامه زمانی پمپ‌های سامانه‌ی انتقال آب سد درودزن به شهر شیراز کردند. هزینه انرژی به‌دست آمده از طریق الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک برابر با ۴۲۴۸۲۴۸۴ ریال است که مقدار ۵۶۷۸۷۴ ریال از پاسخ به‌دست آمده مربوط به جریمه‌کمبود عمق می‌باشد. همچنین با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی زنبورهای عسل مصنوعی نیز بهترین پاسخ به‌دست آمده برابر ۴۱۹۹۱۷۱۶ ریال در روز می‌باشد که از این مقدار ۱۴۵۵۴۱۰ ریال مربوط به جریمه تخطی از قیدهای مخزن می‌باشد. شایان ذکر است که در دو مطالعه مذکور تعداد دفعات سوئیچینگ پمپ‌ها در نظر گرفته نشده است. در نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر علاوه بر ارضاء تمامی قیود به‌طور کامل، تعداد سوئیچینگ تک ساعتی پمپ‌ها نیز به‌صورت یک تابع هدف جدا کنترل شده است که این امر می‌تواند موجب کاهش هزینه‌های استهلاک پمپ‌ها گردد. لازم به ذکر است که تعداد سوئیچ‌های تک ساعته در دو پژوهش مذکور ۵ مرحله می‌باشد که خود می‌تواند موجب استهلاک زود هنگام پمپ‌ها و افزایش هزینه‌های طراحی گردد. در جدول (۲) مقایسه نتایج به‌دست آمده از مدل توسعه داده شده در

این تحقیق با سناریوی بهره‌برداری غیر بهینه و دو تحقیق پیشین ارائه شده است.

با توجه به جدول (۲) هزینه انرژی مصرفی در تمامی حالات بهره‌برداری بهینه حدودا ۲۹ درصد کمتر از هزینه انرژی مصرفی در یک روز عادی است. همچنین با استفاده از مدل توسعه داده شده در این تحقیق نسبت به دو مطالعه پیشین صورت گرفته بر روی مطالعه موردی، هزینه‌های انرژی مصرفی نسبت به حالت بهره‌برداری عادی و مطالعات پیشین به‌ترتیب ۳۰ و ۵ درصد با رعایت تمامی قیود مسئله و همچنین هزینه‌های استهلاک پمپ‌ها ناشی از سوئیچینگ یک ساعته نیز کاهش یافت که نشان می‌دهد مدل توسعه داده شده از عملکرد قابل قبولی برخوردار می‌باشد.

جدول(۲): مقایسه هزینه‌ی انرژی مصرفی کل در حالت بهره‌برداری بهینه و بهره‌برداری غیر بهینه.

	روش مورد استفاده	تعداد سوئیچ تک ساعته پمپ‌ها	جریمه تخطی از قیود (ریال در روز)	هزینه انرژی به‌دست آمده (ریال در روز)	میزان صرفه جویی (٪)
هزینه برق مصرفی در یک روز متوسط	-	-	-	۵۹۳۲۸۹۱۹	-
کشکولی و بهرامی (۱۳۹۵)	GA	۵	۵۶۷۸۷۴	۴۲۴۸۲۴۸۴	۲۸,۴
کشکولی و بهرامی (۱۳۹۵)	ABC	۵	۱۴۵۵۴۱۰	۴۱۹۹۱۷۱۶	۲۹,۲۲
مطالعه حاضر	NSGA-II	۲	۰	۴۰۰۵۳۴۳۶	۳۲,۵
	NSGA-II	۱	۰	۴۰۶۸۵۰۰۴	۳۱,۵
	NSGA-II	۰	۰	۵۳۲۵۲۵۶۰	۱۰,۲۵

نتیجه‌گیری

بهینه‌سازی عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ متوالی در سامانه‌های خط انتقال اصلی آب موضوع بسیار حائز اهمیتی می‌باشد، که می‌تواند به صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی برق و همچنین هزینه‌های مربوطه منجر گردد. در این مطالعه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی چندهدفه برای بهره‌برداری بهینه از ایستگاههای پمپاژ متوالی در سامانه‌های انتقال آب توسعه داده شد. سپس مدل مذکور برای بهینه‌سازی برنامه زمانی کارکرد ایستگاههای پمپاژ سامانه‌ی انتقال آب سد درودزن به شهر شیراز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌صورت یک نمودار تعامل بین هزینه‌های انرژی مصرفی و هزینه‌های استهلاک پمپ‌ها ارائه گردید. سپس حالت‌های خاصی از جواب‌های موجود بر روی نمودار تعامل با حالت بهره‌برداری عادی و نتایج مطالعات قبلی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد ضمن رعایت همه قیود مسئله، هزینه‌ی انرژی مصرفی در ایستگاههای پمپاژ سامانه‌ی انتقال آب مطالعه موردی نسبت به بهره‌برداری عادی ۳۰ درصد کاهش یافته است، که این موضوع عملکرد قابل قبول مدل توسعه داده شده را نشان می‌دهد. همچنین در این مطالعه از یک تابع هدف جدید برای بیان هزینه‌های تعمیر و نگهداری به‌صورت کمینه کردن جریمه تعداد دفعات سوئیچ تک ساعته پمپ‌ها استفاده شد. مشخص گردید که می‌توان ضمن کاهش هزینه‌های انرژی مصرفی با مدیریت صحیح روشن/ خاموش شدن‌های اضافی هزینه‌های تعمیر و نگهداری پمپ‌ها را نیز کنترل نمود.

در این مطالعه، ضریب تقاضا به‌صورت ثابت و برای یک روز معمولی در نظر گرفته شده است که پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده با در نظر گرفتن تاثیر عدم قطعیت ضریب تقاضا به بهینه‌سازی برنامه زمانی ایستگاه‌های پمپاژ پرداخته شود

منابع

اکبری، م. بنازاده، ا. ۱۳۹۶. برنامه ریزی بهینهٔ زمان بندی پمپاژ به مخازن شبکه های توزیع آب با کنترل هزینهٔ استهلاک پمپ ها، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال هفتم، شماره۴، صفحات ۴۲ تا ۵۱.

رجب‌پور، ر. بیدختی، ط. رخشنده‌رو، غ. ۱۳۹۴. ارائه یک الگوریتم جدید G-JPSO و توسعه آن در کنترل پمپ‌ها در شبکه توزیع آب، مجله مهندسی آب و فاضلاب، شماره ۶، صفحات ۱ تا ۱۴.

سامی کشکولی، ب. بهرامی، م. ۱۳۹۵. بهره‌برداری بهینه از ایستگاه‌های پمپاژ سیستم‌های تامین آب با استفاده از الگوریتم جامعه زنبورهای عسل مصنوعی (ABC)، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک گرگان، جلد ۲۳، شماره ۵، صفحات ۱۷۵ تا ۱۸۹.

سامی کشکولی، ب. بهرامی، م. ۱۳۹۵. بهره‌برداری بهینه از سامانه‌ی آبکشی متوالی سامانه‌ی انتقال آب شیراز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مجله مهندسی منابع آب، سال دهم، شماره ۱، صفحات ۱ تا ۱۲.

Barán, B., Von Lücken, C. and Sotelo, A., 2005. Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies. Advances in Engineering Software, 36(1), pp.39-47.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2004.03.012.

Bonvin, G., Demassey, S. and Lodi, A., 2019. Pump scheduling in drinking water distribution networks with an LP/NLP-based branch and bound.

Boulos, P.F., Wu, Z., Orr, C.H., Moore, M., Hsiung, P. and Thomas, D., 2001. Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms. In Distribution system symposium.

Castro-Gama, M., Pan, Q., Lanfranchi, E.A., Jonoski, A. and Solomatine, D.P., 2017. Pump scheduling for a large water distribution network. Milan, Italy. Procedia Engineering, 186, pp.436-443. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.249.

Chase, D.V. and Ormsbee, L.E., 1993. Computer- Generated Pumping Schedules for Satisfying Operational Objectives. Journal- American Water Works Association, 85(7), pp.54-61. doi.org/10.1002/j.1551-8833.1993.tb06024.x.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.A.M.T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), pp.182-197.

Fatemi, S.A., Kuh, A. and Gupta, V., 2016. Energy efficient scheduling algorithms for pumping water in radial networks. In 2016 Information Theory and Applications Workshop (ITA) (pp. 1-6). IEEE.

Goldman, F.E. and Mays, L.W., 1999. The application of simulated annealing to the optimal operation of water systems. In WRPMD'99: Preparing for the 21st Century (pp. 1-16).

Kurek, W. and Ostfeld, A., 2013. Multi-Objective Water Distribution Systems Control of Pumping Cost, Water Quality, and Storage-Reliability Constraints. Journal of Environmental Management, 115, pp.189-197. doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.030.

Lansey, K.E. and Awumah, K., 1994. Optimal pump operations considering pump switches. Journal of Water Resources Planning and Management, 120(1), pp.17-35. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:1(17).

López-Ibáñez, M., Prasad, T.D. and Paechter, B., 2008. Ant colony optimization for optimal control of pumps in water distribution networks. Journal of water resources planning and management, 134(4), pp.337-346.

Mackle, G., Savic, G.A. and Walters, G.A., 1995, September. Application of genetic algorithms to pump scheduling for water supply. In First international conference on genetic algorithms in engineering systems: innovations and applications (pp. 400-405). IET.

Menke, R., Abraham, E., Parpas, P. and Stoianov, I., 2016. Demonstrating demand response from water distribution system through pump scheduling. Applied Energy, 170, pp.377-387.

Rodin, S.I. 1998. Use of genetic algorithm for optimal control of bulk water supply. [Online]. http://stullia.t-k.ru/waterpump/ waterpump.htm. [May 5, 2001].

Rodin, S.I., and M. Moradi-Jalal. 2002 Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations. WAPIRRA program. [Online]. http://stullia.tk. ru/waterpump/waterpump.htm. [June 10, 2002].

Savic, D.A., Walters, G.A. and Schwab, M., 1997, April. Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply. In AISB international workshop on evolutionary computing (pp. 227-235). Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/BFb0027177.

Van Zyl, J.E., Savic, D.A. and Walters, G.A., 2004. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. Journal of water resources planning and management, 130(2), pp.160-170.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال یازدهم. شماره چهل و سوم. بهار۱۴۰۰

Multi-purpose optimal operation of serial pump stations in water conveyance systems (Case study: Shiraz water conveyance system from Doroudzan Dam)

Jafar Jafari-Asl [1], Gholamreza Azizyan [2,*], Seyed Arman Hashemi Monfared [3], Mohsen Rashki[4]

Abstract

Nowadays, with increasing energy consumption costs, the optimization of energy efficient processes is being more considered than before. The essential part of the operational cost of water conveyance systems is energy consumption and maintenance costs of pumping stations. Therefore, it is necessary to develop an efficient method for optimal operation of these stations in order to reduce energy consumption and pumps maintenance costs. In this study, the optimal operation of pumping stations is considered as a multi-purpose optimization problem with the objective functions: 1- energy costs 2- maintenance costs. In order to resolve this problem, an optimization— simulation model based on Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) is coupled to the EPANET hydraulic simulation model. The proposed model is applied to find the optimal pump scheduling program of Shiraz water conveyance system from Doroudzan Dam. Results revealed that by considering all different limitations of the problem, the energy costs were 30% and 5% less than the current state of operation and previous studies respectively. Also, the proposed model can decrease the cost of pumps maintenance by controlling the number of pump switches.

Keywords: Pump scheduling program, water conveyance systems, Multi-objective optimization, Energy costs, Droudzan dam.

[1] PhD student of civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Jafar.Jafariasl@pgs.usb.ac.ir.
[2] Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. G.azizyan@eng.usb.ac.ir (author for correspondence)
[3] Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Hashemi@eng.usb.ac.ir.
[4] Assistant Professor of Architectural Engineering, Department of Architectural Engineering, Faculty of Arts and Architecture, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Mrashki@eng.usb.ac.ir.

Multi-purpose optimal operation of serial pump stations in water conveyance systems (Case study: Shiraz water conveyance system from Doroudzan Dam)

Jafar Jafari-Asl[1], Gholamreza Azizyan [2,*], Seyed Arman Hashemi Monfared [3], Mohsen Rashki[4]

Introduction

Nowadays, with increasing energy consumption costs, the optimization of energy efficient processes is being more considered than before. The essential part of the operational cost of water conveyance systems is energy consumption and maintenance costs of pumping stations. Therefore, it is necessary to develop an efficient method for optimal operation of these stations in order to reduce energy consumption and pumps maintenance costs. Several consecutive pumping stations are used to transfer water from Doroudzan dam to Shiraz city imposing high energy consumption and maintenance costs. In two different studies, Kashkooli and Bahrami (2017) and Kashkooli et al. 2017 presented two simulation-optimization models by integrating EPANET, artificial bee colony (ABC) and genetic algorithm (GA) models to optimize the energy consumption of the pumping stations from Doroudzan to Shiraz. Through the developed models, they were able to reduce the amount of energy consumption by a rate of 28 and 29% compared to the conventional mode of operation. In this study, the optimal operation of pumping stations of Shiraz water conveyance system from Doroudzan Dam is considered as a multi-purpose optimization problem with the objective functions: 1- energy costs 2- maintenance costs. In order to resolve this problem, an optimization— simulation model based on Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) is coupled to the EPANET hydraulic simulation model. Results revealed that by considering all different limitations of the problem, the energy costs were 30% and 5% less than the current state of operation and previous studies respectively. Also, the proposed model can decrease the cost of pumps maintenance by controlling the number of pump switches.

Methodology

In this study, the optimization of pump scheduling problem is considered as a multi-objective problem with two objective functions of energy consumption and maintenance costs. The mathematical formulation of the problem is described below. The first objective function is to minimize the cost of energy consumption ($C_E(s)$) of the pumps, which is calculated through a simulation for a statistical period using the following equations (Lansey and Awumah, 1994):

$$C_E(s) = C_D + C_c \quad (1)$$

$$C_D = \sum_{n=1}^{NP}(P_D \times E_D(n)) \quad (2)$$

[1] PhD student of civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Jafar.Jafariasl@pgs.usb.ac.ir.
[2] Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. G.azizyan@eng.usb.ac.ir (corresponding author).
[3] Associate Professor of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Hashemi@eng.usb.ac.ir.
[4] Assistant Professor of Architectural Engineering, Department of Architectural Engineering, Faculty of Arts and Architecture, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. Mrashki@eng.usb.ac.ir.

$$C_c = \sum_{n=1}^{NP} \sum_{t=0}^{NT-1} (P_c(t) \times E_c(n,t) \times S(n,t)), \quad (3)$$

Where C_D and C_c are the consumption and the demand charge, respectively. NP is the number of pumps, NT denote the time period, $S(n,t)$ is the status of pump n at time t, $P_c(t)$ is the energy consumption tariff, P_D is the demand charge, E_c is the energy consumption rate and E_D is the maximum electrical power consumption of pump n.

$$E_c(n,t) = \frac{10^{-3}.\gamma.Q(n,t).h(n,t)}{e(n,t)} \quad (4)$$

In Eq. 4, Q is the flow through the pump, h is the dynamic head, e is the efficiency of pump and γ is the specific weight of water.

The second objective function addresses the costs of maintenance of the pumps so that it is considered as a reduction in turning on or off the pumps consecutively (Lansey and Awumah, 1994).

$$C_s(s) = \sum_{n=1}^{n=NP} P_s \sum_{t=1}^{t=NT} \left(I_{(n,t)} - I_{(n,t-1)}\right)^2 \quad (5)$$

where, P_s is the fine rate of the single pump switch, and $I_{(n,t)} \in \{0,1\}$ indicates the on or off mode of the nth pump during the time interval t.
The constraints of the optimization problem are shown in Table 1.

Table 2. constraints.

$\sum Q_{in,i} - \sum Q_{out,i} = 0$ $H_{i,t} - H_{j,t} = h_{ij,t}$ $h_{ij,t} = \frac{10.668 L_{ij} Q_{ij,t}^{1.852}}{C_{ij}^{1.852} d_{ij}^{4.871}}$	(6)
$H_{i,t} \geq H_i^{min}$	(7)
$V_k^t \leq V_{Max,k}, V_k^t \geq V_{Min,k}, V_k^t \geq V_{Ini,k}$	(8)

where $Q_{in,i}$ and $Q_{out,i}$ are the input and output flow of node i, respectively. $H_{i,t}$ and $H_{j,t}$ are the head of node i and j at time t, respectively. $h_{ij,t}$ is the head loss between nodes i and j, C_{ij} is the Hazen-Williams constant, d_{ij}, L_{ij} and Q_{ij} are the diameter, length and flow of the pipe between nodes i and j, respectively.
H_i^{min} is the minimum allowable head at node i. $V_{Ini,k}$, $V_{Min,k}$ and $V_{Max,k}$ are the initial, minimum and maximum volume of tank k, respectively. V_k^t is the storage volume of tank k at time t.
NSGA-II (Deb et al, 2002) was used to determine the optimal efficiency of the pumps in a 24-hour period by considering the mentioned functions and constraints. The optimization-simulation model was developed in MATLAB software by integrating EPANET and NSGA-II.

Discussion and Conclusion

Doroudzan dam is located 120 km away from Shiraz providing an average of 67 million cubic meters of drinking and industrial water for Shiraz city. Fig. 1 demonstrates a schematic of the model of this pipe-line system.

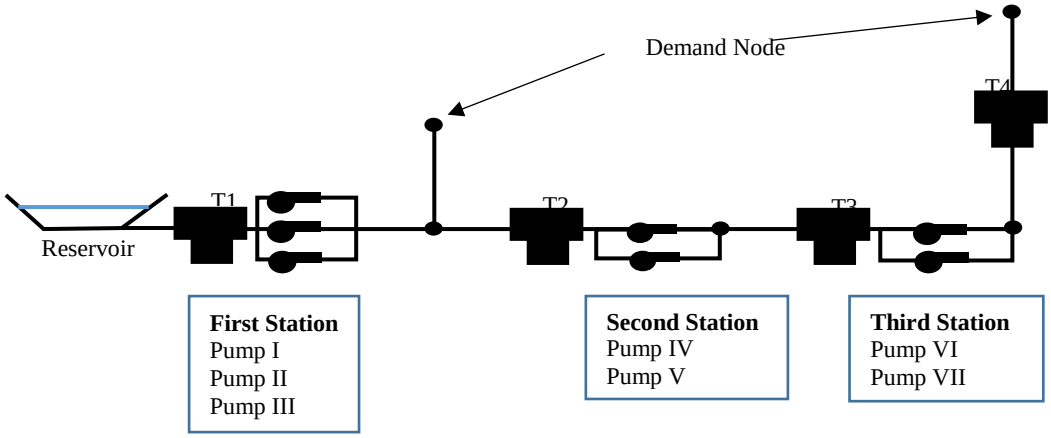


Fig. 1 schematic of the Shiraz water delivery system.

Based on the sensitivity analysis, the values of NSGA-II parameters including the initial population, number of generations, crossover and mutation rates were considered equal to 200, 300, 0.8 and 0.2, respectively. Considering the above values, the NSGA-II model was implemented by connecting to the EPANET model. After convergence of optimization model, 6 points were obtained on the Pareto (Fig. 2, Table. 2).

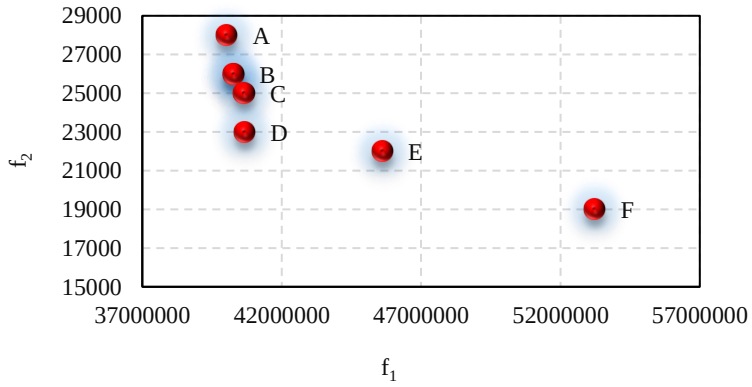


Fig. 2. The Pareto between the energy and maintenance costs.

Table 2. the solutions on pareto front.

No	f_1	f_2
A	40053436	28000
B	40290124	26000
C	40668292	25000
D	40685004	23000
E	45628840	22000
F	53252560	19000

Given that all the answers on the Pareto are optimal, also, obtained in terms of satisfying all the constraints, there is no preference between them and selection depends on the designer besides the conditions of the design. Answer D has been selected and compared with previous studies to show the

efficiency of the developed model. The cost of energy consumption in answer D is reduced by 29% compared to the consumption of a normal day. Also, according to the comparison of the results of the model developed in this study and previous two studies (Kashkooli and Bahrami, 2017, Kashkooli et al. 2017), costs of energy consumption and maintenance were reduced by 5 and 80%, respectively, observing all the constraints of the problem, which shows that the developed model has acceptable efficiency.

The most important references

Kashkooli, B., Bahrami, M. 2017. Optimized Operation of Serial Pump Stations of the Shiraz Water Delivery System, Using the Genetic Algorithm. Water Resources Engineering Journal, 10(33), 1-12 (In Persian).

. Kashkooli, B., Bahrami, M., Ansari, J. 2017. Optimized Operation of Pump Stations of Water Delivery System Using Bees Algorithm. Journal of water and soil conversation, 23(5), 175-189 (In Persian).

Lansey, K.E. and Awumah, K., 1994. Optimal pump operations considering pump switches. Journal of Water Resources Planning and Management, 120(1), pp.17-35.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.A.M.T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), pp.182-197.