

## ۹) روش تحقیق

برای اجرای تحقیق با عنوان «بهینه‌سازی چندهدفه کیفیت آب، ظرفیت مخازن زمینی و هزینه پمپاژ در سیستم توزیع آب شهرستان مورد نظر، مراحل زیر به صورت جامع و مرحله به مرحله تدوین شده است:

### تعریف اهداف و شاخص‌های کلیدی تحقیق

در این مرحله، اهداف اصلی تحقیق شامل بهینه‌سازی هم‌زمان کیفیت آب (از طریق شاخص‌های سن آب و غلظت باقی‌مانده کلر)، ظرفیت بهینه مخازن زمینی و هزینه‌های عملیاتی پمپاژ تعریف می‌شوند. همچنین شاخص‌هایی مانند صرفه‌جویی انرژی و پایداری کیفیت آب به عنوان معیارهای ارزیابی موفقیت انتخاب می‌شوند.

### جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها:

داده‌های مورد نیاز شامل اطلاعات توپولوژیکی شبکه توزیع، ویژگی‌های هیدرولیکی خطوط انتقال، محل و ظرفیت مخازن زمینی، داده‌های مصرف، الگوی زمانی تعرفه برق، و مشخصات مربوط به تزریق کلر از طریق مطالعات میدانی، منابع موجود و شرکت آب و فاضلاب محلی استخراج و پیش‌پردازش می‌شوند.

### اندازه‌گیری میدانی فشار و نمونه‌برداری کیفیت آب

به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی شبیه‌سازی شده، بخش میدانی پژوهش شامل دو فعالیت کلیدی خواهد بود:

#### ۱. اندازه‌گیری فشار در گره‌های کلیدی شبکه توزیع

با استفاده از فشارسنج‌های دیجیتال دارای دیتالاگر، فشار در نقاط حیاتی شبکه (نزدیک به پمپ، دورترین گره‌ها، نقاط مرتفع) در بازه‌های زمانی مشخص (مثلاً هر ۱۵ دقیقه در یک بازه ۲۴ ساعته) ثبت خواهد شد. داده‌های حاصل، به منظور تطبیق با نتایج مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی مورد تحلیل قرار خواهند گرفت.

#### ۲. نمونه‌برداری از آب جهت اندازه‌گیری غلظت کلر باقی‌مانده

در زمان‌های مختلف شبانه‌روز، از آب موجود در گره‌های توزیع (مصارف خانگی و انتهای خطوط) نمونه‌برداری شده و میزان کلر باقیمانده (Free Residual Chlorine) با استفاده از کیت‌های تست

DPD یا دستگاه‌های فتومتر دقیق اندازه‌گیری خواهد شد. این مقادیر با استاندارد مطلوب) حدود ۰.۵ تا ۰.۸ mg/L مقایسه شده و کسری کلر (Chlorine Deficiency) به صورت عددی استخراج می‌گردد.

این داده‌ها به عنوان ورودی برای واسنجی مدل کیفی شبکه استفاده شده و در تعریف دقیق تر تابع هدف دوم (حداقل سازی کسری کلر) نقش خواهند داشت.

### مدل سازی عددی شبکه

یک مدل شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار تخصصی شبیه سازی جریان آب در شبکه های توزیع طراحی می شود. این مدل قادر است پارامترهای هیدرولیکی نظیر فشار، جریان، سن آب و توزیع کلر را شبیه سازی کرده و رفتار سیستم را تحت سناریوهای مختلف بهره برداری تحلیل کند.

### فرمول بندی ریاضی و توسعه مدل بهینه سازی چندهدفه

#### توابع هدف:

○ تابع هدف ۱: کمینه سازی سن آب

$$\min f_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \cdot Q_i$$

که در آن  $f_1$  تابع هدف مرتبط با سن آب،  $N$  تعداد گره های مصرف،  $A_i$  سن آب در گره  $i$  بر حسب ساعت یا دقیقه و  $Q_i$  دبی عبوری از گره  $i$  بر حسب لیتر بر ثانیه یا مترمکعب در ساعت می باشد

○ تابع هدف ۲: بیشینه سازی کلر باقی مانده

$$\max f_2 = \sum_{j=1}^M C_j^{res} \cdot Q_j$$

که در آن  $f_2$  مقدار تابع هدف مرتبط با کلر باقیمانده،  $M$  تعداد گره های کنترل کلر،  $C_j^{res}$  غلظت باقیمانده کلر در گره  $j$  بر حسب میلیگرم در لیتر و  $Q_j$  دبی عبوری از گره  $j$  بر حسب لیتر بر ثانیه یا مترمکعب در ساعت می باشد

○ تابع هدف ۳: کمینه سازی هزینه انرژی پمپ ها

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T E(t) \cdot TOU(t)$$

که در آن  $f_3$  مقدار تابع هدف مرتبط با هزینه کل انرژی مصرفی به ریال،  $T$  تعداد بازه های زمانی،  $E(t)$  انرژی مصرفی در زمان  $t$  بر حسب کیلووات ساعت و  $TOE$  تعرفه ی انرژی در زمانبر حسب ریال بر کیلووات ساعت می باشد.

## ○ قیود مساله

### ▪ محدودیت فشار در گره ها

$$H_i(t) \geq H_{\min}$$

که در آن  $H_i(t)$  فشار در گره  $i$  در زمان  $t$  و  $H_{\min}$  فشار حداقل قابل قبول برای گره ها (معمولا ۱۵ الی ۲۰ متر آب) می باشد.

### ▪ محدودیت حجم ذخیره

$$V_{\min} \leq V_{\text{tank}}(t) \leq V_{\max}$$

که در آن  $V_{\text{tank}}(t)$  حجم لحظه ای ذخیره در مخزن در زمان  $t$  بر حسب مترمکعب و  $V_{\min}$  حداقل حجم مجاز و  $V_{\max}$  حداکثر ظرفیت فیزیکی مخزن بر حسب مترمکعب می باشد.

### ▪ محدودیت مجاز غلظت کلر

$$0 \leq C_i(t) \leq C_{\max}$$

که در آن  $C_i(t)$  غلظت کلر در گره  $i$  در زمان  $t$  بر حسب میلی گرم در لیتر می باشد و  $C_{\max}$  حداکثر مقدار مجاز کلر طبق استاندارد ملی / بین المللی بر حسب میلی گرم در لیتر می باشد.

### ▪ معادله تراز حجمی مخزن

$$V_{\text{tank}}(t + \Delta t) = V_{\text{tank}}(t) + (Q_{\text{in}} + Q_{\text{out}}) \cdot \Delta t$$

که در آن  $V_{\text{tank}}(t)$  حجم آب در مخزن در زمان  $t$ ،  $Q_{\text{in}}$  دبی ورودی به مخزن بر حسب لیتر بر ثانیه و یا مترمکعب بر ساعت،  $Q_{\text{out}}$  دبی خروجی از مخزن و  $\Delta t$  بازه زمانی محاسبات (مثلا ۱ ساعت یا ۱۵ دقیقه)

### ▪ محدودیت تعداد دفعات روشن / خاموش شدن پمپها

$$\sum_t y_t \leq \text{MaxStarts}, \quad y_t \in \{0,1\}$$

$y_t$  متغیر باینری نشان دهنده روشن بودن پمپ در زمان  $t$  و  $\text{MaxStarts}$  حداکثر دفعات مجاز روشن / خاموش شدن پمپ در طول روز

## بهینه سازی عملکرد شبکه توزیع آب با الگوریتم NSGA-III و تحلیل جبهه پارتو

در این پژوهش، به منظور بهینه سازی همزمان سه جنبه ی کلیدی عملکرد شبکه توزیع آب شامل کیفیت هیدرولیکی، کیفیت شیمیایی و بهره وری انرژی، از الگوریتم تکاملی غیرمغلوب NSGA-III استفاده شده است. این الگوریتم، که نسخه ای پیشرفته تر از NSGA-II محسوب می شود، به طور خاص برای حل مسائل چندهدفه با سه یا تعداد بیشتری تابع هدف طراحی شده و از بردارهای مرجع نرمال شده برای پوشش یکنواخت تر جبهه پارتو بهره می برد.

به جای ترکیب خطی توابع هدف با ضرایب وزن، NSGA-III مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیر مغلوب (Pareto optimal) را تولید می‌کند که هر کدام تعادلی متفاوت میان اهداف دارند و هیچ‌یک بر دیگری غالب نیستند. ساختار جمعیتی و تکاملی این الگوریتم، مبتنی بر اصول انتخاب طبیعی، تقاطع (Crossover) و جهش (Mutation) است.

### توابع هدف مورد استفاده در مدل

سه تابع هدف اصلی این پژوهش به شرح زیر هستند:

تابع هدف اول برای کمینه سازی سن آب

$$f_1 = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{t=1}^T w_{i,t} \cdot A_{i,t}$$

که در آن  $A_{i,t}$  سن آب در گره  $i$  و زمان  $t$  و  $w_{i,t}$  وزن جریان یا مصرف در آن گره است.

تابع هدف دوم برای کنترل خطای کلر باقیمانده

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{t=1}^T \left( \frac{Cl - Cl_{i,t}^{target}}{Cl_{i,t}^{target}} \right)^2$$

که در آن  $Cl_{i,t}$  مقدار کلر باقیمانده در گره  $i$  و زمان  $t$  و  $Cl_{target}$  مقدار هدف برای کلر است (مثلاً ۰.۶ میلیگرم در لیتر)

تابع هدف سوم برای هزینه انرژی پمپ ها

$$f_3 = \sum_{p=1}^{N_p} \sum_{t=1}^T \left( \frac{\rho g Q_{p,t} H_{p,t}}{\eta_p} \cdot \Delta t \cdot C_{elec,t} \right)$$

که در آن  $Q_{p,t}$  دبی،  $H_{p,t}$  هد پمپ،  $\eta_p$  راندمان،  $C_{elec,t}$  تعرفه برق و  $\Delta t$  گام زمانی است.

### مراحل اصلی الگوریتم: NSGA-III

۱. تولید جمعیت اولیه: ایجاد جمعیتی اولیه از کروموزوم‌ها که هر کدام بیانگر یک راه حل ممکن هستند.

۲. ارزیابی اهداف: هر کروموزوم بر اساس توابع هدف تعریف شده و قیود عملکردی شبکه مورد ارزیابی قرار می گیرد.
۳. مرتب سازی غیرمغلوب: تعیین جبهه های پارتو با استفاده از اصل غالب نبودن.
۴. تخصیص بردارهای مرجع: برای هر راه حل نزدیک ترین بردار مرجع در فضای هدف مشخص می شود.
۵. محاسبه تراکم: راه حل هایی که در نواحی با تراکم کمتر قرار دارند، برای حفظ تنوع در نسل های بعدی انتخاب می شوند.
۶. اعمال عملگرهای ژنتیکی: با اجرای عملیات انتخاب، تقاطع و جهش، جمعیت نسل جدید تولید می شود.

### نحوه اعمال قیود و تابع جریمه (Penalty Function)

در ساختار NSGA-III، قیود فیزیکی و عملیاتی شبکه (شامل محدودیت فشار، غلظت کلر باقیمانده، حجم مخازن، معادله تراز حجمی، و تعداد دفعات روشن و خاموش شدن پمپ ها) به صورت صریح کنترل می شوند. در صورتی که یک کروموزوم هر یک از این قیود را نقض کند، از تابع جریمه استفاده می شود که به صورت افزودن یک مقدار جریمه به توابع هدف آن کروموزوم یا کاهش رتبه آن در فرآیند مرتب سازی غیرمغلوب اعمال می گردد. فرمول عمومی تابع جریمه در این پژوهش به صورت زیر تعریف می شود:

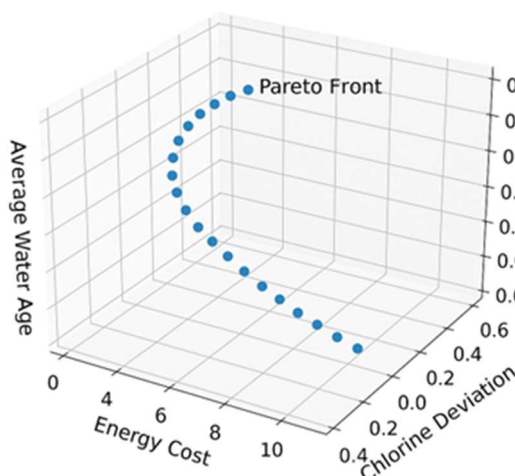
$$Penalty = \alpha \sum_{j=1}^{N_g} [\max(0, g_j^{min} - g_j) + \max(0, g_j - g_j^{max})]$$

که در آن  $g_j$  مقدار واقعی پارامتر کنترل شده در کروموزوم (مثلاً فشار، کلر، حجم و...)،  $g_j^{min}$  و  $g_j^{max}$  حدود مجاز برای پارامتر  $j$  هستند. مقدار  $\alpha$  نیز ضریب بزرگی است که شدت جریمه را تعیین می کند و  $N_g$  تعداد کل قیود مدل می باشد. این تابع جریمه باعث می شود که راه حل های ناقض قیود به صورت خود کار از رقابت برای انتخاب در نسل های بعدی کنار گذاشته شوند.

### تحلیل جبهه پارتو و تصمیم گیری چندمعیاره

در مسائل بهینه سازی چندهدفه، دستیابی به یک راه حل یکتا که هم زمان همه اهداف را در حد مطلوب برآورده کند، معمولاً امکان پذیر نیست. به جای آن، مجموعه ای از راه حل های غیرمغلوب ایجاد می شود که تعادل های مختلفی بین اهداف برقرار می کنند. این مجموعه، جبهه پارتو (Pareto Front) نامیده می شود.

شکل ۱ نمونه‌ای نمادین از چنین جبهه‌ای را به تصویر می‌کشد. در این تصویر، محورهای سه‌گانه به ترتیب نمایانگر هزینه انرژی (Energy Cost)، میانگین سن آب (Average Water Age)، و خطای انحراف کلر (Chlorine Deviation) هستند.



شکل ۱- شماتیک جبهه پاراتو

نقاط آبی ترسیم شده بر روی جبهه پاراتو، هر کدام یک راه حل غیر مغلوب را نشان می‌دهند؛ یعنی راه حلی که در یکی از اهداف بهتر است ولی در هدف(های) دیگر ممکن است عملکرد پایین‌تری داشته باشد.

این نمودار ابزار بسیار قدرتمندی برای تحلیل حساسیت، درک تعارض بین اهداف و انتخاب بهترین سناریو برای بهره‌برداری از سیستم فراهم می‌آورد. در گام نهایی، بهره‌بردار می‌تواند با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند TOPSIS یا روش فاصله از نقطه آرمانی، مناسب‌ترین گزینه را با توجه به اولویت‌های خاص پروژه انتخاب نماید.

### تدوین گزارش نهایی و ارائه پیشنهادات

در گام پایانی، تحلیل نتایج به همراه جداول تصمیم‌یار، نمودارهای تحلیلی، و پیشنهاداتی برای توسعه روش، بهینه‌سازی سناریوهای جدید و پیاده‌سازی در مقیاس‌های بزرگ‌تر تهیه و ارائه می‌شود.