

بهینه‌سازی تانک ذخیره با در نظر گرفتن قیود کیفی در شبکه‌های توزیع آب

نگار خواجه‌پور (کارشناس ارشد)

مسعود تابش* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۶ (۱۳-۲)
دوری ۳۳-۲، شماره ۱/۱، ص. ۱۱-۱۹

در سامانه‌های آب‌رسانی شهری، تانک‌های ذخیره برای مقاصدی چون ذخیره‌سازی آب به منظور متعادل‌سازی نوسانات مصرف و نیز تأمین و متعادل‌سازی فشار طراحی، ذخیره‌ی اضطراری و آتش‌نشانی احداث می‌شوند. همچنین رساندن آب آشامیدنی با کیفیت استاندارد به دست مصرف‌کننده، وظیفه‌ی اصلی کلمه‌ی شرکت‌های آب و فاضلاب است. در این نوشتار، با توجه به هزینه‌ی بالای احداث تانک‌های ذخیره، بهینه‌سازی دو هدفه‌ی هزینه‌ی ساخت تانک‌های ذخیره (بعد ارتقاعی تانک) در تقابل با قابلیت اطمینان آن با در نظر گرفتن قید سن آب انجام شده است. الگوریتم بهینه‌سازی فراکوشی جامعه‌ی مورچگان (ACO) در ترکیب با نرم‌افزار شبیه‌ساز EPANET، برای ایجاد مدل مناسب به کار گرفته شده است. میزان تراز اولیه‌ی آب در تانک‌ها در شبکه‌ی Anytown به عنوان مطالعه‌ی موردی به گونه‌ی بهینه‌ی شده است که در طول شبانه‌روز از حجم در نظر گرفته‌شده‌ی آنها کاملاً استفاده شود.

واژگان کلیدی: تانک ذخیره، کیفیت آب، الگوریتم بهینه‌سازی دو هدفه‌ی جامعه‌ی مورچگان، قابلیت اطمینان، هزینه.

۱. مقدمه

تانک‌های ذخیره، علاوه بر اینکه از پرهزینه‌ترین اجزاء شبکه‌ی توزیع آب هستند، نقش مهمی را به عنوان تأمین‌کننده‌ی آب موردنیاز با فشار و دبی کافی به مصرف‌کننده بازی می‌کنند. بنابراین بررسی دقیق تانک‌های ذخیره، اهمیت ویژه‌ی دارد. در سال‌های اخیر، بحث کاهش هزینه‌های ساخت یا بهره‌برداری و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان اجزاء شبکه‌های توزیع آب به صورت یک مسئله‌ی بهینه‌یابی با رویکردی چندهدفه مورد بررسی قرار گرفته است. در مسائل مذکور اهدافی چندگانه، که گاه در تناقض با یکدیگر هستند، مطرح شده‌اند. از طرف دیگر، هر چه تعداد قیود در نظر گرفته‌شده در مرحله‌ی طراحی بیشتر باشد، به عملکرد شبکه در شرایط بحرانی اطمینان بیشتری می‌توان داشت. در شبکه‌های توزیع آب ممکن است شرایط بحرانی مختلفی از قبیل: اعمال دبی آتش‌نشانی، افزایش تقاضا، شکستن لوله‌ها و یا تغییر در پارامترهایی که در کیفیت آب مؤثرند، رخ دهد. تاکنون الگوریتم‌های بسیاری برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه‌ی اجزاء شبکه‌ی توزیع آب ارائه شده است. با وجود این، گزارش‌های اندکی در زمینه‌ی در نظر گرفتن عامل هزینه‌ی ساخت برخی از اجزاء سیستم در تقابل با قابلیت اطمینان اجزاء شبکه از جمله تانک‌ها، و در نظر گرفتن نقش کیفیت آب به طور هم‌زمان ارائه شده است. به همین دلیل نیاز به استفاده از روشی که با در نظر گرفتن اهداف مختلف، بهترین مجموعه‌ی جواب‌ها را ارائه دهد،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۹/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۳/۹، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۳.

negar.khajehpur@ut.ac.ir
mtabesh@ut.ac.ir

تانک، حجم و تراز آب تانک به‌عنوان متغیرهای تصمیم در مسائل بهینه‌سازی، نوع بهره‌برداری نیز در طراحی تانک‌های ذخیره دخیل است. تانک‌ها برای فراهم ساختن حجم متعادل‌سازی و ذخیره‌ی اضطراری در شبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. هرگاه تعداد تانک‌ها در شبکه بیش از یکی باشد، مسائل طراحی و بهره‌برداری از سیستم به مراتب پیچیده‌تر می‌شود.^[5] در سال ۲۰۱۴، به بهینه‌سازی تک‌هدفی کمیته‌سازی هزینه‌های پمپاژ با استفاده از پمپ دور متغیر توسط الگوریتم جامعه مورچگان پرداخته شده و توان مصرفی برای کل طول روز بدون توجه به قابلیت اطمینان ایستگاه پمپاژ به‌دست آمده است.^[6] همچنین به بهینه‌سازی چندهدفی بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب پرداخته شده است، به گونه‌ی که وضعیت پمپ‌ها (روشن یا خاموش) و تراز آب در تانک‌ها به‌عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده است.^[7] در این راستا با استفاده از متغیرهای تصمیم قطر لوله‌ها، هد پمپ‌ها، بیشینه‌ی توان پمپ‌ها و حجم ذخیره‌ی تانک‌ها در مرحله‌ی طراحی و متغیرهای تصمیم هد و تراز آب در تانک‌ها در مرحله‌ی بهره‌برداری به بهینه‌سازی شبکه‌ی توزیع آب پرداخته شده است.^[8] همچنین به بهینه‌سازی دو هدفی کمیته‌سازی هزینه‌ی پمپاژ و بیشینه‌کردن کیفیت آب در شبکه‌های توزیع آب با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان تانک ذخیره به کمک الگوریتم SPEA۲ پرداخته شده است.^[9] همچنین با استفاده از تعریف قابلیت اطمینان ایستگاه پمپاژ در شبکه‌ی توزیع آب، به بهینه‌سازی دو هدفی کمیته‌کردن هزینه‌های ایستگاه پمپاژ در تقابل با بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان آن با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش قابلیت اطمینان ایستگاه پمپاژ به هزینه‌ی بهره‌برداری آن افزوده می‌شود. ظرفیت بیشتر تانک ذخیره باعث برطرف شدن بیشتر تقاضای شبکه می‌شود و در نتیجه قابلیت اطمینان آن افزایش می‌یابد.^[۱۰] همچنین روشی برای بهینه‌سازی کیفی شبکه‌های توزیع آب براساس وضعیت دور پمپ، نحوه‌ی تزریق کلر و نوع روش تحلیل (مبتنی بر تقاضا یا فشار) ارائه شده است.^[۱۱]

سن آب در شبکه به‌عنوان یکی از پارامترهای کیفی محسوب می‌شود، که افزایش آن باعث کاهش طعم، بو و مزه‌ی آب از میزان استاندارد می‌شود؛ لذا، زوال کیفیت آب در ارتباط مستقیم با سن آب قرار دارد. بنابراین در بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری تأسیسات تانک‌های ذخیره در شبکه‌های توزیع آب، کمیته‌سازی زمان ماند، یکی از اهداف اصلی خواهد بود.^[۱۲] همچنین با تلفیق مدل هیدرولیکی و کیفی EPANET۲۰ و نیز مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مکان ایستگاه‌های تزریق کلر و دز آنها در شبکه‌های توزیع آب بهینه شده است و تابع تک‌هدفی آنها، کمیته‌سازی میزان کلر مصرفی بوده است، در حالی که میزان کلر باقیمانده در هر گره در محدوده‌ی استاندارد واقع شود.^[۱۳] برخی پژوهشگران اظهار کرده‌اند که افزایش ظرفیت تانک‌های ذخیره باعث افزایش هزینه‌ها و همین‌طور افزایش زمان ماند آب در تانک ذخیره می‌شود و طراحان باید بین این دو هدف متضاد، تعادل برقرار کنند.^[۱۴] از این رو بهینه‌سازی هزینه‌ی ساخت تانک‌های ذخیره منجر به بهینه‌سازی و کاهش هزینه‌های کل شبکه می‌شود.

بیشتر نرم‌افزارهای موجود در بازار از جمله EPANET۲۰ برای محاسبه‌ی پارامترهای هیدرولیکی شبکه از روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا (DDSM)^۱ استفاده می‌کنند. از آنجا که در این روش دبی خروجی از گره‌ها با تغییرات فشار ثابت می‌ماند، لذا این روش قادر نیست در شرایط غیرنرمال بهره‌برداری (مانند افزایش تقاضا یا شکست اجزاء سیستم) جواب‌های صحیح و منطبق بر واقعیت را تولید کند. بنابراین با توجه به اینکه امکان کاهش فشارهای گره‌ی از مقدار کمیته و حتی منفی شدن آن وجود دارد، قید کمیته‌ی فشار استاندارد برای گره‌های مصرف اعمال می‌شود. لیکن از آنجا که روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار (HDSM)^۲

به دلیل در نظر گرفتن رابطه‌ی دبی - فشار در هر گره در حالات بحرانی در شرایط بهره‌برداری جواب‌های مناسب‌تر و واقعی‌تری می‌دهد، لازم است برای ارزیابی واقعی‌تر از پارامترهای هیدرولیکی و عملکرد شبکه از این روش استفاده شود. متأسفانه بیشتر مقالات موجود در زمینه‌ی این پژوهش از روش DDSM استفاده می‌کنند، لذا در جواب‌های مربوط به شرایط بهره‌برداری دچار خطا هستند. در پژوهش حاضر، تأثیر استفاده از تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار به تناسب نیاز مشاهده شده است. با توجه به اینکه تانک ذخیره از مهم‌ترین بخش‌های شبکه‌ی توزیع آب به‌شمار می‌رود، بهینه‌سازی شاخص قابلیت اطمینان آن در تقابل با هزینه به همراه در نظر گرفتن قیود کیفی به منظور بررسی عملکرد هر چه بهتر هیدرولیکی و کیفی شبکه ضروری است. در این نوشتار با توجه به توضیحات ارائه شده و نیاز بهره‌برداران شبکه‌های توزیع آب، بهینه‌سازی چندهدفی کمیته‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تانک‌های ذخیره به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مؤثر در عملکرد و هزینه‌ی شبکه با استفاده از الگوریتم دودهدفی جامعه‌ی مورچه‌ها (با استفاده از تلفیق مدل بهینه‌سازی در محیط Visual C++ و شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفی به وسیله‌ی نرم‌افزارهای EPANET۲۰-EMITTER و EPANET۲۰)، پرداخته شده است. سپس با ارائه‌ی رابطه‌ی بین قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک و شبکه، تأثیر اطمینان‌پذیری تانک در قابلیت اطمینان کل سیستم بررسی شده است. همچنین برای تحلیل هیدرولیکی و محاسبه‌ی شاخص قابلیت اطمینان، به تناسب از دو روش DDSM و HDSM استفاده شده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش، توابع هدف، قیود و الگوریتم مسئله‌ی بهینه‌سازی به همراه شاخص‌های قابلیت اطمینان و مدل‌سازی هیدرولیکی ارائه شده است.

۱.۲. توابع هدف و قیود بهینه‌سازی

۱.۱.۲. تابع هدف اول: کمیته‌سازی هزینه‌ی تانک

حجم مفید تانک‌های ذخیره، قسمتی از حجم تانک است که آب موجود در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد و شامل حجم موردنیاز برای جبران نوسانات ساعتی مصرف (حجم متعادل‌کننده)، حجم موردنیاز برای تأمین مصارف آتش‌نشانی و ذخیره‌ی اضطراری است. لذا حجم مفید تانک‌های ذخیره از محاسبه‌ی سه بخش ذکر شده تعیین می‌شود و در صورت نبودن اطلاعات کافی، در شرایط معمولی، حجم مفید بین ۵۰ تا ۸۰ درصد بیشینه‌ی مصرف روزانه‌ی پیش‌بینی شده در پایان دوره‌ی طرح توصیه می‌شود.^[۱۵] با توجه به موارد ذکر شده، تراز آب موجود در تانک ذخیره در شبکه‌ی توزیع آب در طول شبانه‌روز از حد معینی که شامل حجم اضطراری به همراه حجم ذخیره‌ی آتش‌نشانی است، نمی‌تواند کمتر باشد. به‌طور کلی تفاوت تانک ذخیره با مخزن در قابلیت پر و خالی شدن آن است. مخزن با هد ثابت در طول شبانه‌روز است، ولی تراز آب و در نتیجه حجم تانک ذخیره، قابلیت تغییر با نوسانات آب را دارد و لذا، تراز آب در تانک می‌تواند به‌عنوان متغیر تصمیم در طراحی حجم تانک‌های ذخیره مورد استفاده قرار گیرد.

در این پژوهش، کمیته‌سازی هزینه‌ی ساخت تانک‌ها (معادله‌ی ۱)، به‌عنوان تابع هدف اول در نظر گرفته شده است.^[۱۶]

$$TCC = \sum_{i=1}^{N_{ta}} UTC_i(d_{ta}^i) \times \max(h_{1,i}, \dots, h_{k,i}, \dots, h_{T,i}) \quad (1)$$

اطمینان بهره‌برداری از تانک موجود در شبکه هستند. R_1 به صورت رابطه‌ی ۷ قابل فرموله‌شدن است:

$$R_1 = \frac{H_{\max} - H_1}{H_2 - H_1} \quad (7)$$

همچنین R_2 میزان قابلیت اطمینان استفاده از حجم اضطراری و آتش‌نشانی است، که از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید:

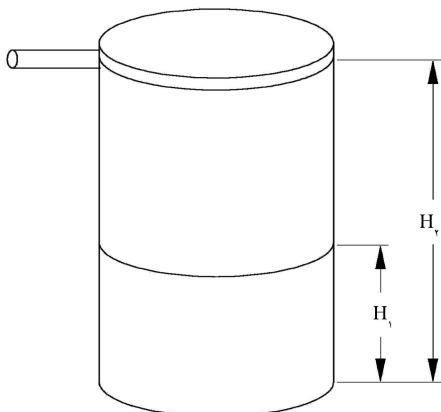
$$R_2 = \frac{H_{\min}}{H_1} \quad (8)$$

در معادلات مذکور، پارامترهای H_1 و H_2 به صورت شکل ۱ قابل تعریف هستند. همچنین H_{\max} برابر با بیشینه‌ی تراز آب موجود در تانک در طول شبانه‌روز و H_{\min} برابر با کمینه‌ی تراز آب موجود در تانک در طول آنالیز دوره‌ی گسترده است.

زمانی قابلیت اطمینان تانک به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد که میزان کمینه‌ی تراز آب موجود در تانک (H_{\min}) بر تراز H_1 و همچنین بیشینه‌ی تراز آب موجود در تانک (H_{\max}) بر بیشینه‌ی ارتفاع تانک H_2 منطبق شود. به این معنا که از مجموع حجم اضطراری و آتش‌نشانی در طول شبانه‌روز هیچ استفاده‌ی نشود و از حجم متعادل‌سازی بیشینه استفاده شود و آب بین این دو تراز در طول شبانه‌روز دست‌کم یک بار پر و خالی شود. لازم به ذکر است که قید عدم وجود فشار منفی برای تمامی گره‌های شبکه مد نظر قرار گرفته است. در این پژوهش از آن جهت که برای افزایش قابلیت اطمینان تانک در شبکه، فرض بر آن است که تراز آب در محدوده‌ی تراز متعادل‌سازی تغییر کند و از تراز ذخیره‌ی آتش‌نشانی و اضطراری استفاده نشود، ضریب α_2 برابر با صفر و ضریب α_1 برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه از میانگین‌گیری وزنی بین قابلیت اطمینان تک‌تانک‌ها از رابطه‌ی ۹ قابل محاسبه خواهد بود:

$$R_{ta, total} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ta}} R_{tai} \times V_{tai}}{\sum_{i=1}^{N_{ta}} V_{tai}} \quad (9)$$

که در آن، $R_{ta, total}$ قابلیت اطمینان بهره‌برداری از تانک‌های موجود در شبکه است. R_{tai} قابلیت اطمینان تانک i ام، V_{tai} حجم آب داخل تانک i ام (بیشینه‌ی تراز آب در تانک منهای تراز ذخیره‌ی اضطراری و آتش‌نشانی در تانک i ام)، و N_{ta} تعداد تانک‌های شبکه هستند. در صورت تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا از رابطه‌ی ۹ استفاده می‌شود.



شکل ۱. تقسیم‌بندی تراز ارتفاعی تانک (H_1 ارتفاع مورد نیاز آتش‌نشانی و اضطراری، و H_2 کل ارتفاع تانک).

$$30 \text{ m} \leq H_j \leq 50 \text{ m} \quad (2)$$

$$0 \text{ hr} \leq W_{age, j} \leq 6 \text{ hr} \quad (3)$$

$$0.3 \text{ m/s} \leq v_{ij} \leq 2 \text{ m/s} \quad (4)$$

که در آن‌ها، TCC هزینه‌ی ساخت تانک (\$)، UTC_i هزینه‌ی هر متر تراز آب در واحد قطر در تانک i ام، $d_{ta, i}$ قطر تانک i ام (متر)، $h_{k, i}$ تراز آب در تانک i ام در انتهای بازه‌ی زمانی k ام (متر)، H_j هد گره‌ی j ، $W_{age, j}$ سن آب در گره j ، و v_{ij} سرعت آب در لوله‌ی ij هستند. سن آب یکی از عوامل تأثیرگذار در کیفیت آب است، که افزایش آن عامل مهمی در زوال کیفیت آب در شبکه‌های توزیع آب را ایفا می‌کند. حد بالا و پایین سن آب براساس پژوهشی در سال ۱۹۹۶، [۱۶] در نظر گرفته شده است. همچنین قید بیشینه‌ی میزان برداشت آب به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$\frac{|\sum_{j=1}^{n \text{ tank}} (S_j^{initial} - S_j^{final})|}{\sum_{j=1}^{n \text{ tank}} S_j^{final}} \leq \varepsilon \quad (5)$$

که در آن، $S_j^{initial}$ و S_j^{final} به ترتیب حجم اولیه و نهایی آب ذخیره (تراز ابتدایی و انتهایی آب) در تانک j ام به مترمکعب و ε مقدار خطای مجاز هستند. لازم به ذکر است که اگر $\varepsilon = 0$ و تعداد تانک‌ها برابر با ۱ باشد، حجم اولیه و نهایی تانک و در نتیجه تراز اولیه و نهایی تانک طی ۲۴ ساعت بر یکدیگر منطبق خواهند بود.

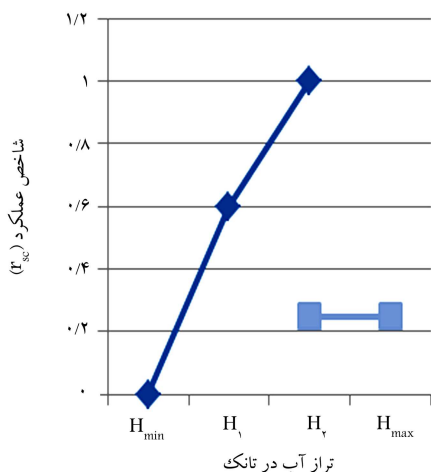
۲.۱.۲. تابع هدف دوم: بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان

به دلیل عدم توجه بهره‌بردار، عدم وجود سیستم کنترل اتوماتیک و عدم تطابق و برنامه‌ریزی لازم برای تعدیل نوسانات مصرف با حجم ذخیره‌ی تانک و آب ورودی به آن، برخی از مواقع آب تانک از بیشینه‌ی تراز آن بالاتر می‌رود و به صورت سرریز از لوله‌ی خروجی مربوط خارج می‌شود. سرریز از تانک‌های ذخیره معمولاً در ساعاتی از شبانه‌روز که پیک مصرف وجود ندارد و تقاضا در سیستم کمینه است (اغلب در نیمه شب‌ها) رخ می‌دهد. لذا در صورتی که تراز آب از ارتفاع طراحی شبکه بیشتر باشد، یعنی آب سرریز کند، قابلیت اطمینان تانک برابر با عددی نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود (۲۵٪) و این جواب مناسب با شرایط شبکه نیست. همچنین اگر از ذخیره‌ی اضطراری و آتش‌نشانی استفاده شود، به میزان بهره‌برداری از این تراز، از میزان قابلیت اطمینان کاسته می‌شود و در نهایت، در صورتی که تراز آب بین کمینه و بیشینه‌ی تراز متعادل‌سازی تغییر کند، قابلیت اطمینان تانک نسبت به میزان استفاده از این تراز متغیر خواهد بود. در این راستا، تعریفی از قابلیت اطمینان به صورت این مراحل در نظر گرفته شده است:

در صورتی که آنالیز دوره‌ی زمانی گسترده (EPS) ^۴ برای شبکه در نظر گرفته شود، در نهایت ترازهای ارتفاعی تانک در طول شبانه‌روز در دسترس خواهد بود. نحوه‌ی بهره‌برداری از حجم تانک طراحی شده و میزان استفاده از آن بسیار مهم است، که با وزن‌دهی به آن، میزان اهمیت هر یک از احجام در نظر گرفته می‌شود. در این نوشتار قابلیت اطمینان تانک (به عنوان تابع هدف دوم)، ترکیبی از بهره‌برداری از حجم متعادل‌کننده و حجم مورد نیاز برای آتش‌نشانی و ذخیره‌ی اضطراری مطابق با رابطه‌ی ۶ در نظر گرفته شده است: [۱۷]

$$R_{ta} = \alpha_1 \times R_1 + \alpha_2 \times R_2 \quad (6)$$

که در آن، α_1 و α_2 به ترتیب درصد اهمیت استفاده از حجم متعادل‌سازی و مجموع حجم آتش‌نشانی و اضطراری، R_1 قابلیت اطمینان استفاده از حجم متعادل‌سازی، R_2 قابلیت اطمینان استفاده از حجم آتش‌نشانی و اضطراری، و R_{ta} قابلیت



شکل ۲. منحنی جریمه برای ترازهای مختلف آب در تانک شبکه. [۱۷]

رابطه‌ی تعریف شده برای محاسبه‌ی قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه استفاده و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

لازم به ذکر است که تابع کمیته‌سازی ریسک به جای قابلیت اطمینان برای دست‌یابی به منحنی پارتو در نظر گرفته شده است، که مطابق رابطه‌ی ۱۳ است:

$$Risk_{ta} = 1 - R_{ta} \quad (13)$$

۲.۲. مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی و کیفی

مدل‌سازی هیدرولیکی دقیق و کامل، پیش‌نیاز انجام سایر تحلیل‌ها و بررسی‌ها بر روی وضعیت شبکه‌ی توزیع آب است. برای این منظور از نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی EPANET۲^{۱۶}، که براساس روش گرادیان عمل می‌کند، استفاده شده است. این نرم‌افزار پارامترهای هیدرولیکی و کیفی آب را در یک دوره‌ی گسترده‌ی زمانی در شبکه‌ی توزیع آب آشامیدنی پیش‌بینی می‌کند. این شبیه‌ساز، که براساس تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا عمل می‌کند، علاوه بر قابلیت مدل‌سازی شکل‌های مختلف هندسی برای تانک‌ها، انواع مختلف شیرها و پمپ‌ها، تقاضای گره‌ی با الگوهای تغییرات زمانی مختلف می‌تواند عملکرد سیستم را بر مبنای تراز آب تانک مشخص کند. همچنین برای تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار نیز از نرم‌افزار EPANET۲-EMITTER^[۱۸] که براساس روش گرادیان و با تبدیل کلیه‌ی گره‌های مصرف به افشانه عمل می‌کند، استفاده شده است.

۳.۲. الگوریتم جامعه‌ی مورچگان

برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی در این نوشتار از الگوریتم جامعه‌ی مورچگان استفاده می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی سیستم مورچه‌ها، اولین الگوریتم از دسته‌ی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچه‌هاست، که در سال ۱۹۹۶ پیشنهاد شده است.^[۱۹] تابع احتمال این الگوریتم به صورت رابطه‌ی ۱۴ تعریف شده است:

$$P_{i(j)}(k, t) = \frac{[\tau_{i(j)}(t)]^\alpha [\eta_{i(j)}]^\beta}{\sum_{j=1}^J [\tau_{i(j)}(t)]^\alpha [\eta_{i(j)}]^\beta} \quad (14)$$

که در آن، $P_{i(j)}(k, t)$ احتمال انتخاب گزینه‌ی i در زمان k در زمان t و نقطه‌ی تصمیم i قرار دارد، $\tau_{i(j)}(t)$ غلظت فرومون مسیر i در زمان t ، $\eta_{i(j)}$ هدایت‌کننده‌ی کاوشی مسیر i ، α ، β ضرایب وزنی، و J تعداد مسیرهای انتخابی

در شرایط بهره‌برداری نیاز به رابطه‌ی است که نسبت به نوسانات فشار در شبکه، حساسیت لازم را داشته باشد. لذا می‌توان قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه را به صورت توانایی تانک‌ها برای رساندن آب کافی به گره‌های مصرف به گونه‌ی که فشار آب در گره‌های مصرف از کمیته‌ی مجاز خود کمتر نشود، تعریف کرد (رابطه‌ی ۱۰):

$$R_{ta,t} = \frac{\sum_{j=1}^N Q_{(j,t)}^{avl}}{\sum_{j=1}^N Q_{(j,t)}^{req}} \quad (10)$$

که در آن، N تعداد گره‌های مصرف، $Q_{(j,t)}^{avl}$ دبی تأمین شده در گره‌ی j در زمان t ، $Q_{(j,t)}^{req}$ دبی موردنیاز در گره j در زمان t ، و $R_{ta,t}$ قابلیت اطمینان تانک در زمان t هستند.

با توجه به ضعف روش تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار، برای محاسبه‌ی مقادیر واقعی دبی‌های خروجی از گره‌ها در شرایط فشاری مختلف، رابطه‌ی قابلیت اطمینان براساس فشار گره‌ی و منطق روش HDSM به صورت رابطه‌ی ۱۱ اصلاح می‌شود:

$$R_{ta,t,Sc} = \begin{cases} 0 & \text{if } H_{j,t,Sc}^{avl} < H^{\min} \\ \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{H_{(i,t,Sc)}^{avl} - H^{\min}}{H_{(i,t,Sc)}^{des} - H^{\min}} \right)^{\gamma} \times Q_{(i,t,Sc)}^{req}}{\sum_{i=1}^N Q_{(i,t,Sc)}^{req}} & \text{if } H^{\min} \leq H_{j,t,Sc}^{avl} \leq H^{\text{des}} \\ 1 & \text{if } H_{j,t,Sc}^{avl} > H^{\text{des}} \end{cases} \quad (11)$$

که در آن، N تعداد گره‌های تقاضا، H^{\min} کمیته‌ی فشار گره‌ی مجاز، H^{des} فشار گره‌ی موردنیاز، $H_{(j,t,Sc)}^{avl}$ فشار موجود در گره‌ی j در زمان t و سناریوی Sc (برحسب متر)، $Q_{(j,t,Sc)}^{req}$ دبی موردنیاز در گره‌ی j در زمان t و سناریوی Sc (برحسب مترمکعب بر ثانیه)، $H_{(j,t,Sc)}^{des}$ کمیته‌ی فشار مجاز در گره‌ی j در زمان t و سناریوی Sc (برحسب متر) و $R_{ta,t,Sc}$ قابلیت اطمینان تانک در زمان t و سناریوی Sc هستند. در این رابطه از $Q_{(j,t,Sc)}^{req}$ به عنوان عامل وزن‌دهی استفاده شده است، تا تخمین دقیق‌تری از قابلیت اطمینان ارائه شود. لازم به ذکر است که سناریوی مدنظر در این پژوهش، ترازهای مختلف آب در تانک ذخیره است. به این ترتیب که سناریوی اول به معنای تراز آب کمتر از تراز H_1 ، سناریوی دوم به معنای تراز آب بین تراز H_1 و H_2 ، و سناریوی سوم به معنای تراز آب بیشتر از تراز H_2 در تانک است.

در صورتی که شبکه‌ی توزیع آب، تعدادی تانک داشته باشد که در سناریوهای مختلف با تراز آب‌های متفاوت باشند، در زمان خاص t در صورتی که قابلیت اطمینان تانک به صورت میانگین وزنی ارائه شود، در عمل برای تصمیم‌گیرنده مناسب‌تر خواهد بود. در این راستا، در صورتی که قابلیت اطمینان سناریوی Sc ، r_{Sc} نام‌گذاری شود، می‌توان از رابطه‌ی ۱۲ استفاده کرد:

$$R_{ta,t,total} = \frac{\sum_{Sc=1}^{N_{ta}} R_{ta,t,Sc} \times r_{Sc}}{\sum_{Sc=1}^{N_{ta}} r_{Sc}} \quad (12)$$

که در آن، N_{ta} تعداد تانک‌های موجود در شبکه و $R_{ta,t,total}$ قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه در زمان t برای کل سناریوهای محتمل هستند. همچنین r_{Sc} با استفاده از منحنی جریمه در شکل ۲ به دست می‌آیند. در این نوشتار از هر دو

لذا در این پژوهش با استفاده از تئوری رفع اختلاف یونگ، بهترین نقطه (نقطه‌ی توافق بین تصمیم‌گیرندگان) روی منحنی تبادل بین اهداف به کمک الگوریتم تدوین‌شده، به طوری که بیشینه‌ی مطلوبیت هر کدام از آن‌ها تأمین شود، تعیین می‌شود. در روش‌های مختلف چانه‌زنی، نتیجه تا حد زیادی به توابع مطلوبیت بازیگران حساس است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در توابع مطلوبیت بازیگران، برای هر طرف درگیر در فرایند رفع اختلاف، یک جمعیت از بازیگران در نظر گرفته می‌شود. در هر مرحله، تصمیمی که هر بازیگر می‌گیرد، براساس مشاهدات پیشین آن است. یونگ در پژوهش خود، این مدل را برای دو گروه بازیکن (I_1, I_2) تعریف کرده است. در این مدل در هر دوره‌ی زمانی، به طور تصادفی دو بازیکن $(q \in I_2, p \in I_1)$ بازی دو نفره‌ی را انجام می‌دهند، که دوره‌ی زمانی مشخصی ندارد. همچنین در این مدل فرض بر این است که این بازیکنان از تابع مطلوبیت یکدیگر اطلاعی ندارند و با استفاده از اطلاعات موجود به بازی می‌پردازند. در این راستا چنانچه توابع مطلوبیت طرفین با U نمایش داده شود x_1 و x_2 نیز نشان‌دهنده‌ی طرفین بازی باشند، هدف از مدل بیشینه‌سازی تابع مذکور، به صورت رابطه‌ی ۱۸ خواهد بود:^[۲۱]

$$R(Z) = \text{MAX} \left\{ \text{Min} \left(\frac{\partial U_P(Z_1)}{\partial Z}, \frac{\partial U_P(Z_2)}{\partial Z} \right) \right\} \quad (18)$$

که در آن، $R(Z)$ نمایانگر نقطه‌ی انتخاب‌شده براساس مدل و Z_1 و Z_2 نیز که واحدهای یکسان دارند، از روابط ۱۹ و ۲۰ قابل محاسبه خواهند بود:^[۲۲]

$$Z_1 = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \quad (19)$$

$$Z_2 = \frac{l_2}{l_1 + l_2} \quad (20)$$

با توجه به روابط ۱۹ و ۲۰ قابل مشاهده است که $Z_1 + Z_2 = 1$. در روابط مذکور، I_1 مقدار اولیه‌ی Z_1 و I_2 مقدار اولیه‌ی Z_2 هستند. به دلیل اینکه توابع هدف مورد استفاده به صورت کمینه‌سازی و بیشینه‌سازی هستند، نقاط پارتو با استفاده از روابط ۲۱ و ۲۲ به صفر و ۱ محدود شده‌اند:

$$l_1 = \frac{f_1 - f_1^{\text{Min}}}{f_1^{\text{Max}} - f_1^{\text{Min}}} \quad (21)$$

$$l_2 = \frac{f_2^{\text{Max}} - f_2}{f_2^{\text{Max}} - f_2^{\text{Min}}} \quad (22)$$

که در آن‌ها، f_1 تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی ساخت تانک، f_1^{Min} کمترین هزینه‌ی موجود در مجموعه جواب پارتو، f_1^{Max} بیشترین هزینه‌ی موجود در مجموعه جواب‌های پارتو، f_2 تابع هدف بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان تانک، f_2^{Min} کمترین قابلیت اطمینان موجود در مجموعه جواب پارتو، و f_2^{Max} بیشترین قابلیت اطمینان موجود در مجموعه جواب پارتو موجود هستند. با استفاده از رابطه‌ی ۲۱، تابع هدف اول با حفظ شرایط خود به حدود صفر و ۱ تبدیل می‌شود، و با استفاده از رابطه‌ی ۲۲، تابع هدف دوم را به یک تابع کمینه‌سازی در محدوده‌ی صفر و ۱ تبدیل می‌کند. سپس با استفاده از مقادیر ذکرشده، Z_1 و Z_2 محاسبه می‌شوند.

۳. بحث و نتایج (مطالعه‌ی موردی)

برای ارزیابی روش ارائه‌شده برای به‌دست‌آوردن منحنی پارتو بهترین جواب‌ها برای بهینه‌سازی دودنده‌ی بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک‌های شبکه (کمینه‌سازی میزان ریسک) و به طور هم‌زمان کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت

توسط مورچه‌ی k هنگامی که در نقطه‌ی تصمیم i قرار دارد، هستند. رابطه‌ی به‌هنگام‌سازی فرمون به صورت معادله‌ی ۱۵ در نظر گرفته شده است:

$$\tau_{i(j)}(t+1) = \rho \tau_{i(j)}(t) + \Delta \tau_{i(j)}(t) \quad (15)$$

که در آن، ρ ضریب تبخیر فرمون که مقداری بین صفر و ۱ دارد، $\tau_{i(j)}(t)$ غلظت فرمون مسیر i, j در زمان t ، $\tau_{i(j)}(t+1)$ غلظت فرمون مسیر i, j در زمان $t+1$ ، و $\Delta \tau_{i(j)}(t)$ اضافه فرمون مسیر i, j در زمان t هستند. لازم به ذکر است در صورتی که ضریب تبخیر فرمون به صفر میل کند، فرمون مسیرها سریعاً تبخیر و مسئله به سرعت همگرا می‌شود و همچنین در صورتی که ضریب تبخیر فرمون به ۱ میل کند، سرعت تبخیر فرمون بسیار کم است و همگرایی به کندی صورت می‌گیرد. در رابطه‌ی ۱۵، اضافه فرمون مسیرها به صورت معادله‌ی ۱۶ تعریف شده است:

$$\Delta \tau_{i(j)}(t) = \sum_{k=1}^m \frac{\varphi}{f(S_k(t))} I_{S_k}(t) \{(i, j)\} \quad (16)$$

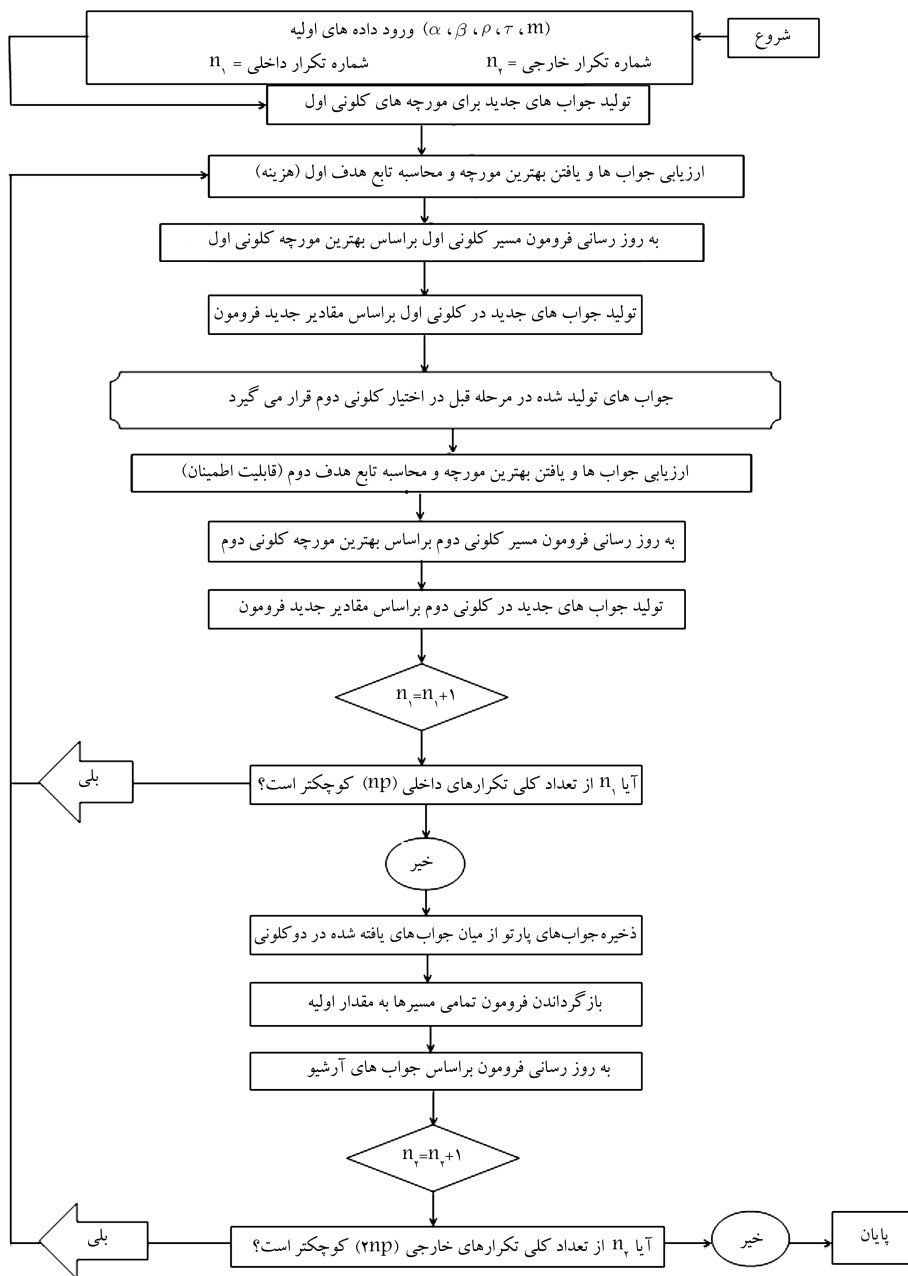
که در آن، m تعداد مورچه‌های جامعه در هر تکرار، φ کمیتی است که به مقدار فرمون بستگی دارد و به آن عامل ارزش فرمون می‌گویند، $S_k(t)$ جواب به دست‌آمده توسط مورچه‌ی k در زمان t ، و $f(S_k(t))$ هزینه‌ی جواب به دست‌آمده توسط مورچه‌ی k در زمان t (مقدار تابع هدف) هستند. لازم به ذکر است که فرمون کلیه‌ی مسیرها در ابتدای مدل‌سازی برابر با مقدار فرمون اولیه (τ_0) است. همچنین $I_{S_k}(t)$ به صورت رابطه‌ی ۱۷ تعریف شده است:

$$I_{S_k}(t) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (17)$$

در صورتی که مورچه‌ی k مسیر (i, j) را انتخاب کند، $I_{S_k}(t)$ برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود. در این مرحله، راه‌حل‌های جدید تولیدشده کاملاً در اختیار جامعه‌ی دوم قرار می‌گیرد، تا این کلونی براساس معیارهای خود و تابع هدف F_2 ، مقدار برانزنگی هر کدام از راه‌حل‌ها را محاسبه و مقایسه کند. در کلونی مذکور نیز مقدار فرمون مسیر متناظر با بهترین راه‌حل به‌هنگام می‌شود و مجدداً در اختیار جامعه‌ی اول قرار می‌گیرد. این عمل رفت و برگشت راه‌حل‌های تولیدشده، تا یک تکرار از پیش تعیین‌شده ادامه می‌یابد. با رسیدن به این تکرار مشخص (np)، که معمولاً مضربی از ۵۰ در نظر گرفته می‌شود،^[۱] مقدار توابع هدف F_1 و F_2 برای هر کدام از مورچه‌ها محاسبه می‌شود. این روند تا پایان تعداد تکرارهای مشخص شده ادامه می‌یابد. پایه‌ی این الگوریتم، که براساس برخی پژوهش‌های اخیر است،^[۲۰] با تغییراتی در نحوه‌ی یافتن جواب‌های غیربست و تعداد گراف‌های مسئله در محیط Visual C++ برنامه‌نویسی شده و به نام NA-ACO^۵ در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.^[۲۱] فلوجارت شکل ۳، راهبرد به کاررفته در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه‌ی پیشنهادی را به طور کامل برای دو تابع هدف نمایش می‌دهد. معیار توقف در فلوجارت مذکور، همگرایی در جواب‌های به دست‌آمده است؛ به گونه‌ی که تمامی مورچه‌ها برای تعداد معینی تکرار از یک مسیر رفته و جواب‌های یکسان تولید کنند. نتایج به دست‌آمده و عملکرد رضایت‌بخش و کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی تدوین شده در حل مسائل دو هدفه‌ی ریاضی (توابع آزمایش)،^[۲۲] کاربرد آن در مسائل واقعی از جمله شبکه‌های توزیع آب را ضمانت می‌کند.

۴.۲. تئوری رفع اختلاف یونگ^۶ و انتخاب بهترین جواب

با توجه به دیدگاه‌های مختلف تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان و وجود توابع مطلوبیت متفاوت غیر هم‌سو با یکدیگر، تأمین هم‌زمان بیشینه‌ی اهداف مسئله ممکن نیست.



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی دو هدفی جامعه‌ی مورچه‌ها در پژوهش حاضر.^[۱]

همان‌طور که از منحنی پارتوی به‌دست‌آمده مشخص است، با افزایش هزینه‌های طراحی تانک‌های ذخیره (ساخت تانک‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر در مقیاس ارتفاعی)، به قابلیت اطمینان آن در تأمین نیازهای هیدرولیکی شبکه افزوده می‌شود. با اعمال بازه‌ی تغییرات متغیر تصمیم در این مسئله، بهترین جواب بهینه‌سازی مطابق با شکل ۵، هزینه‌ی برابر با $10^3 \times 0.7685$ دلار بر حسب متر تراز آب دارد و مقدار قابلیت اطمینان آن برابر با ۰.۷۲۵ است. آنالیز دوره‌ی گسترده در بهینه‌سازی نشان می‌دهد که جواب بهینه‌ی منتخب برای تانک ۱۷۵ برای تراز آب اولیه، معادل ۵.۹ متر و برای تانک ۱۸۵ برای تراز آب اولیه، معادل ۵.۶ متر در پایان شبیه‌سازی است. در مرحله‌ی دوم نیز قید کیفی سن آب علاوه بر قید فشار در نظر گرفته شده و تحلیل هیدرولیکی کماکان به روش مبتنی بر تقاضاست. همچنین برای انجام تحلیل کیفی و بررسی اثرات در نظر گرفتن قید کیفی، زمان لازم برای اینکه مقدار پارامتر کیفی

تانک‌های ذخیره، شبکه‌ی توزیع آب Anytown مورد بررسی قرار گرفته است. این شبکه‌ی توزیع آب، ۴ تانک ذخیره دارد که شامل: ۵۸ لوله، یک ایستگاه پمپاژ و ۲۱ گره است (شکل ۴).^[۳] در مرحله‌ی اول برای انجام بهینه‌سازی دوهدفه، تعداد مورچه‌های هر کلونی برابر ۳۰، تعداد سیکل موجود در هر تکرار برابر ۵۰، تعداد تکرار برابر ۵۰، مقدار فرمون اولیه بر روی مسیرها $\alpha = 5000$ و $\beta = 2$ (حاصل از آنالیز حساسیت) و کمینه‌ی فشار مجاز در گره‌های شبکه ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. تحلیل هیدرولیکی نیز به روش مبتنی بر تقاضا با در نظر گرفتن قید فشار انجام شده است. متغیرهای تصمیم تراز آب در تانک ۱۷۵ از ۴ تا ۹ و در تانک ۱۸۵ از ۴ تا ۶ با گام ۰.۱ است. منحنی پارتو حاصل با استفاده از ۱۰ بار اجرای برنامه، در شکل ۵ نمایش داده شده است.

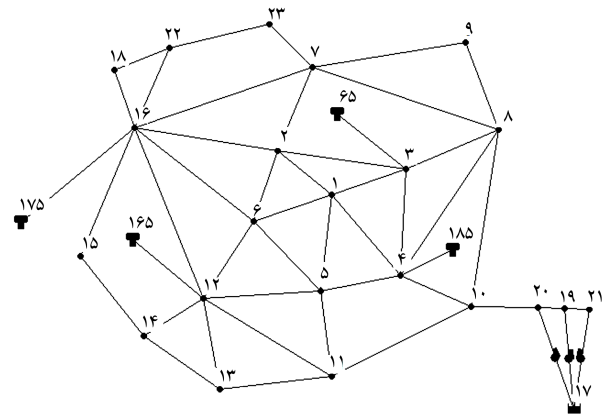
مطابق با شکل ۶، هزینه $10^3 \times 0.686$ دلار بر حسب متر تراز آب و مقدار قابلیت اطمینان برابر با 0.724 است. آنالیز دوره‌ی گسترده در بهینه‌سازی نشان می‌دهد که جواب بهینه‌ی منتخب برای تانک ۱۷۵ برای تراز آب اولیه، معادل 0.78 متر و برای تانک ۱۸۵ برای تراز آب اولیه، معادل 0.7 متر در پایان شبیه‌سازی است. نتایج به‌دست‌آمده، اهمیت در نظر گرفتن قید سن آب را نشان می‌دهند، زیرا هنگامی که فقط تحلیل هیدرولیکی و قید فشار گره‌ی لحاظ شده بودند، مسئله به جواب‌های بیشتری رسیده بود. لازم به ذکر است که زمان مورد نیاز برای بهینه‌سازی (با استفاده از رایانه‌ی پنتیوم (Dual Core ۱٫۶ GHZ, Ram = ۵۱۲MB) در حالت اول، ۶ ساعت و در حالت دوم، ۱۴ ساعت (بیش از ۲ برابر) است. علت این امر آن است که در حالت دوم، علاوه بر تحلیل هیدرولیکی به تحلیل کیفی نیز باید پرداخته شود، که این امر زمان اجرای برنامه را طولانی‌تر می‌کند.

در مرحله‌ی سوم، رابطه‌ی بین قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک و قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه ارائه شده است. روش کار بدین صورت بوده است که برای یک سری از ترازهای اولیه‌ی در نظر گرفته‌شده برای تانک‌های ۱۷۵ و ۱۸۵، میزان قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک‌های شبکه محاسبه شده است. از سوی دیگر، با اجرای مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی مبتنی بر فشار (با در نظر گرفتن همان مقادیر تراز آب) با استفاده از نرم‌افزار EPANET۲۰-EMITTER، مقادیر آب قابل برداشت در گره‌های شبکه به‌دست آمده و نتایج حاصل از محاسبات ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تراز اولیه‌ی آب برابر با 10 انتخاب از بازه‌ی تراز کمینه و بیشینه‌ی هر یک از تانک‌ها و به صورت تصادفی در نظر گرفته شده است.

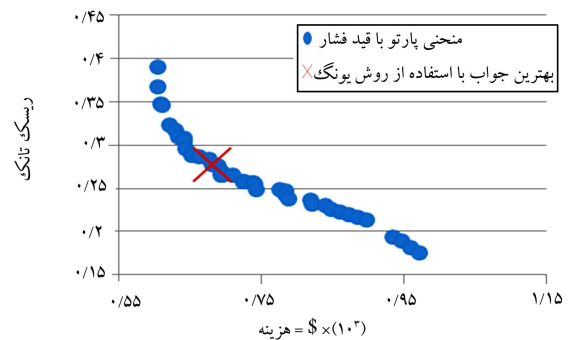
در محاسبه‌ی مقادیر قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه و کل سیستم، تراز اولیه‌ی آب برای دو تانک ۶۵ و ۱۶۵، مقداری ثابت و برابر با تراز کمینه‌ی آب (37.48 متر) و تراز بهینه‌ی بیشینه‌ی آب برای هر یک از تانک‌های مذکور به ترتیب برابر با 7.88 و 9.07 متر بوده است. با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده می‌توان چنین نتیجه گرفت که با استفاده از روش پیشنهادی در این مثال، در هنگامی که متوسط قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک‌های شبکه برابر با 0.719 است، مقدار قابلیت اطمینان کل سیستم به 0.854 می‌رسد. به‌طور کلی علی‌رغم آنکه نرخ رشد یکسانی مابین روند افزایشی اطمینان‌پذیری تانک‌های شبکه و کل سیستم وجود ندارد، لیکن می‌توان چنین نتیجه گرفت که هر چه میزان قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه افزایش یابد، بر اطمینان‌پذیری کل سیستم نیز افزوده می‌شود. همچنین با افزایش بیشتر نرخ رشد اطمینان‌پذیری تانک‌های شبکه (حدود 10%) به میزان کمتری بر قابلیت اطمینان کل شبکه (حدود 4%) افزوده می‌شود، چرا که اطمینان‌پذیری کل سیستم علاوه بر تانک‌های ذخیره، به شرایط سایر اجزاء شبکه نیز وابسته است.

۴. نتیجه‌گیری

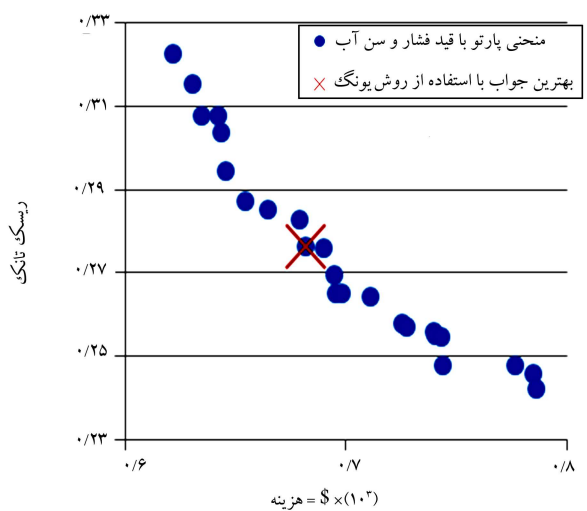
در این پژوهش به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از شبکه‌ی توزیع آب از الگوریتم جامعه‌ی مورچگان استفاده شده است. به این معنا که الگوریتم مذکور در فاز بهره‌برداری شبکه‌های توزیع آب، میزان تراز اولیه‌ی آب در تانک‌ها را به گونه‌ی بهینه می‌سازد، که در طول شبانه‌روز از حجم در نظر گرفته‌شده‌ی آنها کاملاً استفاده شود. بدین منظور، ابتدا توابع هدف هزینه و قابلیت اطمینان تعریف و الگوریتم NAACO در محیط Visual C++ تدوین شده است. سپس با معرفی شبکه‌ی Anytown به عنوان مطالعه‌ی موردی، الگوریتم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۴. شمای کلی شبکه‌ی آب رسانی Anytown [۳].



شکل ۵. منحنی پارتو سری جواب‌های بهینه بدون در نظر گرفتن قید کیفی.



شکل ۶. منحنی پارتو سری جواب‌های بهینه با در نظر گرفتن قید کیفی.

در گره‌ها به حالت پایدار برسد، برابر ۷۲ ساعت منظور شده است. [۲۴] هنگامی که یک قید ارضاء نشود، یک مقدار جریمه برای آن منظور می‌شود. این مقدار عبارت است از حاصل ضرب یک ضریب ثابت در میزان انحراف از قید مورد نظر. لذا برای قیود کیفی ضریب 10^{10} منظور شده است. بنابراین در این قسمت، جواب‌های به‌دست‌آمده‌ی که فشار زیر 30 متر و سن آب خارج از حدود بالا و پایین تعیین شده دارند، از سری جواب‌ها حذف شده‌اند. منحنی پارتو حاصل با استفاده از 10 بار اجرای برنامه، در شکل ۶ نمایش داده شده است. با اعمال بازه‌ی تغییرات متغیر تصمیم در این مسئله، بهترین جواب بهینه‌سازی

جدول ۱. محاسبه‌ی مقادیر متوسط قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه در مقایسه با قابلیت اطمینان هیدرولیکی کل سیستم.

تراز تانک (m)	شماره‌ی تانک		قابلیت اطمینان هیدرولیکی کل سیستم	قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک‌های شبکه
	۱۸۵	۱۷۵		
تراز اولیه	۳٫۳	۳٫۶	۰٫۷۹	۰٫۶۲۲۹
تراز بهینه‌ی پیشینه	۵٫۱۲۶	۶٫۹۵۶	۰٫۸	۰٫۶۵۱۳
تراز اولیه	۳٫۶	۴٫۳	۰٫۸۱	۰٫۶۷۹۹
تراز بهینه‌ی پیشینه	۵٫۴۳۶	۷٫۱۱۴	۰٫۸۳	۰٫۷۱۲۷
تراز اولیه	۳٫۹	۴٫۸	۰٫۸۴	۰٫۷۳۰۳
تراز بهینه‌ی پیشینه	۵٫۶۵۷	۷٫۴۶۷	۰٫۸۶	۰٫۷۴۸۱
تراز اولیه	۴٫۲	۵٫۴	۰٫۸۸	۰٫۷۵۸۶
تراز بهینه‌ی پیشینه	۵٫۸۸۱	۷٫۹۶۳	۰٫۹	۰٫۷۶۴۳
تراز اولیه	۴٫۴	۶٫۱	۰٫۹۱	۰٫۷۶۴۳
تراز بهینه‌ی پیشینه	۵٫۹۹۹	۸٫۲۴۹	۰٫۹۲	۰٫۷۶۴۳
تراز اولیه	۴٫۸	۷	۰٫۸۵۴	۰٫۷۱۹۷
تراز بهینه‌ی پیشینه	۶	۸٫۷۷۴		
تراز اولیه	۵٫۱	۷٫۵		
تراز بهینه‌ی پیشینه	۶	۹٫۱		
تراز اولیه	۵٫۵	۷٫۹		
تراز بهینه‌ی پیشینه	۶٫۰۹	۹٫۱		
تراز اولیه	۵٫۷	۸٫۲		
تراز بهینه‌ی پیشینه	۶٫۰۹	۹٫۱		
تراز اولیه	۶	۹		
تراز بهینه‌ی پیشینه	۶٫۰۹	۹٫۱		
میانگین حسابی				

بیشینه‌شدن قابلیت اطمینان آن با در نظر گرفتن قید فشارگره‌بی، مجموعه‌ی از جواب‌ها به صورت منحنی پارتو ارائه شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی افزایش قابلیت اطمینان با بهبود عملکرد هیدرولیکی تانک‌های ذخیره است. لذا اهمیت در نظر گرفتن تقاضای موجود در گره‌ها و برآورده کردن این نیازهای گره‌بی در رابطه‌ی اطمینان‌پذیری تانک‌های ذخیره در شبکه‌های توزیع آب مشخص می‌شود. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده‌ی حدود تغییرات کمتر هزینه‌ی ساخت نسبت به مرحله‌ی قبل هستند و کمینه‌ی هزینه‌ی مشابهی ارائه شده است. همچنین حدود تغییرات قابلیت اطمینان تانک در شبکه، کمتر است و به ریسک تانک نیز افزوده شده است.

در گام بعدی بهینه‌سازی دو هدفه، قیود کیفی (مقادیر سن آب در گره‌ها) به منظور تطبیق با شرایط واقعی بهره‌برداری از شبکه‌ی توزیع آب در نظر گرفته شده و نتایج نشان داده است که در شبکه‌ی مورد مطالعه، با در نظر گرفتن قیود کیفی، حدود تغییرات قابلیت اطمینان تانک در شبکه کمتر است و برای تصمیم‌گیرنده نتایج محدودتری را ارائه می‌دهد. همچنین حدود تغییرات قابلیت اطمینان تانک در شبکه کمتر است و به ریسک تانک نیز افزوده شده است. البته به دلیل کاهش مقادیر بیشینه‌ی تراز آب در تانک‌ها، از هزینه‌ی احداث تانک‌ها در این حالت کاسته شده است. از مثال فوق چنین نتیجه‌گیری می‌شود که در نظر گرفتن قیود کیفی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب، به طور کلی در نتایج تأثیرگذار است. به طور کلی با وارد کردن قیود کیفی، در صورتی که مسئله به جواب امکان‌پذیری برسد، هزینه‌ی این جواب نهایی یا در حدود حالتی است که قیود کیفی در نظر گرفته نشده‌اند و یا از آن بالاتر است.

در مرحله‌ی سوم، رابطه‌ی بین قابلیت اطمینان هیدرولیکی تانک و قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه با استفاده از روش HDSM ارائه شده است. به طور کلی علی‌رغم آنکه نرخ رشد یکسانی مابین روند افزایشی اطمینان‌پذیری تانک‌های شبکه و کل سیستم وجود ندارد، لیکن می‌توان چنین نتیجه گرفت که هر چه میزان قابلیت اطمینان تانک‌های شبکه افزایش یابد، بر اطمینان‌پذیری کل سیستم نیز افزوده می‌شود. همچنین با افزایش بیشتر نرخ رشد اطمینان‌پذیری تانک‌ها، به میزان کمتری بر قابلیت اطمینان کل شبکه افزوده می‌شود، چرا که اطمینان‌پذیری کل سیستم علاوه بر تانک‌های ذخیره، به شرایط سایر اجزاء شبکه نیز وابسته است.

با توجه به ارائه‌ی تراز آب اولیه‌ی بهینه برای تانک‌ها، هر یک از جواب‌های ایجاد شده در منحنی پارتو به تصمیم‌گیرنده این فرصت را می‌دهد تا با توجه به مطلوبیت آن جواب، راه‌حل مورد نظر را انتخاب و اجرا کند. همچنین نتایج مشخص می‌سازد که با در نظر گرفتن قیود کیفی حدود تغییرات قابلیت اطمینان تانک در شبکه کمتر است و برای تصمیم‌گیرنده نتایج محدودتری را ارائه می‌دهد. همچنین از اطمینان‌پذیری تانک کاسته خواهد شد. شایان ذکر است که نتایج به دست آمده فقط حاصل از رابطه‌ی یونگ است و تصمیم‌گیرنده باید با توجه به اولویت‌های پروژه، نتیجه‌ی مورد نظر را از میان جواب‌های غیربست پارتویی انتخاب کند.

همچنین تمامی پارامترهای غیرقطعی موجود در الگوریتم مورچه‌ها AS_{ib} ، به کمک آنالیز حساسیت و به منظور افزایش کیفیت جواب‌های نهایی در روند بهینه‌سازی تعیین شده‌اند. با استفاده از بهینه‌سازی دو هدفه‌ی کمیته‌سازی تانک در تقابل با

پانویس‌ها

1. demand driven simulation method
2. head driven simulation method
3. water age

4. extended period simulation
5. non-dominated archiving ant colony optimization
6. Young

منابع (References)

1. Afshar, A., Sharifi, F. and Jalali, M.R. "Non-dominated archiving multi-colony ant algorithm for multi-objective optimization: Application to multi-purpose reservoir operation", *Engineering Optimization*, **41**(4), pp. 313-325 (2009).
2. Vamvakeridou-Lyroudia, L.S., Savic, D.A. and Walters, G.A. "Fuzzy multiobjective optimization of water distribution networks", *Journal of Water Resources Management and Planning*, **131**(6), pp. 467-476 (2005).
3. Murphy, L.J., Dandy, G.C. and Simpson, A.R. "Optimum design and operation of pumped water distribution systems", *Proceeding Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Institution of Engineers, Brisbane, Australia, pp. 149-155 (1994).
4. Farmani, R., Walters, G. and Savic, D. "Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: Total cost vs. reliability vs. water quality", *Journal of Hydroinformatics, IWA*, **8**(3), pp. 165-179 (2006).
5. Walski, T.M. "Editorial note: The wrong paradigm-why water distribution optimization doesn't work", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, **127**(4), pp. 203-205 (2001).
6. Hashemi, S.S., Tabesh, M. and Ataekia, B. "Ant-colony optimization of pumping schedule to minimize the energy cost using variable-speed pumps in water distribution networks", *Urban Water Journal*, **11**(5), pp. 335-347 (2014).
7. Sousa, C.M., Covas, D.I.S., Ramos, H.M. "Multiobjective optimization of water supply operation using genetic algorithms", *Proceedings of Water Management Challenges in Global Changes*, Ulanicki, Bounds, Butler, Memon, Vairavamoorthy (eds), Leicester, England, pp. 425-432 (2007).
8. Ostfeld, A. and Tubaltzev A. "Ant colony optimization for least-cost Design and operation of pumping water distribution systems", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, **134**(2), pp. 107-119 (2008).
9. Ostfeld, A. and Kurek, W. "Multi-objective water distribution systems control of pumping cost, water quality and storage-reliability constraints", *Journal of Water Resources Planning and Management*, **140**(2), pp. 184-193 (2014).
10. Mehzad, N. "Multi-objective optimization for the operation of water distribution networks considering the effect of the pump and tank", MS Thesis, Faculty of Civil Engineering, College Of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran (2012).
11. Babaei, N., Tabesh, M. and Nazif, S. "Qualitative optimization of water distribution network under the pump round, chlorine injection mode and method of analysis", *Journal of Water and Wastewater*, **28**(2), pp.55-64 (2017).
12. Farmani, R., Savic, D.A. and Walters, G.A. "Trade-off between total cost and reliability for Anytown water distribution network", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, **131**(3), pp. 161-171 (2005).
13. Tabesh, M., Jamasb, B. and Moeini, R. "Calibration of water distribution hydraulic models: A comparison between pressure dependent and demand driven analyses", *Urban Water Journal*, **8**(2), pp. 93-102 (2011).
14. Van Zyl, J.E. and Haarhoff, J. "Reliability analysis of municipal storage reservoirs using stochastic analysis", *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **49**(3), pp. 27-32 (2007).
15. Islamic Republic of Iran Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision (IRIVSPSPS), *Guidelines for Design of Urban and Rural Water Supply and Distribution Systems, 117-3 (First Review Edition)*, Tehran, Iran, Islamic Republic of Iran Vice Presidency For Strategic Planning and Supervision Press (2013).
16. Coelho, S.T. "Performance assessment in water supply and distribution", PhD Thesis, Civil and Offshore Engineering Department, Heriot-Watt University, Edinburg, UK (1996).
17. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**(2), pp. 182-197 (2002).
18. Pathirana, A. "EPANet2 desktop application for pressure driven demand modeling", In: K.E. Lansey, C.Y. Choi, A. Ostfeld, I.L. Pepper, eds., *Proceedings of the 12th International Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA2010)*, ASCE, Tuscon, AZ, pp. 65-74 (12-15 September 2010).
19. Dorigo, M., Maniezzo, V. and Colorni, A. "The ant system optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Transportation Systems, Man and Cybernetics Society*, **26**(1), pp. 29-41 (1996).
20. Young, H.P. "An evolutionary model of bargaining", *Journal of Economic Theory*, **59**(1), pp. 145-168 (1993).
21. Mehzad, N., Tabesh, M. and AtaeeKia, B. "Multi-objective optimization of pumping station operation in water distribution network using ACO", *9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran (2012).
22. Khjehpour, N. "Optimizing storage tank in water distribution networks considering water quality constraints", MS Thesis, Faculty of Civil Engineering, College Of Engineering, Tehran University, Tehran, Iran (2012).
23. Shirangi, E., Kerachian, R. and Shafai Bajestan, M. "A simplified model for reservoir operation considering the water quality issues: Application of the young conflict resolution theory", *Environmental Monitoring and Assessment*, **146**(1-3), pp. 77-89 (2008).
24. Tabesh, M. and Doulatkhahi, A. "Effects of pressure dependent analysis on quality performance assessment of water distribution networks", *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Technology*, **30**(B1), pp. 119-128 (2006).