

# بهینه‌سازی بیشینه تراز تانک با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان

محمود فتوحی فیروزآباد<sup>۱\*</sup>، مسعود تابش<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- استاد دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران

mtabesh@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۱۱/۲۹]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۳/۱۸]

**چکیده**-تانک‌ها در شبکه توزیع آب وظیفه ذخیره آب به منظور استفاده در شرایط اضطراری، مصرف آتش‌نشانی و کنترل نوسانات مصرف را به عهده دارند. تانک‌ها هزینه‌های زیادی را در حین ساخت شبکه شامل می‌شوند، در زمان بهره‌برداری استفاده بهینه از کل حجم ضروری است. در غیر این صورت در صورتی که حجم تانک از حجم مورد نیاز در طول دوران بهره‌برداری کمتر و یا بیشتر باشد، قابلیت اطمینان بهره‌برداری از آن کمتر خواهد بود. براین اساس، رابطه جدیدی برای قابلیت اطمینان تانک با توجه به تغییر تراز آب در تانک تعریف شده است. به علاوه، با توجه به اینکه تغییر تراز آب می‌تواند روی فشار و سن آب در گر‌ها تاثیرگذار باشد، این تاثیر با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی بررسی شده است. همچنین برای بررسی تاثیر همزمان تغییر تراز آب بر روی قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی، رابطه‌ای برای قابلیت اطمینان تلفیقی نیز تعریف شده است. مدیریت بهینه تانک‌های شبکه توزیع آب برای تأمین آب مورد نیاز متقاضیان با کیفیت مطلوب اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. برای رسیدن به این مهم، بهینه‌سازی به عنوان ابزاری قدرتمند معرفی شده است. در این مقاله با معطوف شدن به فاز بهره‌برداری، سعی می‌شود بهینه‌سازی چندهدفه عملکرد شبکه‌های آبرسانی در چهار حالت تانک، هیدرولیکی (فشار در گر‌ها)، کیفی (سن آب) و تلفیقی (تانک، هیدرولیکی و کیفی) بررسی شود. در هریک از این حالت‌ها، هدف اول کمینه ساختن هزینه ساخت تانک است و هدف دوم، بیشینه نمودن قابلیت اطمینان هیدرولیکی، کیفی و تلفیقی می‌باشد. به منظور بهینه‌سازی عملکردی شبکه توزیع آب به علت کارایی بالا و سادگی پیاده‌سازی الگوریتم جامعه مورچگان، الگوریتم NA-ACO-CD در محیط Visual C++ تدوین شده است. کارایی الگوریتم تدوین شده با بهینه‌سازی توابع ریاضی آزمایش، اثبات شده و قابل اجرا بر شبکه‌های توزیع آب است. منحنی تعامل حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه به تصمیم گیرنده این امکان را خواهد داد تا با توجه به شرایط موجود گزینه برتر را انتخاب نماید.

**واژگان کلیدی:** بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم جامعه مورچگان، تانک، قابلیت اطمینان، سن آب

## ۱- مقدمه

سیستم توزیع شامل ذخیره آتش‌نشانی، حجم متعادل‌سازی و ذخیره اضطراری برای حجم تانک مورد نیاز است. کلیه تانک‌ها باید در بازه عملکرد خود پر و خالی شده بدون اینکه از حجم اضطراری استفاده نمایند [۲]. مزیت اصلی انتخاب مکان برای تانک‌های جدید در قدم اول فراهم کردن قابلیت اطمینان شبکه در زمان شکست لوله‌ها و ایجاد فشار مناسب در گر‌های شبکه است. در قدم دوم، تغذیه شبکه از

تانک‌ها در شبکه توزیع آب وظیفه ذخیره آب به منظور استفاده در شرایط اضطراری، مصرف آتش‌نشانی و کنترل نوسانات مصرف را به عهده دارند. تصمیم‌های متعددی مانند محل، اندازه و نوع عملکرد تانک در طراحی تانک در شبکه‌های توزیع آب باید اتخاذ شود [۱]. سه نوع ذخیره در

جهات مختلف باعث کمک به حداقل‌سازی قطر لوله‌ها و در نتیجه کاهش سن آب در شبکه و کاهش زمان ماند آب در تانک‌ها می‌شود [۳]. اندازه تانک‌ها براساس پارامترهای قطعی مانند تعادل تقاضا، ذخیره اضطراری و نیازهای آتش‌نشانی تعیین می‌شوند [۴]. ظرفیت بیشتر تانک باعث برطرف شدن بیشتر تقاضای شبکه شده و در نتیجه قابلیت اطمینان آنرا افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، افزایش ظرفیت مخازن باعث افزایش هزینه‌ها و زمان ماند آب و به دنبال آن کاهش کیفیت آب در تانک می‌شود و طراحان باید بین این دو هدف متضاد، تعادل برقرار کنند [۵].

برخلاف قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع آب که تعریف جهانی مورد قبولی برای آن وجود ندارد [۶]، قابلیت اطمینان مخازن ذخیره می‌تواند براساس توانایی آن برای ذخیره آب برای مصرف کنندگان تعریف شود. اگر مخزن کاملاً خالی شود، دچار شکست می‌شود. قابلیت اطمینان آن می‌تواند براساس احتمال شکست تانک تعریف شود. پارامترهای شکست گوناگونی شامل تعداد شکست‌ها، طول زمان شکست و زمان شکست مخزن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۵]. این پژوهشگران روش تصادفی را برای آنالیز قابلیت اطمینان مخازن ذخیره در سیستم‌های توزیع آب پیشنهاد دادند و روش‌های مدل‌سازی پارامترهای شبکه و قابلیت اطمینان مخازن ذخیره را با استفاده از مدل‌های تصادفی تقاضای آب، شکست لوله‌ها و وقایع آتش‌سوزی شرح داده و مدل پیشنهادی را در مطالعه موردی برای نشان دادن قابلیت‌های روش به کار بردند. نتایج این مطالعه موردی نشان دهنده این مطلب است که ظرفیت مخزن ذخیره به مراتب کوچکتری از آنچه در راهنماهای طراحی گفته شده است برای شبکه مورد بررسی نیاز است.

Van Zyl و همکاران (2008) روش آنالیز تصادفی را برای اندازه تانک‌های ذخیره بر پایه معیار قابلیت اطمینان ارائه کرده و آنالیز حساسیت را برای تخمین پارامترهای بحرانی برای اندازه تانک‌ها (قابلیت اطمینان تانک) انجام دادند. نتایج نشان داد تقاضای آب بیشترین تأثیر را روی اندازه مورد نیاز تانک دارد. در این پژوهش نشان داده شد که ذخیره آتش‌نشانی کمترین تأثیر روی اندازه تانک دارد [۷].

وجود و یا عدم وجود تانک در شبکه توزیع آب تأثیر زیادی در ابعاد فضای جستجوی الگوریتم دارد [۸]. موضوعات مرتبط با تراز آب در مخزن و تانک تنها با مدل‌سازی دوره گسترده (EPS, Extended Period Simulation) قابل تحلیل است [۹].

Prasad (2010) به بهینه‌سازی محل، حجم کل، تراز حداقل عملکردی، نسبت قطر به ارتفاع و نسبت حجم اضطراری به کل حجم تانک پرداخت به گونه‌ای که هزینه‌های انرژی و سرمایه‌ای شبکه به حداقل ممکن خود برسد [۱۰].

Farmani و همکاران (2006) کاربرد الگوریتم تکاملی چندهدفه را در شناسایی تعامل بین هزینه کل، قابلیت ارتجاع شبکه (قابلیت اطمینان هیدرولیکی) و سن آب (کیفیت آب) در سیستم‌های توزیع آب بررسی کردند. آنها این کار را روی یک شبکه واقعی مانند Anytown آزمایش کردند [۲]. آنها مینیمم کردن هزینه‌ها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری لوله‌ها، تانک‌ها و هزینه فعلی انرژی مصرف شده را به عنوان یکی از اهداف بهینه‌سازی در نظر گرفتند. همچنین قابلیت ارتجاع ارائه شده به وسیله تودینی (2000) را به عنوان هدف دوم برای افزایش در دسترس بودن آب به هنگام شکست لوله‌ها مدنظر قرار دادند [۱۱]. بالاخره مینیمم کردن زمان ماند آب در شبکه به عنوان پارامتر کیفی را برای تابع هدف سوم بکار بردند. نتایج آنها نشان داد که طراحی شبکه به این شکل منجر به یک شبکه با قابلیت بالا می‌شود به گونه‌ای که شبکه به دست آمده، دارای لوله‌های بهینه و بهترین چیدمان برای تانک‌ها در نقاط پر مصرف است. [۲].

با چنین پیشینه‌ای از مطالعات، در این پژوهش هدف بهینه‌سازی حداکثر تراز تانک در فاز بهره‌برداری است به گونه‌ای که هزینه‌های ساخت تانک کمینه شده و قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی بیشینه شود. برای قابلیت اطمینان هیدرولیکی، رابطه جدیدی برای قابلیت اطمینان تانک براساس تغییر حداکثر تراز تانک تعریف شده است و همچنین یک رابطه هم برای تغییر فشار در گره‌ها ناشی از تغییر تراز آب در تانک در نظر گرفته شده است. شاخص عملکرد سن آب در گره‌ها به عنوان قابلیت اطمینان کیفی لحاظ شده است. در ضمن برای بررسی همزمان قابلیت اطمینان هیدرولیکی و

عدد یک نشان می‌دهد که در هر واحد زمان، سن آب یک واحد افزایش پیدا می‌کند.

معادله فوق با داشتن شرط اولیه در زمان صفر و شرط مرزی در ابتدای لوله به شکل رابطه زیر قابل حل است.

$$A_i(0, t) = \frac{\sum_k q_{ki} A_{ki}(L_{ki}, t) + Q_{ext,i} A_{ext,i}}{\sum_k q_{ki} + Q_{ext,i}} \quad (2)$$

که در رابطه بالا  $A_i(0, t)$  سن آب در گره  $i$ ،  $q_{ki}$  دبی جریان در لوله‌های ورودی به گره  $i$ ،  $A_{ki}(L_{ki}, t)$  سن آب در لوله‌های ورودی به گره  $i$  با طول  $L$  در زمان  $t$ ،  $Q_{ext,i}$  جریان خروجی از گره  $i$  و  $A_{ext,i}$  سن آب جریان خروجی است. نرم‌افزار EPANET2 این معادلات را با مدل عددی المان حجم مجزا (Discrete Volume Element Method, DVEM) حل می‌کند.

### ۳- مدل بهینه‌سازی

روش بهینه‌سازی به‌کار رفته در این پژوهش، الگوریتم جامعه مورچگان است. الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان که با الهام از رفتار اجتماعی مورچه‌ها در هنگام جستجوی غذا توسعه یافته، به عنوان یک روش فراکاوشی به وسیله‌ی دوریگو (1992) پیشنهاد شد [۱۶]. استفاده از الگوریتم مورچه‌ها در حل مسائل مهندسی اولین بار به وسیله‌ی ماریانو و موزالز (1998) [۱۷] صورت گرفت و [۱۸ و ۱۹] برای اولین بار این الگوریتم را برای طراحی شبکه‌های توزیع آب به کار بردند. و یافته‌ها نشان داد که الگوریتم جامعه مورچگان می‌تواند جایگزین جالبی برای الگوریتم ژنتیک باشد. Zecchin و همکاران (2005) برای بالابردن فهم پارامترهای الگوریتم ACO، آنها را برای شبکه‌های توزیع آب تشریح نمودند [۲۰]. Zecchin و همکاران (2007) پنج الگوریتم جامعه مورچگان شامل AS، ACS، EAS، ASrank و MMAS در طراحی شبکه‌های توزیع آب را باهم مقایسه کردند. استفاده از برخی روش‌ها (ASrank، MMAS) برای شبکه‌های توزیع آب موفقیت‌آمیز می‌باشند [۲۱].

### ۳-۱- توابع هدف و ساختار آنها

به عنوان تابع هدف اول، کمینه کردن هزینه ساخت تانک‌ها به صورت معادله (۳) در نظر گرفته می‌شود.

کیفی ناشی از تغییر تراز آب، رابطه‌ای هم برای قابلیت اطمینان تلفیقی تعریف شده است.

### ۲- مدل هیدرولیکی و کیفی شبکه

در تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی هدف طراح آن است که از مقادیر دبی لوله‌ها، فشار در گره‌ها اطلاع داشته باشد. در بسیاری از تحلیل‌های هیدرولیکی، دبی‌های خروجی از گره‌ها بدون توجه به فشار آن‌ها مقداری ثابت فرض می‌شود (تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر تقاضا) (Demand Dependent Simulation Method, DDSM). بیشتر نرم‌افزارهای موجود برای تحلیل هیدرولیکی شبکه‌های آب بر مبنای این روش عمل می‌نمایند. در شرایط نرمال و در حالتی که فشار موجود در گره‌ها از فشار حداقل مجاز بیشتر شود، این روش مناسب و کارا است. وقتی فشار در گره‌ای کمتر از میزان حداقل مجاز باشد، دبی خروجی از گره کاهش خواهد یافت و دیگر برابر دبی ثابتی که از اول فرض می‌شود، نخواهد بود. بنابراین روش DDSM در شرایط غیر نرمال کارایی خود را از دست می‌دهد [۱۲]. به این روش، تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار گفته می‌شود (Head Dependent Simulation Method, HDSM). همچنین در مواردی که محاسبه کمبود فشار و مقدار کاهش آب قابل دسترس با محاسبه قابلیت اطمینان مد نظر باشد استفاده از این روش ضروری خواهد بود [۱۳].

مفهوم میانگین سن آب یا متوسط زمان حرکت آب ( $A_{ij}$ ) بین گره‌های  $i$  و  $j$  از همه مخازن تحت شرایط دائمی توسط مالز و همکاران (1985) معرفی شده است [۱۴]. مدل کیفی نرم‌افزار EPANET2 تغییرات سن آب را در شبکه نسبت به زمان مدل می‌کند [۱۵]. در واقع نرم‌افزار مذکور از مقادیر دبی بدست آمده از تحلیل هیدرولیکی برای حل معادله بقای جرم استفاده می‌کند تا زمان حرکت آب در لوله‌ای که گره  $i$  و  $j$  را بهم متصل می‌کند را به دست آورد. معادله بقای جرم از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{\Delta A_{ki}}{\Delta t} = -\frac{q_{ki}}{Area_{ki}} \frac{\Delta A_{ki}}{\Delta x_{ki}} + 1.0 \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $A_{ki}$  سن آب در لوله  $ki$  است که تابعی از فاصله  $x$  و زمان  $t$  است.  $\frac{q_{ki}}{Area_{ki}}$  سرعت جریان در لوله  $ki$  و

سن آب گره‌ای در گره  $i$  و در زمان  $t$  و  $WA(i, t)$  سن آب در گره  $i$  و در زمان  $t$  می‌باشند.

آنگاه قابلیت اطمینان گره‌ای در زمان  $t$  با متوسط‌گیری روابط فوق نسبت به تقاضای گره‌ها از معادلات زیر به دست می‌آید [۲۲].

$$R_{H,t} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{H,i}(t) * Q_{i,t}^{req}}{\sum_{i=1}^N Q_{i,t}^{req}} \quad (۷)$$

$$R_{WA,t} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{WA,i}(t) * Q_{i,t}^{req}}{\sum_{i=1}^N Q_{i,t}^{req}} \quad (۸)$$

در روابط بالا  $R_{H,t}$  و  $R_{WA,t}$ : به ترتیب قابلیت اطمینان هیدرولیکی و سن آب گره‌ای در زمان  $t$  که با متوسط‌گیری وزنی نسبت به تقاضای گره‌ها،  $Q_{i,t}^{req}$ ، به دست آمده‌اند.

در نهایت قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای و سن آب گره‌ای از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$R_H = \frac{\sum_{t=1}^T R_{H,t}}{T} \quad (۹)$$

$$R_{WA} = \frac{\sum_{t=1}^T R_{WA,t}}{T} \quad (۱۰)$$

در روابط فوق  $R_H$  و  $R_{WA}$  به ترتیب قابلیت اطمینان هیدرولیکی و سن آب گره‌ای و  $T$  تعداد گام زمانی یک ساعته در ۲۴ ساعت شبانه‌روز است.

تانک‌های شبکه توزیع آب دارای سه نوع تراز شامل تراز مینیمم (H1) = تراز ذخیره اضطراری و آتش‌نشانی، تراز ماکزیمم (H2) = بیشینه تراز آب در تانک یا تراز سرریزی و تراز اولیه = تراز زمان صفر است. به دلیل عدم توجه بهره‌بردار، عدم وجود سیستم کنترل اتوماتیک و عدم هماهنگی و برنامه‌ریزی لازم برای تعدیل نوسانات مصرف با حجم ذخیره مخزن و آب ورودی به آن، برخی از مواقع آب مخزن از بیشینه تراز آن بالاتر رفته و سرریز می‌کند. پس در صورتی که آب از تانک سرریز نماید، این جواب مناسب با شرایط شبکه نیست. همچنین اگر از ذخیره اضطراری و آتش‌نشانی استفاده شود، به میزان بهره‌برداری از آن، از میزان قابلیت اطمینان تانک کاسته می‌شود. از تراز بین ذخیره اضطراری و آتش‌نشانی (H1) و تراز ماکزیمم (H2) برای کنترل نوسانات مصرف استفاده می‌شود. بنابراین در صورتی که در شبانه‌روز، تانک تا تراز حداکثر پر شده و سپس خالی شود، شرایط مطلوب بوده و قابلیت اطمینان آن حداکثر است.

$$TCC = \sum_{i=1}^{N_{ta}} UTC_i(d_{ta}^i) \times \max(h_{1,i}, \dots, h_{k,i}, \dots, h_{T,i}) \quad (۳)$$

که  $TCC$  هزینه ساخت تانک (\$)،  $UTC_i$  هزینه هر متر تراز آب در تانک  $i$  ام بر حسب قطر،  $d_{ta}^i$  قطر تانک  $i$  ام (متر) و  $h_{k,i}$  تراز آب در تانک  $i$  ام در انتهای بازی زمانی  $k$  ام (متر) است. در این مسئله بهینه‌سازی، قیود مسئله شامل هد فشاری در نقاط مصرف، بیشینه میزان برداشت آب از مخازن ذخیره، بسته شدن خروجی مخزن ذخیره و روابط انرژی و پیوستگی (کنترل شده در EPANET2) می‌باشند. قید بیشینه میزان برداشت آب به صورت رابطه (۴) است.

$$\frac{|\sum_{j=1}^{N_{tank}} (S_j^{initial} - S_j^{final})|}{\sum_{j=1}^{N_{tank}} S_j^{final}} \leq \varepsilon \quad (۴)$$

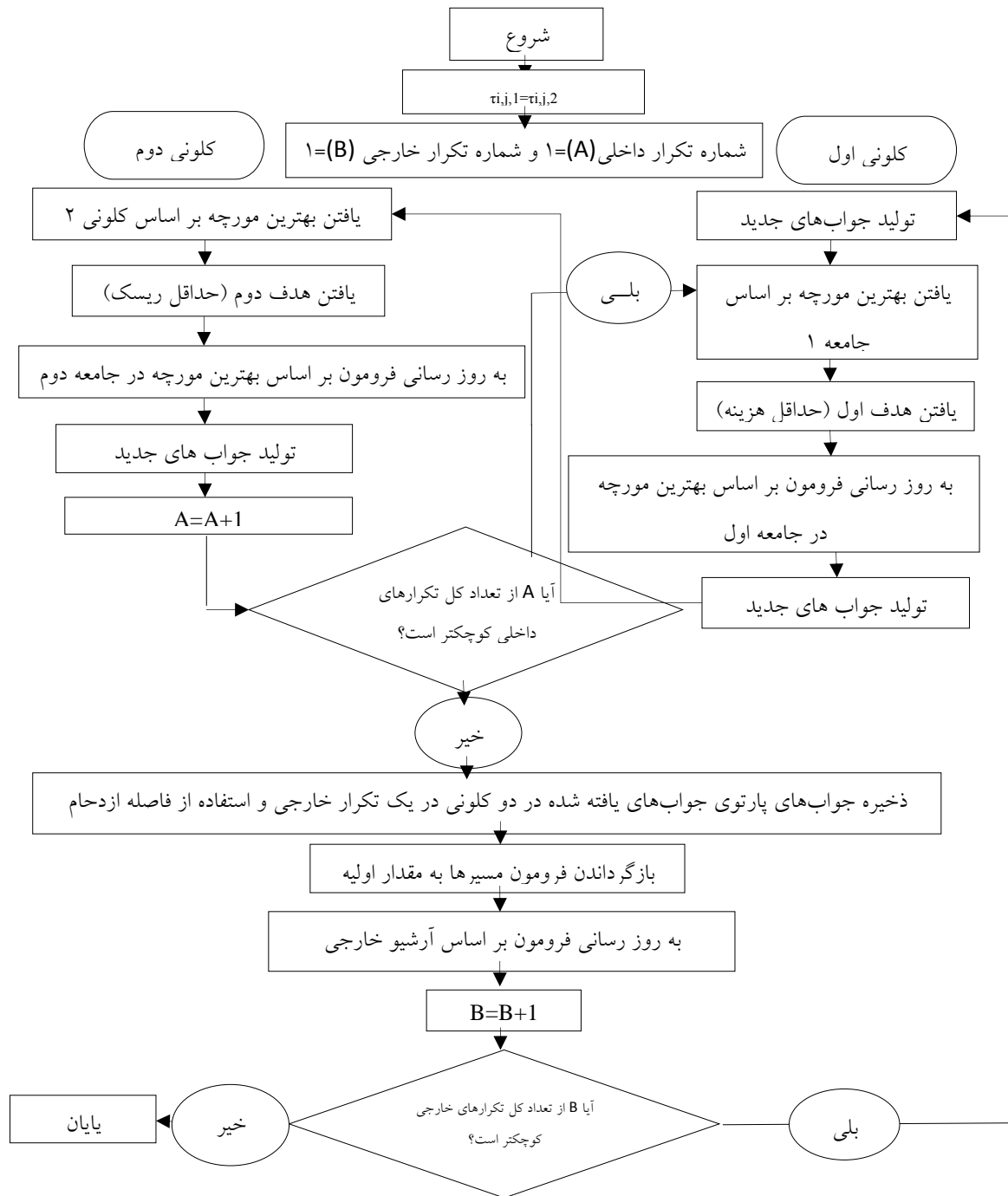
که در آن  $S_j^{initial}$  و  $S_j^{final}$  به ترتیب حجم اولیه و نهایی آب ذخیره (تراز ابتدایی و انتهایی آب) در تانک  $j$  ام به مترمکعب و  $\varepsilon$  مقدار خطای مجاز است. لازم به ذکر است که اگر  $\varepsilon = 0$  و تعداد تانک‌ها برابر با یک باشد، حجم اولیه و نهایی تانک و بنابراین تراز اولیه و نهایی تانک بر یکدیگر منطبق خواهند بود. در این پژوهش فرض آن است که مکان تانک از قبل مشخص است و جانمایی بهینه تانک‌ها در این مطالعه مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

هنگامی که تراز آب در تانک تغییر پیدا می‌کند، فشار و سن آب در گره‌ها نیز دچار تغییر می‌شود. آنگاه می‌توان قابلیت اطمینان گره‌ای ناشی از تغییر فشار و سن آب را در گره  $i$  و در زمان  $t$  از روابط (۵ و ۶) محاسبه نمود [۲۲].

$$r_H(i, t) = \begin{cases} 0 & P(i, t) < P_{min} \\ \frac{P(i, t) - P_{min}}{P_{des} - P_{min}} & P_{min} < P(i, t) < P_{des} \\ \frac{P(i, t) - P_{max}}{P_{des} - P_{max}} & P_{des} < P(i, t) < P_{max} \\ 0.25 & P(i, t) > P_{max} \end{cases} \quad (۵)$$

$$r_{WA}(i, t) = \begin{cases} 1 & WA(i, t) < 6 \\ 2.5 - 0.25 WA(i, t) & 6 < WA(i, t) < 10 \\ 0 & WA(i, t) > 10 \end{cases} \quad (۶)$$

در روابط فوق  $r_H(i, t)$  قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای در گره  $i$  و در زمان  $t$ ، فشار  $P(i, t)$  در گره  $i$  و در زمان  $t$ ،  $P_{min}$  فشار مینیمم برابر صفر،  $P_{des}$  فشار مطلوب برابر ۳۰ متر و  $P_{max}$  فشار ماکزیمم برابر ۱۰۰ متر،  $r_{WA}(i, t)$  قابلیت اطمینان



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم استفاده شده در بهینه سازی بر مبنای الگوریتم (Afshar et al. (2009)

$$R_{\text{tank}} = \frac{\sum_{t=1}^T R_{\text{tank}}(t)}{T} \quad (12)$$

برای محاسبه قابلیت اطمینان تلفیقی، ابتدا قابلیت اطمینان هیدرولیکی و سن آب گره‌ای به نسبت ۰/۷ و ۰/۳ با توجه به اهمیت بیشتر قابلیت اطمینان هیدرولیکی باهم ترکیب می‌شوند و بعد ترکیب این دو با قابلیت اطمینان تانک میانگین‌گیری هندسی گرفته می‌شود.

اما اگر تراز H2 به گونه‌ای باشد که از حجم تانک به خوبی استفاده نشود، قابلیت اطمینان آن کاهش می‌یابد. پس از محاسبه قابلیت اطمینان برای هر تانک در هر زمان، قابلیت اطمینان تانک در زمان t از معادله (۱۱) به دست می‌آید.

$$R_{\text{tank}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^4 R_{\text{tank}}(i, t)}{4} \quad (11)$$

بالاخره قابلیت اطمینان تانک از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

کمبود فشار موجود در شبکه توزیع برطرف شده است [۲۴]. مشخصات این شبکه به صورت جداول زیر قابل تعریف می‌باشد [۲۴]. در ضمن ضریب الگوی تقاضا در مورخی و همکاران بصورت بازه زمانی ۳ ساعته به ترتیب برابر ۰/۷، ۰/۶، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات گره‌های شبکه آبرسانی Anytown [۲۴]

نام گره	تراز ارتفاعی (گره متر)	تقاضای گرهی (لیتر بر ثانیه)	نام گره	تراز ارتفاعی (گره متر)	تقاضای گرهی (لیتر بر ثانیه)
۱	۱۵/۴	۷۵/۸	۱۲	۳۶/۹۶	۷۵/۸
۲	۱۵/۴	۳۷/۹۰	۱۳	۳۶/۹۶	۳۰/۳۲
۳	۱۵/۴	۳۷/۹۰	۱۴	۳۶/۹۶	۳۰/۳۲
۴	۲۴/۶۴	۰	۱۵	۳۶/۹۶	۳۰/۳۲
۵	۱۵/۴	۳۷/۹۰	۱۶	۲۴/۶۴	۳۰/۳۲
۶	۳۶/۹۶	۳۰/۳۲	۲۰	۳/۰۸	۰
۷	۱۵/۴	۱۵/۱۶	۱۷	۲۴/۶۴	۴۵/۴۸
۸	۱۵/۴	۱۵/۱۶	۱۸	۲۴/۶۴	۴۵/۴۸
۹	۱۵/۴	۱۵/۱۶	۱۹	۲۴/۶۴	۴۵/۴۸
۱۰	۶/۱۶	۳۷/۹۰	۲۱	۰	۰
۱۱	۱۵/۴	۳۷/۹۰	۲۲	۰	۰

جدول ۲- مشخصات تانک‌های شبکه توزیع آب Anytown [۲۴]

نام تانک	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷
تراز کف (متر)	۷۰/۲۲	۶۶/۲۲	۶۶/۲۲	۶۴/۶۸
ارتفاع اولیه	۳/۰۸	۳/۰۸	۳/۰۸	۳/۰۸
ارتفاع حداقل	۳/۰۸	۳/۰۸	۳/۰۸	۳/۰۸
ارتفاع حداکثر	۶/۱۶	۱۲/۳۲	۱۲/۳۲	۹/۲۴
قطر (متر)	۲۲/۰۱	۱۲/۷۱	۱۲/۷۱	۲۴/۶۱

جدول ۳- مشخصات پمپ‌های شبکه توزیع آب Anytown [۲۴]

دبی پمپاژ (لیتر بر ثانیه)	هد پمپاژ (متر)	راندمان پمپ (درصد)
۰	۹۲	۰
۱۵۲	۹۰	۵۰
۳۰۳	۸۳	۶۵
۴۵۵	۷۱	۵۵
۶۰۶	۵۶	۴۰

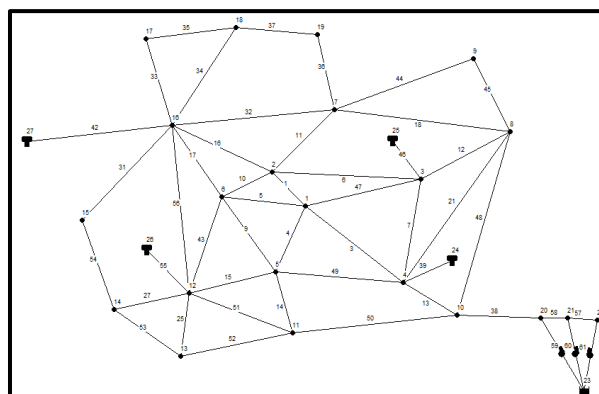
$$(13) \quad R_{\text{tank},H,WA} = \frac{\sum_{t=1}^T \sqrt{(0.7 * R_{H,t} + 0.3 * R_{WA,t}) * R_{\text{tank}}(t)}}{T}$$

در رابطه بالا  $R_{\text{tank},H,WA}$  قابلیت اطمینان تلفیقی (ترکیب قابلیت اطمینان تانک، هیدرولیکی و سن آب) است.

برای محاسبه این توابع هدف، مدل دینامیکی هیدرولیکی و کیفی (سن آب) باید برای هر کدام از اعضای جمعیت یکبار تحلیل شود که این کار به وسیله EPANET2 انجام می‌شود و نتایج به وسیله الگوریتم جامعه مورچگان بررسی می‌شود. همچنین ارتباط بین این دو نرم‌افزار به وسیله برنامه‌ای است که در نرم‌افزار C++ نوشته شده است که مقادیر فشار و سن آب در گره‌های کنترل‌شونده را از نرم‌افزار EPANET2 دریافت و وارد الگوریتم جامعه مورچگان می‌کند و خروجی‌های الگوریتم جامعه مورچگان که همان مقادیر تراز حداکثر تانک است را به EPANET2 وارد می‌کند که این کار تا پیدا شدن و همگرا شدن به سمت جواب بهینه به طور مرتب تکرار می‌شود. شکل ۱ الگوریتم این روش را نشان می‌دهد که در آن A و B پارامترهای تکرار شونده و  $\tau_{ij}$  میزان فرومون است.

## ۴- مطالعه موردی

شبکه مثال موردی استفاده شده در این مقاله شبکه توزیع آب Anytown می‌باشد. در شکل ۲ شمای کلی شبکه مذکور ارائه شده است.



شکل ۲- شمای کلی شبکه آبرسانی Anytown

این شبکه برای اولین بار توسط والسکی و همکاران (1987) ارائه شده که در تأمین تقاضای گرهی دچار کمبود بوده است [۲۳]. در مطالعه مورخی و همکاران (1994) با دوتایی کردن بعضی از لوله‌ها و اضافه کردن ۲ تانک شماره ۲۴ و ۲۷،

## ۵- نتایج و بحث

شبکه Anytown دارای چهار تانک است که در اینجا همه آنها در فرآیند بهینه‌سازی شرکت می‌کنند و منحنی تعامل برای هر رابطه قابلیت اطمینان با انجام بهینه‌سازی تولید می‌شود.

### ۵-۱- محاسبه قابلیت اطمینان تانک

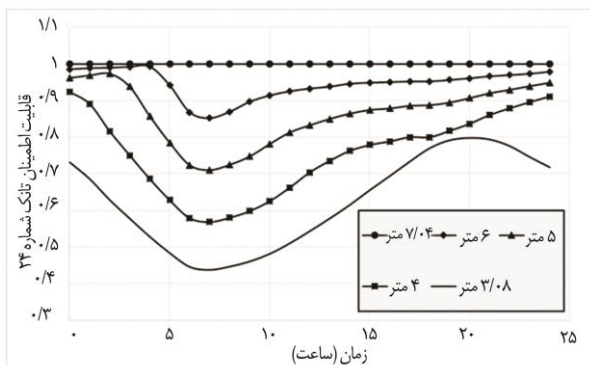
با توضیحات داده شده در قسمت قبل برای تعریف رابطه‌ای برای قابلیت اطمینان تانک گام‌های زیر برای هریک از تانک‌های شبکه توزیع انجام می‌شود.

۱- تراز حداکثر (H2) طراحی شده برای تانک‌های شماره ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ شبکه توزیع آب Anytown به ترتیب برابر ۶/۱۶، ۱۲/۳۲، ۱۲/۳۲ و ۹/۲۴ متر است [۲۴]. برای تعیین اینکه آیا این ترازها با توجه به شرایط کاری پمپ‌ها و میزان تقاضاها دارای ظرفیت کافی است یا خیر، ابتدا با قرار دادن یک مقدار زیاد برای H2 برای هر تانک برنامه EPANET اجرا شده و به این ترتیب بیشینه تراز آب در تانک‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به ترتیب برابر ۷/۰۴، ۹/۴، ۱۰/۸۹ و ۷/۹ متر محاسبه می‌شود. با مقایسه این ترازها با ترازهای طراحی شده نتیجه‌گیری می‌شود که در شرایطی که پمپ‌ها ۲۴ ساعت شبانه‌روز روشن باشند و میزان تقاضای گره‌های شبکه نیز تغییر نکند، آنگاه در زمان طراحی، تانک شماره ۲۴ دارای ظرفیت کم می‌باشد و تانک‌های شماره ۲۵، ۲۶ و ۲۷ ظرفیت بیش از اندازه دارند. پس در صورتی که تراز حداکثر (H2) برای تانک‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به ترتیب برابر ۷/۰۴، ۹/۴، ۱۰/۸۹ و ۷/۹ متر در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه در این ترازها از ذخیره اضطراری و آتش‌نشانی استفاده نمی‌شود و همچنین از تراز بین H1 و H2 حداکثر بهره‌برداری لازم صورت می‌گیرد، آنگاه قابلیت اطمینان این تانک‌ها در تمام زمان‌ها برابر یک خواهد بود.

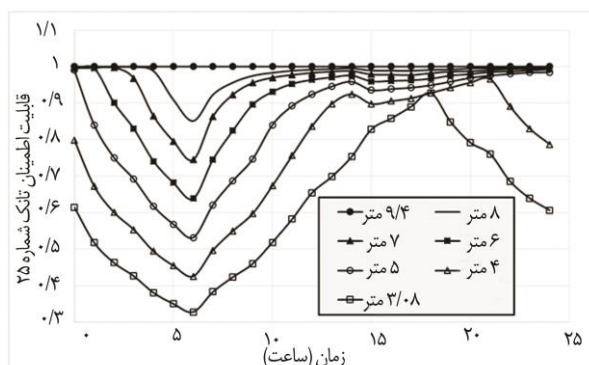
۲- اگر تراز H2 کمتر از هریک از ترازهای فوق باشد، آنگاه قابلیت اطمینان تانک در زمان‌های مختلف از تقسیم تراز آب در تانک به ازای تراز H2 تقسیم بر تراز آب در تانک به ازای تراز H2 با قابلیت اطمینان برابر یک به دست می‌آید.

۳- اگر تراز H2 بیشتر از هریک از ترازهای فوق باشد، قابلیت اطمینان تانک در ضریب H2 تقسیم بر ترازهای با قابلیت

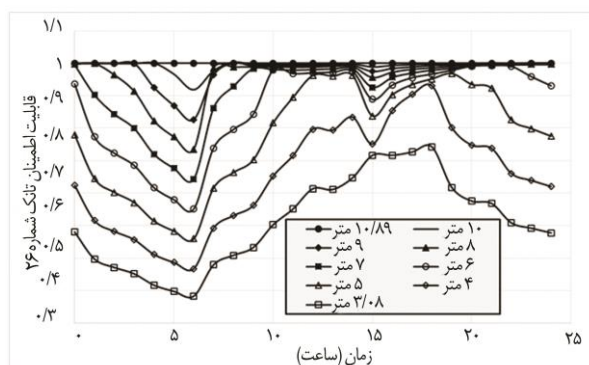
اطمینان یک تقسیم می‌شود تا قابلیت اطمینان تانک کمتر از یک شود. در واقع چون تانک‌های شبکه Anytown بیشتر از ظرفیت‌شان طراحی شده‌اند، اگر در جریان فرایند بهینه‌سازی تراز یکی از تانک‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد ممکن است روی تانک دیگر اثر بگذارد و باعث شود که از ظرفیت اضافه آن تانک استفاده شود. بنابراین قابلیت اطمینان تانک کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۳- قابلیت اطمینان تانک ۲۴ به ازای ترازهای مختلف H2



شکل ۴- قابلیت اطمینان تانک ۲۵ به ازای ترازهای مختلف H2



شکل ۵- قابلیت اطمینان تانک ۲۶ به ازای ترازهای مختلف H2

بدین ترتیب قابلیت اطمینان برای هریک از تانک‌های شبکه برای حالتی که تمام پمپ‌ها ۲۴ ساعت شبانه‌روز روشن باشند و تقاضای گره‌ها تغییری نکند، از این روش محاسبه شده که نمودار آنها در شکل‌های ۳ تا ۶ به ترتیب برای تانک‌های



بازی می‌کنند. چون هنگامی که تراز حداکثر در این دو تانک از ۳/۲۶ متر به ترتیب به ۹/۴۶ و ۱۰/۹۳ متر می‌رسد، قابلیت اطمینان تانک به اندازه ۰/۲۰۵۲ افزایش پیدا می‌کند. از این نقطه به بعد، با افزایش تراز تانک شماره ۲۴ از ۳/۰۸ متر به ۷/۰۴ متر قابلیت اطمینان تانک به اندازه ۰/۱۰۲۰ زیاد می‌شود.

جدول ۴- میزان هزینه، قابلیت اطمینان و تراز حداکثر بهینه هر تانک

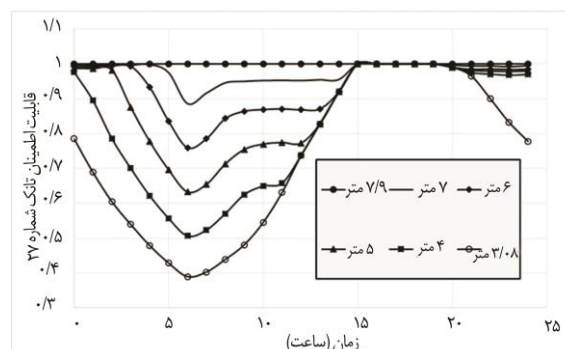
هزینه ساخت تانک (دلار)	قابلیت اطمینان تانک	حداکثر تراز تانک شماره (متر)	حداکثر تراز تانک شماره (متر)	حداکثر تراز تانک شماره (متر)	حداکثر تراز تانک شماره (متر)
۵۸۲۳	۰/۶۲۹۹	۳/۰۸	۳/۲۶	۳/۲۶	۳/۰۸
۵۸۴۹	۰/۶۳۱۰	۳/۱۲	۳/۲۶	۳/۲۶	۳/۰۸
۵۸۷۴	۰/۶۳۲۱	۳/۱۶	۳/۲۶	۳/۲۶	۳/۰۸
۵۸۹۹	۰/۶۳۳۳	۳/۲۰	۳/۲۶	۳/۲۶	۳/۰۸
۸۷۴۷	۰/۸۱۱۰	۳/۴۴	۶/۸۷	۱۰/۹۳	۳/۴۵
۸۷۷۶	۰/۸۳۵۱	۳/۰۸	۹/۴۶	۱۰/۹۳	۳/۰۸
۹۴۶۶	۰/۸۵۵۷	۳/۲۴	۹/۴۶	۱۰/۹۳	۳/۸۲
۱۰۱۵۶	۰/۸۵۷۵	۷/۰۴	۴/۱۰	۱۰/۹۳	۳/۰۸
۱۱۰۴۲	۰/۸۹۸۹	۷/۰۴	۶/۸۷	۱۰/۹۳	۳/۴۵
۱۱۲۹۸	۰/۹۲۸۵	۷/۰۴	۹/۴۶	۱۰/۹۳	۳/۰۸
۱۱۴۴۵	۰/۹۳۳۱	۷/۰۴	۹/۴۶	۱۰/۹۳	۳/۲۶
۱۱۵۴۴	۰/۹۳۵۸	۷/۰۴	۹/۴۶	۱۰/۹۳	۳/۳۹
۱۱۵۹۳	۰/۹۳۷۱	۷/۰۴	۹/۴۶	۱۰/۹۳	۳/۴۵
۱۴۶۲۳	۰/۹۶۱۴	۷/۰۴	۶/۲۲	۱۰/۹۳	۸/۱۳

### ۵-۳- بهینه‌سازی هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای

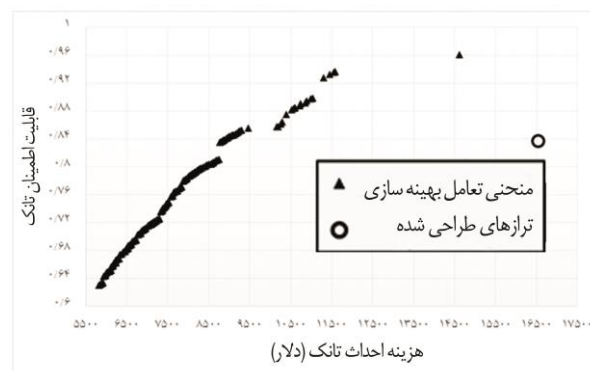
در شکل ۸ منحنی تعامل بین هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای نشان داده شده است. افزایش تراز آب در تانک، قابلیت اطمینان هیدرولیکی را افزایش می‌دهد و این بدین معنی است که فشار در گره‌ها به فشار مورد نیاز برای برآورده شدن تقاضا نزدیک‌تر می‌شود.

در جدول ۵ میزان تراز حداکثر بهینه هر تانک برای چهار نقطه روی منحنی تعامل (نقطه با حداقل قابلیت اطمینان، نقطه میانی هزینه، نقطه میانی قابلیت اطمینان و نقطه با حداکثر قابلیت اطمینان) ارائه شده است. لازم به ذکر است که انتخاب

شماره ۲۴ تا ۲۷ نشان داده شده است. علت اینکه برای هر تانک، رابطه قابلیت اطمینان متفاوتی ارائه شده است این است که هر تانک شرایط خاص خودش را دارد و دارای حجم متعادل‌سازی متفاوتی است.



شکل ۶- قابلیت اطمینان تانک ۲۷ به ازای ترازهای مختلف H2



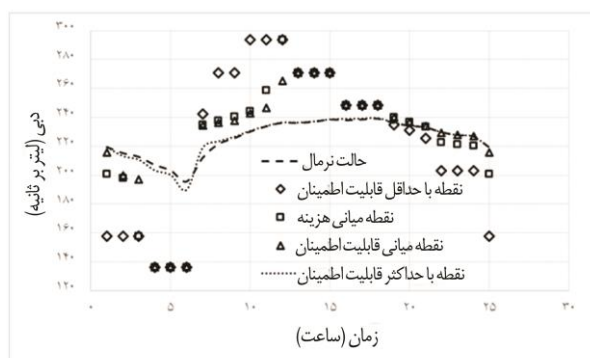
شکل ۷- منحنی تعامل بین هزینه ساخت و قابلیت اطمینان تانک

### ۵-۲- بهینه‌سازی هزینه و قابلیت اطمینان تانک

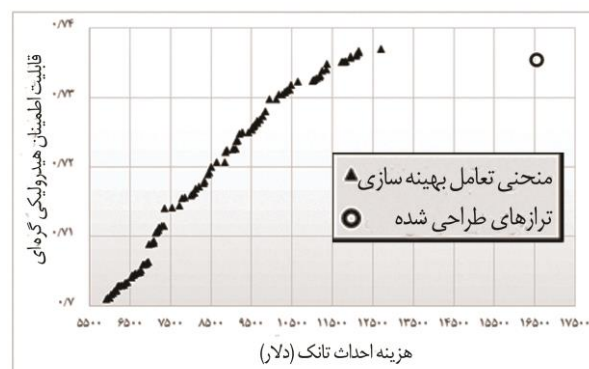
در شکل ۷، منحنی تعامل بین هزینه ساخت و قابلیت اطمینان تانک با استفاده از روابط (۳) و (۱۲) ارائه شده است. با افزایش تراز بیشینه تانک، با توجه به اینکه از حجم متعادل‌سازی استفاده مطلوب‌تری شده، قابلیت اطمینان تانک نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۷، یک نقطه برای ترازهای طراحی شده نیز ارائه شده که منظور همان تراز حداکثر تانک ارائه شده در مورخی و همکاران است [۲۴]. چون ترازهای طراحی شده در شرایط هیدرولیکی ثابت دارای ظرفیت اضافی می‌باشند، به همین دلیل قابلیت اطمینان تانک در این نقطه از نقطه با حداکثر قابلیت اطمینان روی منحنی تعامل کمتر شده است. در جدول ۴، میزان تراز حداکثر بهینه تانک‌ها در سطوح مختلف قابلیت اطمینان ارائه شده است که تانک‌های شماره ۲۵ و ۲۶ نقش بیشتری را در افزایش قابلیت اطمینان تانک



نقطه میانگین هزینه و میانگین قابلیت اطمینان روی منحنی تعامل در این مقاله فقط به منظور بحث روی نتایج است و نشان‌دهنده گزینه برتر نیست. معمولاً برای انتخاب گزینه برتر از روش‌های یونگ [۲۵]، پرسشنامه و غیره استفاده می‌شود که هدف این مطالعه نیست.



شکل ۹- دبی پمپ شماره ۵۹ برای حالت نرمال و نقاط منحنی تعامل



شکل ۸- منحنی تعامل بین هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان هیدرولیک، گره‌ای

جدول ۵- میزان هزینه، قابلیت اطمینان و تراز حداکثر بهینه هر تانک

هر چقدر تراز حداکثر تانک کمتر باشد، با توجه به کاهش ذخیره آب در تانک، ماند آب کم شده و قابلیت اطمینان سن آب زیاد می‌شود. بنابراین با کمترین هزینه ساخت تانک می‌توان به بیشترین قابلیت اطمینان سن آب رسید و به همین دلیل با توجه به اینکه بین این دو پارامتر تعامل وجود ندارد، بهینه‌سازی بین هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان سن آب به صورت یک نقطه بدست آمده است. در این نقطه که هزینه ساخت تانک برابر ۵۸۹۲ دلار و قابلیت اطمینان سن آب برابر ۰/۹۸۶۴ است، تراز آب در تانک‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به ترتیب برابر ۳/۰۸، ۳/۴۵، ۳/۱۷ و ۳/۱۴ متر به دست آمده است. هرچند در این نقطه قابلیت اطمینان سن آب با حداقل هزینه حداکثر شده است، ولی آبی در تانک برای استفاده در زمان مصرف زیاد ذخیره نمی‌شود. یعنی قابلیت اطمینان هیدرولیک، کاهش می‌یابد.

حداکثر	حداکثر	حداکثر	حداکثر	قابلیت اطمینان تانک	هزینه ساخت تانک (دلار)	
تراز تانک شماره ۲۷ (متر)	تراز تانک شماره ۲۶ (متر)	تراز تانک شماره ۲۵ (متر)	تراز تانک شماره ۲۴ (متر)			
۹/۲۴	۱۲/۳۲	۱۲/۳۲	۶/۱۶	۰/۷۳۵۵	۱۶۵۳۳	حالت نرمال
۳/۱۴	۳/۰۸	۳/۴۵	۳/۱۶	۰/۷۰۰۹	۵۹۲۳	نقطه با حداقل قابلیت اطمینان
۵/۹۱	۴/۲۸	۳/۲۶	۳/۲۸	۰/۷۱۹۰	۸۴۲۱	نقطه میانی هزینه
۵/۷۹	۴/۲۸	۴/۹۳	۴/۲۳	۰/۷۲۴۹	۹۲۸۴	نقطه میانی قابلیت اطمینان
۶/۸۴	۴/۲۸	۱۱/۳۰	۶/۱۷	۰/۷۳۷۰	۱۲۷۰۹	نقطه با بیشینه قابلیت اطمینان

### ۵-۵- بهینه‌سازی هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان تلفیقی

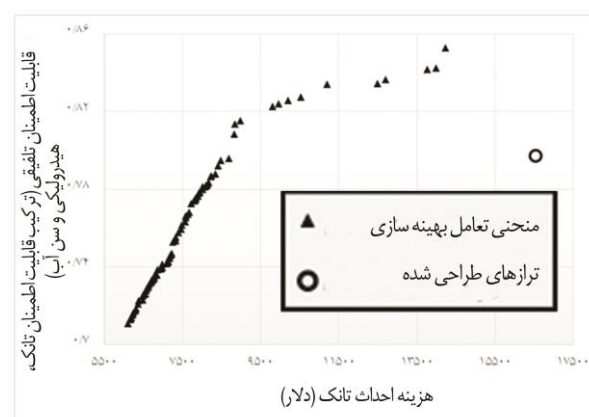
در شکل ۱۰ منحنی تعامل بین هزینه و قابلیت اطمینان تلفیقی (رابطه ۱۳) نشان داده شده است. علت انتخاب قابلیت

جدیدی از قابلیت اطمینان تانک که نشان می‌دهد که تانک چقدر توانسته است نوسانات مصرف را کنترل نماید. در واقع قابلیت اطمینان تعریف شده که تابعی از تراز تانک است، در شرایط هیدرولیکی ثابت محاسبه شده است. سن آب در گره‌ها هم به عنوان قابلیت اطمینان کیفی در نظر گرفته شده است و در نهایت قابلیت اطمینان تلفیقی به صورت ترکیب سه قابلیت اطمینان تانک، هیدرولیکی گره‌ای و سن آب گره‌ای است. رفتار منحنی‌های تعامل تولید شده کاملاً به نوع قابلیت اطمینان تعریف شده بستگی دارد. در نگاه اول ممکن است اینگونه به نظر برسد که تانک‌های شبکه توزیع برای ظرفیت زیادی طراحی می‌شوند و نیازی به این همه هزینه برای ساخت تانک نیست. در اینجا هرچند پمپ به طور مستقیم در فرآیند بهینه‌سازی وارد نشده است، اما به طور غیرمستقیم در تولید نتایج بهینه‌سازی دخالت کرده است. به این ترتیب که هرچقدر تراز تانک کمتر شود، نقطه کار پمپ روی منحنی‌های عملکرد پمپ تغییر کرده و باعث می‌شود تغییرات دبی پمپ گسترده‌تر شود. این دخالت پمپ باعث می‌شود تا با کاهش تراز تانک، بخشی از قابلیت اطمینان کاهش یافته ناشی از کاهش تراز تانک جبران شود. بنابراین تصمیم‌گیری دقیق‌تر در مورد اینکه آیا تانک‌های شبکه توزیع دارای ظرفیت اضافی هستند یا اینکه چقدر از ظرفیت آنها ممکن است اضافی باشد را باید در مطالعات آینده و با وارد کردن پمپ به مسئله بهینه‌سازی جستجو کرد.

## ۷- مراجع

- [1] Walski, T. M., 2000, Hydraulic Design of Water Distribution Storage Tanks, In *Water Distribution Systems Handbook*, Chapter 10 (ed. L. W. Mays), McGraw-Hill, New York.
- [2] Farmani R., Walters G. and Savic D., 2006. Evolutionary multi-objective optimization of the design and operation of water distribution network: total cost vs. reliability vs. water quality. *Journal of Hydroinformatics*, 8 (3), 165-179.
- [3] Farmani, R., Savic, D. A., Walters, G. A., 2004, The Simultaneous Multi-Objective Optimization of Anytown Pipe Rehabilitation, Tank Sizing, Tank Siting and Pump Operation Schedules, *Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management*, ASCE, American Society of Civil Engineers, Salt Lake City, 4663-4672.

اطمینان تلفیقی بررسی تاثیر همزمان تغییر تراز تانک بر روی عملکرد هیدرولیکی و کیفی است. برعکس منحنی‌های تعامل قابلیت اطمینان تانک و هیدرولیکی گره‌ای که با شیب یکنواخت زیاد می‌شود، در اینجا منحنی تعامل دارای دو شیب است. نقطه عطف منحنی دارای هزینه ۸۹۷۷ دلار و قابلیت اطمینان تلفیقی ۰/۸۱۵۳ است، که در این نقطه تراز آب در تانک‌های ۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷ به ترتیب برابر ۳/۳۲، ۳/۴۶، ۱۰/۹۳ و ۳/۱۴ متر به دست آمده است. قابلیت اطمینان تانک، هیدرولیکی گره‌ای و سن آب در این نقطه به ترتیب برابر ۰/۸۴۲۹، ۰/۷۱۷۳ و ۰/۹۵۹۸ است. در این نقطه، تانک‌های ۲۴ و ۲۷ عملاً عملکردی ندارند و عدم کارایی آنها با تغییر نقطه کار پمپ جبران شده است. به نظر می‌رسد که وارد کردن تانک به تنهایی در فرآیند بهینه‌سازی مطلوب نیست و پمپ هم باید وارد شود.



شکل ۱۰- منحنی تعامل بین هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان تلفیقی (قابلیت اطمینان تانک، هیدرولیکی و سن آب)

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله بهینه‌سازی هزینه ساخت تانک و قابلیت اطمینان هیدرولیکی، کیفی و تلفیقی (تلفیق قابلیت اطمینان هیدرولیکی و کیفی) برای شبکه توزیع آب Anytown در شرایط هیدرولیکی ثابت (پمپ‌ها ۲۴ ساعت شبانه‌روز روشن باشند و تقاضای گره‌ها نیز تغییری نکند) مورد بررسی قرار گرفت. در این مقاله، دو تعریف مجزا برای قابلیت اطمینان هیدرولیکی انجام شد، یکی قابلیت اطمینان هیدرولیکی گره‌ای که میزان برآورده شدن فشار مورد نیاز در گره‌ها برای تأمین آب مورد نیاز مصرف کنندگان را نشان می‌دهد و دیگری تعریف

- [16] Dorigo, M., 1992, Optimization, learning and natural algorithms., *Ph.D. Thesis*, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
- [17] Mariano, C.E. and Morales, E., 1998, A multiple objective ant-Q algorithm for the design of water distribution irrigation networks, *Proceedings of First International Workshop on AntColony Optimization ANTS*, Brussels, Belgium.
- [18] Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y. and Tan, C.L., 2001, Ant Colony optimization for the design of water distribution systems, *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2001*, ASCE, The Rosen Plaza Hotel, Orlando, Florida, United States.
- [19] Maier, H.R., Simpson, A.R., Zecchin, A.C., Foong, W.K., Phang, K.Y., Seah, H.Y. and Tan, C.L., 2003, Ant colony optimization for design of water distribution systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3), 200-209.
- [20] Zecchin, A.C., Maier, H.R., Simpson, A.R., Leonard, M. and Nixon, J.B., 2005, Parametric Study for an Ant Algorithm Applied to Water Distribution System Optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 9(2), 175-191.
- [21] Zecchin, A.C., Maier, H.R., Simpson, A.R., Leonard, M. and Nixon, J.B., 2007, Ant colony optimization applied to water distribution system design: comparative study of five algorithm, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(1), 87-92.
- [۲۲] مهزاد، ن. (۱۳۹۰)، "بهینه سازی چندهدفه بهره‌برداری از شبکه توزیع آب با در نظر گرفتن تأثیرات پمپ و مخزن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران.
- [23] Walski, T. M., Brill, E. D., Gessler, J., Goulter, L. C., Jeppson, R. M., Lansey, K., Lee H. L., Leibman, J. C., Mays, L., Moegan, D. R., and Ormsbee, L., 1987, Battle of the Network Models: Epilogue, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 113(2), 191-203.
- [24] Murphy, L. J., Dandy, G. C., Simpson, A. R., 1994, Optimum Design And Operation Of Pumped Water Distribution Systems, *Proceeding Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Institution of Engineers, Brisbane, Australia, 149-155.
- [25] Young, H. P., 1993, An Evolutionary Model of Bargaining, *Journal of Economic Theory*, 59(1), 145-168.
- [4] Haarhoff, J., Van Zyl, J. E., Nel, D., Van der Walt, J. J. 2000, Water Supply and Water Quality in Rural Areas: Stochastic Analysis of Rural Water Supply Systems, *Water Supply*, 18(1), 467-470.
- [5] Van Zyl, J. E., Haarhoff, J., 2007, Reliability Analysis of Municipal Storage Reservoirs Using Stochastic Analysis, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 49(3), 27-32.
- [6] Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., Koelle, E., 2003, Advanced Water Distribution Modeling and Management, *Watertown, Conn: Haestad Press*.
- [7] Van Zyl, J. E., Piller, O., Legat, Y., 2008, Critical Parameters for the Reliability of Municipal Storage Tanks, *World Water and Environmental Resources Congress*, EWRI, Honolulu, Hawaii, 12-16.
- [۸] هاشمی، س.س.، (۱۳۸۹)، "بهینه‌سازی شبکه‌های آب با حداقل سازی انرژی پمپاژ"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ایران.
- [9] MacPherson, G., Cripps, S., de Schaetzen, W., 2007, Storage and Pumping Capacity Analysis Using Hydraulic Modeling, *Conference Proceeding Paper, A.A. Balkema Publishers, Water Management Challenges in Global Changes*, CCWI, London, England, 439-446.
- [10] Prasad, T. D., 2010, Design of Pumped Water Distribution Networks with Storage, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, 136(1), 129-132.
- [11] Todini, E., 2000, Looped Water Distribution Networks Design Using a Resilience Index Based Heuristic Approach, *Urban Water*, 2 (3), 115-122.
- [12] Tabesh, M., Tanyimboh, T. T., Burrows, R., 2002, Head Driven Simulation of Water Supply Networks, *International Journal of Engineering*, Transactions A: Basics, 15 (1), 11-22.
- [۱۳] تابش، م. و عطایی کیا، ب.، (۱۳۸۹)، "بهینه‌سازی شبکه‌های آب با استفاده از الگوریتم اجتماع مورچگان و در نظر گرفتن رابطه دبی فشار در گره‌ها"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
- [14] Males, R. M., Clark, R. M., Wehrman, P. J. & Gates, W. E. 1985, Algorithm for mixing problems in water systems, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 111 (2), 206-219.
- [15] Rossman, L.A. 2000, EPANET2 Users Manual. *US Environmental Protection Agency*. Cincinnati, OH.

# Ant Colony Optimization of Tank Maximum Level Considering Hydraulic and Quality Reliability

M. Fotuhi<sup>1\*</sup>, M. Tabesh<sup>2</sup>

1- Ph.D. of Water Engineering, Faculty of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Center of Excellence for Engineering and Management of Infrastructures, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

mahmood\_fotuhi@yahoo.com

## Abstract:

Tanks in water distribution networks are used to store water for emergency conditions, fire flow demand and demand oscillations control. Construction of tanks spends a lot of money and therefore using whole volume of tanks is essential while operation. Otherwise, if tank volume will be more or less than what is required during operation, tank reliability is reduced. Accordingly, in this paper, a new relationship for tank reliability according to water level variation in tanks is defined. Therefore, maximum water level in tanks is defined as the decision variable. The definition of tank reliability is as follows. At first, the values of maximum level for each tank is computed such a way that optimal use is provided from balancing volume of tanks. In fact, for these maximum level values, maximum reliability is achieved for each tank. Now if during optimization process, a value lower than these computed maximum level is selected for decision variables, tank reliability is reduced. To compute the value of tank reliability, the values of tank water level for the selected decision variables is divided by the values of tank water level for maximum tank reliability. Also, because water level variation can effect on pressure and water age in demand nodes, this effect is investigated by considering hydraulic and quality reliability. In fact, variation of water level in tanks changes node demand pressures and in result actual node demands. Also, variation of water level or on the other hand variation of storage volume affects on water age in demand nodes. Besides, in order to investigate the simultaneous effect of water level variation on hydraulic and quality reliability, a relationship is also defined for integrated reliability. Definition of integrated reliability is to investigate whether there is optimum maximum tank level values that both hydraulic and quality reliability is improved simultaneously while tank construction costs is minimum. Optimal management of tanks in water distribution networks to provide required water of consumers with desired quality is of high importance. To achieve this, optimization is defined as a powerful tool. In this paper, by focusing on operation phase, multi-objective optimization of water distribution performance is performed in which tank costs is considered as the first objective and tank reliability, node hydraulic reliability, node water age reliability and integrated reliability is considered as the second objective. Ant colony algorithm is codified in Microsoft Visual C++ for optimization due to its simplicity and high performance. The validity of the edited algorithm is tested on mathematical functions and proved to be applicable on water distribution networks. The created trade-off curve from multi-objective optimization helps the decision makers to select the top choice based on the importance of their own criterion whether it is hydraulic or quality. It should be mentioned that the created trade off curves have been produced under constant hydraulic conditions (i.e. pumps are On for 24 hours and nodal demands are constant). Further study should also consider pump rotation speed as the decision variable to achieve more accurate results. In fact these conditions help operators to make better decisions.

**Keywords:** Multi-objective Optimization, Ant Colony Algorithm, Tank, Reliability, Water Age