

## طراحی چند هدفه شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شاخص اطمینان پذیری فازی (FRI)

نوید قاجارنیا<sup>۱</sup> امید بزرگ حداد<sup>۲</sup> صلاح کوچک‌زاده<sup>۳</sup>  
(دریافت ۸۸/۱۱/۱۲ آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۲/۱۰ پذیرش ۹۰/۳/۲۸)

### چکیده

در این تحقیق طراحی چند هدفه شبکه توزیع آب شهری با استفاده از یک الگوریتم چند هدفه صورت گرفت. توابع هدف مورد استفاده، کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن اطمینان پذیری بود. همچنین با به کارگیری منطق فازی در محدوده فشار کمینه و بیشینه مجاز شبکه و بر اساس تعاریف متداول اطمینان پذیری، معیار اطمینان پذیری قطعی جدیدی به نام شاخص اطمینان پذیری فازی پیشنهاد شد. سپس با توسعه الگوریتم چند هدفه جفت گیری زنبور عسل بر پایه مفاهیم نسخه تک هدفه آن، طراحی چند هدفه دو شبکه آبرسانی به کار رفته در تحقیقات دیگران، با استفاده از توابع هدف مذکور انجام گرفت. نتایج نشان داد که معیار پیشنهادی، توانایی مناسبی را در ایجاد اطمینان پذیری مورد نظر در شبکه دارد. همچنین عملکرد رضایت بخش الگوریتم چند هدفه جفت گیری زنبور عسل نیز در ارائه پارتوی بهینه برای مسائل مورد نظر، نشان داده شد. از الگوی طراحی توسعه داده شده در این تحقیق می توان به منظور ارائه یک مجموعه جواب غیرپیست به تصمیم گیرندگان، برای انتخاب نقاطی که در آن‌ها هر دو عامل هزینه و اطمینان پذیری در شرایط مطلوبی هستند، استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: شبکه آبرسانی، اطمینان‌پذیری، طراحی چند هدفه، شاخص FRI، الگوریتم HBMO

## Multi Objective Design of Water Distribution System Using Fuzzy Reliability Index

Navid Ghajarnia<sup>1</sup>

Omid Bozorg Hadad<sup>2</sup>

Salah Kochakzadeh<sup>3</sup>

(Received Feb. 1, 2010 Revised Apr. 30, 2011 Accepted June 18, 2011)

### Abstract

This paper investigates the application of a multiobjective algorithm in the problem of multiobjective design of water distribution networks. The problem is formulated using two different objective functions: minimizing cost and maximizing reliability. To measure the reliability, a new definition based on the original concept of fuzzy logic, named "Fuzzy Reliability Index" is introduced. Then, developing the Multi Objective Honey-Bee Mating Optimization algorithm based on its single objective version, the multi criteria design of two benchmark networks is performed using predefined objective functions. The results obtained show that the proposed reliability index is able to provide desired reliability in the network. Furthermore, satisfactory results obtained by the algorithm in defining the pay off characteristic between total cost and reliability are shown. Finally, it is possible to use the developed model to introduce different and numerous non-dominant solutions to decision makers.

**Keywords:** Water Distribution Network, Reliability, Multi Objective Design, FRI Index, HBMO.

1- Ph.D. Student of Water Resources Eng., Faculty of Irrigation and Reclamation, Tehran University, Tehran (Corresponding Author) (+98 261) 2241119 Ghajarnia@ut.ac.ir  
2- Assist. Prof. of Water Resources Eng., Faculty of Irrigation and Reclamation, Tehran University, Tehran  
3- Prof. of Water Structures, Faculty of Irrigation and Reclamation, Tehran University, Tehran

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران (نویسنده مسئول) ۲۲۴۱۱۱۹ (۰۲۶۱) Ghajarnia@ut.ac.ir  
۲- استادیار بخش مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران  
۳- استاد بخش سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، تهران

## ۱- مقدمه

تاریخچه طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری با استفاده از روشهای نوین بهینه‌سازی دارای قدمتی حدوداً ۳۰ ساله است [۱]. پیش از آن، غالباً طراحی‌ها بر اساس قضاوت مهندسی و یا با استفاده از روشهای مبتنی بر سعی و خطا صورت می‌گرفت. در این صورت طبیعی است که به دلیل پیچیدگی و گستردگی فضای تصمیم مسائل مربوط به شبکه‌های توزیع آب، عدم بهینگی این طراحی‌ها کاملاً قابل انتظار بود. از این رو بهبود روشهای طراحی و به‌کارگیری روشهای بهینه‌سازی اجتناب ناپذیر بود. آلپرویتز<sup>۱</sup> و شمیر<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۷ برای اولین بار نوعی روش طراحی ارائه کردند که بر پایه برنامه‌ریزی خطی<sup>۳</sup> استوار بود [۲]. با آن روش، مبانی ریاضی وارد طراحی شبکه‌های توزیع آب شد و به این ترتیب افق جدیدی را پیش روی محققان و طراحان باز نمود. برای اصلاح روش‌های طراحی سنتی، آلپرویتز و شمیر در سال ۱۹۷۷ با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی گرادینتی<sup>۴</sup> معادلات جریان را به‌طور مستقیم وارد یک مدل بهینه‌سازی LP کردند. در آن تحقیق انتخاب اندازه بهینه برای اجزای مختلف شبکه (قطر لوله‌ها، ظرفیت پمپ‌ها، قطر شیر و اندازه مخزن ذخیره) در شرایط نیاز عادی و بحرانی، به‌عنوان هدف طراحی بهینه مد نظر قرار گرفته بود. سپس کاربرد روش LP برای طراحی شبکه تکمیل و تعمیم داده شد [۳، ۴ و ۵].

فوجیوارا<sup>۵</sup> و کانگ<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۰ روش تجزیه دو مرحله‌ای<sup>۷</sup> را برای طراحی شبکه توزیع آب پیشنهاد کردند [۶]. در مرحله اول روش ارائه شده در آن تحقیق، یک پاسخ بهینه موضعی با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی گرادینتی<sup>۸</sup> تعیین می‌گردد. سپس این جواب وارد مرحله دوم شده و بهبود داده می‌شود و این فرایند تکراری تا ثابت شدن پاسخ نهایی ادامه می‌یابد. اما باید توجه داشت که مسئله بهینه‌سازی شبکه توزیع آب ذاتاً یک مسئله غیرخطی است. از این رو برخی از محققان برای حل آن به خطی‌سازی روابط پرداختند و برخی دیگر نیز از انواع روشهای NLP بهره‌گیری کرده‌اند. اما این روشها متغیرهای تصمیم را به‌صورت پیوسته در نظر می‌گیرند و منجر به ارائه قطرهای پیوسته می‌شوند که باید با قطرهای گسسته موجود در بازار جایگزین شوند. این تبدیل قطر نه تنها بهینه بودن پاسخ اصلاح شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه

گاهی ارضای قیودات هیدرولیکی را نیز زیر سؤال می‌برد. به‌علاوه این روشها نمی‌توانند بهینگی مطلق پاسخ ارائه شده در پایان کار را تضمین کنند [۷]. پس باید روشهایی به‌کار گرفته شوند که معضلات یاد شده را مرتفع کنند و یا حداقل از محدودیتهای موجود بکاهند. از این رو برای رفع یا تقلیل محدودیت روشهای پیشین، سوپج<sup>۹</sup> و والترز<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۷ استفاده از روشهای تکاملی و فراکوشی مانند الگوریتم ژنتیک<sup>۱۱</sup> را پیشنهاد کردند [۷]. به‌طور کلی، روشهای تکاملی و فراکوشی برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی، بسیار کارآمد بوده و نیازی به خطی‌سازی روابط و یا محاسبه مشتقات جزئی ندارند. به‌علاوه نمونه‌گیری سراسری این روشها احتمال گیر افتادن در بهینه‌های موضعی را کاهش داده و اثر نقطه شروع بر پاسخ نهایی را نیز از بین می‌برد. لذا پس از سوپج و والترز در سال ۱۹۹۷، الگوریتم‌های متعدد دیگری از قبیل نورد شیه‌سازی شده<sup>۱۲</sup>، جستجوی ممنوعه<sup>۱۳</sup>، الگوریتم ترکیبی جهش قورباغه<sup>۱۴</sup>، جستجوی هماهنگ<sup>۱۵</sup>، الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی<sup>۱۶</sup> و الگوریتم جامعه مورچگان<sup>۱۷</sup> در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری پیشنهاد و به‌کار گرفته شد [۸-۱۳]. الگوریتم‌های یاد شده توانستند پاسخهای کاربردی بهتری در مقایسه با روشهای ریاضی پیشین ارائه دهند. اگرچه روشهای تکاملی نیز همچون روشهای قبلی قادر به تضمین بهینه مطلق بودن پاسخ نهایی خود نیستند، اما سادگی آنها، به‌کارگیری مستقیم قطرهای تجاری گسسته و نمونه‌گیری سراسری انجام شده در طی روند حلشان، کارآمدی آنها را در مقایسه با روشهای قبلی به اثبات رسانده است.

اما نکته‌ای که تا کنون همواره ذهن مهندسان را به‌خود مشغول کرده است، تقابل موجود بین هزینه طراحی شبکه‌های توزیع آب و اطمینان‌پذیری شبکه طراحی شده، است. میز<sup>۱۸</sup> در سال ۱۹۹۶ بروز نارسایی در شبکه‌ها را به یکی از دو صورت مکانیکی (مانند شکستن لوله‌ها، خرابی پمپ‌ها و یا شیرهای کنترلی) و یا هیدرولیکی (مانند تغییرات نیاز یا فشار در گره‌ها، فرسوده شدن لوله‌ها، کوچک بودن اندازه قطر لوله‌ها، ظرفیت ناکافی پمپ‌ها و یا ظرفیت ناکافی تانک‌های ذخیره) برشمرد [۱۴]. بسیاری از محققان کوشیدند تا با ترکیب این دو عامل، بتوانند شاخصی را برای سنجش

<sup>9</sup> Savic

<sup>10</sup> Walters

<sup>11</sup> Genetic Algorithm (GA)

<sup>12</sup> Simulated Annealing (SA)

<sup>13</sup> Taboo Search (TS)

<sup>14</sup> Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA)

<sup>15</sup> Harmonic Search (HS)

<sup>16</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)

<sup>17</sup> Ant Colony Optimization (ACO)

<sup>18</sup> Mays

<sup>1</sup> Alperovits

<sup>2</sup> Shamir

<sup>3</sup> Linear Programming (LP)

<sup>4</sup> Linear Programming Gradient (LPG)

<sup>5</sup> Fujiwara

<sup>6</sup> Kang

<sup>7</sup> Two-Phase Decomposition Method

<sup>8</sup> Non-Linear Programming Gradient (NLPG)

شبکه<sup>۳</sup> ( $I_r$ ) در نظر گرفت. به این ترتیب تودینی در سال ۲۰۰۰ توانست با طراحی دوهدفه شبکه با توابع هدف بیشینه کردن  $I_r$  و کمینه کردن هزینه گامی در راستای طراحی مطمئن تر شبکه‌ها بردارد. اما پراساد<sup>۴</sup> و پارک<sup>۵</sup> در سال ۲۰۰۴ بیان نمودند که بیشینه‌سازی شاخصهای ارائه شده توسط تودینی تنها توان اضافی موجود در شبکه را افزایش می‌دهد و تأثیری بر انعطاف‌پذیری حلقه‌های شبکه ندارد [۲۷]. آنها یادآور شدند که بالا بودن سطح شاخص  $I_r$  در یک شبکه شاخه‌ای به تنهایی ضامن بالا بودن سطح اطمینان‌پذیری شبکه نخواهد بود زیرا قدرت عکس‌العمل یک شبکه شاخه‌ای در مقابل بروز نارسایی بسیار ضعیف است. بنابراین انعطاف‌پذیری به تنهایی برای سنجش اطمینان‌پذیری سیستم کافی نبوده و ایجاد تغییراتی در آن به نوعی که ارزیابی حلقه‌های مطمئن را نیز ممکن گرداند، ضروری به نظر می‌رسد. پراساد و پارک در سال ۲۰۰۴ شاخص انعطاف‌پذیری شبکه<sup>۶</sup> ( $I_n$ ) را به گونه‌ای که ضامن وجود حلقه‌های مطمئن در شبکه باشد، با ایجاد تغییراتی در شاخص انعطاف‌پذیری ( $I_r$ ) ارائه کردند. این کار با ضرب ضریبی در رابطه شاخص ( $I_r$ ) صورت گرفت. این ضریب به گونه‌ای تنظیم شده است که قادر به ارزیابی وجود یا عدم وجود حلقه‌های مطمئن در شبکه باشد.

اما شاخصهای ارائه شده قبلی، هیچ یک بیشینه فشار مجاز در گره‌های شبکه را در روابط ریاضی خود وارد نکرده‌اند. در حقیقت هر دو شاخص  $I_n$  و  $I_r$  با افزایش خود، مقدار فشار گره‌های شبکه را به صورت بی قید و شرط افزایش می‌دهند. این امر موجب نشت غیر قابل کنترل از شبکه در مواقع شکستگی و همچنین عدم حفظ ایمنی لوله‌ها می‌شود. لذا در این تحقیق برای جبران کمبودهای موجود در زمینه شاخص‌های اطمینان‌پذیری قطعی موجود، شاخص اطمینان‌پذیری جدیدی بر مبنای منطق فازی<sup>۷</sup> ارائه شد. همچنین پس از توسعه الگوریتم چند هدفه جفت‌گیری زنبورهای عسل<sup>۸</sup>، به منظور ارزیابی کارآمدی و کارایی مدل بهینه‌سازی مزبور، طراحی بهینه و دو هدفه دو مثال متداول در تحقیقات قبلی با دو تابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن FRI مد نظر قرار گرفت. هدف نهایی این مدل بهینه‌سازی، ترسیم تقابل هزینه و اطمینان‌پذیری به صورت یک مجموعه جواب غیرپست<sup>۹</sup> بود که در نوع خود یک مسئله گسسته، غیر خطی، پیچیده و به شدت مقید است.

اطمینان‌پذیری در شبکه توزیع آب ارائه دهند [۱۵]. اما وارد ساختن اطمینان‌پذیری به‌طور صریح در طراحی شبکه‌های توزیع آب، یکی از دشوارترین وظایفی است که تا به حال پژوهشگران شبکه‌ها با آن روبرو شده‌اند [۱۶]. در این خصوص والسکی<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۷ معتقد بود که شاخص اطمینان‌پذیری در شبکه‌ها باید به نوعی منعکس‌کننده اوضاع مصرف‌کننده در هنگام بروز شرایط نامطلوب در شبکه باشد [۱۷]. تابش و همکاران در سال ۲۰۰۴ نیز مدعی شدند که بررسی اطمینان‌پذیری شبکه‌ها بر اساس مقادیر قطعی نیاز متوسط و بحرانی گره‌های آن، نمی‌تواند یک برآورد واقعی از اطمینان‌پذیری سیستم را ارائه دهد. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که دیدگاههای مختلفی در مورد چگونگی به‌کارگیری اطمینان‌پذیری در طراحی شبکه‌های آبرسانی تاکنون منتشر شده است [۱۸-۲۵].

اگر چه تمایل کارفرمایان و تصمیم‌گیرندگان به احداث شبکه‌های کم هزینه تر، محققان را به سمت طراحی شبکه‌ها با هدف کمینه کردن هزینه‌ها سوق می‌دهد، اما تمرکز بیش از حد مدل‌های طراحی به کمینه کردن هزینه‌های ساخت، بدون توجه به وضعیت فاکتورهای کارایی شبکه، اصلی‌ترین دلیل ناکارآمدی مدل‌های مزبور در طی سالهای اخیر بوده است [۲۶]. نگاه یک بعدی در جهت کاستن هزینه‌های شبکه می‌تواند منجر به از یاد بردن فاکتورهای کارایی همچون اطمینان‌پذیری تأمین نیاز و یا فشار در گره‌ها شود. از این رو در طراحی بهینه شبکه‌ها لازم است رسیدن به کمترین مقدار هزینه را در کنار دستیابی به بیشترین مقدار اطمینان‌پذیری، به عنوان تابع هدف مد نظر قرار داد. به این ترتیب استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه برای رسیدن به هر دو هدف مذکور ضروری به نظر می‌رسد.

بنابراین برخی از محققان با استفاده از روشهای حل چندهدفه و با به‌کارگیری تعاریفی از اطمینان‌پذیری به صورت شاخصهای قطعی، به طراحی شبکه‌های آبرسانی پرداختند. تودینی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۰ ادعا کرد که در صورت طراحی شبکه‌های آبرسانی بر مبنای ارضای دقیق (نه بیشتر و نه کمتر) قیودات دبی و فشار گره‌ها، در هنگام بروز نارسایی (مانند شکست یکی از لوله‌ها) به علت ایجاد افت اضافی، شبکه قادر به تحویل دبی و فشار کافی به مصرف‌کننده نخواهد بود. بنابراین، اگر گره‌ها دارای توان و انرژی بیشتری از مقدار حداقل مورد نیاز باشند، احتمال عملکرد مناسب شبکه در شرایط بروز نارسایی افزایش خواهد یافت [۱۵]. وی این انرژی اضافی را به عنوان یک شاخص اندازه‌گیری برای انعطاف‌پذیری در

<sup>3</sup> Resiliency

<sup>4</sup> Prasad

<sup>5</sup> Park

<sup>6</sup> Network Resiliency

<sup>7</sup> Fuzzy Reliability Index (FRI)

<sup>8</sup> Multi Objective Honey-Bee Mating Optimization (MOHBMO)

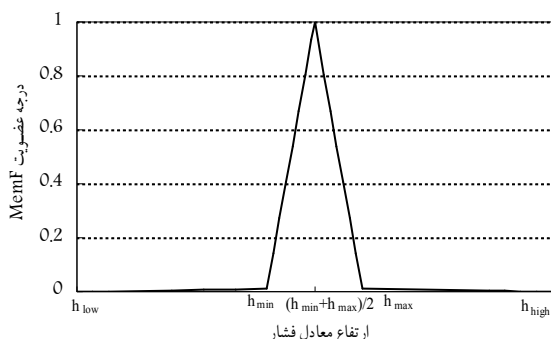
<sup>9</sup> Nondominated

<sup>1</sup> Walski

<sup>2</sup> Todini

## ۲- شاخص اطمینان پذیری فازی (FRI)

شبکه در صورتی افزایش می‌یابد که فشار آنها به مقدار میانگین فشار حداقل و حداکثر مجاز نزدیک تر شود. بنابراین شمای کلی تابع فازی مورد استفاده در شاخص FRI به صورت شکل ۱ است.



شکل ۱- درجه عضویت تابع فازی به کار رفته در شاخص FRI

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار بهینه تابع درجه عضویت فازی (مقدار برابر یک) در فشاری معادل میانگین فشار حداقل و حداکثر مجاز، قابل دستیابی است. با دور شدن از این مقدار بهینه، درجه عضویت تابع فازی کاهش می‌یابد تا جایی که در فشارهای حداقل و حداکثر مجاز به مقداری بسیار نزدیک به صفر خواهد رسید. سپس تابع درجه عضویت فازی مورد نظر با شیب بسیار کمی در دو طرف مقدار بهینه خود (فشار میانگین) به سمت صفر حرکت می‌کند. به این ترتیب با افزایش دامنه تابع فازی و در نظر گرفتن یک خط با شیب بسیار کم در اطراف  $h_j^*$  و  $h_j^{**}$ ، از صفر شدن ناگهانی درجه عضویت در این ناحیه جلوگیری شده و می‌توان الگوریتم بهینه‌سازی را در جستجوی پاسخ بهینه یاری نمود.

از طرف دیگر هر کدام از گره‌های شبکه دارای مقدار نیاز معینی هستند که به نوعی بیان‌کننده اهمیت آنها در شبکه است. واضح است که گره‌های پرمصرف در مقایسه با آن دسته از گره‌ها که نیاز کمتری را در شبکه تأمین می‌کنند، از درجه اهمیت بالاتری برخوردارند. به منظور وارد ساختن این اهمیت در محاسبات مربوط به شاخص اطمینان‌پذیری FRI، ضریب  $C_j^1$  به صورت زیر تعریف می‌شود

$$C_j^1 = 1 - \frac{q_j^*}{\sum_{j=1}^{N_j} q_j^*} \quad (2)$$

که در این رابطه

$C_j^1$  مقدار ضریب مورد نظر در هر کدام از گره‌ها،  $q_j^*$  حداقل دبی خروجی مجاز یا همان نیاز گره  $N_j$  و تعداد گره‌های شبکه هستند.

هر شبکه آبرسانی با توجه به توپوگرافی منطقه و همچنین وضعیت نیاز در گره‌های آن دارای یک مقدار حداقل فشار مجاز در گره‌های شبکه است. اگر فشار تأمین شده در گره‌ها در طول دوران بهره‌برداری کمتر از مقدار حداقل گردد، وضعیت شبکه از لحاظ آبرسانی به مصرف‌کنندگان در شرایط نامطلوبی قرار گرفته و در نتیجه برای بهبود عملکرد آن باید به گزینه‌های نوسازی و بهسازی اندیشید. بنابراین هر چه فشار گره‌ها از مقدار حداقل آنها بیشتر باشد، ضریب اطمینان تأمین فشار شبکه بالاتر رفته و همچنین توانایی آن برای مقابله با افت‌های ایجاد شده در شرایط بروز نارسایی و شکست لوله‌ها بیشتر می‌گردد. اما حداکثر فشار در گره‌های شبکه هم از یک حد مجاز نباید تجاوز کند که این حد با توجه به مقاومت لوله‌ها تعیین می‌گردد. فشار بیش از حد مجاز در لوله‌ها و گره‌های شبکه، نشت را افزایش و شکستگی‌ها را تسریع می‌دهد و به این ترتیب عمر مفید شبکه کاهش می‌یابد. بنابراین مقدار بهینه فشار در گره‌ها را می‌توان در دامنه تغییرات حداکثر و حداقل مجاز آن در نظر گرفت. از این رو و با توجه به موارد یاد شده، در این تحقیق با استفاده از تعریف یک تابع فازی بین مقادیر حداکثر و حداقل فشار در گره‌ها، شاخص FRI به صورت زیر تعریف و پیشنهاد می‌گردد

(۱)

$$\text{MemF}_j = \begin{cases} 0 & \text{If } h_j \leq h_j^{low} \\ \left( \frac{0.01}{h_j^* - h_j^{low}} \right) \times (h_j - h_j^{low}) & \text{If } h_j^{low} < h_j \leq h_j^{low} \\ 0.01 + \frac{1.98}{h_j^* - h_j^*} (h_j - h_j^*) & \text{If } h_j^* < h_j \leq \frac{h_j^* + h_j^{**}}{2} \\ 0.01 + \frac{1.98}{h_j^* - h_j^{**}} (h_j - h_j^{**}) & \text{If } \frac{h_j^* + h_j^{**}}{2} < h_j \leq h_j^{**} \\ \left( \frac{0.01}{h_j^{**} - h_j^{high}} \right) \times (h_j - h_j^{high}) & \text{If } h_j^{**} < h_j \leq h_j^{high} \\ 0 & \text{If } h_j > h_j^{high} \end{cases}$$

اگر  $h_j$  ارتفاع معادل فشار در گره‌زام،  $h_j^*$  مقدار ارتفاع معادل فشار برای حداقل فشار مجاز،  $h_j^{**}$  مقدار ارتفاع معادل فشار برای حداکثر فشار مجاز در گره‌زام،  $h_j^{low}$  و  $h_j^{high}$  مقادیر فرضی ارتفاع معادل فشار که به ترتیب از  $h_j^{**}$  بزرگ‌تر و از  $h_j^*$  کوچک‌تر هستند باشند، مقدار درجه عضویت تابع فازی مورد نظر برای گره  $N_j$  (MemF<sub>j</sub>) از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار درجه عضویت تابع فازی مورد استفاده در شاخص FRI را برای هر کدام از گره‌های شبکه محاسبه نمود. به این ترتیب و با توجه به تعاریف مذکور، اطمینان‌پذیری گره‌های مختلف

$$\text{Optimize } (\text{Cost}, \text{Reliability}) \quad (5)$$

$$\text{Cost} = \sum_{i=1}^{N_i} C(D_{ij}) \cdot L_i + \sum_{j=1}^{N_j} PF_j^1 \quad (6)$$

$$\text{Reliability} = \left( \sum_{j=1}^{N_j} FRI_j \right) \times \text{Min}(FRI_j) \quad (7)$$

$$FRI_j = \text{Mem}F_j \times \left( 1 - \frac{q_j^*}{\sum_{j=1}^{N_j} q_j^*} \right) \times \left( \frac{NP_j \sum_{i=1}^{NP_j} D_{ij}}{NP_j \times D_{\text{Max}_j}} \right) \quad (8)$$

$$\text{Mem}F_j = \begin{cases} 0 & \text{If } h_j \leq h_j^{\text{low}} \\ \left( \frac{0.01}{h_j^* - h_j^{\text{low}}} \right) \times (h_j - h_j^{\text{low}}) & \text{If } h_j^{\text{low}} < h_j \leq h_j^* \\ 0.01 + \frac{1.98}{h_j^* - h_j^*} (h_j - h_j^*) & \text{If } h_j^* < h_j \leq \frac{h_j^* + h_j^{**}}{2} \\ 0.01 + \frac{1.98}{h_j^* - h_j^{**}} (h_j - h_j^{**}) & \text{If } \frac{h_j^* + h_j^{**}}{2} < h_j \leq h_j^{**} \\ \left( \frac{0.01}{h_j^{**} - h_j^{\text{high}}} \right) \times (h_j - h_j^{\text{high}}) & \text{If } h_j^{**} < h_j \leq h_j^{\text{high}} \\ 0 & \text{If } h_j > h_j^{\text{high}} \end{cases} \quad (10)$$

$$PF_j^1 = \begin{cases} \alpha_1 (h_j^* - h_j)^{\alpha_2} & \text{if } h_j < h_j^* \\ 0 & \text{if } h_j \geq h_j^* \end{cases}$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - h_f^{1,2} + H_p = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{In}} Q_{i,j} = \sum_{i=1}^{N_{Out}} Q_{i,j} \quad \forall j = 1, 2, \dots, N_j \quad (12)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_i \quad (13)$$

$$h_{f_i} = \omega LC_i^{HW-1.852} D_i^{-4.871} Q_i^{1.852}$$

که در این روابط

Cost هزینه لوله‌های شبکه،  $C(D_i)$  هزینه واحد طول لوله  $\lambda$  م با قطر  $D_i$  و  $PF_j^1$  نیز تابع جریمه مربوط به رعایت حداقل فشار مجاز گره‌های شبکه بوده که نحوه محاسبه آن در رابطه ۱۰ آورده شده است. در این رابطه  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  ضرایبی هستند که با توجه به نوع

با ضرب  $C_j^1$  در  $\text{Mem} F_j$ ، مقدار درجه عضویت گره‌های پرمصرف کوچک‌تر شده و متقابلاً درجه عضویت گره‌های کم مصرف بزرگ‌تر می‌شود. از طرفی از آنجایی که بیشتر بودن درجه عضویت مطلوب‌تر است، بنابراین با کاهش مقدار عددی آن در گره‌های پرمصرف، حساسیت آنها ملموس‌تر شده و با تعریف مدل بهینه‌سازی به صورت بیشینه کردن مقدار شاخص FRI، می‌توان مقدار درجه عضویت گره‌های بحرانی (گره‌های پرمصرف) را بهبود بخشید.

همچنین به منظور استفاده از نتایج تحقیقات پراساد و پارک در سال ۲۰۰۴، ضریب پیشنهادی آنها برای ارزیابی و بهبود وضعیت حلقه‌های شبکه نیز در محاسبات اطمینان‌پذیری سیستم وارد شد. این محققان بیان کردند که حلقه‌های مطمئن زمانی وجود خواهند داشت که قطر لوله‌های موجود در هر حلقه حتی الامکان با یکدیگر برابر باشند. بنابراین ضریب معرفی شده توسط پراساد و پارک در سال ۲۰۰۴ که در این تحقیق  $C_j^2$  نامیده می‌شود، با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$C_j^2 = \frac{NP_j \sum_{i=1}^{NP_j} D_{ij}}{NP_j \times D_{\text{Max}_j}} \quad (3)$$

که در این رابطه

$C_j^2$  مقدار ضریب مورد نظر در هر کدام از گره‌ها،  $D_{ij}$  قطر لوله  $i$ ام که به گره  $j$ ام متصل است،  $NP_j$  تعداد لوله‌های متصل به گره  $j$ ام و  $D_{\text{Max}_j}$  قطر قطورترین لوله متصل به گره  $j$ ام است. با توجه به رابطه ۳ در صورتی که قطر تمام لوله‌های متصل به گره  $j$ ام با یکدیگر برابر باشند مقدار شاخص بالا برابر یک بوده و هر چه حلقه‌های شبکه ناهمگن‌تر باشند مقدار آن از یک کوچک‌تر می‌شود. در نهایت با توجه به روابط ۱، ۲ و ۳، مقدار نهایی شاخص FRI در هر گره به صورت زیر خواهد بود

$$FRI_j = \text{Mem}F_j \times C_j^1 \times C_j^2 \quad (4)$$

به این ترتیب مقدار نهایی شاخص FRI برای هر گره معرفی اطمینان‌پذیری فشار در آن با لحاظ کردن درصد تامین نیاز و همچنین با اعمال سنجش مربوط به وجود یا عدم وجود حلقه‌های مطمئن است.

### ۳- توسعه مدل بهینه‌سازی چند هدفه

اهداف این مسئله طراحی، کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری است. به این ترتیب مدل بهینه‌سازی مسئله به صورت زیر خواهد بود.

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه جفت‌گیری زنبور عسل (MOHBMO)

الگوریتم MOHBMO نسخه چند هدفه الگوریتم HBMO ارائه شده توسط بزرگ حداد و همکاران در سال ۲۰۰۶ است [۲۹]. برای تولید الگوریتم MOHBMO نیز همانند نسخه تک هدفه آن، از نحوه زندگی واقعی زنبورهای عسل استفاده شد. هر کندوی زنبور عسل، می‌تواند دارای یک یا چند ملکه باشد. ملکه‌ها در مواقع مشخصی از سال به خارج از کندو سفر کرده و به پرواز جفت‌گیری می‌پردازند. نکته جالب توجه آن است که زنبورهای نری که موفق به جفت‌گیری با ملکه‌ای می‌شوند، لزوماً متعلق به کندوی همان ملکه نیستند. به این معنا که ملکه‌ها می‌توانند با زنبورهای نر متعلق به کندوهای دیگر نیز جفت‌گیری کنند. به‌علاوه عموماً دو ملکه در یک کندو زندگی نمی‌کنند. بنابراین اگر کندویی دارای دو ملکه باشد، یکی از آنها کندو را ترک کرده و به کندوی دیگری که فاقد ملکه است می‌پیوندد. لذا به این ترتیب نیز امکان جفت‌گیری ملکه یک کندو با زنبورهای کندوهای دیگر وجود دارد. این عمل موجب جابجایی ژن‌های برتر موجود در کندوهای مختلف شده و به این ترتیب خصوصیات زنبورهای کندوهای مختلف با یکدیگر ترکیب می‌شود. از پدیده طبیعی جابجایی ملکه‌ها در بین کندوها و انتقال خصوصیات یک کندو به کندوی دیگر، می‌توان در توسعه الگوریتم MOHBMO استفاده نمود.

برای این منظور، ابتدا دو کندو که هر کدام دارای یک ملکه‌اند تولید می‌شود. هر کندو با توجه به یک تابع هدف به‌صورت تک هدفه، بهینه‌سازی را انجام داده و پس از تکرار تعداد مشخصی سعی و خطا به بهبود ملکه خود می‌پردازد. پارتوی نهایی به‌دست آمده هرگز از محدوده جوابهای بهینه به‌دست آمده برای هر کدام از توابع هدف فراتر نخواهد رفت. بنابراین برای به‌دست آوردن پارتویی که از نظر وسعت و پراکندگی در وضعیت مطلوبی قرار داشته باشد، باید جوابهای به‌دست آمده از حل تک هدفه مسئله به نقاط بهینه مطلقشان نزدیک باشد. به این ترتیب نقاط موجود در دو سر پارتو از هم دور شده و پارتوی نهایی پراکندگی مناسبی خواهد داشت. لذا برای رسیدن به این مطلوب، دوره‌ای به نام دوره گرم شدن<sup>۲</sup> برای هر کدام از کندوها در نظر گرفته شد [۱]. در طی دوره WU هر کندو با انجام تعداد نسبتاً زیادی سعی و خطا، ملکه را به سمت نقطه بهینه مطلق تابع هدف خود هدایت می‌کند. پس از انجام WU برای هر کدام از کندوها، دو پاسخ جداگانه به‌دست می‌آید که هر کدام از آنها از نظر یکی از دو تابع هدف در وضعیت مطلوبی قرار دارند. این دو جواب از نظر توابع هدفشان با یکدیگر مقایسه شده و اگر یکی

مسئله مورد نظر انتخاب می‌شوند. همچنین  $L_i$  طول لوله  $i$  ام،  $h_1$  و  $h_2$  ارتفاع معادل فشار هیدرولیکی بر حسب متر،  $V_1$  و  $V_2$  سرعت آب بر حسب متر بر ثانیه و  $Z_1$  و  $Z_2$  ارتفاع از سطح مبنا بر حسب متر به ترتیب در نقاط ۱ و ۲ هستند. لازم به‌ذکر است که نقاط ۱ و ۲، دو نقطه فرضی در یک خط جریان در لوله‌های شبکه بوده که برای عنوان نمودن رعایت مبانی هیدرولیکی در شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه در نظر گرفته شده‌اند.  $h_f^{1,2}$  ارتفاع افت هیدرولیکی بین نقاط ۱ و ۲ بر روی هر خط جریان فرضی بر حسب متر،  $H_p$  ارتفاع هد پمپاژ بر حسب متر،  $Q_{ij}$  دبی آمین لوله ورودی و یا خروجی متصل به گره  $i$  ام بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $h_{fi}$  ارتفاع افت هیدرولیکی در لوله  $i$  ام بر حسب متر،  $\omega$  ضریب ثابت وابسته به فرمول هیزن-ویلیامز مورد استفاده،  $C_i^{HW}$  ضریب هیزن-ویلیامز<sup>۱</sup> لوله  $i$  ام،  $Q_i$  دبی جاری در لوله  $i$  ام بر حسب متر مکعب بر ثانیه،  $\gamma$  وزن مخصوص آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $g$  شتاب جاذبه زمین بر حسب متر بر مجذور ثانیه و  $N_i$  تعداد لوله‌های شبکه هستند.

در این مدل بهینه‌سازی کمینه کردن هزینه لوله‌های شبکه و همچنین بهینه‌سازی شاخص اطمینان‌پذیری FRI به‌عنوان اهداف طرح مد نظر است. به‌علاوه برای کسب اطمینان از عدم رعایت حداقل فشار مجاز در گره‌های شبکه، یک تابع جریمه مطابق رابطه ۱۰ به تابع هدف مربوط به هزینه اضافه شد. همچنین با توجه به نحوه تعریف تابع هدف در نظر گرفته شده برای بهینه‌کردن اطمینان‌پذیری شبکه در رابطه ۷، علاوه بر اینکه مجموع تمامی FRI‌های گره‌های مختلف شبکه در مقدار تابع هدف وارد می‌شود، از تأثیر کمترین مقدار FRI در بین گره‌ها نیز غفلت نشد. به این ترتیب بهینه‌شدن  $Z$  نه تنها مجموع مقادیر FRI در گره‌های شبکه را بهینه می‌سازد بلکه از بیش از حد کوچک شدن FRI در برخی گره‌های بحرانی نیز جلوگیری به‌عمل می‌آورد. به همین دلیل حداقل FRI در مجموع تمامی FRI‌های شبکه، ضرب شد. به‌علاوه با توجه به نحوه تعریف این رابطه روشن است که شاخص نهایی معرف اطمینان‌پذیری شبکه (بر خلاف برخی شاخص‌های اطمینان‌پذیری قبلی) در محدوده صفر و یک نبوده و می‌تواند از عدد یک بزرگ‌تر باشد.

شایان ذکر است که شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه در مدل بهینه‌سازی MOHBMO توسط نرم افزار EPANET 2.0 انجام می‌شود و به این ترتیب قیودات مذکور در روابط ۱۱، ۱۲ و ۱۳ توسط مدل شبیه‌ساز برآورده خواهند شد [۲۸]. لذا اعمال تابع جریمه برای کسب اطمینان از رضای آن‌ها مورد نیاز نیست.

<sup>2</sup> Warm Up (WU)

<sup>1</sup> Hazen-Williams

توانست دیگری را مغلوب کند، وارد لیست جوابهای غیرپست می‌گردد و در غیر این صورت هر دوی آنها در این لیست قرار می‌گیرند. سپس جوابی که در لیست غیرپست از نظر تابع هدف اول برتر است، به‌عنوان ملکه کندوی دوم و همچنین جوابی که از نظر تابع هدف دوم برتر است به‌عنوان ملکه کندوی اول انتخاب می‌شود (جابجایی ملکه‌ها در بین دو کندو). مجدداً فرایند حل مسئله تک‌هدفه با ملکه‌های جدید و همان توابع هدف قبلی آغاز می‌شود با این تفاوت که این بار تعداد سعی و خطا در هر کندو نسبت به مرحله WU بسیار کمتر است. پس از انجام تعداد معینی سعی و خطا مجدداً جوابهای بهینه به‌دست آمده از هر کندو با یکدیگر مقایسه شده و پس از انجام آزمایش غیرپستی وارد لیست جوابهای غیرپست می‌شوند. هر جواب وارد شده به لیست غیرپست، با تمام جوابهای قبلی موجود در این لیست مقایسه می‌شود و در نهایت جوابهای غیرپست درون لیست باقی می‌مانند. پس از به‌روز کردن لیست غیرپست پس از هر بار فرایند تکراری موجود در روند حل چندهدفه، جوابی که در درون این لیست نسبت به تابع هدف اول از همه برتر باشد به‌عنوان ملکه جمعیت دوم قرار گرفته و برعکس. سپس مجدداً هر کندو با توجه به تابع هدف خودش پیش می‌رود و این فرایند تکراری تا رسیدن به شرط توقف که عموماً تعداد مشخصی تکرار است، ادامه می‌یابد. اگر دوره WU به خوبی انجام شود، تعداد تکرارهای هر کندو در مرحله فرایند تکراری فرایند حل چندهدفه به خوبی انتخاب شوند و در نهایت تعداد تکرارهای فرایند تکراری به‌اندازه کافی انتخاب شده باشد، می‌توان انتظار داشت که پارامتری به‌دست آمده چه از نظر پراکندگی و چه از نظر تعداد نقاط موجود بر روی آن دارای وضعیت مناسبی باشد. در شکل ۲ فلوچارت الگوریتم دو هدفه MOHBM0 مشاهده می‌شود. در این فلوچارت NWU1 و NWU2 به ترتیب تعداد تکرار برای دوره گرم شدن کندوی اول و دوم، Itt1 و Itt2 تعداد تکرار هر کندو در مرحله تکراری فرایند حل چند هدفه و Rep تعداد تکرار فرایند تکراری روند حل چند هدفه است.

## ۵- مطالعه موردی

روش طراحی مورد نظر با استفاده از توابع هدف تعریف شده، بر روی دو شبکه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. شبکه اول که توسط آلپروویتز و شمیر در سال ۱۹۷۷ ارائه شده است و توسط بسیاری از محققان به کار رفته است، یک شبکه ساده بدون پمپ و بدون تانک ذخیره بوده که شمای کلی آن در شکل ۳ مشاهده می‌گردد [۷-۱۱]. شبکه دو حلقه‌ای<sup>۱</sup> دارای ۸ لوله ( $N_i=8$ ) و ۶ گره ( $N_j=6$ )

است. طول همه لوله‌های به‌کار رفته در شبکه ( $L_i$ ) با هم برابر بوده و معادل ۱۰۰۰ متر هستند. به‌علاوه ضریب هیزن-ویلیامز برای محاسبه افت تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ و ضریب  $\omega$  نیز برابر  $10/6744$  (برابر ضریب  $\omega$  به کار رفته در نرم افزار EPANET 2.0) فرض شده‌اند. مقادیر دبی مورد نیاز هر گره معلوم بوده و میزان کمینه و بیشینه فشار مجاز در هر گره نیز به ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ متر آب فرض گردید ( $P_j^* = 30$  و  $P_j^{**} = 60$ ). همچنین مقدار  $h_j^{High}$  و  $h_j^{Low}$  نیز برابر ۱۰۰۰- و ۵۰۰ متر آب در نظر گرفته شدند. لازم به‌ذکر است که فشار ۱۰۰۰- دارای مفهوم فیزیکی نبوده و فقط به‌منظور سهولت حل مسئله در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به گره‌ها و قطرهای تجاری این شبکه در مقاله آلپروویتز و شمیر در سال ۱۹۷۷ ارائه شده‌اند.

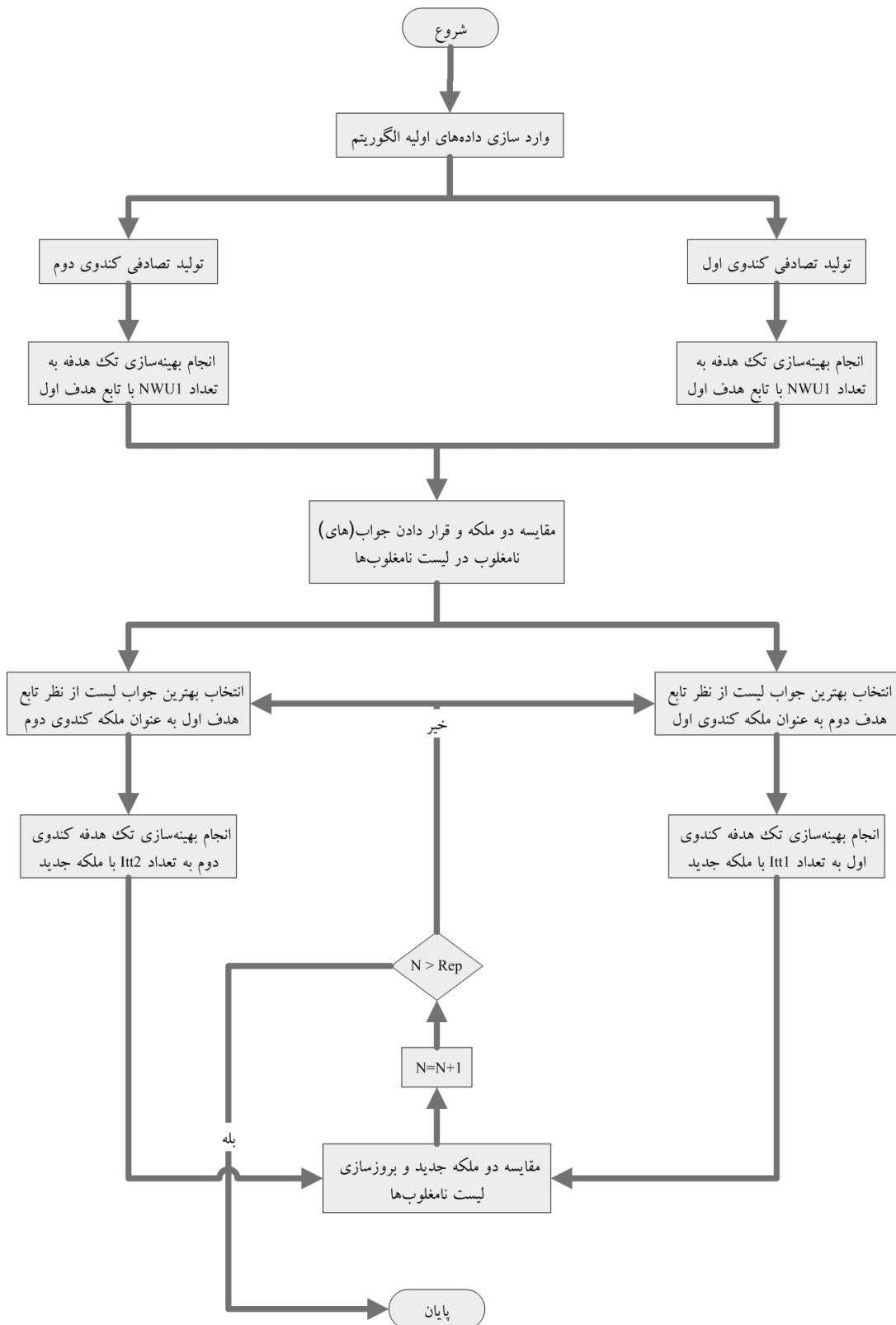
طراحی دو هدفه شبکه دو حلقه‌ای با متغیرهای تصمیم‌گیر لوله‌ها و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه MOHBM0 انجام شد که در آن کندوی اول با تابع هدف کمینه کردن هزینه و کندوی دوم با تابع هدف بیشینه کردن FRI تکامل می‌یابند. برای طراحی این شبکه از الگوریتم MOHBM0، ۱۰ اجرای جداگانه گرفته شد. سپس با ترکیب این ۱۰ پارتو و حذف جوابهای مغلوب، پارامتری نهایی به‌دست آمد که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. لازم به‌ذکر است که تمامی نقاط موجود در این پارتو، قیودات مربوط به هر دو تابع هدف را به‌طور کامل ارضا کرده‌اند.

نقاط موجود در دو سر پارامتری شکل ۴ (نقاط A و B)، از طراحی تک‌هدفه شبکه دو حلقه‌ای با هر یک از توابع هدف و با استفاده از الگوریتم HBMO به‌دست می‌آیند. از طرف دیگر همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم MOHBM0 نیز توانسته است به‌خوبی ناحیه بین این دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد. تقابل بین هزینه و اطمینان‌پذیری در این شکل با وضوح بیشتری قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش هزینه، مقدار شاخص اطمینان‌پذیری FRI افزایش می‌یابد.

اما هدف از طراحی چند هدفه یک شبکه آبرسانی، دسترسی به طراحی‌ای است که از نظر هر دو تابع هدف، وضعیت نسبتاً بهینه‌ای داشته باشد. بنابراین باید بتوان با روشی یکی از نقاط موجود در پارامتری را انتخاب نمود و آن‌را به‌عنوان نتیجه نهایی طراحی دو هدفه این شبکه معرفی کرد. برای این منظور مدل‌های حل اختلاف مختلفی وجود دارد که در این تحقیق از مدل حل اختلاف یونگ<sup>۲</sup> در سال ۱۹۹۳ استفاده شد. در این روش به هر یک از توابع هدف، تابع مطلوبیتی برآزش داده می‌شود و با استفاده از بهینه‌سازی

<sup>2</sup> Young

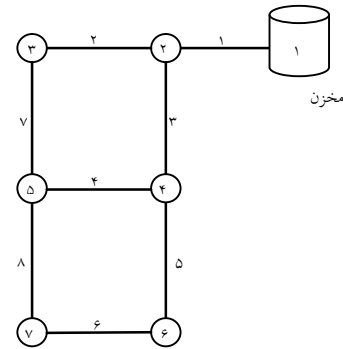
<sup>1</sup> Two-Loop



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی دو هدفه جفت‌گیری زنبور عسل MOHBMO



اطمینان‌پذیری حدود ۴۰ برابر آن دست یابد. همچنین با انجام مقایسه مشابه با نقطه B می‌توان گفت که طراحی C با صرف هزینه‌ای در حدود ۳۳٪ هزینه شبکه B می‌تواند حدود ۸۰ درصد از اطمینان‌پذیری این شبکه را تأمین کند.



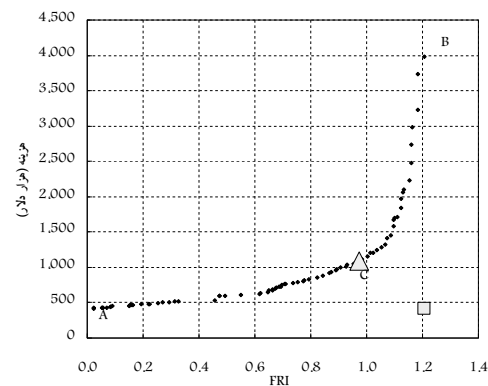
شکل ۳- شماتیک شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای [۲]

جدول ۱- مقادیر قطر لوله‌ها برای نقاط A, C و B

شماره لوله	قطر (اینچ)	قطر (اینچ)	قطر (اینچ)
۱	۱۸	۱۸	۱۸
۲	۱۰	۲۰	۲۴
۳	۱۶	۲۰	۲۴
۴	۴	۱۴	۲۴
۵	۱۶	۱۸	۲۴
۶	۱۰	۱۸	۲۴
۷	۱۰	۲۰	۲۴
۸	۱	۱۸	۲۴
هزینه (دلار)	۴۱۹۰۰۰	۱۰۹۰۰۰۰	۳۹۸۰۰۰۰

جدول ۲- مقادیر فشار گره‌ها و شاخص FRI برای نقاط A, C و B

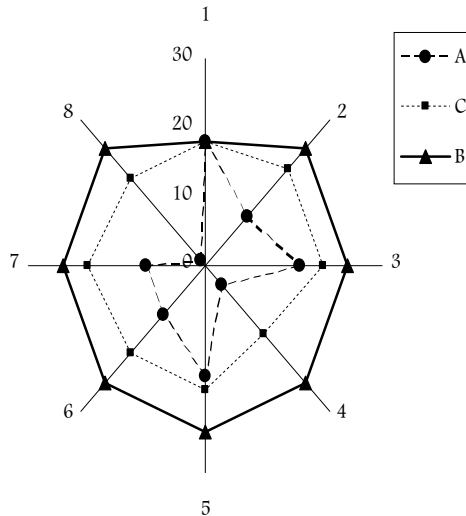
نقطه	A	C	B
شماره گره	۲	۳	۴
فشار (متر)	۵۳/۲۵	۴۲/۴۱	۴۲/۹۳
FRI	۰/۳۴	۰/۷۶	۰/۷۹
شماره گره	۵	۶	۷
فشار (متر)	۳۳/۸۱	۳۶/۵۵	۳۷/۶۴
FRI	۰/۱۰	۰/۳۱	۰/۳۶
شماره گره	۸	۷	۶
فشار (متر)	۰/۵۵	۴۱/۵۵	۴۲/۶۴
FRI	۰/۰۲	۰/۶۳	۰/۶۹
تابع هدف FRI	۰/۰۲۳۴	۰/۹۷۴۹	۱/۲۰۵۵



شکل ۴- منحنی به‌دست آمده در حل مسئله دو حلقه‌ای و نقطه انتخاب شده

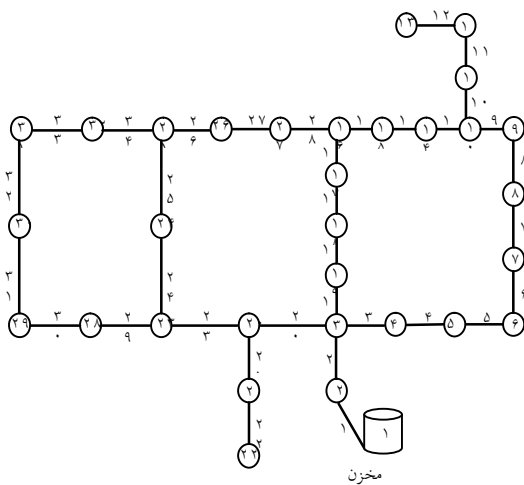
اما واضح است که مطلوب‌ترین نقطه ممکن در بین نقاط موجود بر روی پارتو، نقطه‌ای است که از نظر هر دو تابع هدف به‌مقادیر بهینه تک هدفه آنها رسیده باشد. به این معنا که مطلوب‌ترین طراحی ممکن برای شبکه دو حلقه‌ای، شبکه‌ای است با هزینه ساخت ۴۱۹,۰۰۰ دلار و مقدار تابع هدف FRI معادل ۰/۲۰۵۵. البته واضح است که این یک شبکه فرضی است اما نمایش آن با نماد مربع در شکل ۴، به ارزیابی عملکرد الگوریتم MOHBMO در یافتن یک پارتوی مناسب کمک می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارتوی به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم MOHBMO دارای تحذب مناسبی به سمت مربع نمایش داده شده در شکل است. به این معنا که برخی از نقاط موجود در روی منحنی توانسته‌اند تا حد نسبتاً مطلوبی خود را به این نقطه بهینه فرضی نزدیک کنند و مشاهده می‌شود که نقطه انتخاب شده توسط مدل یونگ در سال ۱۹۹۳ نیز در همین محدوده قرار دارد.

یک رابطه ریاضی بر مبنای شیب نقاط مختلف پارتو، نقطه مطلوب انتخاب می‌گردد [۳۰]. یونگ در سال ۱۹۹۳ مدل چانه زنی را برای دو گروه از بازیکنان  $I_1$  و  $I_2$  ارائه نمود. در این مدل در هر دوره زمانی  $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ ، به صورت تصادفی دو بازیکن  $p \in I_1$  و  $q \in I_2$  بازی دو نفره‌ای را انجام می‌دهند. البته لزوماً این بازی دوره زمانی مشخصی ندارد. همچنین فرض می‌شود که دیگر بازیکنان از تابع مطلوبیت یکدیگر اطلاعی نداشته و با توجه به اطلاعات موجود به بازی می‌پردازند [۳۰]. با استفاده از این روش، نقطه C که با علامت مثلث در شکل ۴ مشخص شده است انتخاب می‌گردد. اگر طراحی به‌دست آمده با تابع هدف کمینه کردن هزینه (نقطه پایینی پارتو) را A، طراحی به‌دست آمده با تابع هدف بیشینه کردن FRI (نقطه بالایی پارتو) را B و نقطه انتخاب شده با مدل یونگ در سال ۱۹۹۳ را C بنامیم، مقادیر قطر لوله‌ها، فشار گره‌ها و همچنین شاخص FRI آنها به‌صورت جدولهای ۱ و ۲ است. همچنین مقادیر مربوط به هزینه و شاخص FRI برای این سه شبکه نیز در همین جدولها آورده شده است. با مقایسه مقادیر مذکور، می‌توان گفت که شبکه C با هزینه‌ای در حدود ۲/۵ برابر شبکه A می‌تواند به



شکل ۶- قطر لوله‌های شبکه دو حلقه‌ای در سه طراحی A, B و C (اینچ)

مخزن تأمین کننده آن در ارتفاع ۱۰۰ متری قرار داشته و برای تأمین فشار از هیچ پمپی استفاده نمی‌شود. همچنین میزان کمینه و بیشینه فشار مجاز در هر گره به ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ متر آب بوده  $(P_j^* = 30$  و  $P_j^{**} = 60)$  و مقدار  $h_j^{High}$  و  $h_j^{Low}$  نیز برابر ۱۰۰۰- و ۵۰۰ متر آب فرض شده‌اند. به علاوه ضریب هیزن- ویلیامز برای محاسبه افت تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ و ضریب  $\omega$  نیز برابر  $10/5088$  در نظر گرفته شده‌اند.

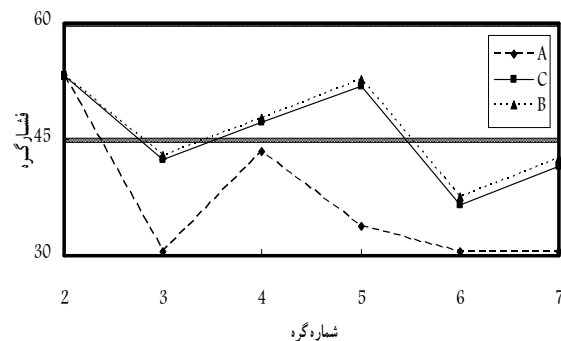


شکل ۷- شماتیک شبکه آبرسانی هانوی [۶]

به منظور بهینه‌سازی دو هدفه شبکه هانوی<sup>۱</sup> از الگوریتم چند هدفه MOHBM0 استفاده شد که در آن کندوی اول به سمت کمینه

<sup>۱</sup> Hanoi

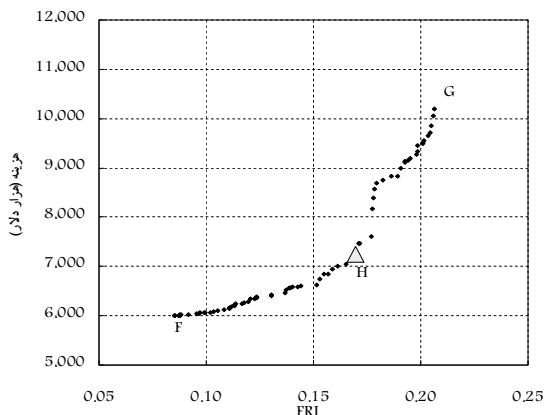
شکل ۵ وضعیت فشار در گره‌های شبکه دو حلقه‌ای برای هر سه طراحی A, B و C را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در شبکه A که از طراحی تک هدفه شبکه با تابع هدف کمینه کردن هزینه به دست آمده است، مقدار فشار گره‌ها تا حد امکان به حداقل فشار مجاز (۳۰ متر) نزدیک شده‌اند. اما فشار گره‌ها در طراحی‌های C و همچنین B تا حد امکان به مقدار میانگین فشار حداقل و حداکثر مجاز (۴۵ متر) نزدیک شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که تابع هدف دوم (بیشینه کردن FRI) نقش خود را به خوبی ایفا کرده و توانسته است با توجه به نحوه تعریف تابع درجه عضویت فازی مورد نظر، فشار گره‌ها را به مقدار بهینه در نظر گرفته شده، نزدیک کند.



شکل ۵- فشار گره‌های شبکه دو حلقه‌ای در سه طراحی A, B و C (متر)

در شکل ۶ نیز وضعیت قطر لوله‌های هر سه طراحی در یک نمودار حلقه‌ای آورده شده است. در این نمودار ۸ میله مدرج وجود دارد که هر یک معرف یکی از ۸ لوله شبکه است. با تعیین قطر لوله‌های شبکه بر روی این میله‌ها و وصل کردن نقاط به یکدیگر، یک شکل هندسی به دست می‌آید. هر چه این شکل هندسی به دایره نزدیک تر باشد، نشان از یکنواخت تر بودن قطر لوله‌ها در شبکه داشته و به این ترتیب بر طبق تعریف پراساد و پارک در سال ۲۰۰۴ شبکه دارای حلقه‌های مطمئن تری خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود شبکه B که از طراحی شبکه با تابع هدف بیشینه کردن FRI به دست آمده است دارای لوله‌های یکنواختی است. به طوری که شکل هندسی مربوط به قطرهای این طراحی به دایره بسیار نزدیک است. بنابراین به نظر می‌رسد که تابع هدف تعریف شده با استفاده از شاخص FRI چه از نظر رساندن فشار گره‌ها به مقدار بهینه مورد نظر و چه از نظر یکنواخت کردن قطر لوله‌ها و ایجاد حلقه‌های مطمئن، توانسته است نقش خود را به خوبی ایفا کند. مثال دوم مربوط است به شبکه آبرسانی شهر هانوی در کشور ویتنام که در شکل ۷ شمای کلی آن مشاهده می‌شود [۶]. این شبکه متشکل است از ۳۲ گره ( $N_j=32$ ), ۳۴ لوله ( $N_i=34$ ) و سه حلقه.

قادر است اطمینان‌پذیری در شبکه هانوی را تقریباً ۱۳ برابر کند. در مقایسه با نقطه G نیز، نقطه انتخاب شده با صرف ۰/۷ هزینه این نقطه می‌تواند در حدود ۸۰ درصد اطمینان‌پذیری آن را تأمین کند. به علاوه مقادیر قطر لوله‌های شبکه انتخاب شده در جدول ۳ و فشار گرده‌ها، درجه عضویت تابع فازی MemF و شاخص FRI نیز در جدول ۴ مشاهده می‌شوند.



شکل ۸- پارتوی به‌دست آمده از الگوریتم MOHBMO در حل مسئله هانوی

کردن هزینه و کندوی دوم به سمت بیشینه کردن FRI تکامل می‌یابند. در این قسمت نیز از الگوریتم MOHBMO، ۱۰ اجرای جداگانه گرفته شد. سپس با ترکیب این ۱۰ پارتو و حذف جوابهای مغلوب، پارتوی نهایی به‌دست آمد که در شکل ۸ مشاهده می‌شود. لازم به‌ذکر است که تمامی نقاط موجود در این پارتو، قیودات مربوط به هر دو تابع هدف را به‌طور کامل ارضا کرده‌اند.

نقاط مرزی موجود در پارتوی شکل ۸ همان طراحی‌های به‌دست آمده از کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی FRI هستند. هزینه طراحی F معادل ۶,۰۰۰,۴۴۴ دلار و مقدار FRI آن برابر ۰/۰۸ بوده و در مورد نقطه G نیز مقادیر مذکور به ترتیب برابر ۱۰,۱۹۱,۵۲۷ دلار و ۰/۲۱ می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود الگوریتم MOHBMO توانسته است به‌خوبی ناحیه بین دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی این الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد. در این قسمت نیز با استفاده از روش یونگ در سال ۱۹۹۳، یکی از نقاط موجود در پارتوی بالا انتخاب گردید که این نقطه با علامت مثلث در شکل ۸ مشخص شده است (نقطه H). مقادیر هزینه طراحی و شاخص FRI برای این نقطه به ترتیب برابر ۷,۲۴۴,۴۷۹ دلار و ۰/۱۷ می‌باشند. نقطه H، با هزینه‌ای در حدود ۱/۲ هزینه نقطه F،

جدول ۳- قطر لوله‌های نقطه انتخاب شده از پارتوی طراحی شبکه هانوی (نقطه H)

شماره لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
قطر (اینچ)	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۳۰	۴۰	۴۰	۲۴	۱۶	۱۲	۱۲	۲۴	۲۴
شماره لوله	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴
قطر (اینچ)	۲۴	۳۰	۴۰	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۴۰	۲۰	۲۰	۲۴	۲۰	۲۰	۱۲	۱۶	۱۶	۴۰

جدول ۴- فشار گرده‌ها و مقادیر شاخص FRI برای نقطه انتخاب شده از پارتوی شبکه هانوی (نقطه H)

شماره گرده	فشار (متر)	Memfun	FRI	شماره گرده	فشار (متر)	Memfun	FRI
۲	۹۷/۲۱	۰/۰۹۲	۰/۰۸۷	۱۸	۵۲/۲۳	۰/۵۲۲۷	۰/۴۸۷۴
۳	۶۲/۵۵	۰/۰۹۹	۰/۰۸۹	۱۹	۶۱/۰۱	۰/۱۰۰	۰/۰۹۰
۴	۵۸/۵۶	۰/۱۰۵۱	۰/۱۰۴۵	۲۰	۵۲/۱۹	۰/۵۲۵۲	۰/۴۰۹۷
۵	۵۳/۶۳	۰/۴۳۰۵	۰/۴۱۴۹	۲۱	۴۳/۰۶	۰/۸۷۱۸	۰/۸۳۱۱
۶	۴۸/۵۱	۰/۷۶۸۱	۰/۷۲۹۴	۲۲	۴۲/۶۴	۰/۸۴۴۱	۰/۸۲۳۶
۷	۴۷/۳۵	۰/۸۴۴۹	۰/۷۸۷۷	۲۳	۴۶/۶۲	۰/۸۹۲۸	۰/۷۰۵۰
۸	۴۶/۰۴	۰/۹۳۱۲	۰/۹۰۵۵	۲۴	۴۵/۴۷	۰/۹۶۹۰	۰/۹۲۹۲
۹	۴۵/۰۴	۰/۹۹۷۶	۰/۸۴۹۹	۲۵	۴۴/۷۷	۰/۹۸۴۵	۰/۸۱۳۴
۱۰	۴۲/۱۶	۰/۸۱۲۶	۰/۵۶۷۰	۲۶	۴۲/۱۶	۰/۸۱۲۷	۰/۷۷۶۰
۱۱	۴۱/۷۸	۰/۷۸۷۸	۰/۷۶۸۰	۲۷	۴۲/۱۵	۰/۸۱۲۱	۰/۷۳۰۶
۱۲	۴۱/۵۱	۰/۷۶۹۴	۵۹۸۲	۲۸	۴۴/۱۸	۰/۹۴۶۱	۰/۹۳۲۳
۱۳	۳۷/۳۹	۰/۴۹۸۰	۰/۴۷۴۵	۲۹	۴۲/۹۹	۰/۸۶۷۲	۰/۶۸۱۳
۱۴	۳۹/۵۰	۰/۶۳۷۱	۰/۵۴۰۳	۳۰	۴۲/۸۰	۰/۸۵۴۸	۰/۷۳۴۴
۱۵	۳۹/۵۷	۰/۶۴۱۶	۰/۶۳۲۶	۳۱	۴۲/۹۷	۰/۸۶۵۹	۰/۸۶۱۳
۱۶	۴۲/۲۶	۰/۸۱۸۹	۰/۶۷۱۸	۳۲	۴۴/۶۱	۰/۹۷۴۵	۰/۶۵۴۶
۱۷	۴۵/۴۱	۰/۹۷۳۰	۰/۹۳۰۸	-	-	-	-

## ۶- نتیجه‌گیری

نتایج کار نشان دهنده عملکرد رضایت‌بخش شاخص FRI (با توجه به اهداف در نظر گرفته شده برای آن که قرار گرفتن فشارگرها بین فشار کمینه و بیشینه مجاز و ایجاد حلقه‌های مطمئن بوده است) و همچنین الگوریتم چندهدفه توسعه داده شده بود که قادراند مجموعه‌ای از طراحی‌های بهینه را در قالب مجموعه جوابی غیرپست به تصمیم‌گیرندگان ارائه دهند. در هر دو مثال نمونه طراحی شده با استفاده از مدل بهینه‌سازی توسعه داده شد در این تحقیق، می‌توان با انتخاب یکی از نقاط موجود بر روی مجموعه جوابی غیرپست به دست آمده، به طراحی‌های با اطمینان‌پذیری بالا و در عین حال مقرون به صرفه از نظر اقتصادی دست یافت. به عنوان مثال در شبکه اول با صرف ۳۰ درصد و در شبکه دوم با صرف ۷۰ درصد هزینه مطمئن‌ترین طراحی به دست آمده، می‌توان ۸۰ درصد اطمینان‌پذیری این طراحی‌ها را به دست آورد. به علاوه از جمله محدودیت‌های شاخص FRI می‌توان بیشتر شدن مقدار آن از عدد یک و همچنین انتخاب نقطه بهینه برای فشارگرها در محدوده بین فشار کمینه و بیشینه مجاز را نام برد که موضوعات پیشنهادی برای تحقیقات بعدی خواهند بود.

## ۷- قدردانی

به این وسیله از حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

واردسازی اطمینان‌پذیری در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری یکی از وظایف دشوار محققان در این زمینه است. روشهای متعددی برای این منظور در تحقیقات مختلف به کار گرفته شده است و یکی از آنها استفاده از شاخصهای اطمینان‌پذیری قطعی به عنوان تابع هدف در طراحی است. شاخصهای ارائه شده قبلی در این زمینه دارای نقاط قوت و ضعفی بوده‌اند. یکی از کمبودهایی که در این شاخصها مشاهده می‌شود عدم وارد کردن بیشینه فشار مجاز در محاسبات مربوط به شاخص مورد نظر بوده است. لذا در این تحقیق با بهره‌گیری از تجربیات محققان پیشین و با تلاش در زمینه جبران کمبودهای موجود، یک شاخص اطمینان‌پذیری قطعی بر پایه منطق فازی به نام شاخص FRI معرفی شده است. سپس با توسعه الگوریتم چند هدفه MOHBMO از روی نسخه تک‌هدفه آن و با به‌کارگیری توابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن FRI، طراحی دو هدفه دو شبکه آبرسانی نمونه انجام گرفت. بررسی طراحی‌های به دست آمده از مدل بهینه‌سازی MOHBMO، نشان می‌دهد که شاخص FRI در نزدیک کردن فشارگرهای شبکه به مقدار مطلوب (که در این تحقیق میانگین کمینه و بیشینه فشار مجاز فرض شده است) و همچنین در ایجاد حلقه‌های مطمئن در شبکه توانسته است انتظارات طراحی را برآورده سازد. در پایان،

## ۷- مراجع

- 1- Fallah Mehdipour, E. (2008). "Application of multi purpose evolutionary optimization methods in multi reservoir systems operation." M.Sc. Thesis, Tehran, University Tehran. (In Persian)
- 2- Alperovits, E., and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution systems." *Water Resources Research*, 13(6), 885-900.
- 3- Quindry, G. E., Brill, E. D., and Liebman, J. C. (1981). "Optimization of looped water distribution systems." *J. Environmental Engineering*, 107(4), 665-679.
- 4- Goulter, I. C., Lussier, B. M., and Morgan, D. R. (1986). "Implications of head loss path choice in the optimization of water distribution networks." *Water Resources Research*, 22(5), 819-822.
- 5- Kessler, A., and Shamir, U. (1989). "Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks." *Water Resources Research*, 25(7), 1469-1480.
- 6- Fujiwara, O., and Kang, D. B. (1990). "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *Water Resources Research*, 26(4), 539-549.
- 7- Savic, D. A., and Walters, G. A. (1997). "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management*, 123(2), 67-77.
- 8- Cunha, M. C., and Sousa, J. (1999). "Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach." *J. Water Resources Planning and Management*, 125(4), 215-221.
- 9- Lippai, I., Heaney, J. P., and Laguna, M. (1999). "Robust water system design with commercial intelligent search optimizers." *J. Computations in Civil Engineering*, 13(3), 135-143.
- 10- Eusuff, M. M., and Lansey, K. E. (2003). "Optimization of water distribution network design using the shuffled frog leaping algorithm." *J. Water Resources Planning and Management*, 129(3), 210-225.

- 11- Geem, Z. W. (2005). "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search." *J. Engineering Optimization*, 38(3), 259-280.
- 12- Suribabu, C. R., and Neelakantan, T. R. (2006). "Design of water distribution networks using particle swarm optimization." *J. Urban Water*, 3(2), 111-120.
- 13- Afshar, M. H., and Mariño, M. A. (2008). "Application of an ant algorithm for layout optimization of tree networks." *Engineering Optimization*, 389(3), 353-369.
- 14- Mays, L. W. (1996). "Review of reliability analysis of water distribution systems." Tikle, G., Xu, W., and Bouchart (Eds.), *Stochastic hydraulics '96 (pp. 53±62)*, Rotterdam: Balkema.
- 15- Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic Approach." *Urban Water*, 2(3), 115-122.
- 16- Goulter, I. C., and Bouchart, F. (1990). "Reliability constrained pipe networks model." *J. Hydraulic Engineering*, 16(2), 221-229.
- 17- Walski, T. M., et al. (1987). "Battle of the network models: Epilogue." *J. Water Resources Planning and Management*, 113(2), 191-203.
- 18- Tabesh, M., Tanimboh, T. T., and Burrows, R. (2004). "Pressure dependent stochastic reliability analysis of water distribution networks." *J. Water Science Technology: Water Supply*, 4(3), 81-90.
- 19- Rowell, W. F., and Barnes, J. W. (1982). "Obtaining the layout of water distribution systems." *J. Hydraulics Division*, 108(1), 137-148.
- 20- Morgan, D. R., and Goulter, I. C. (1985). "Optimal urban water distribution design." *Water Resources Research*, 21(5), 642-652.
- 21- Kettler, A., and Goulter, I. (1983). "Reliability consideration in the least cost design of looped water distribution networks." *Proceeding of 10<sup>th</sup> International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulic and Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, Ky., 305-312.
- 22- Goulter, I., and Coals, A. (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." *J. Transportation Engineering*, 112(3), 287-301.
- 23- Ostfeld, A., and Shamir, U. (1996). "Design of optimal reliable multiquality water- supply systems." *J. Water Resources Planning and Management*, 122(5), 322-333.
- 24- Xu, C., and Goulter, I. (1999). "Reliability-based optimal design of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management*, 125(6), 352-362.
- 25- Tabesh, M., Soltani, J., Farmani, R., and Savic, D. (2009). "Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data-driven modeling." *J. Hydroinformatics*, 11(1), 1-17.
- 26- Walski, T. M. (2001). "The wrong paradigm-why water distribution optimization doesn't work." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 127(4), 203-205.
- 27- Prasad, T. D., and Park, N. S. (2004). "Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management*, 130(1), 73-82.
- 28- Rossman, L. A. (1993). *EPANET, users manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- 29- Bozorg Haddad, O., Afshar, A., and Mariño, M. A. (2006). "Honey-bees mating optimization (HBMO) algorithm: A new heuristic approach for water resources optimization." *J. Water Resources Management*, 20(5), 661-680.
- 30- Young, H. P. (1993). "An evolutionary model of bargaining." *J. Economic Theory*, 59, 145-168.