



## Multi Objective Dynamic Design of Water Distribution Networks

N. Ghajarnia<sup>1\*</sup>, O. Bozorg Haddad<sup>2</sup>  
and S. Kouchakzadeh<sup>3</sup>

### Abstract

In water distribution networks the initial and rehabilitation design are usually performed separately. However, it seems that the influence of the initial design upon the future condition of the network performance during operational years and rehabilitation activities are undeniable. Therefore, by combining the initial and rehabilitation designs, a new method is presented in this paper. This method called Dynamic Design of water distribution networks is capable of introducing cheaper and more reliable long term designs in comparison with normal initial design and rehabilitation design of networks. To assess this method, a fuzzy reliability index is introduced. Then by developing the multi objective version of the honey-bee mating optimization algorithm and applying it on two sample networks, final results of the multi objective dynamic design method is presented. Finally, this paper showed the positive performance and influence of dynamic design method on decreasing the design costs and increasing system reliability.

**Keywords:** Dynamic Design, Multi Objective optimization, Fuzzy Reliability Index, MOHBMO algorithm, Water Distribution Network.

Received: February 20, 2010  
Accepted: January 18, 2012

## طراحی پویای چند معیاره شبکه‌های توزیع آب شهری

نوید قاجارنیا<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ حداد<sup>۲</sup>  
و صلاح کوچک زاده<sup>۳</sup>

### چکیده

طراحی اولیه شبکه‌های توزیع آب شهری برای دوره طرح مورد نظر و همچنین طراحی فاز ترمیم و نگهداری آن‌ها عموماً به طور کاملاً جداگانه انجام می‌شوند. در حالیکه به نظر می‌رسد تاثیر طراحی اولیه بر شرایط موجود در دوران بهره‌برداری و تصمیمات اتخاذ شده در فاز ترمیم و نگهداری کاملاً غیر قابل انکار است. در این تحقیق با تلفیق دو فاز طراحی اولیه و فاز ترمیم و نگهداری شبکه‌ها، روش جدیدی برای طراحی و ترمیم توام شبکه‌های آبرسانی ارائه شده است. این روش که طراحی پویای شبکه‌های توزیع آب شهری نامیده شده است، قادر به ارائه گزینه‌های کم هزینه‌تر و در عین حال مطمئن‌تر در مقایسه با طراحی و ترمیم جداگانه شبکه‌هاست. برای این منظور ابتدا یک شاخص اطمینان‌پذیری جدید بر مبنای منطق فازی ارائه می‌شود. سپس با توسعه الگوریتم چند هدفه جفت گیری زنبور عسل و به کارگیری آن در طراحی پویای چند معیاره دو شبکه به کار رفته در تحقیقات دیگران، نتایج نهایی به دست می‌آید. این نتایج نشان‌دهنده تاثیر مثبت طراحی پویا بر کاهش هزینه‌ها و همچنین افزایش اطمینان‌پذیری سیستم می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** طراحی پویا، بهینه‌سازی چند هدفه، شاخص اطمینان‌پذیری FRI، الگوریتم MOHBMO، شبکه آبرسانی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱ اسفند ۱۳۸۸  
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۸ دی ۱۳۹۰

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: ghajarnia@ut.ac.ir.

2- Assistant Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: obhaddad@ut.ac.ir.

3- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran, E-mail: skzadeh@ut.ac.ir.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران - تهران - ایران.

۲- استادیار بخش مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران - تهران - ایران.

۳- استاد بخش سازه‌های آبی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران - تهران - ایران.

\*- نویسنده مسئول

برخی محققان برای فائق آمدن بر نقاط ضعف روش‌های LP و NLP، استفاده از روش‌های محاسباتی جدیدی همچون الگوریتم‌های تکاملی و فراکاوشی را پیشنهاد کردند. امکان مدل‌سازی فضاهای تصمیم گسسته، توانایی رویارویی با مدل‌های ریاضی غیر خطی، نمونه‌گیری تصادفی و توانایی فرار از نقاط بهینه موضعی از جمله مهم‌ترین برتری‌های روش‌های مذکور نسبت به روش‌های سنتی بود. به این ترتیب و با تکیه بر نقاط قوت الگوریتم‌های تکاملی و فراکاوشی محققان توانستند در حل مسائل مشابه، پاسخ‌های به مراتب بهتری را در مقایسه با روش‌های LP و NLP بدست آورند. از آن جمله می‌توان به تحقیقات صورت گرفته با استفاده از الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> (GA) (Savic and Walters, 1997)، نورد شبیه‌سازی شده<sup>۴</sup> (SA) (Cunha and Sousa, 1999)، جستجوی ممنوعه<sup>۵</sup> (TS) (Lippai et al., 1999)، الگوریتم ترکیبی جهش قورباغه<sup>۶</sup> (SFLA) (Eusuff and Lansey, 2003)، الگوریتم جستجوی هماهنگ<sup>۷</sup> (HS) (Geem, 2005)، الگوریتم بهینه‌سازی رفتار جمعی<sup>۸</sup> (PSO) (Suribabu et al., 2006) و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان<sup>۹</sup> (ACO) (Afshar and Marino 2008) اشاره کرد. در حقیقت آن محققان می‌کوشیدند تا با اتخاذ بهترین روش طراحی، قطری برای لوله‌های شبکه بیابند که علی‌رغم رعایت قیودات هیدرولیکی مربوط به فشار، کمترین هزینه ساخت را نیز به تصمیم‌گیرندگان تحمیل کند. اما کاهش هزینه‌ها، تنها چالش روبروی طراحان شبکه‌ها نبوده است.

Walski (2001) یادآور شد که نگاه یک بعدی در جهت کاستن هزینه‌های شبکه می‌تواند منجر به از یاد بردن فاکتورهای کارایی مثل اطمینان‌پذیری تامین نیاز و یا فشار در گره‌ها شود. با این حال وارد کردن اطمینان‌پذیری در محاسبات مربوط به طراحی شبکه‌های توزیع آب کار آسانی نیست تا آنجا که از نظر Goulter and Bouchart (1990)، وارد کردن اطمینان‌پذیری به طور صریح در طراحی شبکه‌های توزیع آب، یکی از دشوارترین وظایفی است که تا به حال پژوهشگران شبکه‌ها با آن روبرو شده‌اند. به همین دلیل متأسفانه در مورد اطمینان‌پذیری و ریسک‌های موجود در طراحی شبکه‌های توزیع آب هنوز هیچ تعریف جامع و کاملی که مورد قبول همگان باشد ارائه نشده است (Mays, 1996; Todini, 2000). Walski (1987) معتقد است که شاخص اطمینان‌پذیری در شبکه‌ها باید به نوعی منعکس‌کننده اوضاع مصرف کننده در هنگام بروز شرایط نامطلوب باشد. (Tabesh et al. (2004) 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. این محققین با استفاده از

پیشینه مطالعات انجام شده بر روی شبکه‌های توزیع آب دارای قدمتی طولانی و گستردگی بسیاری است. پس از روش‌های سنتی مبتنی بر سعی و خطا در طراحی شبکه‌های توزیع آب، الگوهای نوین بهینه‌سازی به سرعت وارد زمینه‌های تحقیقاتی شده و با سرعت کمتری نیز راه خود را به سوی طراحی‌های واقعی بازگشودند. (Alperovits and Shamir (1977) می‌توان بنیانگذار نسل جدید روش‌های طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری دانست که از روش برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> (LP) به منظور طراحی استفاده کردند. آن‌ها ابتدا معادلات موجود را خطی‌سازی کرده و سپس با روش LP به حل مدل بهینه‌سازی مسئله اقدام کردند. متغیرهای تصمیم 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 بود. پس از آن، محققانی همچون (Quindry et al. (1981)، (Goulter et al. (1986) و (Kessler and Shamir (1989) نیز از روش LP برای طراحی شبکه‌های توزیع آب استفاده کردند و به تعمیم و تکمیل آن روش پرداختند. در ادامه (Fujiwara and Kang (1990) نیز طراحی این شبکه‌ها را با بکارگیری روش برنامه‌ریزی غیر خطی<sup>۲</sup> (NLP) انجام دادند.

با وجود پیشرفت‌های حاصل شده توسط روش‌های پیشنهادی محققان مذکور، این روش‌ها در کنار فواید زیاد، نقطه‌ضعف‌هایی نیز داشتند. مهم‌ترین مسئله در طراحی شبکه‌ها با استفاده از این روش‌ها را می‌توان عدم تطابق فضای تصمیم گسسته مسائل طراحی شبکه‌های توزیع آب با ذات پیوسته روش‌های LP و NLP دانست. از آنجا که نتایج نهایی بدست آمده از این روش‌ها به صورت پیوسته بوده و قطرهای تجاری موجود در بازار به صورت گسسته‌اند، لذا طراحان ناگزیر خواهند شد که مقادیر پیوسته بهینه بدست آمده را به نزدیک‌ترین معادل‌های گسسته موجود تبدیل کنند. این تبدیل قطر نه تنها بهینه بودن پاسخ اصلاح شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد، بلکه گاهی امکان‌پذیر بودن آن از لحاظ ارضای قیودات هیدرولیکی را نیز زیر سوال می‌برد (Savic and Walters, 1997). بعلاوه این روش‌ها نمی‌توانند بهینه‌گی مطلق پاسخ ارائه شده در پایان کار را تضمین کنند چراکه پاسخ نهایی گزارش شده توسط آن‌ها به شدت به نقطه شروع وابسته بوده لذا به این ترتیب برای رسیدن به بهینه مطلق، حل مسئله با استفاده از نقطه شروع‌های مختلف مورد نیاز است (Savic and Walters, 1997). از اینرو محققان بعدی به منظور جبران کاستی‌های موجود، به ارائه روش‌های جدیدتر پرداختند.

نوسازی تبیین نمود و همچنین برای چند مطالعه موردی خاص نیز پیشنهاداتی در مورد گزینه‌های ممکن برای تعمیر و نگهداری ارائه داد.

برخی از محققان برای اتخاذ تصمیمات بهینه، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بهره‌گیری کردند. (Woodburn et al. (1987) برای کمینه‌کردن هزینه تعمیر و توسعه شبکه، از ترکیب برنامه‌ریزی غیر خطی و یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی استفاده کردند. سپس Murphy and Simpson (1992) از الگوریتم ژنتیک تصادفی<sup>۱۳</sup> (SGA) برای انتخاب تصمیمات بهینه ترمیم و نگهداری شبکه‌ها استفاده کرده و به پاسخ‌های قابل قبولی دست یافتند. Halhal et al. (1997) نیز از الگوریتم ژنتیک چند هدفه برای یافتن مجموعه جواب‌های نامغلوب در بازسازی بهینه شبکه‌ها استفاده نمودند. این تحقیق که هدف آن یافتن بهترین گزینه‌های ممکن در استفاده از منابع مالی محدود به منظور بهبود عملکرد شبکه بود، توانست برای دو شبکه نمونه فرضی و واقعی مجموعه جواب‌های نامغلوبی را ارائه دهد.

در همین راستا Agrawal et al. (2007) بیان کردند که جایگزینی یک شبکه کاملاً جدید به جای شبکه موجود که عمر مفید آن به پایان رسیده است، به ندرت صورت می‌پذیرد. آن‌ها متذکر شدند که عموماً در چنین شرایطی ترمیم، تقویت و توسعه شبکه کهنه موجود معنی‌دارتر از جایگزینی کامل آن با یک شبکه جدید خواهد بود. اخیراً نیز Bozorg Haddad et al. (2008) با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبور عسل<sup>۱۴</sup> (HBMO) به بهینه‌سازی فاز ترمیم و نگهداری یک شبکه آبرسانی نمونه پرداختند و علاوه بر اثبات کارایی روش بکار رفته به منظور ترمیم شبکه، توانایی الگوریتم HBMO را در یافتن پاسخ بهینه چنین مسئله‌ای نشان دادند.

ملاحظه می‌شود که تا به امروز تاثیر طراحی اولیه شبکه بر روی فاز ترمیم و نگهداری، به طور خاص مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته است. با توجه به مدل‌های مفید و متعدد موجود برای پیش‌بینی عوامل کاهش کارایی شبکه‌ها (همچون مدل‌های پیش‌بینی نرخ شکست، افزایش زبری لوله‌ها و نیاز گره‌ها) و همچنین توانایی مدل‌های کامپیوتری امروزی در شبیه‌سازی شبکه‌ها در دوران بلند مدت طرح، به نظر می‌رسد که با نگاهی بلند مدت در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری بتوان گامی در جهت جامع‌نگری و طراحی کارآمدتر شبکه‌ها برداشت. بدین ترتیب طراحان قادرند، طراحی اولیه شبکه را همزمان با مشاهده بازخورد آن در فاز بهره‌برداری و ترمیم و نگهداری انجام دهند و در نتیجه خواهند

یک مدل استوکاستیکی به شبیه‌سازی نیاز واقعی در شبکه و برآورد اطمینان‌پذیری آن پرداختند. به هر حال با بررسی ادبیات واردسازی اطمینان‌پذیری در طراحی شبکه‌های توزیع آب، ملاحظه می‌شود که نظرات و دیدگاه‌های مختلفی در این زمینه ارائه شده است (Rowell and Barnes, 1982; Morgan and Goulter, 1985; Kettler and Goulter, 1983; Goulter and Coals, 1986; Ostfeld and Shamir, 1996; Xu and Goulter, 1999; Tabesh et al., 2004; Tabesh et al., 2009). اما نگرانی دو جانبه در مورد کاهش هزینه‌ها و افزایش اطمینان‌پذیری شبکه، به تدریج محققان را به فکر ارائه، پیشنهاد و به کارگیری روش‌هایی برای دستیابی همزمان به مقدار مطلوب هر دو هدف انداخت.

در سال‌های اخیر همگام با پیشرفت روش‌های کامپیوتری و همچنین گسترش الگوریتم‌های تکاملی و فراکوشی چند هدفه، محققان کوشیدند تا با ارائه شاخص‌های اطمینان‌پذیری قطعی، توابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن اطمینان‌پذیری را به طور همزمان وارد مدل‌های طراحی کنند. (Todini (2000) با بکارگیری مفهوم قابلیت ارتجاع<sup>۱۵</sup> در شبکه‌ها، شاخص قابلیت ارتجاع ( $I_r$ ) را ارائه کرد و با استفاده از دو تابع هدف بیشینه کردن  $I_r$  و کمینه کردن هزینه، به طراحی چند هدفه شبکه توزیع آب پرداخت. در همین راستا Prasad and Park (2004) نیز پس از انجام اصلاحاتی بر روی شاخص ارائه شده توسط Todini (2000) و ارائه شاخص اصلاح شده قابلیت ارتجاع شبکه<sup>۱۶</sup> ( $I_n$ )، با استفاده از الگوریتم چند هدفه ژنتیک<sup>۱۷</sup> (NSGA) به طراحی شبکه‌های توزیع آب پرداخت و نشان داد که شاخص اصلاح شده قادر است اطمینان‌پذیری را در سطح مناسب‌تری تضمین کند. لازم به ذکر است که تمامی تحقیقات مذکور، طراحی اولیه شبکه را مد نظر قرار داده‌اند و این در حالی است که بهره‌برداری از شبکه‌ها و بویژه ترمیم و بازسازی آن‌ها نیز فصلی دیگر از مسائل پیش‌روی محققان و طراحان شبکه‌ها است. تاکنون بسیاری از تحقیقات صورت گرفته در ارتباط با شبکه‌های توزیع آب تنها به ارائه روش‌های مناسب ترمیم و نگهداری شبکه‌ها پرداخته‌اند.

در حقیقت سابقه مطالعات انجام شده در زمینه ترمیم و نگهداری شبکه‌های توزیع آب نیز دارای قدمت زیادی است. (Shamir and Howard (1979) مدلی را بر پایه تاریخچه شکست لوله‌های شبکه و همچنین هزینه تعویض و ترمیم آن‌ها، به منظور اتخاذ تصمیمات مربوط به تعویض لوله‌ها در فاز بازسازی ارائه دادند. (Kettler and Goulter (1985) نیز رابطه‌ای بین نرخ شکست لوله‌های چدنی و سیمانی نسوز و قطر آن‌ها بدست آوردند. اندکی بعد، (Walski (1986) چارچوبی برای اتخاذ تصمیمات بازسازی و

دلیل در رابطه (۱) از تعداد سال‌های دوره طرح یک عدد کاسته شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق مجاز است تا در تمام سال‌های دوره طرح (به جز سال اول) و همچنین برای تمامی جایگاه‌های لوله موجود، یکی از عملیات مربوط به ترمیم و نگهداری شبکه را اتخاذ کند. گزینه‌های مجاز برای این کار، تعویض لوله قرار گرفته در سال اول (با قطرهای مجاز گوناگون)، اضافه کردن یک لوله به طور موازی با لوله قرار گرفته در سال اول (با قطرهای مجاز گوناگون) و یا انجام ندادن هیچ کدام از این عملیات<sup>۱۹</sup> (DoN) می‌باشند. بنابراین و با توجه به تابع هدف و قید هیدرولیکی در نظر گرفته شده، الگوریتم حل مسئله در مواقعی که فشار گره‌ها در آستانه فشار حداقل مجاز قرار می‌گیرند اقدام به انتخاب گزینه‌های ترمیم و نگهداری شبکه کرده و در غیر اینصورت گزینه DoN را انتخاب می‌کند. به این ترتیب علاوه بر رعایت قید هیدرولیکی موجود در مسئله (بیشتر بودن فشار تمامی گره‌های شبکه از حداقل مقدار مجاز)، می‌توان به سمت رسیدن به کم‌هزینه‌ترین عملیات ترمیم و نگهداری نیز حرکت نمود.

به علاوه در این تحقیق تعدادی از محدودیت‌های اجرایی ممکن، به صورت قید وارد مدل بهینه‌سازی شده‌اند. محدودیت‌های عملیات ترمیم و نگهداری که صرفاً به صورت فرضی در نظر گرفته شده و قابل تغییر می‌باشند به شرح زیر هستند:

۱. انجام هرگونه عملیات ترمیم و نگهداری در ۱۰ سال اول دوره طرح و همچنین در دو سال آخر آن مجاز نمی‌باشد.
۲. تعداد لوله‌های ترمیم شده در هر سال نباید از حدود ۲۰ درصد تعداد کل لوله‌های جایگذاری شده در سال اول بیشتر باشد.
۳. پس از انجام عملیات ترمیم و نگهداری برای هر کدام از لوله‌ها، انجام عملیات مجدد بر روی آن لوله تا حداقل ۱۰ سال ممکن نخواهد بود.
۴. تعداد کل عملیات ترمیم و نگهداری نباید از حد معینی بیشتر باشد.

از طرف دیگر، برای محاسبه هزینه در طول این دوره T ساله، هزینه‌های موجود را می‌توان به سه دسته هزینه‌های خرید لوله‌ها، هزینه حفاری و جایگذاری لوله‌ها و همچنین ارزش اسقاطی آن‌ها تقسیم کرد. در این تحقیق عمر مفید لوله‌ها برابر عمر مفید شبکه (که همان دوره طرح است) در نظر گرفته می‌شود. بنابراین لوله‌های اضافه شده به شبکه در سال‌های بهره‌برداری و همچنین لوله‌هایی

توانست به سطوح بالاتری از اطمینان‌پذیری رسیده و همچنین هزینه‌های کل دوران طرح را نیز کاهش دهند. هدف این تحقیق توسعه روشی برای طراحی همزمان شبکه‌ها در فاز ساخت اولیه و ترمیم و نگهداری است که مختصراً طراحی پویا نامیده شده است. در این تحقیق پس از توسعه الگوریتم چند هدفه جفت‌گیری زنبور عسل<sup>۱۵</sup> (MOHBMO) و همچنین ارائه یک شاخص جدید اطمینان‌پذیری قطعی بر مبنای منطبق فازی<sup>۱۶</sup> (FRI)، طراحی پویای چند هدفه دو شبکه توزیع آب متداول در تحقیقات مد نظر قرار گرفته شده است.

## ۲- طراحی پویای شبکه‌های توزیع آب

اصلی‌ترین هدف این پژوهش ارائه روشی جدید برای طراحی شبکه‌های آبرسانی است که طراحی پویای شبکه نامیده شده است. پیش از بیان مبانی روش طراحی پویا، لازم است مدل ترمیم و نگهداری توسعه داده شده در این تحقیق توضیح داده شود. سپس مبنای روش طراحی پویا، فواید و محدودیت‌های آن و همچنین نحوه مقایسه این روش با روش‌های معمول فعلی از نظر خواهد گذشت.

### ۱-۲- بهینه‌سازی اقدامات لازم در فاز ترمیم و نگهداری شبکه

در این تحقیق با پیش‌بینی افزایش نیاز و کاهش ضریب زبری هیزن- ویلیامز<sup>۱۷</sup> در طول دوره طرح، عواملی که در طول زمان مهندسان را ملزم به ترمیم شبکه می‌کنند شبیه‌سازی می‌شوند. سپس با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی، گزینه‌های مناسب ترمیم و همچنین زمان اقدام به آن عملیات بدست می‌آیند. ترمیم و نگهداری لوله‌های شبکه‌های آبرسانی عموماً به یکی از سه روش تعویض لوله‌ها، اضافه کردن لوله جدید و یا روکش کردن<sup>۱۸</sup> آن‌ها صورت می‌گیرد که در این تحقیق به دلیل ساده سازی مسئله تنها از دو روش اول استفاده شده است.

در مسئله ترمیم و نگهداری طراحی شده در این تحقیق، تعداد لوله‌های شبکه  $N_i$  و تعداد سال‌های دوره طرح (سال جایگذاری شبکه بعلاوه سال‌های بهره‌برداری) برابر  $T$  سال فرض شده‌اند. بنابراین تعداد متغیرهای تصمیم در این مسئله بهینه‌سازی برابر است با:

$$N_{Dec\ var} = N_i \times (T - 1) \quad (1)$$

در این رابطه  $N_{Dec\ var}$  = تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشد. جایگذاری شبکه در زیر زمین در سال اول دوره طرح انجام می‌شود و انجام عملیات ترمیم و نگهداری در این سال بی معناست. به همین

بهره‌گیری نمود. در حالیکه در سال‌های اولیه دوره طرح مقدار نیاز شبکه بسیار پایین بوده و قطره‌های به مراتب کوچکتری نیز قادر به تامین نیازهای شبکه خواهند بود.

هدف اصلی این تحقیق، نزدیک‌تر کردن فازهای طراحی اولیه و ترمیم و نگهداری شبکه و ارائه روشی برای یکپارچه کردن این دو فاز طراحی است. با این اوصاف طراحی پویای شبکه را می‌توان طراحی توأم فازهای احداث اولیه و ترمیم و نگهداری شبکه دانست. به عنوان مثال طراحی پویای شبکه شهر مثال زده شده در فوق به گونه‌ای است که در آن طراحی اولیه شبکه، برای نیاز سال پایانی دوره طرح صورت نخواهد گرفت. بلکه در این روش طراحی، با در نظر گرفتن روابط پیشنهاد شده برای مدلسازی تغییرات نیاز و ضریب زبری هیزن- ویلیامز لوله‌ها، با نگاه بلند مدت به آینده به طراحی شبکه در زمان حال پرداخته می‌شود. به این ترتیب قیودات تامین نیاز و حداقل فشار مجاز شبکه در هر سال، با توجه به نیاز گره‌ها در همان سال (و نه نیاز سال پایانی دوره طرح) ارضاء خواهند شد و با وارد ساختن تغییرات محتمل در شبکه در مدل بهینه‌سازی، ظرفیت شبکه گام به گام و همراه با افزایش نیاز و شرایط هیدرولیکی شبکه، افزایش خواهد یافت. طراحی شبکه با استفاده از روش طراحی پویا در مقایسه با روش‌های قبلی، ممکن است برای لوله‌های قرار گرفته در طراحی اولیه شبکه قطرهای کوچکتری را پیشنهاد کند و با گذشت زمان و همگام با بروز تغییرات در شرایط هیدرولیکی و فیزیکی شبکه، گام به گام به ترمیم و توسعه آن اقدام کند. به همین دلیل نام این روش طراحی پویای شبکه انتخاب شده است.

### ۲-۳- فواید روش طراحی پویا

به طور کلی فواید طراحی پویای شبکه را می‌توان در کاهش هزینه احداث و افزایش کارایی هیدرولیکی آن دانست. همانطور که پیشتر نیز بیان شد در فرآیند مالی موجود برای احداث و ترمیم شبکه‌های توزیع آب، سال صفر معادل سال احداث شبکه (اولین سال) در نظر گرفته شده است. بنابراین هر چه بتوان هزینه‌های صرف شده برای شبکه را از سال صفر دورتر کرد، می‌توان هزینه کل پروژه را کاهش داد. واضح است که هزینه‌های صرف شده در سال‌های پایانی دوره طرح، به دلیل تاثیر نرخ بهره در انتقال آنها به سال صفر، دارای ارزش بسیار کمی خواهند بود. لذا پخش کردن هزینه‌های احداث و ترمیم شبکه در طول دوران بهره‌برداری می‌تواند در صرفه اقتصادی پروژه نقش مثبتی ایفا کند و طراحی پویای شبکه این امر را ممکن می‌سازد. در طراحی پویا، هزینه‌های هنگفت صرف شده برای طراحی شبکه در سال اول (که در طراحی‌های معمولی بر اساس تامین نیاز

که پیش از به پایان رسیدن عمر مفیدشان مورد تعویض قرار گرفته‌اند، در پایان دوره طرح دارای ارزش اسقاطی خواهند بود. ارزش اسقاطی به صورت خطی و به نسبت هزینه خرید اولیه آن در نظر گرفته شده است. اگر تعداد سال‌های کارکرد لوله  $i$  ام نصب شده در سال  $t$  ام در شبکه  $t_{i,t}^{op}$ ، عمر مفید شبکه و یا دوره طرح  $T$ ، هزینه خرید لوله مورد نظر  $Cost_i$  و ارزش اسقاطی آن  $CostE_i$  در نظر گرفته شوند، از طریق رابطه زیر می‌توان ارزش اسقاطی را محاسبه کرد:

$$CostE_i = Cost_i \times \frac{T - t_{i,t}^{op}}{T} \quad (2)$$

پس از محاسبه ارزش اسقاطی، هزینه‌های خرید لوله‌ها و همچنین هزینه‌های مربوط به حفاری‌های انجام شده، با استفاده از نرخ بهره می‌توان همگی را به سال صفر منتقل کرده و در نهایت با انجام عملیات جبری هزینه خالص تمام شده برای عملیات ترمیم و نگهداری را محاسبه نمود.

### ۲-۲- مبانی روش طراحی پویا

طراحی‌های صورت گرفته امروزی را می‌توان به دو قسمت طراحی اولیه شبکه و پس از آن طراحی برای فاز ترمیم و نگهداری تقسیم نمود. شهر تازه تاسیسی را در نظر بگیرید. مهندس طراح شبکه توزیع آب این شهر، با انجام محاسبات مربوط به رشد جمعیت و نیاز سال آخر دوره طرح اقدام به طراحی شبکه می‌نماید. سپس شبکه طراحی شده احداث شده و به حال خود رها می‌شود تا زمانی که نشانه‌هایی از نارسایی در آن دیده شود. در چنین شرایطی مجدداً پروژه‌ای برای ترمیم و نگهداری آن تعریف شده و مهندسان طراحی جدیدی را به منظور ترمیم و توسعه شبکه انجام می‌دهند. با این اوصاف این‌گونه به نظر می‌رسد که فازهای طراحی اولیه و ترمیم و نگهداری شبکه، در نظر مهندسان طراح تا حدودی جدا از یکدیگر هستند.

واضح است که طراحی اولیه شبکه بر عملکرد آن در سال‌های بعدی بسیار موثر است. از این رو برخی از طراحان برای کسب اطمینان از عملکرد مناسب شبکه، طراحی را با لوله‌های قطورتر انجام می‌دهند. به این ترتیب با افزایش ظرفیت شبکه می‌توان شرایط نابسامان پیش‌رو را با اطمینان بیشتری پشت سر گذاشت. اما از طرف دیگر وجود لوله‌های قطور در سال‌های اول دوره طرح که در آن مقدار نیاز گره‌ها کم بوده و در نتیجه سرعت جریان داخل لوله‌ها کم است، می‌تواند به بالا رفتن فشار در شبکه و به فراخور آن افزایش نشت و آسیب دیدن اجزای آن منجر شود. به علاوه با این کار هزینه هنگفتی در زیر زمین مدفون می‌شود تا پس از چند سال بتوان از آن

سال پایانی دوره طرح صورت می‌پذیرد) به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا کرده و افزایش ظرفیت شبکه همگام با افزایش نیاز و همچنین تغییرات فیزیکی شبکه صورت می‌گیرد. همین امر هزینه‌های احداث و ترمیم را در طول دوران بهره‌برداری به طور متناسبی پخش کرده و موجب کاهش هزینه کلی شبکه خواهد شد.

از طرف دیگر شبکه‌های توزیع آب علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین بر دولت‌ها، دارای درآمدهایی نیز هستند. درآمد اصلی این شبکه‌ها از مبالغ آب‌بهای دریافتی است و واضح است که در صورت عدم سرویس‌دهی مناسب به مصرف‌کنندگان، دریافت آب‌بها با نارضایتی همراه خواهد بود. لذا کسب اطمینان از کارایی هیدرولیکی شبکه‌های آبرسانی و یا به عبارتی مطلوب بودن وضعیت شاخص‌های اطمینان‌پذیری برای این سیستم‌ها را نیز می‌توان جزء فواید آن‌ها به حساب آورد. به این ترتیب طراحی پویای شبکه به دلیل کمتر در نظر گرفتن قطر لوله‌ها در سال‌های ابتدایی، از افزایش بیش از حد فشار در شبکه جلوگیری کرده و همچنین به دلیل بهره‌گیری از نگاه بلند مدت در طراحی هیدرولیکی، قادر است طراحی صورت گرفته را در سطح بالاتری از اطمینان‌پذیری انجام دهد.

#### ۲-۴- محدودیت‌های روش طراحی پویا

همانطور که گفته شد طراحی پویای شبکه به نوعی تلفیق فازهای طراحی اولیه و ترمیم و نگهداری است. لذا محدودیت‌های روش طراحی پویا نیز دقیقاً همچون موارد ذکر شده برای ترمیم و نگهداری شبکه است. این محدودیت‌ها به دو دسته موارد اجرایی و هیدرولیکی تقسیم می‌شوند. قیودات هیدرولیکی مواردی است که برای جلوگیری از کاهش شدید فشار گره‌ها و کمتر شدن آن از مقدار حداقل مجاز تعریف می‌شوند و قیودات اجرایی نیز دقیقاً همان موارد مذکور برای عملیات ترمیم و نگهداری می‌باشند. لذا از توضیح مجدد خودداری می‌گردد.

#### ۲-۵- نحوه محاسبه هزینه و مقایسه نتایج طراحی پویا با روش طراحی معمول

نحوه محاسبه هزینه به دست آمده از روش طراحی پویا نیز مجدداً شبیه روش محاسبه هزینه فاز ترمیم و نگهداری است. تنها تفاوت موجود در هزینه شبکه احداث شده در سال اول است که در طراحی پویا، بدون تاثیر پذیری از نرخ بهره با هزینه‌های منتقل شده از سال‌های بعدی جمع می‌شود. در حقیقت از آنجاکه سال احداث شبکه، همان سال صفر فرآیند مالی است بنابراین نرخ بهره در مقدار هزینه‌های مربوط به احداث شبکه تاثیری نخواهد داشت.

اما برای اثبات فواید استفاده از ایده طراحی پویای شبکه، باید به نوعی روش طراحی فعلی را با روش پیشنهادی در این تحقیق مقایسه نمود. برای این منظور در شبکه‌های یکسان، ابتدا به طراحی قطر لوله‌های شبکه برای سال اول پرداخته و سپس با انجام شبیه‌سازی، نیاز و یا عدم نیاز به ترمیم شبکه طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. در صورت نیاز به ترمیم، طراحی فاز ترمیم و نگهداری شبکه با استفاده از سناریوی توسعه داده شده انجام می‌شود و وضعیت شبکه طراحی شده در سال اول و ترمیم شده در سال‌های بعدی، به عنوان نتیجه حاصل از روش طراحی فعلی در نظر گرفته می‌شود. سپس همین شبکه با استفاده از روش طراحی پویا طراحی شده و نتایج بدست آمده با نتایج روش طراحی فعلی شبکه‌ها مقایسه می‌گردد. این کار با تابع هدف کمینه کردن هزینه، بیشینه کردن  $FRI$  و همچنین به صورت دو هدفه انجام می‌گردد.

#### ۳- توسعه مدل بهینه‌سازی طراحی پویا

کلی‌ترین مدل بهینه‌سازی بکار رفته در این تحقیق مدل بهینه‌سازی دو هدفه طراحی پویای شبکه است که توابع هدف آن به صورت زیر می‌باشند.

$$Satisfy \quad (NetCost, Reliability) \quad (3)$$

$$NetCost = TotalCost - CostE +$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_j} PF_{j,t}^1 + \sum_{t=1}^T PF_t^2 + PF^3 \quad (4)$$

$$Reliability = \left( \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_j} FRI_{j,t} \right) \times \quad (5)$$

$$Min(FRI_{j,t}) - \sum_{t=1}^T PF_t^4 - PF^5$$

در این روابط  $NetCost$  = هزینه خالص بعلاوه توابع جریمه،  $Reliability$  = اطمینان‌پذیری سیستم که با استفاده از تابع فازی تعریف می‌شود،  $TotalCost$  = هزینه خرید و جایگذاری لوله‌ها،  $CostE$  = ارزش اسقاطی لوله‌ها،  $PF_{j,t}^1$  = تابع جریمه برای محدودیت مربوط به رعایت حداقل فشار،  $PF_t^2$  = تابع جریمه برای محدودیت شماره ۲،  $PF^3$  = تابع جریمه برای محدودیت شماره ۴ از محدودیت‌های مذکور برای عملیات ترمیم و نگهداری،  $N_j$  = تعداد گره‌های شبکه،  $FRI_{j,t}$  = شاخص اطمینان‌پذیری فازی برای گره  $j$  در سال  $t$ ،  $PF_t^4$  و  $PF^5$  نیز همانند توابع جریمه  $PF_t^2$  و  $PF^3$  به ترتیب مربوط به محدودیت‌های شماره ۲ و ۴ از عملیات ترمیم و نگهداری بوده که برای تابع هدف بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری با علامت منفی و ضرایب متفاوت نسبت به کمینه

کردن هزینه بکار می‌روند.

جایگذاری برای لوله  $i$  که در سال  $t$ ،  $t_{i,t}^{op}$  = مدت زمان کارکرد لوله‌ای که در سال  $t$  و جایگاه لوله  $i$  مورد تعویض قرار گرفته و یا اضافه شده است،  $DecVar_{i,t}$  = متغیر تصمیم برای لوله  $i$  در سال  $t$  که مقدار آن از بین گزینه‌های موجود برای ترمیم و نگهداری انتخاب می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود، در رابطه (۶) هزینه لوله‌های قرار گرفته در شبکه در سال اول به اضافه لوله‌های اضافه شده و یا تعویض شده از سال سوم به بعد در متغیر  $TotalCost$  قرار می‌گیرد. در رابطه (۷) نیز ارزش اسقاطی لوله‌ها با استفاده از یک نسبت خطی ساده بین دو متغیر  $T$  و  $t_{i,t}^{op}$  محاسبه می‌شود. ضمناً نرخ بهره نیز در محاسبات فرایند مالی طرح وارد شده‌اند (روابط ۶ و ۷). رابطه (۸) نیز نشان می‌دهد که در صورت در نظر نگرفتن هیچگونه عملیات ترمیم و نگهداری در سال  $t$  و برای جایگاه لوله  $i$ ، هزینه وارد شده در محاسبات برابر صفر خواهد بود.

$$FRI_{j,t} = MemF_{j,t} \times \left( 1 - \frac{q_{j,t}^*}{\sum_{j=1}^{N_j} q_{j,t}^*} \right) \times \left( \frac{\sum_{i=1}^{NP_{j,t}} D_{ij,t}}{NP_{j,t} \times D_{Max,j,t}} \right) \quad (9)$$

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

در این مدل بهینه‌سازی دو هدفه، که توابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن اطمینان‌پذیری با تعریف  $FRI$  را مد نظر دارد، تابع هدف اول (رابطه ۴) با کسر ارزش اسقاطی ( $CostE$ ) لوله‌ها از هزینه لوله‌های بکار رفته ( $TotalCost$ ) بدست می‌آید. سپس توابع جریمه مربوط به محدودیت‌های این مدل بهینه‌سازی نیز از کل تابع هدف کم می‌شوند. اما تابع هدف دوم (رابطه ۵) با توجه به تعریف یک تابع عضویت فازی بر روی مقدار فشار گره  $z$  در سال  $t$  بدست می‌آید که در روابط (۹) و (۱۰) معرفی شده‌اند. همچنین با توجه به نحوه تعریف تابع هدف در نظر گرفته شده برای بیشینه کردن اطمینان‌پذیری شبکه در رابطه (۵)، علاوه بر اینکه مجموع تمامی شاخص‌های  $FRI$  گره‌های مختلف شبکه در طول دوره طرح در مقدار تابع هدف وارد می‌شود، از تاثیر کمترین مقدار  $FRI$  در بین گره‌ها و در طول سال‌های مختلف نیز غفلت نشده است. به این ترتیب بیشینه شدن اطمینان‌پذیری نه تنها مجموع مقادیر  $FRI$  در دوره طرح را ماکزیمم می‌سازد، بلکه از بیش از حد کوچک شدن  $FRI$  برخی گره‌ها در سال‌های بحرانی نیز جلوگیری به عمل می‌آورد. بعلاوه با توجه به نحوه تعریف این رابطه (روابط ۹ و ۱۰)، مشخص 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 هم باشد.

$$TotalCost = \sum_{i=1}^{N_i} C(D_{i,t}) \cdot L_i + \sum_{t=11}^{T-3} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_i} Cost_{i,t}}{(1+ir)^{t-1}} \right] \quad (6)$$

$$CostE = \sum_{t=11}^{T-3} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (Cost_{i,t}) \cdot \left( \frac{T - t_{i,t}^{op}}{T} \right)}{(1+ir)^{t-1}} \right] \quad (7)$$

$$Cost_{i,t} = \begin{cases} (C(D_{i,t}) + CD(D_{i,t})) \cdot L_i & \text{if } DecVar_{i,t} = DoN \\ 0 & \text{if } DecVar_{i,t} = DoN \end{cases} \quad (8)$$

در این روابط،  $C(D_{i,t})$  = هزینه واحد طول برای لوله  $i$  که در سال  $t$  در شبکه قرار گرفته است،  $L_i$  = طول لوله  $i$ ،  $Cost_{i,t}$  = هزینه خرید و جایگذاری لوله  $i$  که در سال  $t$  در شبکه قرار گرفته است،  $ir$  = نرخ بهره،  $CD(D_{i,t})$  = هزینه حفاری و

$$TNch = \sum_{t=1}^T Nch_t \quad (12)$$

$$PF_{j,t}^1 = \begin{cases} \alpha_1 (h_{j,t}^* - h_{j,t})^{\alpha_2} & \text{if } h_{j,t} < h_{j,t}^* \\ 0 & \text{if } h_{j,t} \geq h_{j,t}^* \end{cases} \quad (13)$$

$$PF_t^2 = \begin{cases} \alpha_3 (Nch_t - \beta_1)^{\alpha_4} & \text{if } Nch_t > \beta_1 \\ 0 & \text{if } Nch_t \leq \beta_1 \end{cases} \quad (14)$$

$$PF^3 = \begin{cases} \alpha_5 (TNch - \beta_2)^{\alpha_6} & \text{if } TNch > \beta_2 \\ 0 & \text{if } TNch \leq \beta_2 \end{cases} \quad (15)$$

$$PF_t^4 = \begin{cases} \alpha_7 (Nch_t - \beta_1)^{\alpha_8} & \text{if } Nch_t > \beta_1 \\ 0 & \text{if } Nch_t \leq \beta_1 \end{cases} \quad (16)$$

$$PF^5 = \begin{cases} \alpha_9 (TNch - \beta_2)^{\alpha_{10}} & \text{if } TNch > \beta_2 \\ 0 & \text{if } TNch \leq \beta_2 \end{cases} \quad (17)$$

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - h_{f,1,2} +$$

$$H_p = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

$$\sum_{i=1}^{NIn} Q_{i,j,t} = \sum_{i=1}^{NOut} Q_{i,j,t}$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, Nj$$

$$h_{f,i,t} = \omega LC_{i,t}^{HW-1.852} D_{i,t}^{-4.871} Q_{i,t}^{1.852} \quad (18)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, Ni$$

$$q_{j,t}^* = \text{Exp}(\text{Ln}(q_{j,T}^*) - K_g \times t) \quad (21)$$

در این روبرو،  $MemF_{j,t}$  = مقدار درجه عضویت تابع فازی مورد نظر برای گره  $j$  و سال  $t$ ،  $q_{j,t}^*$  = حداقل دبی خروجی مجاز یا همان نیاز گره  $j$  و سال  $t$ ،  $D_{ij,t}$  = قطر لوله  $i$  که در سال  $t$  به گره  $j$  متصل است،  $NP_{j,t}$  = تعداد لوله‌های متصل به گره  $j$  در سال  $t$ ،  $D_{Max_{j,t}}$  = قطر قطورترین لوله متصل به گره  $j$  در سال  $t$ ،  $h_{j,t}$  = ارتفاع معادل فشار در گره  $j$  و سال  $t$ ،  $h_{j,t}^*$  = مقدار حداقل فشار مجاز در گره  $j$  و سال  $t$ ،  $h_j^{low}$  و  $h_j^{high}$  = مقادیر فرضی ارتفاع معادل فشار که به ترتیب از  $h_j^{**}$  بزرگتر و از  $h_j^*$  کوچکتر هستند.

تابع عضویت فازی مورد نظر در رابطه (۱۰) به گونه‌ای تعیین شده که بنابر آن بیشترین درجه عضویت فازی (مقدار یک) به گره‌ای تعلق خواهد گرفت که فشار آن برابر مقدار میانگین دو حد بالا و پایین مجاز برای فشار گره‌های شبکه باشد. به این ترتیب مطلوب ترین مقدار فشار در شبکه برابر مقداری است که فاصله آن از حداکثر و حداقل فشار مجاز به یک اندازه باشد. بعلاوه مقدار درجه عضویت تابع فازی ( $MemF_{j,t}$ )، در رابطه (۹) در دو ضریب مربوط به دبی خروجی از گره متناظر و همچنین ضریب معرفی شده توسط Prasad and Park (2004) ضرب می‌شود. ضریب اول برای متمایز ساختن اهمیت گره‌ها از نظر سهم آن‌ها در تامین نیاز شبکه است. به این معنا که گره با سهم تامین نیاز بیشتر، دارای اهمیت بیشتری در تابع هدف اطمینان‌پذیری خواهد بود. ضریب دوم که توسط Prasad and Park (2004) ارائه شده است نیز به منظور ایجاد حلقه‌های مطمئن در شبکه به تابع هدف اطمینان‌پذیری مورد نظر اضافه شده است.

لازم به ذکر است که دلیل در نظر گرفتن پارامترهای  $h_j^{low}$  و  $h_j^{high}$  در تابع هدف فازی این مدل، تسهیل در رسیدن به پاسخ بهینه توسط الگوریتم است. به این ترتیب مقدار شاخص  $FRI$  برای گره با فشار بسیار بسیار کم (مثلاً مقادیر منفی که علی‌رغم بی معنی بودن، در روند حل مسئله ظاهر می‌شوند) با مقدار شاخص  $FRI$  برای گره با فشار صفر متفاوت بوده و الگوریتم بهینه‌سازی به این ترتیب تفاوت این دو را درک خواهد نمود. در حالی که اگر دو پارامتر مذکور در تابع هدف فازی شاخص  $FRI$  در نظر گرفته نمی‌شدند، مقدار شاخص برای هر دو حالت مذکور برابر صفر در نظر گرفته می‌شد و این شرایط منجر به جستجوهای بی‌بهره توسط الگوریتم می‌گردید.

$$\text{If } DecVar_{i,t} \neq DoN \quad (11)$$

$$\text{Then } DecVar_{i,t+(1,2,\dots,10)} = DoN$$



$$C_{i,t}^{HW} = 18.0 - 37.2 \log \left( \frac{e_{0_i} + a_i(t)}{D_i} \right) \quad (22)$$

در این روابط،  $NCh_t$  = تعداد عملیات ترمیم و نگهداری در هر سال،  $TNCh$  = تعداد کل عملیات ترمیم و نگهداری در دوره طرح بوده و پارامترهای  $\beta_1$  و  $\beta_2$  نیز ضرایبی هستند که با توجه به نوع مسئله مورد نظر و فرضیات موجود در آن به ترتیب برای حداکثر تعداد مجاز عملیات ترمیم در هر سال و کل تعداد عملیات ترمیم مجاز در طول دوران طرح انتخاب می‌شوند. پارامترهای  $\alpha_1$  تا  $\alpha_{10}$  نیز ضرایب ثابت توابع جریمه بوده که معمولاً مقدار مطلوب‌تر آن‌ها پس از انجام تحلیل حساسیت اولیه از اجراهای مختلف توسط الگوریتم انتخاب و بکار گرفته می‌شود.  $h_1$  و  $h_2$  = ارتفاع معادل فشار هیدرولیکی (متر)،  $V_1$  و  $V_2$  = سرعت آب (متر بر ثانیه) و  $Z_1$  و  $Z_2$  = ارتفاع از سطح مبنا (متر) به ترتیب در نقاط ۱ و ۲ هستند.  $h_f^{1,2}$  = ارتفاع افت هیدرولیکی بین نقاط ۱ و ۲ بر روی هر خط جریان فرضی (متر)،  $H_p$  = ارتفاع هد پمپاژ (متر)،  $Q_{i,j}$  = دبی  $i$  امین لوله ورودی و یا خروجی متصل به گره  $j$  (متر مکعب بر ثانیه)،  $h_{fi}$  = ارتفاع افت هیدرولیکی در لوله  $i$  (متر)،  $\omega$  = ضریب ثابت وابسته به فرمول هیزن- ویلیامز مورد استفاده،  $C_{i,t}^{HW}$  = ضریب زبری هیزن- ویلیامز لوله  $i$  در سال  $t$  (متر مکعب بر ثانیه)،  $e_{0_i}$  = زبری داخلی لوله  $i$  در سال نصب آن در شبکه (متر) و  $a_i$  = نرخ رشد زبری در لوله  $i$  (متر بر سال) می‌باشند. با استفاده از رابطه (۲۳) که توسط Sharp and Walski (1988) ارائه شده است، می‌توان تغییرات ضریب زبری هیزن- ویلیامز را وارد مدل شبیه‌سازی مورد نظر کرده و مقدار آن را در سال‌های مختلف محاسبه نمود. در نهایت  $q_{j,T}^*$  = نیاز گره  $j$  در سال پایانی دوره طرح  $(T)$ ،  $K_g$  = ضریب تصاعد هندسی در رابطه رشد نیاز،  $\gamma$  = وزن مخصوص آب (کیلوگرم بر متر مکعب) و  $g$  = شتاب جاذبه زمین (متر بر مجذور ثانیه).

روابط (۱۳) تا (۱۷) مربوط به قیودات مدل بهینه‌سازی هستند. در رابطه (۱۳) جریمه به گره‌ای تعلق می‌گیرد که فشار آن از حداقل فشار مجاز در شبکه کمتر شده است. به همین ترتیب، رابطه (۱۴) مربوط است به محدودیت شماره ۲ از محدودیت‌های مذکور برای عملیات ترمیم و نگهداری که در آن، در صورتیکه تعداد عملیات ترمیم و نگهداری در هر سال از حداکثر مقدار آن ( $\beta_1$ ) بیشتر شود، مقداری جریمه به تابع هدف تعلق می‌گیرد. رابطه (۱۵) نیز قیدی مشابه برای محدودیت شماره ۴ از محدودیت‌های مذکور برای عملیات ترمیم و نگهداری است که در آن تعداد کل عملیات ترمیم و

نگهداری در کل افق طراحی و بهره‌برداری کنترل می‌شود. روابط (۱۶) و (۱۷) نیز دقیقاً متناظر با قیودات (۱۴) و (۱۵) هستند، با این تفاوت که برای تابع هدف بیشینه سازی اطمینان‌پذیری در نظر گرفته می‌شوند و لذا باید دارای ضرایب متفاوتی باشند (به دلیل تفاوت در مقیاس مقدار عددی تابع هدف).

به علاوه لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر از نرم‌افزار EPANET 2.0 به منظور شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در شبکه استفاده شده است (Rossman, 1993) و به این ترتیب قیدهای (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) خود به خود ارضاء می‌شوند.

#### ۴- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه جفت‌گیری زنبور عسل (MOHBMO)

الگوریتم MOHBMO نسخه چند هدفه الگوریتم HBMO ارائه شده توسط Bozorg Haddad et al. (2006) می‌باشد. در الگوریتم MOHBMO، ابتدا دو کندو که هر کدام دارای یک ملکه هستند تولید می‌شود. هر کندو با توجه به یک تابع هدف به صورت تک هدفه بهینه‌سازی را انجام داده و پس از تکرار تعداد مشخصی سعی و خطا، به بهبود ملکه خود می‌پردازد. در این الگوریتم از روش گرم شدن<sup>۲۰</sup> (WU) که توسط فلاح (۱۳۸۷) ارائه شد، استفاده شده است. در طی روش 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 روش WU برای هر کدام از کندوها، دو پاسخ جداگانه به دست می‌آید که هر کدام از آن‌ها از نظر یکی از دو تابع هدف در وضعیت مطلوبی قرار دارند. این دو جواب وارد لیست جواب‌های نامغلوب می‌شوند. سپس جوابی که در لیست نامغلوب از نظر تابع هدف اول برتر است، به عنوان ملکه کندوی دوم و همچنین جوابی که از نظر تابع هدف دوم برتر است به عنوان ملکه کندوی اول انتخاب می‌شود (جابجایی ملکه‌ها در بین دو کندو). مجدداً فرآیند حل مسئله تک هدفه 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 بدست آمده از هر کندو با یکدیگر مقایسه شده و پس از انجام تست نامغلوبی وارد لیست جواب‌های نامغلوب می‌شوند. هر جواب وارد شده به این لیست، با تمام جواب‌های قبلی موجود مقایسه می‌شود تا تنها جواب‌های نامغلوب درون لیست باقی بمانند. سپس جوابی که در درون این لیست نسبت به تابع هدف اول از همه برتر باشد به عنوان ملکه جمعیت دوم قرار گرفته و برعکس. مجدداً هر کندو با توجه به تابع هدف خود پیش

می‌رود و این فرآیند تکراری تا رسیدن به شرط توقف که عموماً تعداد مشخصی تکرار خواهد بود، ادامه می‌یابد. خوانندگان محترم می‌توانند برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد الگوریتم‌های HBMO و MOHBMO به مراجع بزرگ حداد (۱۳۸۴) و قاجارنیا (۱۳۸۸) مراجعه نمایند.

## ۵- مطالعه موردی

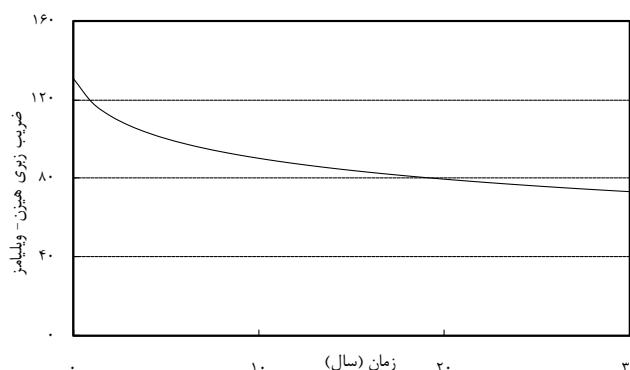
مدل‌های بهینه‌سازی مورد نظر با استفاده از توابع هدف تعریف شده، بر روی دو شبکه نمونه مورد آزمون قرار گرفت. مثال اول، شبکه ارائه شده توسط Alperovits and Shamir (1977) می‌باشد. شبکه دو حلقه‌ای<sup>۲۱</sup> یک شبکه ساده دارای ۸ لوله ( $N_i = 8$ ) و  $(N_j = 6)$  گره است (شکل ۱، الف). طول همه لوله‌های بکار رفته در آن ( $L_i$ ) با هم برابر بوده و معادل ۱۰۰۰ متر هستند. بعلاوه ضریب هیزن-ویلیامز برای محاسبه افت تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ و ضریب  $\omega$  نیز مساوی  $10/6744$  (برابر ضریب  $\omega$  به کار رفته در نرم افزار EPANET 2.0) فرض شده‌اند. مقادیر دبی مورد نیاز هر گره معلوم بوده و میزان حداقل و حداکثر فشار مجاز در هر گره نیز به ترتیب برابر ۳۰ و ۶۰ متر آب فرض گردیده است ( $P_j^* = 30$  و  $P_j^{**} = 60$ ). همچنین مقدار  $h_j^{High}$  و  $h_j^{Low}$  نیز برابر  $-1.000$  و  $500$  متر آب در نظر گرفته شده‌اند. لازم به ذکر است که فشار  $-1.000$  دارای مفهوم فیزیکی نبوده و فقط به منظور حل مسئله و با توجه به تابع هدف فازی تعریف شده در شاخص اطمینان‌پذیری در نظر گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به گره‌ها و قطرهای تجاری این شبکه در مقاله Alperovits and Shamir (1977) ارائه شده‌اند. بعلاوه مقادیر زبری داخلی لوله‌ها ( $e_{0i}$ ) و همچنین نرخ رشد زبری در لوله‌ها ( $a_i$ ) برای شبکه دو حلقه‌ای در جدول ۱ قابل ملاحظه هستند (Bozorg Haddad et al. 2008). با استفاده از این مقادیر و رابطه

(۲۳)، می‌توان تغییرات ضریب زبری هیزن-ویلیامز برای لوله‌های مختلف شبکه را محاسبه کرد که روند این تغییرات در شکل ۱-ب مشاهده می‌شود. ضمناً مقادیر پارامترهای  $\beta_1$  و  $\beta_2$  در این شبکه برابر ۲ و ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند.

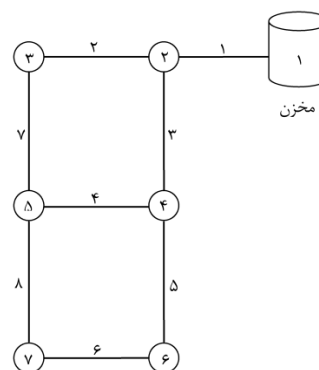
در ابتدا شبکه مورد نظر با استفاده از الگوریتم چند هدفه موجود، برای نیاز سال پایانی طراحی می‌شود. سپس این شبکه طراحی شده در طول دوران بهره‌برداری شبیه‌سازی شده و در صورت عدم رعایت قیودات هیدرولیکی، ترمیم می‌شود. در پایان نیز طراحی پویای شبکه انجام شده و نتایج آن با نتایج شبکه طراحی شده برای نیاز سال پایانی دوره طرح و ترمیم شده در طول دوران بهره‌برداری، مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

جدول ۱- مقادیر زبری داخلی و نرخ رشد زبری برای شبکه دو حلقه‌ای (Bozorg Haddad et al. 2008)

نرخ رشد زبری	زبری داخلی (mm)	قطر لوله (mm)
۰/۰۳	۰/۰۲	۲۵/۴
۰/۰۵	۰/۰۵	۵۰/۸
۰/۰۸	۰/۰۷	۷۶/۲
۰/۱۱	۰/۱۰	۱۰۱/۶
۰/۱۶	۰/۱۵	۱۵۲/۴
۰/۲۲	۰/۲۰	۲۰۳/۲
۰/۲۷	۰/۲۵	۲۵۴
۰/۳۳	۰/۳۰	۳۰۴/۸
۰/۳۸	۰/۳۵	۳۵۵/۶
۰/۴۴	۰/۴۰	۴۰۶/۴
۰/۴۹	۰/۴۵	۴۵۷/۲
۰/۵۴	۰/۵۰	۵۰۸
۰/۶۰	۰/۵۵	۵۵۸/۸
۰/۶۵	۰/۵۹	۶۰۹/۶



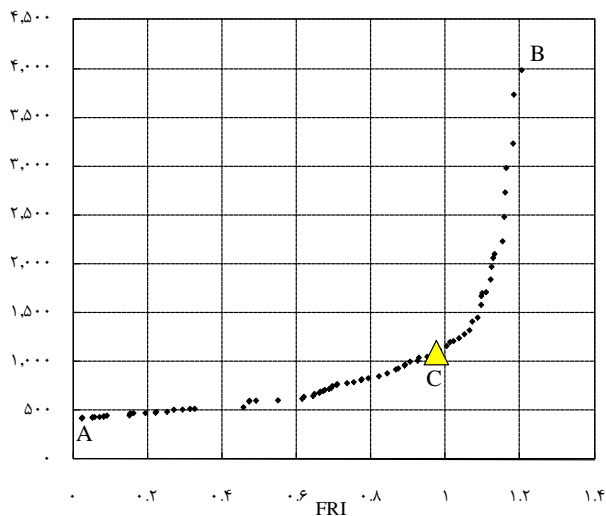
(ب)



(الف)

شکل ۱- (الف) شماتیک شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای و (ب) تغییرات ضریب زبری هیزن-ویلیامز در شبکه دو حلقه‌ای

ترمیم و نگهداری کمتری نیاز داشته ولی هزینه آن بالا خواهد بود. ضمناً واضح است که شبکه C دارای وضعیت بینابین است.



شکل ۲- پارتوی بدست آمده در طراحی دو هدفه شبکه دو حلقه‌ای و نقطه انتخاب شده

جدول ۲- مقادیر قطر لوله‌ها برای نقاط A، C و B

نقطه	A	C	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)	۴۱۹,۰۰۰	۱,۰۹۰,۰۰۰	۳,۹۸۰,۰۰۰

بنابراین موارد، فرآیند مقایسه با استفاده از هر سه شبکه A، B و C انجام شد. به این معنا که هر کدام از این سه طراحی به طور جداگانه از نظر عملکرد  $T$  ساله مورد آزمون و بررسی قرار می‌گیرند. در صورت مشاهده هر گونه نارسایی در عملکرد آن‌ها، اقدامات ترمیم و نگهداری انجام شده و در نهایت نتایج هر سه مورد با نتایج طراحی پویای شبکه مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

بنابراین برای ارزیابی لزوم اقدام به ترمیم و نگهداری سه طراحی A، B و C در دوره زمانی  $T$  ساله، رفتار هیدرولیکی این شبکه‌ها در طول دوران بهره‌برداری شبیه‌سازی شده و پس از بدست آوردن نتایج شبیه‌سازی، وضعیت فشار گره‌ها در سال‌های مختلف، نیاز و یا عدم

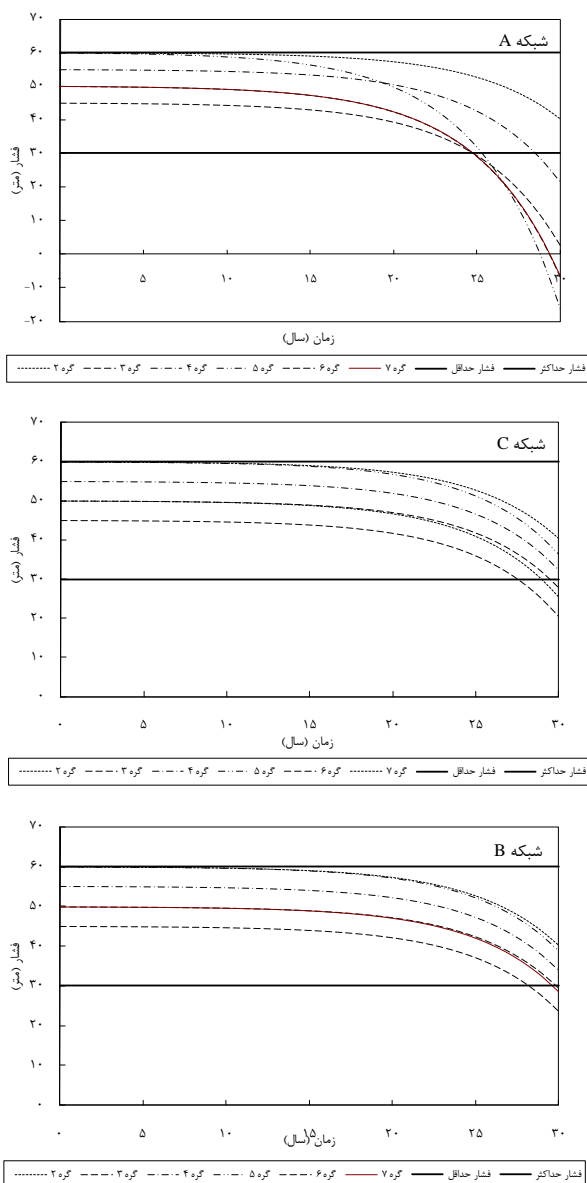
طراحی دو هدفه شبکه دو حلقه‌ای با استفاده از الگوریتم چند هدفه MOHBMO انجام گرفت که در آن، کندوی اول با تابع هدف کمینه کردن هزینه و کندوی دوم با تابع هدف بیشینه کردن  $FRI$  تکامل می‌یابند. برای طراحی این شبکه از الگوریتم MOHBMO، پارتوی نهایی بدست آمد که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی نقاط موجود در این پارتو، قیودات مربوط به هر دو تابع هدف را به طور کامل ارضا کرده‌اند.

نقاط موجود در دو سر پارتوی شکل ۲ (نقاط A و B)، از طراحی تک هدفه شبکه دو حلقه‌ای با هر یک از توابع هدف و با استفاده از الگوریتم HBMO بدست می‌آیند. از طرف دیگر همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم MOHBMO نیز توانسته است به خوبی ناحیه بین این دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی این الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد. ملاحظه می‌شود که با افزایش هزینه شبکه، مقدار اطمینان‌پذیری نیز که در این تحقیق با شاخص  $FRI$  سنجیده شده است، افزایش می‌یابد. بنابراین انتخاب نقطه دلخواه از بین نقاط نامغلوب موجود در روی پارتو کار چندان ساده‌ای نیست.

در این تحقیق برای انتخاب یکی از نقاط موجود در پارتوها، از مدل حل اختلاف (Young 1993) استفاده شده است. در این روش به هر یک از توابع هدف، تابع مطلوبیتی برآزش داده شده و با استفاده از بیشینه‌سازی یک رابطه ریاضی بر مبنای شیب نقاط مختلف پارتو، نقطه مطلوب انتخاب می‌شود (Young, 1993). با استفاده از این روش، نقطه C که با علامت مثلث در شکل (۲) مشخص شده است انتخاب می‌گردد. اگر طراحی بدست آمده با تابع هدف کمینه کردن هزینه (نقطه پایینی پارتو) A، طراحی بدست آمده با تابع هدف بیشینه کردن  $FRI$  (نقطه بالایی پارتو) B و نقطه انتخاب شده با مدل (Young 1993)، C نامیده شوند، مقادیر قطر لوله‌ها و همچنین هزینه کلی این طراحی‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

هر کدام از این سه طراحی دارای ویژگی‌های بخصوصی هستند و طبیعتاً این ویژگی‌ها بر روی دو پارامتر هزینه و اطمینان‌پذیری در کل دوران طراحی اولیه و ترمیم و نگهداری موثر خواهند بود. طراحی A از نظر هزینه در بهترین وضعیت و از نظر اطمینان‌پذیری در بدترین وضعیت قرار دارد. بنابراین انتظار می‌رود که نیاز آن به ترمیم و نگهداری بیشتر ولی هزینه کلی آن پایین‌تر باشد. در مقابل، شبکه B از وضعیت بهتری از نظر اطمینان‌پذیری برخوردار بوده و در عین حال پر هزینه‌ترین شبکه موجود نیز می‌باشد. لذا این شبکه عملیات

شبکه در سال اول دوره طرح و گزینه‌های ترمیم و نگهداری در دوران بهره‌برداری آورده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر قطر لوله‌های جایگذاری شده در سال اول در حالت طراحی پویا در مقایسه با مقادیر مشابه در شبکه A، مقادیر کوچکتری هستند. شکل ۶ نیز نمودار هزینه‌های صرف شده برای احداث و ترمیم شبکه A و شبکه طراحی شده به روش طراحی پویا را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هزینه احداث شبکه در سال صفر برای طراحی پویا کمتر از نصف طراحی A بوده و در عوض هزینه‌های ترمیم و نگهداری آن بیشتر است.



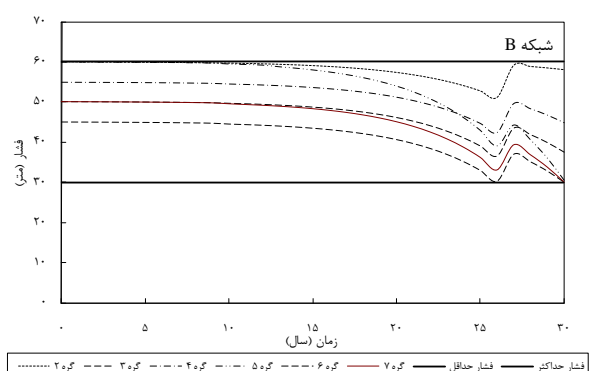
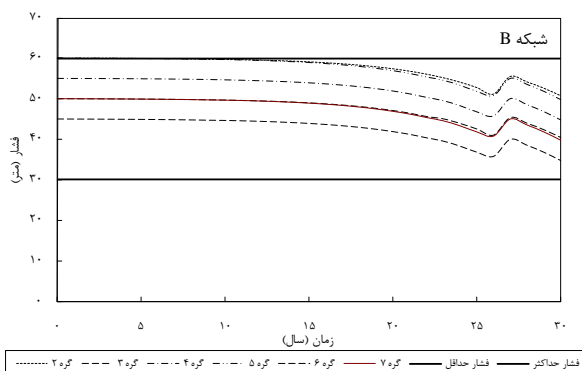
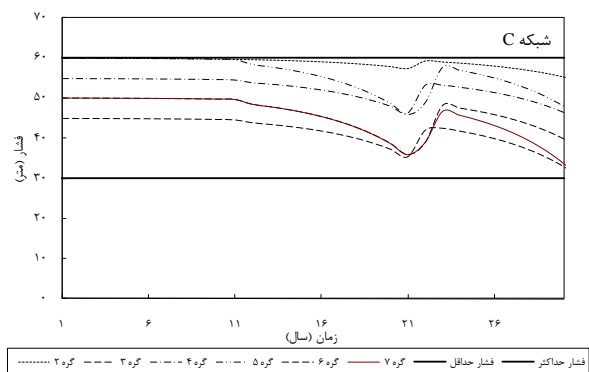
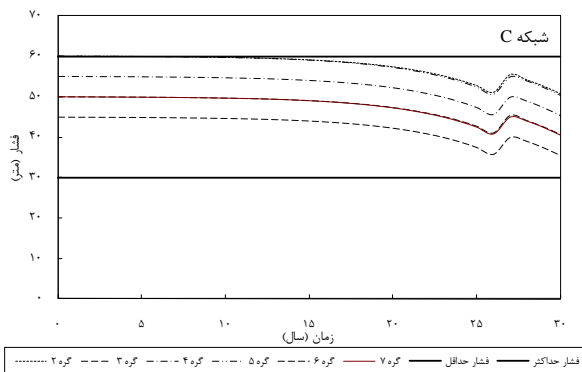
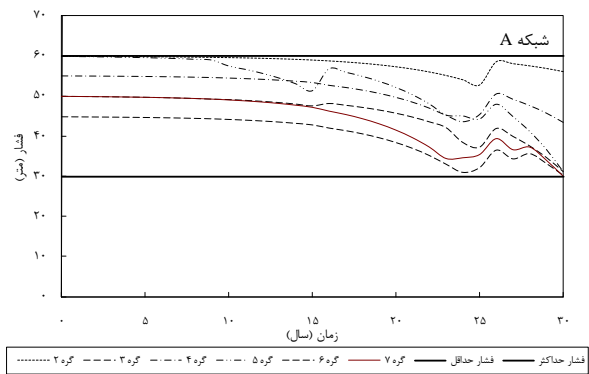
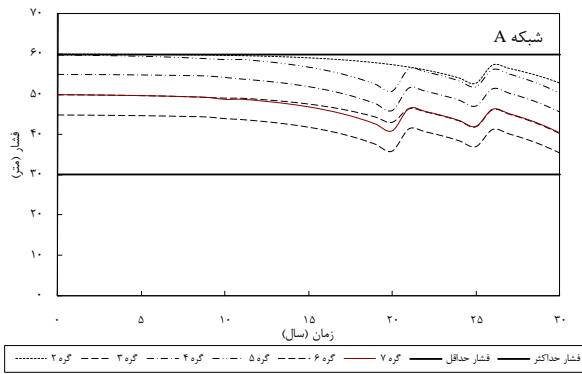
شکل ۳- مقادیر فشار گره‌های شبکه‌های A، B و C در طول دوران طرح

نیاز شبکه‌ها به انجام عملیات ترمیم و نگهداری را نشان خواهد داد. شکل ۳ وضعیت فشار گره‌های هر سه شبکه را پس از انجام شبیه‌سازی در دوره زمانی  $T$  ساله نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش نیاز گره‌ها و همچنین کاهش ضریب زبری لوله‌ها منجر به افزایش افت فشار و به فراخور آن کاهش فشار هیدرولیکی در گره‌های شبکه‌ها شده است. بنابراین واضح است که هر سه شبکه به ترمیم و نگهداری نیاز داشته تا به این ترتیب بتوانند قیودات هیدرولیکی موجود را جابگو شوند.

بهینه‌سازی عملیات ترمیم و نگهداری با استفاده از الگوریتم تک هدفه HBMO و با استفاده جداگانه از هر دو تابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن  $FRI$  برای هر سه شبکه A، B و C انجام شده است. شکل ۴ وضعیت فشار در گره‌های شبکه‌ها را پس از انجام عملیات ترمیم و نگهداری با تابع هدف کمینه کردن هزینه نشان می‌دهد. به همین ترتیب شکل ۵ نیز وضعیت فشار در گره‌های شبکه‌ها را پس از انجام عملیات ترمیم و نگهداری با تابع هدف بیشینه کردن  $FRI$  نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود فشار در همه گره‌های هر سه شبکه در محدوده بین فشار حداقل و حداکثر مجاز قرار دارند. ضمناً مشخص است که تابع هدف کمینه کردن هزینه فشار گره‌ها را در نزدیکی کمترین فشار مجاز نگاه داشته و به همین ترتیب نیز تابع هدف بیشینه کردن  $FRI$  باعث نزدیک شدن فشار گره‌ها به میانگین فشار حداقل و حداکثر مجاز (یعنی ۴۵ متر آب) گردیده است.

یک نمونه از تصمیمات اتخاذ شده در دوران طرح برای شبکه A و با تابع هدف کمینه کردن هزینه نیز در جدول ۳ ارائه شده است. اول این جدول مقادیر قطر لوله‌های طراحی شده در سال اول است. مقادیر ستون‌های دیگر نیز مربوط به تصمیمات اتخاذ شده در فاز ترمیم و نگهداری می‌باشند. اعداد مشخص شده با علامت یک ستاره قطر لوله‌های تعویض شده و مقادیر مشخص شده با دو ستاره قطر لوله‌های اضافه شده هستند.

پس از طراحی اولیه شبکه دو حلقه‌ای بر اساس نیاز سال پایانی دوره طرح و ترمیم و نگهداری آن با هر دو تابع هدف، طراحی پویای این شبکه با هر دو تابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن  $FRI$  انجام گرفته است. طراحی پویای شبکه دو حلقه‌ای به معنای تعیین همزمان گزینه‌های بهینه برای قطرهای لوله‌ها در سال اول و گزینه‌های ترمیم و نگهداری در دوران بهره‌برداری است. برای این منظور با هر یک از توابع هدف از الگوریتم HBMO استفاده شده و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول ۴ مقادیر قطر لوله‌های



شکل ۵- مقادیر بلند مدت فشار گره‌های شبکه‌های A، B و C پس از ترمیم و نگهداری با تابع هدف بیشینه کردن FRI

شکل ۴- مقادیر بلند مدت فشار گره‌های شبکه‌های A، B و C پس از ترمیم و نگهداری با تابع هدف کمینه کردن هزینه

جدول ۳- قطر (اینچ) لوله‌های تعویض و یا اضافه شده در ترمیم و نگهداری شبکه A با تابع هدف کمینه کردن هزینه

سال لوله	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰				
۱	۱۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۸**	
۲	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۳	۱۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۳**
۴	۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۸**
۵	۱۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۳**
۶	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۸**
۷	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۶**
۸	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

شکل ۷ نیز وضعیت فشار گره‌های شبکه دو حلقه‌ای پس از طراحی پویا با هر دو تابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن FRI را

بدان معنا که طراحی پویا توانسته است هزینه‌های سنگین مربوط به احداث اولیه شبکه را در طول دوران طرح به خوبی پخش کند.

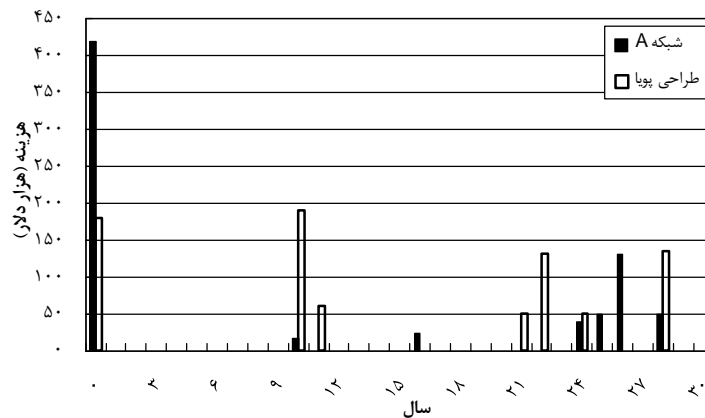
شبکه در حالت طراحی پویا از هر سه حالت دیگر کمتر بوده و هزینه ترمیم آن نیز نسبتاً زیاد است. این بدان معناست که طراحی پویا توانسته است هزینه‌های شبکه را در طول دوره بهره‌برداری به نحو مناسبی پخش کند و به این ترتیب (با توجه به تاثیر نرخ بهره در محاسبات مربوط به فرآیند مالی طرح) هزینه کل پروژه را در مقایسه با شبکه‌های A، B و C به ترتیب ۲۴، ۶۳ و ۸۸ درصد کاهش داده است.

نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در حالت بیشینه کردن  $FRI$ ، مقادیر فشار با دقت بیشتری در نزدیکی میانگین حداقل و حداکثر فشار مجاز (۴۵ متر آب) قرار گرفته‌اند.

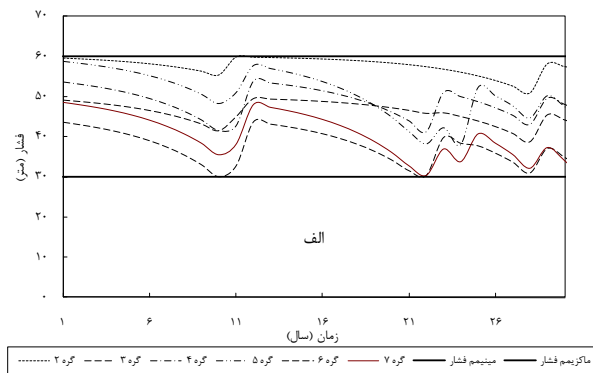
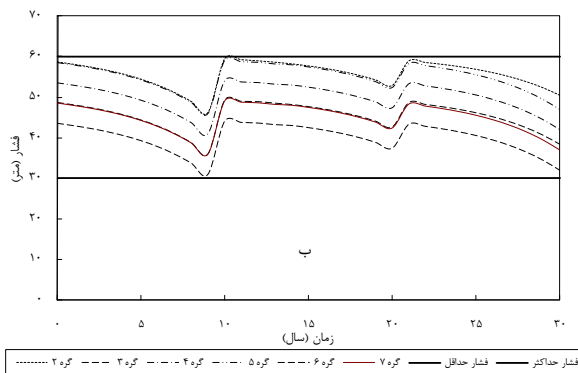
جدول ۵ مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی شبکه‌های A، B و C و همچنین نتایج طراحی پویا با تابع هدف کمینه کردن هزینه را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، هزینه احداث

جدول ۴- قطر (اینچ) لوله‌های تعویض یا اضافه شده به شبکه دو حلقه‌ای، طراحی شده با تابع هدف کمینه کردن هزینه به روش طراحی پویا

سال	لوله	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰			
۱	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۸*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۸**	-
۲	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۳	۱	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۴	۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۶	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۷	۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۸	۸	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



شکل ۶- نمودار میله‌ای هزینه‌های صرف شده برای شبکه A و شبکه طراحی شده به روش طراحی پویا



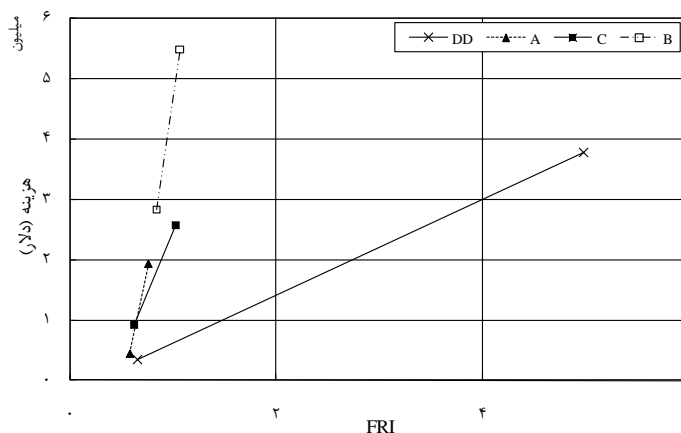
شکل ۷- مقادیر فشار گره‌های شبکه دو حلقه‌ای در طراحی پویا با تابع هدف (الف) کمینه کردن هزینه و (ب) بیشینه کردن  $FRI$

مسائل خواهند بود. همانطور مشاهده می‌شود، طراحی پویا توانسته است از نظر هر دو تابع هدف هزینه و  $FRI$  در وضعیت مناسب‌تری در مقایسه با سه طراحی دیگر قرار بگیرد. در حقیقت بهینه‌سازی تک هدفه شبکه دو حلقه‌ای به منظور کمینه کردن هزینه، با استفاده از طراحی پویا توانسته است در مقایسه با طراحی مشابه برای شبکه‌های A، B و C کمترین هزینه را ارائه دهد. به همین ترتیب در مورد بهینه‌سازی  $FRI$  نیز، طراحی پویا قادر بوده است به طور چشمگیری اطمینان‌پذیری شبکه را افزایش دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که در صورت طراحی دو هدفه این شبکه‌ها، پارتوی حاصل از طراحی پویا نسبت به بقیه پارتوها در موقعیت غالب قرار خواهد گرفت. به این معنا که تمام نقاط موجود بر روی پارتوی طراحی پویا، می‌تواند تمام نقاط موجود بر روی هر سه پارتوی دیگر را مغلوب کند.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی با دو تابع هدف کمینه کردن هزینه و بیشینه کردن  $FRI$  برای حالات مختلف طراحی در نظر گرفته شده، در شکل ۸ مشاهده می‌شوند. نقاط مشخص شده با علامت ضربدر متعلق به نتایج بدست آمده از طراحی پویای (DD) شبکه دو حلقه‌ای هستند. برای نمایش بهتر این نقاط و همچنین بدست آوردن تصویری از پارتوی حاصل از طراحی پویای دو هدفه شبکه دو حلقه‌ای، خطی فرضی بین این نقاط کشیده شده است. همین کار برای طراحی‌های مربوط شبکه‌های A، B و C انجام شده است. واضح است که پارتوی حاصل از بهینه‌سازی چند هدفه یک مسئله، هرگز از محدوده بین نقاط بدست آمده از طراحی تک هدفه با هر یک از توابع هدف مورد نظر، فراتر نخواهد رفت. لذا خطوط فرضی ترسیم شده در این شکل، به نوعی نمادی از پارتوی حاصل از طراحی دو هدفه هر یک از

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن هزینه (دلار) برای حالات مختلف طراحی شبکه دو حلقه‌ای

B	هزینه احداث شبکه در سال صفر	۳,۹۸۰,۰۰۰	ارزش اسقاطی	۱,۴۲۴,۸۰۱
	هزینه ترمیم احداث شبکه	۲۷۸,۵۲۲	هزینه خالص ترمیم و احداث شبکه	۲,۸۳۳,۷۲۱
C	هزینه احداث شبکه در سال صفر	۱,۰۹۰,۰۰۰	ارزش اسقاطی	۳۱۵,۹۳۴
	هزینه ترمیم احداث شبکه	۱۴۴,۹۱۸	هزینه خالص ترمیم و احداث شبکه	۹۱۸,۹۸۴
A	هزینه احداث شبکه در سال صفر	۴۱۹,۰۰۰	ارزش اسقاطی	۶۹,۶۶۱
	هزینه ترمیم احداث شبکه	۹۶,۵۳۳	هزینه خالص ترمیم و احداث شبکه	۴۴۵,۸۷۲
طراحی پویا	هزینه احداث شبکه در سال صفر	۱۸۰,۰۰۰	ارزش اسقاطی	۱۰۴,۶۳۷
	هزینه ترمیم	۲۶۵,۳۲۱	هزینه خالص طراحی پویا	۳۴۰,۶۸۵



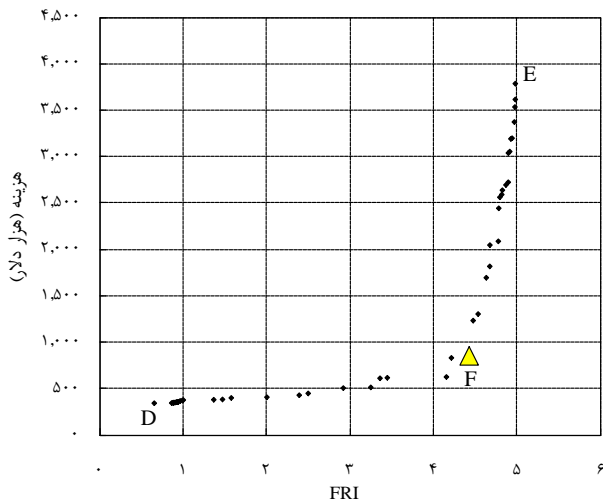
شکل ۸- نتایج بهینه‌سازی با هر دو تابع هدف هزینه و  $FRI$  برای حالات مختلف طراحی شبکه دو حلقه‌ای

به علاوه نکته دیگری که از شکل ۸ قابل استنباط است، وسعت و گستردگی پارتوی حاصل از طراحی پویا در مقایسه با سه پارتوی دیگر است. این شکل نشان می‌دهد که طراحی پویای شبکه در مقایسه با روش‌های معمول طراحی فعلی، قادر خواهد بود تا طراحی‌های بهینه را در فضای وسیع‌تری در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد. نزدیکی بیش از حد نقاط دو سر پارتو برای شبکه‌های A، B و C در مقایسه با شبکه بدست آمده از طراحی پویا، به نوعی طراحی چند هدفه سه شبکه مذکور را بی معنا کرده است. بنابراین در تحقیق حاضر از طراحی دو هدفه شبکه‌های A، B و C صرف نظر کرده و تنها به طراحی پویای دو هدفه شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای با استفاده از الگوریتم MOHBMO پرداخته می‌شود.

پس از انجام تحلیل حساسیت و تنظیم پارامترهای مربوط به الگوریتم MOHBMO پارتوی نهایی بدست آمد که در شکل ۹ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی نقاط موجود در این پارتو، قیودات مربوط به هر دو تابع هدف را به طور کامل ارضا کرده‌اند. نقاط موجود در دو سر پارتوی شکل ۹، همان نقاط مشخص شده با علامت ضربدر در شکل ۸ می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود الگوریتم MOHBMO توانسته است به خوبی ناحیه بین این دو نقطه مرزی را پوشش دهد که این نشان از توانایی این الگوریتم و همچنین انتخاب مناسب پارامترهای آن دارد. برای انتخاب یکی از نقاط پارتوی شکل ۹ نیز از روش Young (1993) استفاده شد. نقطه انتخاب شده در شکل با علامت مثلث مشخص شده است (نقطه F). این طراحی دارای هزینه‌ای معادل ۸۵۰۰۰۰ دلار بوده و مقدار شاخص  $FRI$  برای آن ۴/۴۳ می‌باشد. در حقیقت طراحی F با صرف هزینه‌ای در حدود ۰/۲ هزینه طراحی نقطه E، قادر است ۸۰ درصد اطمینان‌پذیری آن را تامین کند. همچنین هزینه طراحی نقطه F در حدود ۲/۵ برابر هزینه نقطه D بوده، در حالی که اطمینان‌پذیری آن حدود ۷ برابر اطمینان‌پذیری نقطه D است.

مثال دوم به کار گرفته شده در این تحقیق، مربوط به شبکه آبرسانی شهر هانوی<sup>۲۲</sup> در ویتنام می‌باشد (Fujiwara and Kang, 1990). این شبکه متشکل است از ۳۲ گره ( $N_j = 32$ )، ۳۴ لوله ( $N_i = 34$ ) و سه حلقه (شکل ۱۰، الف). مخزن تامین کننده آن در ارتفاع ۱۰۰ متری قرار داشته و برای تامین فشار از هیچ پمپی استفاده نمی‌شود. اطلاعات مربوط به گره‌ها و قطرهای تجاری موجود برای این شبکه نیز در مقاله Fujiwara and Kang (1990) ارائه شده‌اند. میزان حداقل و حداکثر 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. بعلاوه ضریب هیزن- ویلیامز برای محاسبه افت تمامی لوله‌ها برابر ۱۳۰ و ضریب  $\omega$  نیز برابر ۱۰/۵۰۸۸ در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر زبری داخلی لوله‌ها ( $e_{0i}$ ) و همچنین نرخ رشد زبری در لوله‌ها ( $a_i$ ) برای شبکه هانوی در جدول ۶ قابل ملاحظه هستند (Bozorg Haddad et al., 2008). با استفاده از این مقادیر و رابطه (۲۳)، می‌توان تغییرات ضریب زبری هیزن- ویلیامز برای لوله‌های مختلف شبکه را محاسبه نمود. ضمناً مقادیر پارامترهای  $\beta_1$  و  $\beta_2$  در این شبکه برابر ۱۰ و ۴۵ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۹- پارتوی بدست آمده از الگوریتم MOHBMO در طراحی پویای دو هدفه شبکه دو حلقه‌ای

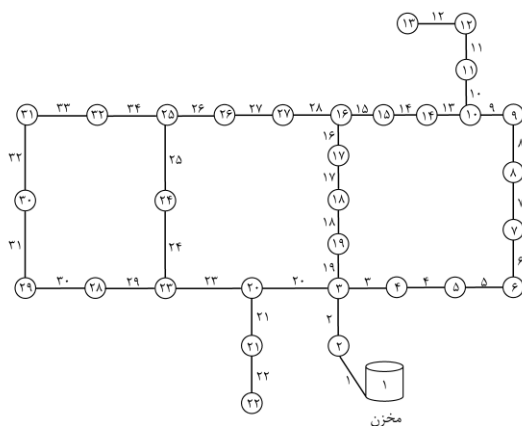
جدول ۶- مقادیر زبری داخلی و نرخ رشد زبری برای قطرهای تجاری شبکه هانوی (Bozorg Haddad et al., 2008)

نرخ رشد زبری	زبری داخلی (mm)	قطر لوله (mm)
۰/۳۳	۰/۳۰	۳۰۴/۸
۰/۴۴	۰/۴۰	۴۰۶/۴
۰/۵۴	۰/۵۰	۵۰۸
۰/۶۵	۰/۵۹	۶۰۹/۶
۰/۸۲	۰/۷۴	۷۶۲
۱/۰۹	۰/۹۹	۱۰۱۶

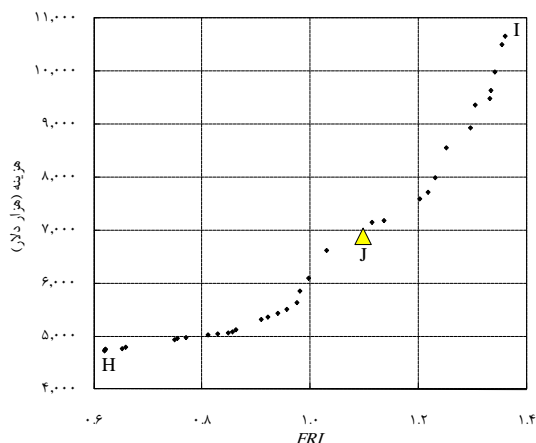
طراحی دو هدفه شبکه آبرسانی هانوی نیز با استفاده از الگوریتم MOHBMO انجام شده و مقادیر پارامترهای به کار رفته در آن پس از انجام آنالیز حساسیت انتخاب شده‌اند. در این قسمت نیز از الگوریتم MOHBMO پارتوی نهایی بدست آمد که در شکل ۱۰-۱



است. به این ترتیب که تحقیقات صورت گرفته بر روی بهینه‌سازی قطر لوله‌های شبکه‌های آبرسانی و همچنین طراحی‌های انجام شده برای یافتن بهترین گزینه‌های ترمیم و نگهداری سیستم، در دو فاز جداگانه انجام شده و تا به حال طراحی این دو فاز به طور همزمان و یکجا صورت نگرفته است.



(الف)



(ب)

### شکل ۱۰- (الف) شماتیک شبکه هانوی (ب) پارتوی الگوریتم MOHBMO در هانوی با روش طراحی پویا

از این رو در تحقیق حاضر با استفاده از روابط ارائه شده در تحقیقات قبلی، تغییرات شبکه در طول دوران بهره‌برداری مدلسازی گردید و سپس با ارائه روشی که طراحی پویای شبکه‌های توزیع آب نامیده شد، طراحی همزمان فازهای طراحی اولیه و ترمیم و نگهداری شبکه مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان داد که طراحی پویای تک هدفه شبکه‌های آبرسانی، چه از نظر کمینه کردن هزینه و چه از نظر بیشینه کردن اطمینان‌پذیری، قادر است طراحی‌های مطلوب‌تری را

ب مشاهده می‌شود. نقاط موجود در دو سر این پارتو نیز، طراحی‌های بدست آمده از طراحی پویای تک هدفه با هر یک از توابع هدف هستند. نقطه H دارای کمترین هزینه برابر ۴,۷۱۴,۴۳۱ دلار و شاخص FRI در این نقطه برابر ۰/۶۲ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که هزینه طراحی پویای شبکه هانوی برای نقطه مذکور، حتی از کمترین هزینه طراحی (بدون عملیات ترمیم و نگهداری) گزارش شده برای این شبکه در تحقیقات گذشته ( Cunha and Sousa, ) معادل ۶,۰۵۶,۰۰۰ دلار نیز کمتر است. به معنای دیگر هزینه طراحی اولیه و ترمیم شبکه با استفاده از روش طراحی پویا، از هزینه طراحی معمولی شبکه هانوی بدون ترمیم و نگهداری نیز کمتر می‌باشد. برای نقطه I نیز مقدار هزینه برابر ۱۰,۶۷۰,۵۳۱ دلار و شاخص FRI معادل ۱/۳۶ می‌باشد. لازم به ذکر است که تمامی نقاط موجود در این پارتو، قیودات مربوط به هر دو تابع هدف را به طور کامل ارضا کرده‌اند.

همانطور که مشاهده می‌شود پارتوی بدست آمده از نظر پراکنندگی و تعداد نقاط موجود در آن از وضعیت قابل قبولی برخوردار است. یادآور می‌شود که مسئله طراحی پویای دو هدفه شبکه هانوی دارای فضای تصمیم بسیار گسترده بوده و از نظر قیودات نیز به شدت مقید است. با این حال پارتوی بدست آمده از پراکنندگی خوب و مناسبی برخوردار است.

در این قسمت نیز با استفاده از روش Young (1993) یکی از نقاط پارتو انتخاب گردید (نقطه J) که با علامت مثلث مشخص شده است. این نقطه با صرف هزینه‌ای در حدود ۱/۵ برابر هزینه نقطه H، به اطمینان‌پذیری حدود ۱/۷ اطمینان‌پذیری آن خواهد رسید. در مقایسه با نقطه I نیز، نقطه J با هزینه‌ای در حدود ۰/۶ هزینه نقطه I می‌تواند ۸۰ درصد اطمینان‌پذیری این نقطه را تامین کند. ضمناً تعداد کل ترمیمات و تعویض‌های صورت گرفته در طراحی نقطه J در طول ۳۰ سال دوره بهره‌برداری در حدود ۴۰ عدد می‌باشد. البته لازم به ذکر است که تمامی قیودات اجرایی توضیح داده شده برای روش طراحی پویا، در این طراحی رعایت شده‌اند.

### ۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر ارائه روشی به منظور طراحی بلند مدت شبکه‌های توزیع آب مد نظر قرار گرفته است. به نظر می‌رسد که تاثیر طراحی‌های صورت گرفته در فاز طراحی اولیه بر روی شرایط بوجود آمده در فاز ترمیم و نگهداری، کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته

- 20- Warm Up
- 21- Two-Loop
- 22- Hanoi

## ۸- مراجع

بزرگ حداد، ا. (۱۳۸۴). "بهینه‌سازی هیدروسیستم‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO)". رساله دکتری، دانشگاه علم و صنعت.

فلاح مهدی‌پور، ا. (۱۳۸۷). "کاربرد روش‌های بهینه‌سازی چندمنظوره فراکاوشی در بهره‌برداری از سیستم‌های چندمخزنه". پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران.

قاجارنیا، ن. (۱۳۸۸). "طراحی پویای چند معیاره شبکه‌های توزیع آب شهری". پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران.

Afshar, M. H. and Mariño, M. A. (2008). "Application of an ant algorithm for layout optimization of tree networks" *Engineering Optimization*, 389(3), pp. 353-369.

Agrawal, M. L., Gupta. R. and Bhawe. P. R. (2007). "Reliability-Based Strengthening and Expansion of Water Distribution Networks" *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 133(6), pp. 531-541.

Alperovits, E. and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution systems." *Water Resources Research*, 13(6), pp. 885-900.

Bozorg haddad, O., Adams, B. J. and Mariño, M. A. (2008). "Optimum rehabilitation strategy of water distribution systems using the HBMO algorithm" *J. Water Supply: Research and Technology*. (151), pp. 337-350.

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), pp. 661-680.

Cunha, M. C. and Sousa, J. (1999) "Water distribution network design optimization: simulated annealing approach." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 125(4), pp. 215-221.

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* (ASCE), 129(3), pp. 210-225.

Fujiwara, O. and Kang, D. B. (1990). "A two-phase decomposition method for optimal design of looped

در مقایسه با روش‌های طراحی قبلی ارائه دهد. به عنوان مثال طراحی پویای شبکه دو حلقه‌ای با تابع هدف کمینه کردن هزینه، با صرف حدود ۷۵ درصد هزینه روش‌های طراحی قبلی قادر است به اطمینان‌پذیری در حدود ۱/۱۲ اطمینان‌پذیری آن‌ها دسترسی یابد. همچنین طراحی با تابع هدف بیشینه کردن هزینه به روش طراحی پویا، با صرف حدود ۲ برابر هزینه روش‌های طراحی قبلی، قادر است به اطمینان‌پذیری معادل ۶/۶ برابر آن دسترسی پیدا کند.

بعلاوه طراحی پویای چند هدفه شبکه‌های توزیع آب می‌تواند محدوده وسیع‌تری از فضای تصمیم را پوشش دهد. نتایج این تحقیق مشخص کرد که روش طراحی پویا در مقایسه با روش‌های قبلی طراحی، قادر به افزایش معنی‌دار سطح اطمینان‌پذیری شبکه خواهد بود. به عبارت دیگر با استفاده از طراحی پویای چند هدفه شبکه‌ها، می‌توان گزینه‌های مختلفی که در عین بهینه و نامغلوب بودن، به طور مناسبی در فضای تصمیم پخش شده‌اند را به تصمیم گیرندگان ارائه داد. ضمناً از جمله محدودیت‌های روش طراحی پویا، می‌توان به عدم در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی تغییرات نیاز و ضریب زبری لوله‌ها اشاره کرد. از این‌رو آزمایش ایده طراحی پویا و ارزیابی عملکرد آن در شرایط واقعی و بر روی یک شبکه احداث شده، مورد نیاز خواهد بود.

## ۷- تشکر

این تحقیق با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تهران انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

## پی نوشت

- 1- Linear Programming
- 2- Non-linear Programming
- 3- Genetic Algorithm
- 4- Simulated Annealing
- 5- Taboo Search
- 6- Shuffled Frog Leaping Algorithm
- 7- Harmonic Search
- 8- Particle Swarm Optimization
- 9- Ant Colony Optimization
- 10- Resiliency
- 11- Network Resiliency
- 12- Non Dominant Sorting Genetic Algorithm
- 13- Stochastic Genetic Algorithm
- 14- Honey-Bee Mating Optimization
- 15- Multi Objective HBMO
- 16- Fuzzy Reliability Index
- 17- Hazen-Williams
- 18- Linning
- 19- Do Nothing

- Ostfeld, A. and Shamir, U. (1996). "Design of optimal reliable multiquality water- supply systems." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 122(5), pp. 322-333.
- Prasad, T. D. and Park, N. S. (2004). "Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 130(1), pp. 73-82.
- Quindry, G. E., Brill, E. D. and Liebman, J. C. (1981). "Optimization of looped water distribution systems." *J. Environmental Engineering* (ASCE), 107(4), pp. 665-679.
- Rossman, L. A. (1993). "EPANET, users manual." *U.S. Environmental Protection Agency*, Cincinnati, Ohio.
- Rowell, W. F. and Barnes, J. W. (1982). "Obtaining the layout of water distribution systems." *J. Hydraulics Division*, (ASCE), 108(1), pp. 137-148.
- Savic, D. A. and Walters, G. A. (1997) "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 123(2), pp. 67-77.
- Shamir, U. and Howard, C. D. (1979). "An Analytic approach to scheduling pipe replacement." *J. American Water Works Association* (AWWA), 71(5), pp. 248-258
- Sharp, W. W. and Walski, T. M. (1988). "Predicting internal roughness in water mains." *J. American Water Works Association* (AWWA), (80), pp. 34-40.
- Suribabu, C. R. and Neelakantan, T. R. (2006). "Design of water distribution networks using particle swarm optimization" *Urban Water*, 3(2), pp. 111-120.
- 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), pp. 81-90.
- 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), pp. 1-17.
- Todini, E. (2000). "Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic Approach." *Urban Water*, 2(3), pp. 115- 122.
- Vasan. A. and Simonovic. S.P. (2010), "Optimization of water distribution network design using differential evolution." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 136(2), pp. 279-287.
- water distribution networks." *Water Resources Research*, 26(4), pp. 539-549.
- Geem, Z. W. (2005). "Optimal cost design of water distribution networks using harmony search." *Engineering Optimization*, 38(3), pp. 259-280.
- Goulter, I. C. and Bouchart, F. (1990). "Reliability constrained pipe networks model." *J. Hydraulic Engineering* (ASCE), 16(2), pp. 221-229.
- Goulter, I. and Coals, A. (1986). "Quantitative approaches to reliability assessment in pipe networks." *J. Transportation Engineering*, (ASCE), 112(3), pp. 287- 301.
- 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), pp. 819-822.
- Halhal, D., Walters, G. A., Ouazar, D. and Savic, D. A. (1997). "Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 123(3), pp. 137-146.
- 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), pp. 1469-1480.
- Kettler, A. and Goulter, I. (1983). "Reliability consideration in the least cost design of looped water distribution networks." *Proceeding of 10th International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulic and Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, Ky., pp. 305-312.
- Kettler, A. J. and Goulter, L. C. (1985). "An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks." *Canadian J. Civil Engineering*, 12(2), pp. 286-293.
- 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), pp. 135-143.
- Mays, L. W. (1996). "Review of reliability analysis of water distribution systems." In Tikle, Goulter, Xu, Wasimi, & Bouchart (Eds.), *Stochastic Hydraulics*, Rotterdam, Balkema, pp. 53-62.
- Murphy, L. J. and Simpson, A. R. (1992). "Genetic algorithm in pipe network optimization." Re. Rep. NR93, Dep. Of Civ. And Envir. Engrg., Univ. of Adelaide, Australia.
- Morgan, D. R. and Goulter, I. C. (1985). "Optimal urban water distribution design." *Water Resources Research*, 21(5), pp. 642-652.

- replacement of water distribution system components." *Proceeding of National Conference of Hydraulics Engineering*, (ASCE), New York, N.Y., pp. 606-611.
- Young, H. P. (1993). "An evolutionary model of bargaining." *J. Economic Theory*, (59), pp. 145-168.
- Xu, C. and Goulter, I. (1999). "Reliability-Based Optimal Design of Water Distribution Networks" *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 125(6), pp. 352-362.
- Walski, T. M. (1986). "Making water system rehabilitation decisions." *Proceeding of Water Forum 86*, (ASCE), New York, N.Y., pp. 474-476.
- Walski, T. M., et al. (1987). "Battle of the network models: Epilogue." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 113(2), pp. 191-203.
- Walski, T. M. (2001). "The wrong paradigm-Why water distribution optimization doesn't work." *J. Water Resources Planning and Management* (ASCE), 127(4), pp. 203-205.
- Woodburn, J., Lansey, K. and Mays, L. W. (1987). "Model for the optimal rehabilitation and