

طراحی اقتصادی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از عملگر مفهومی آستانه پویا در الگوریتم ژنتیک (GA-DTO)

علی حقیقی

استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

اهواز، صندوق پستی 135
a.haghighi@scu.ac.ir

چکیده - تحقیق حاضر به توسعه یک روش بهینه‌سازی فراکاوشی بر پایه مفهوم آستانه پویا برای طراحی شبکه‌های آبرسانی می‌پردازد. نخست مدل برنامه‌ریزی مسأله شامل تعریف تابع هزینه، قیود و اتصال مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی به الگوریتم بهینه‌سازی توسعه داده می‌شود. سپس از یک ساختار بسیار ساده الگوریتم ژنتیک باینری برای حل مسأله کمک گرفته شده که در آن از مفهوم آستانه پویا به عنوان یکی از عملگرهای بهینه‌سازی بهره گرفته می‌شود. توسط این عملگر در فرایند بهینه‌سازی، فضای تصمیم‌گیری مسأله بصورت تدریجی و منطبق با تاریخچه جستجو فشرده و کوچک می‌شود و به این ترتیب شانس رسیدن به پاسخ بهینه مطلق در آستانه‌های مختلف افزایش می‌یابد. قابلیت روش با حل دو مثال مرجع مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی سبب افزایش کارایی فرایند جستجو و امید دست‌یابی به پاسخ بهینه مطلق در مسأله طراحی شبکه‌های آبرسانی می‌شود.

کلیدواژگان: شبکه‌های آبرسانی، طراحی اقتصادی، آستانه پویا، الگوریتم ژنتیک.

1- مقدمه

و بهره‌برداری تأکید دارند، در برخی از کشورها از جمله ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله می‌توان به موضوع بهینه‌سازی اقتصادی شبکه‌های آبرسانی با استفاده از روش‌های ریاضی و الگوریتم‌های هوشمند اشاره نمود که اگرچه در سه دهه اخیر علاقه و توجه محققان بسیاری را به خود جلب نموده و کارهای زیادی در این زمینه ارائه شده، اما کمتر توسط مهندسان طراح و شرکت‌های آب و فاضلاب داخلی به عنوان یک ضرورت پیگیری می‌شود. در حال حاضر تنها ملاک طراحی و

شبکه‌های آبرسانی به منظور تأمین آب شرب مورد نیاز مردم یک شهر، روستا و یا یک مرکز صنعتی طرح و اجرا می‌شوند. در کشورهای مختلف جهان ضوابط و معیارهای گوناگونی برای تحلیل و طراحی سیستم‌های آبرسانی توصیه و یا بصورت قانون وضع شده است. بخشی از این ضوابط که مربوط به اصول هیدرولیکی حاکم بر مجاری تحت فشار می‌شود، جهان شمول هستند. اما سایر ضوابط طراحی به ویژه آنجا که به اقتصاد پروژه در زمان ساخت

ساده‌سازی‌ها در تعریف مسأله به حل آن بپردازند. (Dantzig 1963; Gupta 1969; Gupta and Hassan 1972; Alperovits and Shamir 1977; Quindry et al. 1981; Kessler and Shamir 1989; and Bhavé and Sonak 1992). گروهی دیگر از محققان به استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی در ریاضیات (که عموماً بر پایه محاسبه گرادیانهای تابع هزینه توسعه یافته اند) روی آوردند. در این تحقیقات فضای تصمیم‌گیری مسأله از حالت گسسته به پیوسته تبدیل می‌شود بطوری که مدل بهینه‌سازی در یک بازه حقیقی مشخص (بین حداقل و حداکثر قطر تجاری) به تعیین قطر لوله‌ها می‌پردازد. روش‌های ریاضی غیرخطی به سادگی در دام اکسترم‌های محلی گرفتار می‌شوند و مقدار قطرهای بهینه نهایی نیز می‌بایست به نزدیک‌ترین قطر تجاری گرد شوند. این موضوع خود سبب خارج شدن پاسخ نهایی از حالت بهینه می‌شود (Watanatada 1973; Morgan and Goulter 1985; Chiplunkar et al. 1986; Walski 1987; Lansey and Mays 1989; Taher and Labadie 1996; and Samani and Naeeni 1996). همچنین محققانی نیز با استفاده از روش‌های گسسته در ریاضیات از جمله برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح⁴ (ILP) با پذیرش مقداری ساده‌سازی و شناسایی مسیرهای بحرانی تأمین آب هر گره در شبکه، موفق شدند که مشکل گسسته بودن فضای تصمیم‌گیری مسأله را مرتفع ساخته و با تبدیل آن از حالت غیرخطی به خطی به پاسخ‌های نزدیک به بهینه دست یابند (Samani and Mottaghi 2006; Samani and Zangeneh 2010). در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که با وجود محدودیت‌ها و نقاط ضعف روش‌های ریاضی در مسأله حاضر، این روش‌ها هنوز کنار گذاشته نشده‌اند و تلاش برای توسعه و سازگار نمودن آنها با مسأله طراحی شبکه‌های آبرسانی ادامه دارد. علت اصلی این موضوع را می‌توان به محاسن ویژه این روش‌ها از جمله منطق ریاضی حاکم بر آنها، قابلیت اثبات و تفسیر نتایج و

ارزیابی طرح‌های آبرسانی در کشور، نشریه 3-117 سازمان برنامه و بودجه است که در آن نیز به اهمیت و ارائه راهکاری برای طراحی بهینه شبکه‌ها پرداخته نشده است.

منظور از بهینه‌سازی یک شبکه آبرسانی انتخاب قطر لوله‌ها، ارتفاع مخازن و تعداد و مشخصات ایستگاه‌های پمپاژ در آن است، به نحوی که نخست کلیه ضوابط هیدرولیکی و فنی مورد نیاز تأمین شوند و دوم هزینه احداث شبکه به کمترین مقدار ممکن تقلیل یابد.

تاریخچه تحقیقات انجام شده در خصوص بهینه‌سازی سیستم‌های آبرسانی دست کم در سه دهه اخیر بسیار غنی و حاوی پیشرفت‌های چشم‌گیری بوده است. این پیشرفت‌ها هم پا با توسعه رایانه‌ها تداوم داشته و پس از پیدایش و تکامل الگوریتم‌های فراکاوشی که عمده‌تاً الهام گرفته از طبیعت هستند، وارد مرحله تازه‌ای گردید. بطور کلی مسأله بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی، یک برنامه‌ریزی غیرخطی¹ (NLP)، بزرگ مقیاس، مقید، گسسته و چند قله‌ای² می‌باشد که مورد آخر سبب بروز اکسترم‌های محلی فراوان در بهینه‌سازی می‌شود. کلیه این موارد، مسأله طراحی شبکه‌های آبرسانی را پیچیده و از طرفی جذاب برای محققان ساخته است.

در ابتدا محققان تلاش داشتند تا با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی (LP)³ و غیرخطی به بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی بپردازند. اگرچه این روش‌ها برای شبکه‌های شاخه‌ای نتایج موفقیت آمیزی به دنبال داشتند، اما در خصوص سیستم‌های حلقوی چندان کارساز نبودند. محدودیت بزرگ پیش روی روش‌های ریاضی مربوط به فضای گسسته مسأله و خطر به دام افتادن حل در اکسترم‌های محلی می‌باشد. محققان بسیاری کوشیدند تا با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و انجام برخی

1. Non-Linear Programming

2. Multi-modal

3. Linear Programming

همچنین سرعت بالای حل مرتبط دانست.

در سال‌های اخیر توسعه و کاربرد روش‌های کاوشی و فراکاوشی بطور روزافزون در حل مسائل پیچیده مهندسی دیده می‌شود. این روش‌ها که عمدتاً الهام گرفته از طبیعت هستند با اعمال برخی عملگرهای تصادفی می‌توانند از دام اکسترمم‌های محلی بگریزند، لذا عمدتاً استوکستیک¹ هستند. بسیاری از این روش‌ها جمعیت‌گرا بوده، به این معنی که روند بهینه‌سازی نه با یک جواب، بلکه با تعداد زیادی جواب اولیه شروع به تکامل می‌نماید و به این واسطه تا حدی می‌توان به جستجوی کل دامنه حل اطمینان حاصل نمود. همچنین این روش‌ها فارغ از محاسبه مشتق‌های مرتبه اول و دوم تابع هزینه عمل کرده و با مسأله پیش‌رو بصورت یک جعبه سیاه برخورد می‌کنند. به عبارتی الگوریتم بهینه‌سازی تنها بر اساس متغیرهای ورودی و مقدار هزینه متناظر با آن، مستقل از شکل و مشخصات ریاضی تابع هزینه و قیود، عمل می‌کند. این مزیت سبب می‌شود که روش‌های فراکاوشی موفق‌تر از روش‌های ریاضی قادر به حل مسائل غیرخطی و گسسته باشند. با این حال الگوریتم‌های فراکاوشی برای شناخت فضای تصمیم‌گیری و توپولوژی مسأله به انجام تکرارهای زیادی نیازمندند که این مسأله استفاده از آنها را به لحاظ زمانی و محاسباتی پرهزینه می‌سازد. همچنین ماهیت تصادفی این روش‌ها نیز خود عامل دیگری در کاهش راندمان بهینه‌سازی محسوب می‌شود. از دیگر محدودیت‌های روش‌های فراکاوشی نامقید بودن آنهاست. مشکل دیگری که درخصوص بیشتر روش‌های فراکاوشی به چشم می‌خورد عدم قابل اثبات بودن نتایج و ضعف مبنای ریاضی در عملکرد آنهاست. این موضوع سبب می‌شود که هیچ‌گاه نتوان در خصوص نتایج بدست آمده نظر قطعی داد. لذا کاربرد روش‌های فراکاوشی تنها در خصوص مسائل پیچیده و زمانی که امکان استفاده

موفقیت آمیز از روش‌های ریاضی وجود نداشته باشد قابل توصیه است. از محبوب‌ترین روش‌های فراکاوشی، الگوریتم‌های ژنتیک هستند که در خصوص بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی نیز به وفور مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نتایج رضایت بخشی از آنها در حل مسائل با مقیاس کوچک تا متوسط بدست آمده است (Simpson et al. 1994; Savic and Walters 1997; Vairavamoorthy al. 2005; Reza et al. and Ali 2000, 2005; Wu and Walski al. 2008; Afshar and Marino 2005; Kadu et al. 2008). از دیگر الگوریتم‌های موفق در حل مسائل گسسته روش بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها² می‌باشد. این روش با الهام از رفتار تعاون اجتماعی حشرات توسعه یافته است که به واسطه آن یک کلونی از مورچه‌ها قادر هستند با انتخاب و بهبود مسیرهای مختلف، به کوتاه‌ترین مسیر منبع غذا تا آشیانه خود دست یابند. در واقع این روش برای مسائلی که در ذات خود گسسته هستند همچون طراحی شبکه‌های آبرسانی، بسیار موفق عمل می‌کند (Maier et al. 2003; Zecchin et al. 2006; Vasan and Simonovic 2010; Zecchin et al. 2005). از دیگر الگوریتم‌های مطرح فراکاوشی می‌توان به روش شبیه‌سازی بازیخت فلزات³ اشاره نمود. ایده اصلی این روش از عملیات سرد کردن تدریجی فلزات مذاب برای رسیدن به استحکام بیشتر گرفته شده است. روش شبیه‌سازی بازیخت فلزات برای مسائل پیوسته بسیار خوب عمل کرده و در خصوص شبکه‌های آبرسانی نیز نتایج رضایت بخشی حاصل نموده است (Cunha and Sousa 1999; Tospornsampan et al. 2007). روش‌های بسیار دیگری را نیز می‌توان به این لیست اضافه نمود که پرداختن به کلیه آنها خارج از حوصله این نوشتار بوده و مجال وسیعی را می‌طلبد. با این حال عناوین آنها ذکر می‌شود. به عنوان مثال روش بهینه‌سازی جمعیت ذرات

2. Ant Colony Optimization
3. Simulated Annealing

1. Stochastic

کلی یک الگوریتم ژنتیک (GA) باینری⁶ استاندارد پذیرفته می‌شود. سپس مفهوم بهینه‌سازی آستانه پویا⁷ (DTO) در کاهش تدریجی و سازگار شونده فضای تصمیم‌گیری⁸ (DS)، به عنوان یک عملگر به الگوریتم ژنتیک افزوده می‌شود. قابلیت و نتایج حاصل از این ترکیب جدید در قالب دو مثال مرجع برگرفته از مقالات قبلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

2- معادلات هیدرولیکی حاکم و طرح مسأله

با فرض برقراری جریان ماندگار در شبکه‌های آبرسانی، معادلات حاکم عبارتند از معادلات خطی پیوستگی در گره‌ها و معادلات غیرخطی انرژی در حلقه‌ها. همچنین در طراحی سیستم‌های آبرسانی قیود فنی دیگری نیز وجود دارند که از رایج‌ترین آنها می‌توان به حفظ فشار در گره‌ها و سرعت در لوله‌ها در یک بازه از پیش تعیین شده (بر اساس آیین‌نامه‌ها و مشخصات لوله‌های مورد استفاده) نام برد. همچنین در کاربردهای پیشرفته‌تر مباحثی همچون تعیین مشخصات پمپ‌ها، موقعیت مخازن و یا افزایش سطح اعتمادپذیری توزیع دبی در شبکه نیز ممکن است به اهداف و قیود بهینه‌سازی افزوده شود. به بیان ریاضی، مسأله بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی را می‌توان بصورت زیر تعریف کرد. شیوه نوشتاری برنامه‌ریزی زیر برگرفته از مقاله Kadu et al. (2008) می‌باشد که به آن قید سرعت حداقل نیز افزوده شده است.

$$\text{Minimize } f(D_1, \dots, D_x) = \sum u(D_x) \times L_x; \quad x = 1, \dots, X \quad (1)$$

Subject to constraints:

$$\sum_{(x \text{ incident on } j)} Q_x + q_j = 0; \quad j = 1, \dots, (M - S) \quad (2)$$

$$\sum_{(x \in y)} h_x + \sum E_p = 0; \quad y = 1, \dots, Y \quad (3)$$

¹ PSO (Suribabu and Neelakantana 2006). روش جستجوی هارمونی ² HS (Geem 2006). روش جهش ناآرام غورباکه‌ها ³ SFL (Eusuff and Lansey 2003). روش تکامل ترکیبی ناآرام ⁴ SCE (Liong and Atiquzzaman 2004) از دیگر روش‌های موفق در بهینه‌یابی شبکه‌های آبرسانی محسوب می‌شوند.

گروهی از محققان برای استفاده از قابلیت‌های هر دو دسته روش در بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی و به ویژه در مسائل بزرگ مقیاس به توسعه روش‌های هیبریدی ریاضی-فراکاوشی روی آوردند. در این روش‌ها مسأله طراحی شبکه‌های آبرسانی به دو زیر مسأله تفکیک می‌شود که یکی از آنها به سادگی و با سرعت بالا با استفاده از روش‌های ریاضی (معمولاً برنامه‌ریزی خطی) حل شده و سپس به عنوان مقدار معلوم در زیر مسأله دوم وارد می‌شود. تعداد دیگری از متغیرهای تصمیم‌گیری نیز در زیر مسأله دوم توسط روش‌های فراکاوشی بهینه‌یابی می‌شوند. از نمونه کارهای موفقیت‌آمیزی که در سال‌های اخیر در این دسته ارائه شده می‌توان به تحقیقات Krapivka and Ostfeld (2009) و Cisty (2010) با تلفیق الگوریتم ژنتیک GA و برنامه‌ریزی خطی LP و همچنین کار Haghghi et al. (2011) با ترکیب GA و برنامه‌ریزی خطی اعداد صحیح ILP اشاره کرد. روش‌های هیبریدی محاسن هر دو روش ریاضی و فراکاوشی را دارند و از نظر تعداد تکرار و راندمان حل در حد وسط این دو روش قرار می‌گیرند. با این حال ایراد بزرگی که به روش‌های هیبریدی وارد است پیچیدگی مدل‌سازی و پیاده‌سازی رایانه‌ای آنها است.

تحقیق حاضر به معرفی یک الگوریتم ساده بر مبنای روش‌های فراکاوشی⁵ می‌پردازد. به این منظور ساختار

1. Particle Swarm Optimization
2. Harmony Search
3. Shuffled Frog Leaping
4. Shuffled Complex Evolution
5. Metaheuristic

6. Binary Genetic Algorithm
7. Dynamic Threshold Optimization
8. Decision Space

توجه به این که f_D بطور ضمنی تابعی از مشخصات جریان و لوله از جمله دبی و قطر محاسبه می‌شود (که هر دو در طراحی مجهول هستند)، استفاده از رابطه تجربی هیزن- ویلیامز رایج‌تر است. این رابطه در طراحی بسیاری از پروژه‌های آبرسانی در سراسر دنیا مورد استفاده قرار گرفته و در شرایط مختلف و برای انواع لوله‌ها نتایج مطلوبی حاصل نموده است. شکل معمول رابطه هیزن- ویلیامز با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$h = \frac{\omega L Q^\alpha}{C_{HW}^\alpha D^\beta} \quad (8)$$

در این رابطه ω ضریب ثابت تبدیل عددی رابطه وابسته به سیستم مورد نظر، C_{HW} ضریب هیزن- ویلیامز و α و β ضرایب توانی رابطه می‌باشند. ضرایب ثابت رابطه هیزن ویلیامز توسط محققان مختلف و بصورت تجربی تعیین شده است. برای نمونه (Savic and Walters 1997) حداقل و حداکثر مقدار ω را به ترتیب برابر 10.5088 (برای $\alpha = 1.85$, $\beta = 4.87$) و 10.9031 (برای $\alpha = 1.852$, $\beta = 4.87$) گزارش نمودند. همچنین در مدل شبیه‌سازی EPANET مقدار ω برابر 10.667 (برای $\alpha = 1.852$, $\beta = 4.87$) در نظر گرفته شده است.

3- اعمال قیود بهینه‌سازی

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد، روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق ساختار جدیدی از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در روش‌های فراکاوشی می‌بایست قیود مسأله بطور مناسب در تابع هدف اعمال شوند. تابع هزینه اصلی در این تحقیق معادله (1) است و معادلات (2) و (3) معرف قیود هیدرولیکی می‌باشند که توسط مدل شبیه‌سازی EPANET بطور خودکار تأمین می‌شوند. قید لزوم استفاده از قطرهای تجاری (معادله 6) نیز به سادگی توسط روش‌های فراکاوشی از جمله الگوریتم ژنتیک قابل تأمین است. تنها قیود باقی‌مانده، نامعادلات (4) و (5) مربوط به فشار و سرعت جریان در سیستم می‌باشند. یک

$$H_j \geq H_j^{\min}; \quad j = 1, \dots, (M - S) \quad (4)$$

$$V_x \geq V_x^{\min}; \quad x = 1, \dots, X \quad (5)$$

$$D_x \in \overline{CD} = \{D_{\min}, \dots, D_{\max}\}; \quad x = 1, \dots, X \quad (6)$$

در این معادلات f تابع هزینه، $u(D_x)$ هزینه واحد طول لوله x که شامل قطر D می‌شود (منظور هزینه کل خرید، حمل و کارگذاری یک متر لوله به قطر D است)، L_x طول لوله x ، تعداد کل لوله‌ها در شبکه، Q_x دبی جریان در لوله x ، q_j مصرف در گره j ، M تعداد کل گره‌ها در شبکه، S تعداد نقاط تأمین دبی (مخازن) در شبکه، Y تعداد حلقه‌ها در شبکه، h_x افت انرژی در لوله x ، E_p انرژی افزوده شده به آب توسط پمپ، H_j هد فشار در گره j ، $H_j^{\min}$ حداقل فشار مجاز در گره j ، V_x سرعت جریان در لوله x ، $V_x^{\min}$ حداقل سرعت مجاز در لوله x ، $\overline{CD}$ لیست قطرهای تجاری قابل استفاده در طراحی، $D_{\min}$ و $D_{\max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر قطر تجاری می‌باشند.

1-2- روش محاسبه افت انرژی

یکی از قسمت‌های مهم در معادلات فوق نحوه محاسبه افت انرژی در لوله‌های شبکه است. برای این منظور معمولاً از دو روش استفاده می‌شود که عبارتند از رابطه تحلیلی دارسی- وایسباخ¹ و رابطه تجربی هیزن- ویلیامز². رابطه دارسی- وایسباخ در سیستم متریک عبارت عبارت است از:

$$h = f_D \frac{8L}{g\pi^2} \frac{Q^2}{D^5} \quad (7)$$

در این رابطه، f_D ضریب افت دارسی- وایسباخ می‌باشد که با حل معادله کلبروک- وایت³ و یا استفاده از دیاگرام مودی⁴ بصورت تابعی از زبری نسبی خط لوله (ε/D) و عدد رینولدز ($Re = VD/\nu$) بدست می‌آید. در این روابط ε زبری جداره لوله و ν لزجت سینماتیک می‌باشد. با

1. Darcy-Weisbach
2. Hazen-Williams
3. Colebrook-white
4. Moody diagram

تصمیم‌گیری یک بعدی و چند قله‌ای مطابق شکل 1 در نظر گرفته شود. تابع هدف $f(x)$ شامل چندین بیشینه محلی و یک بیشینه مطلق است. عملکرد DTO به این گونه است که طی فرایند بهینه‌سازی (در اینجا بیشینه‌سازی) فضای تصمیم‌گیری را با تعریف آستانه‌های متوالی از پایین محدود می‌کند. در واقع با این روش به جای آن که فضای تصمیم‌گیری توسط محدود ساختن حدود متغیرهای تصمیم‌گیری از کناره‌ها فشرده شود، از طریق محدود ساختن فضای جستجو از پایین فشرده می‌شود. لذا در هر آستانه ضمن آنکه به متغیرها اجازه حرکت در کل فضای تصمیم‌گیری داده می‌شود، اما کلیه پاسخ‌های تابع هدف از مقدار آستانه تعریف شده بیشتر خواهند بود. از این منظر هر آستانه مانند یک آینه یا مرز انعکاسی عمل کرده و اجازه نفوذ بهینه‌سازی به مقادیر کمتر از خود را نمی‌دهد (البته در خصوص مسائل کمینه‌سازی این مسئله برعکس است و آستانه از بالا فضای جستجو را فشرده می‌سازد). در واقع در روش DTO روند بهینه‌سازی به چند مرحله متوالی تقسیم می‌شود. پاسخ بهینه یافته شده در انتهای هر مرحله، که ممکن است یک بهینه محلی باشد، به عنوان آستانه جدید در مرحله بعد تعریف می‌شود (به عنوان مثال T_0 در شکل 1). یافتن پاسخ بهینه مطلق در فضای تصمیم‌گیری فشرده شده بسیار ساده‌تر است چراکه بسیاری از پاسخ‌های محلی با استفاده از آستانه بدست آمده از مرحله قبل فیلتر شده و کیفیت جستجو را خراب نمی‌کنند.

از آنجا که DTO یک روش هندسی است، لذا کاملاً مستقل از الگوریتم بهینه‌سازی بوده و با هر روش فراکاوشی قابل تلفیق است. در واقع DTO خود یک روش بهینه‌سازی نیست بلکه عملکردی است که می‌تواند فرایند بهینه‌سازی را تقویت نموده و به سمت پاسخ مطلوب هدایت کند.

روش معمول برای اعمال این قیود استفاده از توابع جریمه و سپس اصلاح تابع هزینه بصورت زیر است:

$$f(D_1, \dots, D_x) = \sum_{x=1}^X u(D_x) \times L_x + A \times \sum_{j=1}^M \phi_j + B \times \sum_{x=1}^X \phi_x \quad (9)$$

در این رابطه ϕ_j ترم تعدی از فشار مجاز در گره j و ϕ_x ترم تعدی از سرعت مجاز در لوله x می‌باشد. همچنین ضرایب A و B به ترتیب جریمه تجاوز از فشار و سرعت مجاز در شبکه هستند. در این تحقیق برای هم بعدسازی توابع جریمه با تابع هزینه، ضرایب A و B برحسب درصدی از هزینه شبکه (تابع f) در نظر گرفته می‌شوند (به عنوان مثال 20%). در واقع می‌توان جریمه‌ها را به این صورت تفسیر نمود که در اثر تجاوز از فشارها و سرعت‌های مجاز می‌بایست هزینه مازادی برای جبران آنها به شبکه اضافه کرد. ترم‌های ϕ_j و ϕ_x نیز با استفاده از روابط زیر بدست می‌آیند:

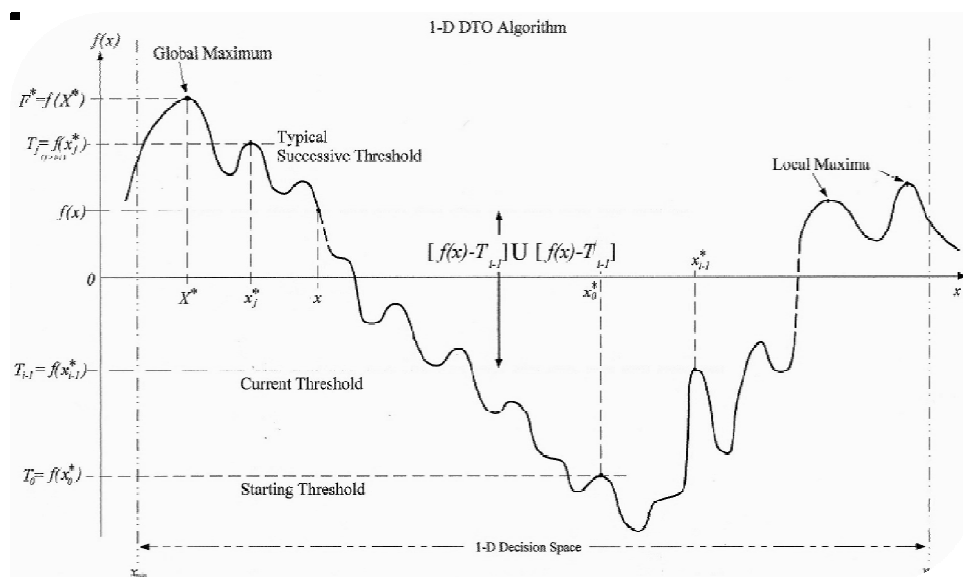
$$\phi_j = \begin{cases} (H_j^{\min} - H_j) & H_j < H_j^{\min} \\ 0 & H_j \geq H_j^{\min} \end{cases} \quad j = 1, \dots, M \quad (10)$$

$$\phi_x = \begin{cases} (V_x^{\min} - V_x) & V_x < V_x^{\min} \\ 0 & V_x \geq V_x^{\min} \end{cases} \quad x = 1, \dots, X \quad (11)$$

در حین بهینه‌سازی، پاسخ‌هایی امکان‌پذیر و قابل قبول تلقی می‌شوند که مقادیر ϕ_j و ϕ_x برای همه گره‌ها و همه لوله‌های شبکه برابر صفر شود و در واقع هیچ جریمه‌ای به سیستم تحمیل نشود.

4- آستانه پویا در بهینه‌سازی

مفهوم آستانه پویا (DTO) در بهینه‌سازی نخستین بار توسط Formato (2012) مطرح شد و یا دست کم از جستجوی‌های نگارنده چنین بر می‌آید. مفهوم DTO بسیار ساده و در عین حال مؤثر در هدایت یک الگوریتم بهینه‌سازی به سوی پاسخ بهینه مطلق می‌باشد. برای معرفی روش، یک مسئله بهینه‌سازی با یک فضای



شکل 1 مفهوم آستانه در DTO در اکسترم‌های محلی متوالی (Formato 2012)

سوم، یک مقدار کمینه برای تابع هدف f_{min} بدون نیاز به متغیرهای تصمیم‌گیری آن.

مقدار f_{min} در شروع بهینه‌سازی می‌تواند بر اساس قضاوت مهندسی و شناخت نسبی کاربر از توپولوژی مسأله (پس از چند اجرای اولیه) انتخاب شود و یا اساساً در شروع کار از آن صرف‌نظر شود. شایان ذکر است که در فرایند $OPT[...]$ می‌توان از هر روش کاوشی و فراکاوشی، ریاضی و یا هیبریدی بهره گرفت. تنها لازم است که الگوریتم بهینه‌سازی پذیرفته شده قادر به بهینه‌یابی تابع $f(\vec{x})$ باشد. برای بکارگیری روش DTO، بهینه‌سازی مسأله در چند مرحله متوالی صورت می‌گیرد. در ابتدا DTO بر روی تابع هدف $f(\vec{x})$ بدون هیچ گونه آستانه‌ای و یا با فرض $T_0 = f_{min}$ اعمال می‌شود (مرحله $k = 0$). سپس از نتایج حل $OPT[...]$ برای تعریف آستانه شروع استفاده می‌شود که طی بهینه‌سازی در مراحل بعدی، این آستانه به روزرسانی خواهد شد. برای این منظور از تابع کمکی زیر در هر مرحله جدید k بهره گرفته می‌شود:

$$g(\vec{x}) = [f(\vec{x}) - T_{k-1}] \times U[f(\vec{x}) - T_{k-1}] + T_{k-1} \quad (12)$$

در ادامه الگوریتم پیاده سازی DTO بصورت عمومی برای استفاده در هر روش بهینه‌سازی تشریح می‌شود. اگرچه این توضیحات برگرفته از مقاله مرجع (Formato 2012) برای مسائل بهینه‌سازی ارائه شده و در این تحقیق بازگو می‌شوند، اما نیاز به توضیح نیست که در مسائل کمینه‌سازی نیز قابل اعمال هستند، چرا که $\max: f(x) = \min: -f(x)$. در قسمت بعد اصلاحات مورد نیاز برای تلفیق DTO در الگوریتم ژنتیک برای کمینه ساختن هزینه شبکه‌های آبرسانی ارائه می‌شود.

1-4- الگوریتم روش DTO

در نظر گرفته شود که نوشتار $OPT[f(\vec{x}), \vec{x}^*, f^*, f_{min}]$ معرف یک بهینه‌سازی مطلق باشد که در هر مرحله این موارد را باز می‌گرداند:

نخست، یک بردار N_d بعدی متغیرهای تصمیم‌گیری $\vec{x}^*$ به عنوان یک پاسخ بهینه (بهینه محلی یا مطلق) برای تابع هدف $f(\vec{x})$

دوم، مقدار برازندگی¹ تابع هدف در پاسخ بهینه f^* و

1. Fitness

مطلق افزایش می‌یابد.

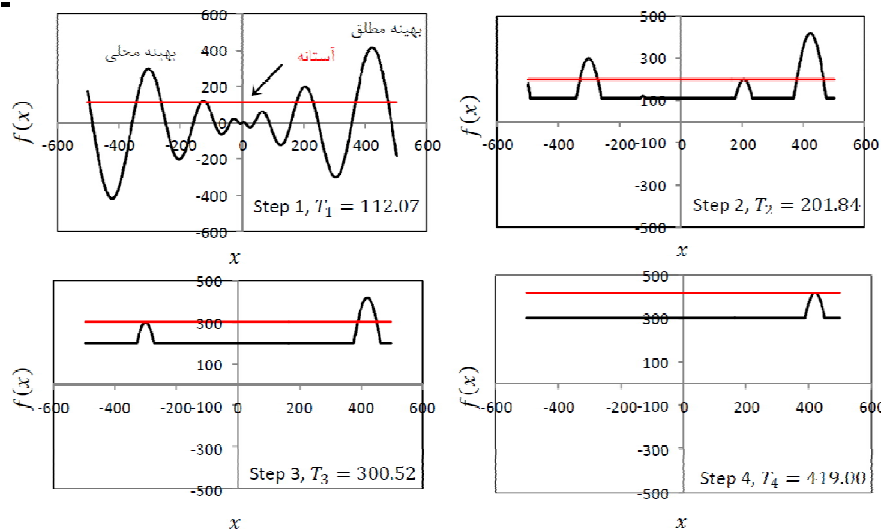
5- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک از رایج‌ترین و البته موفق‌ترین روش‌های فراکاوشی بکارگرفته شده برای طراحی سیستم‌های آبرسانی محسوب می‌شوند. با این حال با توجه به تصادفی بودن فرایند حل و حجم بالای محاسبات در این الگوریتم‌ها، کاربرد آنها در خصوص مسائل بزرگ مقیاس پر هزینه بوده و امکان اثبات نتایج حاصل از آنها دشوار است. همچنین برای کسب اطمینان نسبی از نتایج روش، اولاً می‌بایست با انجام تحلیل حساسیت‌های اولیه پارامترهای الگوریتم واسنجی شوند و ثانیاً لازم است تا بهینه‌سازی چند بار تکرار شود. این موارد خود حجم عملیات بهینه‌سازی را بطور قابل توجهی افزایش می‌دهند. لذا در سال‌های اخیر تلاش زیادی برای ارتقای اعتمادپذیری و بالا بردن راندمان الگوریتم‌های ژنتیک صورت گرفته است. در این تحقیق هدف استفاده از قابلیت‌های روش DTO و بکارگیری آن به عنوان یک عملگر تکمیلی در الگوریتم ژنتیک است.

که در آن T_{k-1} مقدار آستانه بدست آمده از مرحله قبل $(k-1)$ بهینه‌سازی و $U[\dots]$ تابع پله‌ای است که مقادیر درون کروشه را به شکل زیر باز می‌گرداند:

$$U(Z) = \begin{cases} 1 & Z \geq 0 \\ 0 & Z < 0 \end{cases} \quad (13)$$

لذا در مرحله k از بهینه‌سازی (بهینه‌سازی)، برای کلیه $f(\vec{x}) \geq T_{k-1}$ خواهیم داشت $g(\vec{x}) = f(\vec{x})$ و برای $f(\vec{x}) < T_{k-1}$ خواهیم داشت $g(\vec{x}) = T_{k-1}$ و بر این اساس طی بهینه‌سازی‌های متوالی، DTO فضای جستجو را فشرده و فشرده‌تر می‌سازد و این رویه تا تأمین یک شرایط توقف مطلوب که توسط کاربر تعیین می‌شود ادامه می‌یابد. در شکل (1) تعابیر استفاده شده در این نوشتار و نحوه بکارگیری و عملکرد DTO نشان داده شده است. برای تشریح بیشتر روند کار، یک مسأله یک بعدی چند پاسخ (تابع یک بعدی Schwefel) نیز در این تحقیق با استفاده از روش DTO بهینه‌سازی شده است. نتایج آن برای نشان دادن نحوه تغییرات فضای تصمیم‌گیری مسأله طی چند مرحله اعمال آستانه‌های مختلف در شکل 2 ارائه می‌شود. همان طور که قابل ملاحظه است با ارتقای گام به گام خط برش آستانه تعداد اکسترم‌های محلی بیشتری از دامنه جستجو حذف شده و شانس رسیدن به پاسخ بهینه



شکل 2 روند فشرده‌سازی فضای جستجوی تابع Schwefel ($f(x) = x \sin \sqrt{|x|}$)

برای بهتر نشان دادن کارایی DTO و سهم آن در ارتقای بهینه‌سازی، یک قالب بسیار ساده و اولیه از الگوریتم ژنتیک باینری برگرفته از مرجع Haupt and Haupt (2004) در نظر گرفته می‌شود و سپس مدل مفهومی DTO در ساختار آن گنجانده می‌شود.

یک الگوریتم ژنتیک مانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی با معرفی پارامترهای تصمیم‌گیری و تابع هدف شروع به کار می‌نماید و خاتمه آن نیز با کنترل یک شرط همگرایی مناسب همراه است. در الگوریتم ژنتیک، متغیرهای تصمیم‌گیری با تعدادی ژن¹ تعریف می‌شوند و به مجموعه ژن‌ها برای کلیه متغیرهای مسأله کروموزوم² گفته می‌شود. جدول 1 یک نمونه کروموزوم طراحی برای یک شبکه آبرسانی 8 لوله‌ای را نشان می‌دهد که در آن هر قطر با سه بیت ($N_b = 3$) نشان داده شده است. این بدان معناست که می‌توان به هر قطر لوله $2^3 = 8$ مقدار مختلف اختصاص داد که در اینجا این مقادیر از یک لیست تجاری انتخاب می‌شوند. بدیهی است که مثلاً اگر تعداد قطرهای تجاری 16 باشد لازم است که هر قطر در کروموزوم طراحی با دست کم چهار بیت $2^4 = 16$ نمایش داده شود. هر شماره قطر که بصورت باینری در مبنای دو تعیین شده، به یک عدد صحیح در بازه $[1, 2^{N_b}]$ کدبرداری شده و معین می‌سازد که کدام قطر تجاری از میان لیست داده شده برای هر لوله انتخاب شود. به عنوان مثال بر اساس کروموزوم شکل 3، به لوله شماره 1 قطر تجاری شماره 7 و به لوله شماره 8 قطر تجاری شماره 5 اختصاص می‌یابد.

الگوریتم ژنتیک طی یک روند تکامل تدریجی و تصادفی با تولید یک جمعیت اولیه شروع به بهینه‌سازی می‌کند. منظور از جمعیت در الگوریتم ژنتیک تعداد مشخصی (معمولاً زیاد) کروموزوم است که طی روند بهینه‌سازی به مناسب‌ترین طرح همگرا می‌شوند. برای هر کروموزوم در

جمعیت اولیه، هزینه ساخت متناظر با فراخوانی مدل‌های هیدرولیکی تشریح شده و تابع هزینه محاسبه می‌شود. در واقع برای هر کروموزوم مدل شبیه ساز هیدرولیکی EPANET اجرا شده و شبکه تحلیل می‌شود. سپس بر اساس سرعت‌ها و فشارهای بدست آمده جریمه‌ها از روابط (10) و (11) محاسبه می‌شوند. این ضرایب در رابطه (9) اعمال شده و در کنار هزینه ساخت شبکه، مقدار کلی تابع هزینه تعیین می‌شود. پس از آنکه این مهم برای کلیه کروموزوم‌ها انجام شد، آنگاه تعدادی از بهترین کروموزوم‌ها (کروموزوم‌های خوب که در اینجا نیمی از جمعیت در نظر گرفته می‌شوند) بر اساس حداقل هزینه مرتب‌سازی شده و با اعمال یک سیاست مناسب (روش انتخاب وزنی در اینجا) والدین دو به دو انتخاب می‌شوند. پس از آن عملگری به نام تبادل ژنی برای تکامل طبیعی در جمعیت موجود اعمال می‌شود.

این عملگر به این ترتیب عمل می‌کند که بین هر جفت والدین انتخاب شده یک تزویج صورت داده که حاصل آن دو فرزند خواهد بود. در این تحقیق عمل تزویج با استفاده از روش تک نقطه‌ای تقاطع³ صورت می‌گیرد. به این ترتیب که یک موقعیت ژن باینری بصورت تصادفی بین کروموزوم‌های والدین انتخاب می‌شود و والدین، ژنهای خود را حول این نقطه تعویض می‌نمایند. در نهایت به جمعیت حاضر، برابر با تعداد کروموزوم‌های خوب (والدین) کروموزوم جدید (فرزندان) اضافه می‌شود که جایگزین کروموزوم‌های بد کنار گذاشته شده هستند.

در الگوریتم ژنتیک عملگر دیگری تحت عنوان جهش ژنی⁴ وجود دارد که ابزاری برای جستجوی تصادفی محسوب می‌شود و از گرفتار شدن موتور جستجو در یک نقطه بهینه محلی ممانعت می‌کند. انتخاب صحیح مقدار احتمال جهش ژنی μ تأثیر بسزایی در روند بهینه‌سازی دارد.

3. Single crossover point
4. Mutation

1. Gene
2. Chromosome

جدول 1 نمونه‌ای از کروموزوم طراحی شبکه آبرسانی 8 لوله‌ای

شماره لوله	Pipe 8	Pipe 7	Pipe 6	Pipe 5	Pipe 4	Pipe 3	Pipe 2	Pipe 1
ژن‌های روی کروموزوم	100	111	101	111	000	010	001	110
شماره قطر در لیست تجاری	5	8	6	8	1	4	2	7

سیستم‌های آبرسانی به شرح زیر و مطابق با شکل 3 معرفی می‌شود:

1- شبکه آبرسانی، متغیرهای تصمیم‌گیری، لیست قطرهای تجاری و مقادیر سرعت و فشار مجاز به مدل معرفی می‌شوند.

2- پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل نرخ جهش ژنی μ ، تعداد جمعیت اولیه N_{ipop} ، تعداد جمعیت هر نسل N_{pop} (معمولاً $N_{ipop}/2$) و حداکثر تعداد تولید نسل N_g در هر مرحله بهینه‌سازی تعیین می‌شوند.

3- تعداد مراحل بهینه‌سازی متوالی برای اعمال روش DTO تعریف می‌شود. این مشخصه با N_{DTO} نام‌گذاری می‌شود.

4- در شروع بهینه‌سازی، برای آستانه اولیه یک عدد بزرگ (مثلاً $+\infty$) در نظر گرفته می‌شود.

5- تابع هزینه بهینه‌سازی $f(\bar{x})$ با استفاده از معادله اصلاح شده DTO برای مسائل کمینه‌سازی (نشان داده شده در شکل 3) و بر اساس آستانه بدست آمده از مرحله قبل به تابع $g(\bar{x})$ تبدیل می‌شود.

6- الگوریتم ژنتیک فراخوانده شده و طی N_g تولید نسل، بهترین پاسخ f_{best} را بدست می‌دهد.

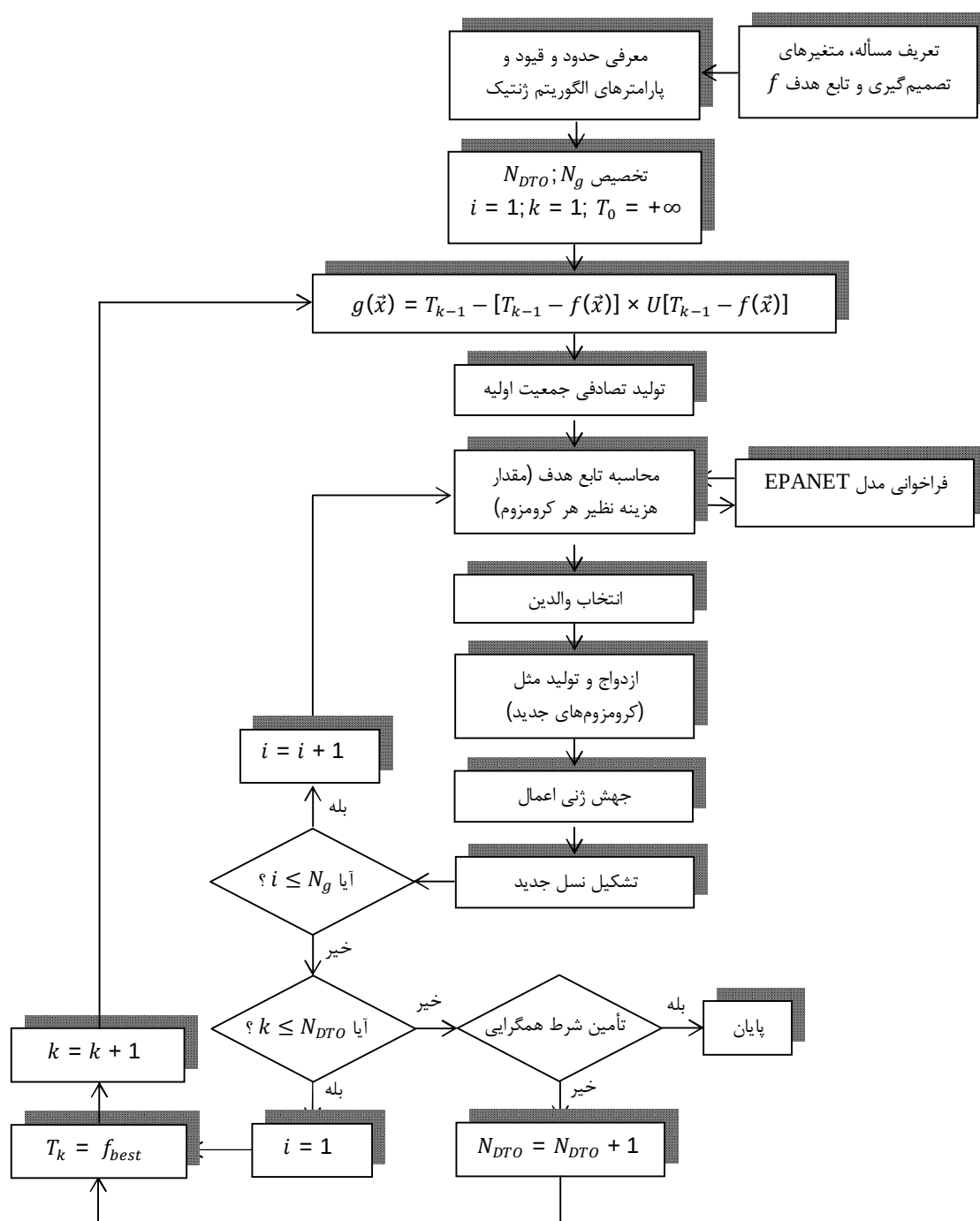
7- مقدار آستانه مطابق با $T = f_{best}$ به روز می‌شود و الگوریتم با ورود به مرحله جدید به گام 5 باز می‌گردد.

8- فرایند فوق تا تکمیل کلیه مراحل بهینه‌سازی (N_{DTO} مرحله) و تأمین شرط همگرایی ادامه می‌یابد. یک شرط همگرایی این گونه تعریف می‌شود که چنانچه پس از دو یا سه مرحله بهینه‌سازی متوالی مقدار آستانه تغییر نکرد، بهینه‌سازی متوقف می‌شود.

جهش ژنی به این گونه عمل می‌کند که بطور تصادفی درصدی از ژنها انتخاب می‌شود، اگر ژنی 0 است به 1 و اگر 1 است به 0 تغییر داده می‌شود (به اصطلاح ژنها سویچ می‌شوند). پس از وقوع تبادیل و جهش ژنی، نسل جدید حاصل می‌شود و این شیوه تولید نسل تا رسیدن به یک پاسخ مطلوب ادامه می‌یابد. معیار همگرایی در الگوریتم ژنتیک می‌تواند به صورت یکی یا مجموعه‌ای از فاکتورهای آماری معرفی شود. در نسل‌های متوالی این فاکتورها بهبود یافته و روند بهینه‌سازی تا رسیدن به همگرایی مورد نظر ادامه می‌یابد. همچنین معمول است یک مقدار برای حداکثر تولید نسل (مثلاً 1000 نسل) در افق بهینه‌سازی تعریف شود. به دلیل آن که روند بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک نیاز به تولید متوالی نسل‌ها و مقایسه بین آنها دارد، محاسبه هزینه و متعاقباً تحلیل هیدرولیک شبکه ممکن است هزاران بار صورت بگیرد. بنابراین لازم است برای تسریع همگرایی، پارامترهای الگوریتم ژنتیک با دقت انتخاب شوند. این مهم تا حد زیادی به سطح آشنایی و تجربه کاربر در استفاده از الگوریتم و مشخصات مسأله در دست طراحی دارد. همچنین انجام تحلیل حساسیت‌های اولیه بر روی نرخ جهش ژنی و تعداد جمعیت هر نسل نیز بسیار مؤثر است.

1-5- اعمال مفهوم آستانه پویا در الگوریتم ژنتیک (GA-DTO)

در این تحقیق، الگوریتم ژنتیک باینری به صورت یک مدل کمینه سازی فرمول نویسی شد و روش DTO نیز مطابق با هدف کمینه سازی تابع هزینه اصلاح شد. الگوریتم GA-DTO پیشنهادی برای طراحی اقتصادی



شکل 3 مراحل بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک همراه با عملگر آستانه پویا (GA-DTO)

6- مثال‌های مرجع

1-6- شبکه دو حلقه‌ای

در این مثال، به بهینه‌سازی یک شبکه آبرسانی با دو

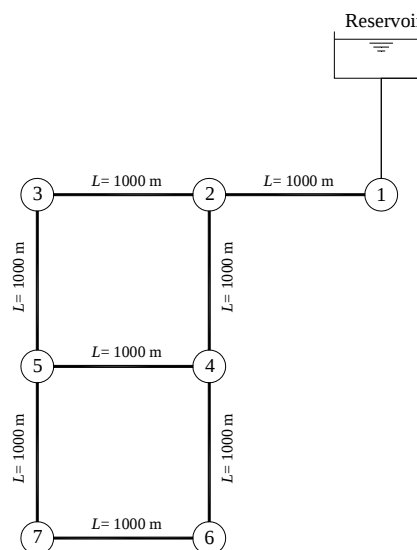
حلقه مطابق شکل 4 پرداخته می‌شود که نخستین بار توسط Alperovits and Shamir (1977) معرفی شد و بعدها توسط بسیاری از محققان برای ارزیابی روش‌های

مختلف مورد استفاده قرار گرفت.

تجاری را ارائه می‌نمایند. برای انجام بهینه‌سازی، تعداد مراحل کاربرد آستانه $N_{DFO} = 10$ ، تعداد نسل در هر مرحله $N_g = 50$ ، تعداد جمعیت اولیه $N_{ipop} = 120$ ، تعداد جمعیت نسل‌های بعدی $N_{pop} = 60$ و نرخ جهش ژنی برابر $\mu = 0.03$ در نظر گرفته می‌شود.

جدول 2 مشخصات گره‌های شبکه آبرسانی مثال دو حلقه‌ای

شماره گره	مصرف (m^3/h)	ارتفاع از سطح مبنا (m)
1	-1120	210
2	100	150
3	100	160
4	120	155
5	270	150
6	330	165
7	200	160



شکل 4 شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای

جدول 3 لیست لوله‌های تجاری قابل استفاده در طراحی

شبکه آبرسانی دو حلقه‌ای

قطر (mm)	هزینه واحد طول	قطر (mm)	هزینه واحد طول
25/4	2	304/8	50
50/8	5	355/6	60
76/2	8	406/4	90
101/6	11	457/2	130
152/4	16	508	170
203/2	23	558/8	300
254	32	609/6	550

همچنین شایان ذکر است که تولید جمعیت اولیه بصورت تصادفی، اما با توزیع یکنواخت در فضای جستجو انجام می‌شود. برای اطمینان از نتایج بدست آمده، بهینه‌سازی شبکه با استفاده از مدل GA-DTO چند بار تکرار شد که برای نمونه یکی از بهترین پاسخ‌های بدست آمده در مجموعه شکل 5 ارائه شده است. در این شکل‌ها روند کمینه‌سازی تابع هزینه در مراحل مختلف بکارگیری

شبکه مثال حاضر حاوی 7 گره، 8 لوله و یک مخزن با هد ثابت 210 متر بوده که بصورت ثقلی سیستم را تغذیه می‌کند. طول کلیه لوله‌ها برابر 1000 متر و ضریب هیزن ویلیامز آنها 130 است. همچنین حداقل فشار مجاز در کلیه گره‌ها 30 متر می‌باشد. در این مثال یک لیست قطر تجاری شامل 14 اندازه مختلف در محدوده 25/4 تا 609/6 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعداد قطرهای تجاری و تعداد لوله‌های شبکه، چنانچه طراحی بخواهد بدون استفاده از بهینه‌سازی به اقتصادی طرح این مثال دست یابد، می‌بایست در مجموع $14^8 = 1/48 \times 10^9$ بار شبکه حاضر را تحلیل هیدرولیکی نموده و سپس مقایسه کند. روشن است که این امر حتی برای شبکه‌های بسیار کوچک همچون مثال حاضر امری غیر عملی است. با فرض حتی یک ثانیه برای هر بار تحلیل و طراحی شبکه، زمان مورد نیاز برای شمارش کامل در این مثال در حدود 47 سال خواهد شد! برای اطلاعات بیشتر، جدول 2 مشخصات گره‌ها و جدول 3 مشخصات لوله‌های

جدول 6 مقایسه نتایج بدست آمده برای شبکه دو حلقه‌ای با تحقیقات پیشین¹

روش حل	هزینه کل	ضریب ω	مؤلف
Split-Pipe	479525	10/68	Alperovits and Shamir (1997)
Split-Pipe	435015	10/90	Goulter et al. (1986)
Split-Pipe	417500	10/68	Kessler and Shamir (1989)
Split-Pipe	402352	10/51	Eiger et al. (1994)
Split-Pipe	403657	10/68	Loganathan et al. (1995)
-	419000	10/51	Savic and Walters (1997)
-	420000	10/90	Savic and Walters (1997)
-	419000	10/51	Cunha and Sousa (1999)
-	419000	10/51	Cunha and Ribeiro (2003)
-	419000	10/68	Samani and Mottaghi (2006)
-	419000	10/68	تحقیق حاضر

1- منظور از Split-Pipe روش‌هایی هستند (از جمله برنامه‌ریزی خطی) که در آنها طول لوله‌های شبکه به عنوان متغیر تصمیم‌گیری در بهینه‌سازی دخالت داده می‌شود و در نهایت هر لوله به چند لوله سری با قطرهای مختلف تبدیل می‌شود. این روش‌ها از نظر کاربردی مناسب نیستند و نیاز به اصلاحات بعدی دارند که شبکه را از بهینگی خارج می‌سازد.

از آنجا که کامپیوترها با سرعت‌های مختلف در بهینه‌سازی شبکه حاضر بکار گرفته شده‌اند، در کارهای اخیر به جای ذکر زمان بهینه‌سازی از فاکتور تعداد دفعات شبیه‌سازی هیدرولیکی جهت مقایسه سرعت‌ها استفاده می‌شود. به این معنی که مدل EPANET چند بار در کل فرایند بهینه‌سازی اجرا شده است. در طرح حاضر، تعداد کل مدل‌سازی هیدرولیکی برای رسیدن به پاسخ بهینه در حدود 21000 بار می‌باشد (تعداد جمعیت ضرب در کل تولید نسل) در حالی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک متعارف در تحقیق (Savic and Walters (1997) در مجموع 250000 بار اجرای مدل تحلیل هیدرولیکی در بهینه‌سازی لحاظ شد. البته شایان ذکر است که هم در این کار و هم در مرجع نام برده یک شکل ساده و ابتدایی الگوریتم ژنتیک بهره گرفته شده است. جنبه سوم مربوط به افزایش شانس رسیدن به پاسخ بهینه مطلق است. در

عملگر آستانه پویا نمایش داده شده است. حداقل هزینه ساخت شبکه برابر 419000 واحد در مرحله ششم بدست آمده است. جداول 4 و 5 نتایج تحلیل شبکه به ازای پاسخ بهینه را نشان می‌دهند. همچنین مقایسه هزینه بهینه در روش حاضر با تحقیقات پیشین نیز در جدول 6 ارائه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق با الگوریتم ژنتیک متعارف از سه جنبه قابل بررسی است. نخست این که مقدار حداقل هزینه طرح همان طور که در جدول 6 نیز ارائه شده است، با بهینه مطلق مطالعات پیشین مطابقت می‌کند. جنبه دوم مربوط به سرعت مدل در انجام بهینه‌سازی است.

جدول 4 نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه پس از بهینه‌سازی (فشار در گره‌ها)

گره	هد فشار (m)
2	53/28
3	30/49
4	43/52
5	33/83
6	30/53
7	30/73

جدول 5 نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه پس از بهینه‌سازی (دبی و سرعت در لوله‌ها)

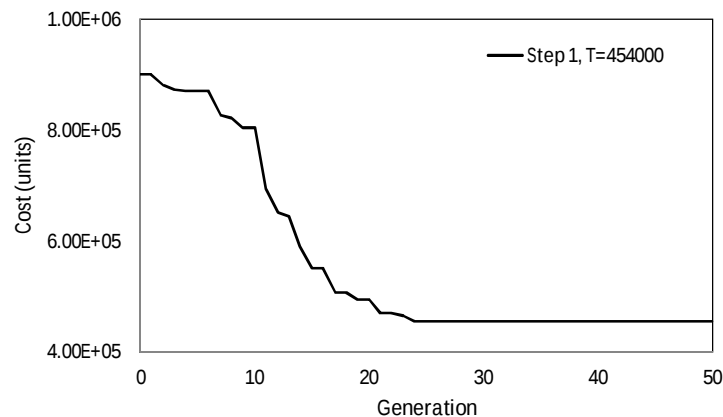
لوله	قطر (mm)	دبی (lit/s)	سرعت (m/s)	گره ابتدا / گره انتها	
				1	2
1	457/2	130/30	1/89	2	1
2	254	93/58	1/85	3	2
2	406/4	188/92	1/46	4	2
4	101/6	9/06	1/12	5	4
3	254	65/78	1/30	5	3
4	406/4	146/86	1/13	6	4
6	254	55/16	1/09	7	6
5	25/40	-0/16	0/31	7	5

می‌توانند از روش حاضر که از یک الگوی بسیار ساده الگوریتم ژنتیک بهره می‌گیرد، بسیار موفق‌تر باشند.

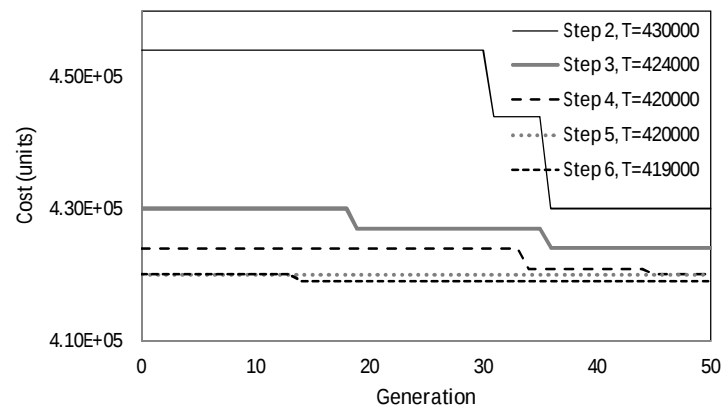
2-6- شبکه Hanoi

مثال مرجع دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته شبکه آبرسانی مشهور Hanoi در کشور ویتنام است. پیکربندی شبکه همراه با مصارف گره‌ای در شکل 6 نشان داده شده‌اند. شبکه حاضر از 3 حلقه، 34 لوله و 32 گره تشکیل یافته است. یک مخزن با هد ثابت 100 متر در گره شماره یک، مصرف شبکه را بصورت تغلی تأمین می‌کند. در این شبکه حداقل فشار مورد نیاز 30 متر تعیین شده است.

روش پیشنهادی به این دلیل که فضای جستجو مرتباً از بالا فشرده می‌شود، لذا در مراحل بعدی، امکان ایجاد حلقه‌های باطل در بهینه‌سازی و بازدید مجدد فضاهای نامرغوب عملاً از بین می‌رود. در واقع در هر مرحله از آستانه پویا، بهینه‌سازی راهی جز یافتن پاسخی بهتر و یا دست کم برابر با آستانه آن مرحله ندارد. این مهم سبب می‌شود که در روش پیشنهادی بتوان پاسخ‌های بدست آمده را با اطمینان بیشتری نسبت به روش‌های متعارف پذیرفت. در واقع از میان سه جنبه یاد شده مورد آخر جنبه نوآوری در تحقیق حاضر است. چراکه از حیث موفقیت در حل مسأله و سرعت اجرای بهینه‌سازی، روش‌های بسیار زیادی در سال‌های اخیر توسعه یافته (از جمله مدل‌های پیشرفته‌تری از الگوریتم ژنتیک) که

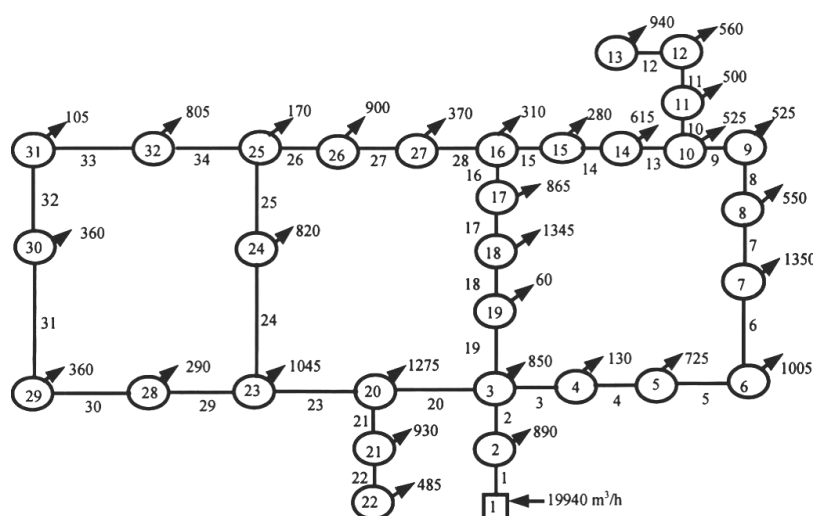


الف - مرحله اول DTO



ب- مراحل دوم تا ششم DTO

شکل 5 مراحل کمینه‌سازی تابع هزینه طی مراحل GA-DTO



شکل 6 شبکه آبرسانی Hanoi (Savic and Walters, 1997)

جدول 7 سایر مشخصات شبکه Hanoi را نشان می‌دهد. همچنین ضریب هیزن- ویلیامز برای کلیه لوله‌ها 130 و سایر ضرایب این رابطه در مثال حاضر α ، β و γ به ترتیب برابر 1/85، 4/87 و 10/68 می‌باشند. برای طراحی 6 قطر تجاری مطابق با جدول 8 شامل اندازه و هزینه هر متر لوله، قابل استفاده هستند. فضای تصمیم‌گیری در این مثال شامل $6^{34} = 2.87 \times 10^{26}$ تحلیل هیدرولیکی مجزا خواهد بود.

جدول 8 قطرهای بهینه بدست آمده در کنار مشخصات شبکه نشان داده شده‌اند. هزینه احداث شبکه متناظر با این بهینه‌سازی 6190000 واحد بدست می‌آید که در مقایسه با کارهای پیشین صحت مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند. این مقدار با سایر روش‌های پیشین و دست کم با الگوریتم ژنتیک متعارف در حل مسائل بزرگ مقیاس قابل مقایسه است. جدول 9 نتایج تحلیل شبکه (فشار در گره‌ها) به ازای پاسخ بهینه بدست آمده را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه هزینه بهینه شده در روش حاضر با تحقیقات پیشین در جدول 10 ارائه گردیده است.

همچنین برای مقایسه سرعت همگرایی بهینه‌سازی، شایان ذکر است که این مسأله توسط Savic and Walters (1997) با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک ساده یک میلیون بار تحلیل هیدرولیکی شبکه بهینه شد.

جدول 7 لیست لوله‌های تجاری قابل استفاده در طراحی شبکه

آبرسانی Hanoi

قطر (mm)	هزینه واحد طول
304/8	45/726
406/4	70/4
508	98/387
609/6	129/333
762	180/748
1016	278/28

برای حل این مثال، تعداد مراحل DTO در ابتدا

جدول 9 نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه Hanoi

پس از بهینه‌سازی (هد فشار در گره‌ها)

گره	فشار (m)	گره	هد فشار (m)
1	100	17	39/28
2	97/08	18	50/04
3	60/82	19	57/13
4	56/38	20	49/59
5	50/88	21	40/04
6	45/13	22	34/76
7	43/81	23	43/42
8	42/28	24	37/73
9	41/09	25	34/07
10	37/61	26	30/51
11	36/01	27	30/32
12	34/83	28	38/05
13	30/53	29	30/08
14	32/06	30	30/58
15	30/96	31	30/90
16	31/13	32	31/81

جدول 10 مقایسه نتایج بدست آمده برای شبکه Hanoi

با تحقیقات پیشین

هزینه کل	ضریب ω	مؤلف
6195000	10/90	Savic and Walters (1997)
6056000	10/51	Cunha and Sousa (1999)
6056000	10/51	Geem et al. (2002)
6220000	10/68	Liong and Atiquzzaman (2004)
6190000	10/90	Kadu et al. (2008)
6190000	10/90	Haghighi et al. (2011)
6190000	10/68	تحقیق حاضر

در این تحقیق، شبکه مورد مطالعه با حدوداً 100000 بار فراخوانی مدل هیدرولیکی به همان پاسخ بهینه‌سازی شد.

10- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک روش بهینه‌سازی بر پایه الگوریتم

جدول 8 مشخصات گره‌ها و لوله‌های شبکه آبرسانی Hanoi

مشخصات لوله‌ها	طول (mm)	قطر بهینه (mm)	مشخصات گره‌ها	
			گره	مصرف (m ³ /h)
1	100	40	1	-19940
2	1350	40	2	890
3	900	40	3	850
4	1150	40	4	130
5	1450	40	5	725
6	450	40	6	1005
7	850	40	7	1350
8	850	40	8	550
9	800	30	9	525
10	950	30	10	525
11	1200	30	11	500
12	3500	24	12	560
13	800	16	13	940
14	500	12	14	615
15	550	12	15	280
16	2730	16	16	310
17	1750	20	17	865
18	800	24	18	1345
19	400	24	19	60
20	2200	40	20	1275
21	1500	20	21	930
22	500	12	22	485
23	2650	40	23	1045
24	1230	30	24	820
25	1300	30	25	170
26	850	20	26	900
27	300	12	27	370
28	750	12	28	290
29	1500	16	29	360
30	2000	12	30	360
31	1600	12	31	105
32	150	16	32	805
33	860	20		
34	950	24		

ژنتیک و مفهوم آستانه پویا برای طراحی اقتصادی و فنی شبکه‌های آبرسانی ارائه شد. قابلیت روش پیشنهادی با حل دو مثال مرجع ارزیابی شد و نتایج حکایت از قابلیت مدل از نظر دقت و سرعت بهینه‌سازی داشتند. در هر دو مثال شبکه دو حلقه‌ای و شبکه Hanoi تعداد دفعات اجرای مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی از الگوریتم ژنتیک متعارف بطور قابل ملاحظه‌ای کمتر بود. همچنین پاسخ بهینه مطلق که در خصوص هریک از شبکه‌ها بدست آمد در مقایسه با کارهای پیشین مطابقت داشت و حاکی از اعتمادپذیری نتایج مدل بود. علاوه بر آن جنبه سومی از مدل که در واقع نوآوری تحقیق حاضر محسوب می‌شود، معرفی و کاربرد مفهوم آستانه پویا در بهینه‌سازی است که هنوز در مراحل اولیه خود بوده و بدون شک نیاز به توسعه بیشتر و کاربرد در سایر مسائل مهندسی دارد. با استفاده از این عملگر، فرایند بهینه‌سازی در هر مرحله از آستانه پویا چاره‌ای جز یافتن پاسخی بهتر یا دست کم هم ارزش با آستانه پویا را ندارد. این مهم از جستجوی کور محل‌هایی از فضای تصمیم‌گیری که قبلاً بازدید شده‌اند جلوگیری می‌کند و علاوه بر افزایش سرعت همگرایی، شانس رسیدن به پاسخ بهینه مطلق را نیز افزایش می‌دهد. نکته قابل توجه آنست که این روش به سادگی و در قالب هر الگوریتم بهینه‌سازی دیگری اعم از ریاضی و یا فراکاوشی قابل استفاده است. به دلیل آن که با پیش‌روی آستانه و فشرده‌تر شدن فضای جستجو، مناطق مسطح در توپولوژی مسأله وسیع‌تر می‌شوند، لذا روش‌های فراکاوشی استوکستیک و جمعیت‌گرا مانند الگوریتم‌های ژنتیک موفق‌تر به نظر می‌رسند. در هر حال اظهار نظر قطعی در این خصوص نیاز به مطالعات مقایسه‌ای بیشتر و در خصوص مسائل متنوع‌تر دارد. با این حال کاربرد عملگر آستانه پویا در الگوریتم ژنتیک سبب می‌شود که با فشرده‌تر شدن فضای جستجو، کروموزوم‌های متفاوت شامل ارزش یکسانی نسبت به

تابع هدف شوند و این مهم سبب بروز یکنواختی زودرس در جمعیت بهینه‌سازی خواهد شد. این موضوع تهدیدی جدی برای موفقیت بهینه‌سازی در حل مسائل بزرگ مقیاس و پیچیده محسوب می‌شود. لذا برای برطرف کردن این مشکل استفاده از ترفندها و عملگرهایی برای حفظ و تقویت پراکندگی کروموزوم‌ها در مرحله انتخاب در الگوریتم ژنتیک توصیه می‌شود.

9- فهرست علائم

C_{HW}	ضریب هیزن- ویلیامز
CD	قطرهای تجاری
D_{min} و D_{max}	حداکثر و حداقل قطر تجاری
D	قطر لوله
E_p	انرژی پمپ
H^{min}	هد فشار حداقل
N_{DFO}	تعداد مراحل بهینه‌سازی
N_b	تعداد بیت
N_g	حداکثر تولید نسل
N_{ipop}	تعداد جمعیت اولیه
N_{pop}	تعداد جمعیت هر نسل
V^{min}	سرعت حداقل
f_D	ضریب افت دارسی ویسباخ
ϕ و φ	توابع جریمه
A و B	ضرایب جریمه
h	افت هد
i, j و K	شمارنده
x	شماره لوله
H	هد فشار
L	طول لوله
M	تعداد کل گره‌ها
Q	دبی لوله
Re	عدد رینولدز
S	تعداد مخازن
T	آستانه پویا

Library, Technical report.

Fujiwara O. and Khang D.B. (1990). A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks, *Water Resour. Res.*, 26(4), pp. 539-549.

Geem Z.W., Kim J.H. and Loganathan G.V. (2002). Harmony search optimization: Application to pipe network design, *Int. J. Model. Simul.*, 22(2), pp. 125-133.

Gupta I. (1969). Linear programming analysis of a water system, *Trans. Amer. Inst. Ind. Eng.*, I(1), pp. 56-61

Gupta I. and Hassan M.Z. (1972). Linear programming analysis of a water supply system with a multiple supply points, *Trans. Amer. Inst. Ind. Eng.* 4(3), pp. 200-204.

Haghighi A., Samani H.M.V. and Samani Z.M.V. (2011). GA-ILP method for optimization of water distribution networks, *J. Water Resour. Manage.*, 25, pp. 1791-1808.

Haupt R.L. and Haupt S.E. (2004). *Practical genetic algorithms*, second edition, John Wiley & Sons Inc. Hoboken, New Jersey.

Kadu M.S., Gupta R. and Bhav P.R. (2008). Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 134(2), pp. 147-160.

Kessler A. and Shamir U. (1989). Analysis of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks, *Water Resour. Res.*, 25(7), pp. 1469-1480.

Krapivka, A. and Ostfeld, A. (2009). Coupled genetic algorithm—linear programming scheme for least-cost pipe sizing of water-distribution systems, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 135, SPECIAL ISSUE: Water Infrastructure: Remembering the Contributions and Influence of G. V. Loganathan, pp. 298-302.

Lansey K. E. and Mays. L. W. (1989). *Optimization models for design of water distribution systems. Reliability analysis of water distribution systems*, L. W. Mays, ed., ASCE. New York. N.Y.

Liong S.Y. and Atiquzzman M.D. (2004). Optimal design of water distribution network using Shuffled complex evolution, *J. Institution Eng. Singapore*, 44(1) pp. 93-107.

Lippai I., Heaney J.P. and Laguna M. (1999). Robust water system design with commercial intelligent search optimizers, *J. Comput. Civ. Eng.*, 13(3), pp. 135-143.

V	سرعت لوله
X	تعداد کل لوله‌ها در شبکه
Y	تعداد حلقه‌ها
f	تابع هزینه
g	تابع کمکی
q	مصرف در گره
u	هزینه واحد طول لوله
α و β	ضرایب توانی رابطه هیزن ویلیامز
ε	زبری جدار لوله
μ	نرخ جهش زنی
ν	لزجت سینماتیک
ω	ضریب رابطه هیزن ویلیامز

10- مراجع

Afshar M. H. and Marino M. A. (2005). A convergent genetic algorithm for pipe network optimization, *Scientia Iranica*, 12(4), pp. 392-401.

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

Bhave P. and Sonak V. (1992). A critical study of the linear programming gradient method for optimal design of water supply networks, *Water Resour. Res.*, 28(6), pp. 1577-1584.

Chiplunkar A., Mehendiratta V. and Khanna S.L. (1986). Looped water distribution system optimization for single loading, *J. Environ. Eng.*, ASCE 112(2), pp. 264-279.

Cisty M. (2010). Hybrid genetic algorithm and linear programming method for least-cost design of water distribution systems, *Water Resour. Manage.*, 24, pp. 1-24.

Cunha M.C. and Sousa J. (1999). Water distribution network design optimization: simulated annealing approach, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 125(4), pp. 215-221.

Dantzig G.B. (1963). *Linear programming and extensions*, Princeton Univ. Press, New Jersey.

Eusuff M.M. and Lansey K.E. (2003). Optimization of water distribution network design using the Shuffled frog leaping algorithm, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 129(3), pp. 210-225.

Formato R.A. (2012). *Dynamic Threshold Optimization-A New Approach?* Cornell University

- heuristic search techniques for pipe sizing, *Journal of Environmental Informatics*, 8(1), pp. 1-9.
- Taher S.A. and Labadie J.W. (1996). Optimal design of water-distribution networks with GIS, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 122(4), pp. 301-311.
- Tospornsampan, J., Kita, I., Ishii, M. and Kitamura, Y. (2007). Split-pipe design of water distribution network using simulated annealing. *International Journal of Computer, Information & Systems Science*, 1(3), pp. 153-160.
- Vairavamoorthy K. and Ali M. (2000). Optimal design of water distribution systems using genetic algorithms, *Comput-Aided Civil Infrastruct. Eng.*, 15(5), pp. 374-382.
- Vairavamoorthy K. and Ali M. (2005). Pipe index vector: A method to improve genetic-algorithm-based pipe optimization, *J. Hyd. Eng.*, 131(12), pp. 1117-1127.
- Vasan, A. and Simonovic S.P. (2010). Optimization of water distribution network design using differential evolution, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 136(2), pp. 279-287.
- Walski T. (1987). Battle of the network models; epilogue, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 113(2), pp. 191-203.
- Watanatada T. (1973). Least cost design of water distribution systems, *J. Hyd. Eng.*, 99(9), pp. 1497-1513.
- Wu Z.Y. and Walski T. (2005). Self-adaptive penalty approach compared with other constraint-handling techniques for pipe line optimization, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 131(3), pp. 181-192.
- Zecchin A. C., Simpson A. R., Maier H. R. and Nixon J. B. (2005). Parametric study for an ant algorithm applied to water distribution system optimization, *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 9(2), pp. 175-191.
- Zecchin A. C., Maier H. R., Simpson A. R., Leonard M., Roberts A. J. and Berrisford M. J. (2006). Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimization, *Math. Comput. Model*, 44, pp. 451-468.
- Maier H.R., Simpson A.R., Zecchin A.C. Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y. and Tan C.L. (2003). Ant colony optimization for design of water distribution systems, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 129(3), pp. 200-209.
- Morgan D.R. and Goulter I.C. (1985). Optimal urban water distribution design, *Water Resour. Research*, 21(5), pp.642-652.
- Prasad T.D. and Park N.S. (2004). Multiobjective genetic algorithms for design of water distribution networks, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 130(1), pp. 73-82.
- Quindry G.E., Brill E.D. and Liebman J.C. (1981). Optimization of looped water distribution systems, *J. Environ. Eng., ASCE* 107(4), pp. 665-679.
- Reca J., Martínez J., Gil C. and Baños R. (2008). Application of several meta-heuristic techniques to the optimization of real looped water distribution networks, *J. Water Resour. Manage.*, 22, pp. 1367-1379.
- Samani H.M.V. and Mottaghi A. (2006). Optimization of water distribution networks using integer linear programming, *J. Hyd. Eng.*, 132(5), pp. 501-509.
- Samani H.M.V. and Naeeni S.T. (1996). Optimization of water distribution networks, *J. Hyd. Res.*, 34(5), pp. 623-632.
- Samani H.M.V. and Zangeneh A. (2010). Optimization of water Networks using linear programming. *J. Water Manage., Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, WM8, pp. 475-485.
- Savic D.A. and Walters G.A. (1997). Genetic algorithms for least cost design of water distribution networks, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 123(2), pp. 67-77.
- Simpson A.R., Dandy G.C. and Murphy L.J. (1994). Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 120(4), pp. 423-443.
- Suribabu C. R. and Neelakantan, T. R. (2006). Particle swarm optimization compared to other