



افزایش سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب

مهسا امیر عبدالهیان^۱، محمدرضا چمنی^۲، کیوان اصغری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

m.amirabdollahian@cv.iut.ac.ir
mchamani@cc.iut.ac.ir
kasghari@cc.iut.ac.ir

خلاصه

الگوریتم ژنتیک از قوی‌ترین ابزارها برای طراحی بهینه شبکه‌های آب است. در این تحقیق روش‌های مختلف انتخاب و ترکیب برای بهینه‌سازی قطر و طول لوله‌های شبکه آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک به کار برده شده‌است. تابع هدف هزینه‌ی ساخت شبکه و قیود، محدودیت سرعت و فشار در اجزای سیستم هستند. نتایج، بهترین عملگرهای انتخاب و ترکیب برای بهینه‌سازی این سیستم‌ها روش رقابتی و تک‌نقطه‌ای معرفی کردند. استفاده از این عملگرها و معرفی کروموزم‌های مجزا برای هریک از متغیرهای تصمیم (طول و قطر لوله‌ها)، سرعت همگرایی بالاتر و جواب‌های بهینه‌تری را نسبت به نتایج محققین گذشته نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، شبکه‌های انتقال آب.

۱. مقدمه

شبکه‌های توزیع آب شهری برای ارتباط بین مصرف‌کننده و منبع آب احداث می‌شوند و از جمله پیچیده‌ترین زیرساخت‌های شهری هستند که طراحی و توسعه آن‌ها نیازمند تحلیل‌های گسترده و صرف هزینه‌ی قابل توجه است. رشد فزاینده جمعیت و نیاز روز افزون به آب در صنعت، کشاورزی و همچنین مصارف شهری، نیاز به روش‌هایی برای بهینه‌سازی این شبکه‌ها را ایجاد می‌کند. از حدود چهار دهه پیش استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی در طراحی شبکه‌ها، یکی از زمینه‌های مورد علاقه دانشمندان بوده است. هدف این تحقیقات رسیدن به طرح بهینه‌ای است که علاوه بر داشتن بهترین شرایط از لحاظ سرمایه‌گذاری و هزینه، بهترین شرایط بهره‌برداری را نیز برای مصرف‌کننده تامین کند.

روش‌های مختلف بهینه‌سازی شامل روش‌های ریاضی، شمارشی و تصادفی هستند [۱]. به دلیل پیچیدگی طراحی بهینه‌ی شبکه‌ها ناشی از روابط غیرخطی دبی، تلفات هد، تعداد زیاد متغیرها و غیرخطی بودن تابع هدف، تحقیقات اخیر بر روی روش‌های تصادفی متمرکز شده است. در این شیوه، برخی از نقاط فضای جستجو به صورت تصادفی انتخاب و ارزیابی می‌شوند. اشکال این روش رانده‌مان پایین است. دسته‌ای از روش‌های جستجو وجود دارند که در حین عمل، از انتخاب تصادفی استفاده می‌کنند، ولی در اصل عملکرد آنها جهت‌دار است. الگوریتم ژنتیک از این دسته است که به این دسته، الگوریتم‌های کاشف و یا ابتکاری^۱ گفته می‌شود. برای مثال، اجرای الگوریتم ژنتیک با سعی در شناسایی محدوده‌های مختلف فضای جستجو شروع می‌شود و این عمل از طریق ارزیابی چندین نقطه از فضای جواب که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند صورت می‌گیرد [۲]. جهت کسب اطلاعات کامل در مورد الگوریتم ژنتیک و انواع آن می‌توان به مرجع ۱ مراجعه کرد. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه‌های آب از اوایل دهه ۱۹۹۰ با مقاله مورفی و سیمپسون^۲ (۱۹۹۲) آغاز شد. در این تحقیق از سیستم باینری برای مشخص کردن مقدار متغیرهای تصمیم استفاده شد.

^۱ - Heuristic

^۲ - Murphy and Simpson



قید اعمال شده بر سیستم فقط حداقل هد در گره‌های سیستم تحت سه بارگذاری مختلف، دبی حداکثر روزانه و دو حالت متفاوت برای آتش‌نشانی، است. سیمپسون و همکاران^۱ (۱۹۹۴) روش الگوریتم بکار رفته را با روش‌های شمارشی و روش‌های دیگر بهینه‌سازی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که در این مثال کوچک روش الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های دیگر بسیار وقت گیر است. همچنین دیده شد که روش الگوریتم ژنتیک ساده به پارامترهای الگوریتم بسیار حساس است [۳].

دنی و همکاران^۲ (۱۹۹۶) اقدام به بهبود الگوریتم ژنتیک کردند. آن‌ها از روش رتبه‌بندی برای انتخاب و روش کدگذاری گری^۳ بجای استفاده از کدگذاری باینری برای طراحی شبکه تغذیه تونل شهر نیویورک استفاده کردند [۴].

ساویک و والترز (۱۹۹۷) روش الگوریتم ژنتیک را همراه با نرم افزار حل شبکه *EPANET* برای حل سه شبکه نسبتاً پیچیده بکار بردند و مشاهده کردند که جواب حاصل بهینه‌سازی به شدت به ضریب هیزن - ویلیامز بکار برده شده در برنامه شبیه‌ساز جریان وابسته است [۵]. همچنین کارتر^۴ (۱۹۹۸) دو روش الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی دینامیکی را برای بهینه‌سازی سیستم انتقال گاز استفاده کرد. وی توصیه کرد که همیشه الگوریتم ژنتیک در زمان کوتاه‌تری مسئله را حل نمی‌کند و فقط در زمانی که از برنامه‌ریزی دینامیکی نمی‌توان استفاده کرد، از روش‌هایی مثل الگوریتم ژنتیک باید استفاده کرد [۶].

روش الگوریتم ژنتیکی که تا این زمان استفاده می‌شد به الگوریتم ژنتیک ساده معروف است. گلدبرگ در سال ۱۹۸۹ الگوریتم ژنتیک نامرتب^۵ را معرفی کرد. وو و سیمپسون^۶ (۱۹۹۶ و ۱۹۹۷)، سیمپسون و وو (۱۹۹۷) و وو و همکاران^۷ (۲۰۰۰) نشان دادند که الگوریتم ژنتیک نامرتب با ایجاد بی‌نظمی در بین جمعیت جواب‌های ممکن نتیجه بهتری را نسبت به الگوریتم ژنتیک مرتب در بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب نشان می‌دهد [۳]. همچنین آیوس و همکاران^۸ (۱۹۹۹) الگوریتم ژنتیک بهبود یافته‌ای به نام *MGA* معرفی کردند که در این روش با اعمال تغییراتی در فرآیند ترکیب و جهش تأثیر انتخاب تصادفی در *GA* را کم کردند و بدین طریق در مدت زمان کمتری به جواب بهینه رسیدند [۶].

ساویک و همکاران^۹ (۲۰۰۴) روش هیبریدی الگوریتم ژنتیک را معرفی کردند. در این روش از الگوریتم ژنتیک و روش هیلکلیمبر^{۱۰} استفاده می‌شود. روش هیلکلیمبر برای بالابردن سرعت همگرایی از این اصل که قابلیت اصلی الگوریتم ژنتیک پیدا کردن محل تقریبی بهینه است استفاده می‌کند [۵].

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بسیار قوی برای بهینه‌سازی است ولی بهینه‌سازی توسط این روش بسیار وقت گیر و پرهزینه است. همراه با گسترش کارایی الگوریتم ژنتیک، تلاش‌های بسیاری برای کاهش زمان بهینه‌سازی توسط این روش انجام شد. استفلد و کارپیکا^{۱۱} (۲۰۰۵) از ترکیب الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب استفاده کردند. در روش *LPG* ارائه شده توسط آن‌ها یک مسئله برنامه‌ریزی خطی با دبی‌های ثابت در حلقه داخلی حل می‌شود در حالی که در حلقه خارجی دبی در لوله‌های سیستم با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در حال تغییر است. آن‌ها بدین طریق توانستند از مزیت هر دو روش الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی استفاده کنند و سرعت بهینه‌سازی را به شدت افزایش دهند [۷].

در این تحقیق با معرفی بهترین روش انتخاب و ترکیب با توجه به ماهیت مسایل بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب و همچنین با معرفی روش جدیدی برای نمایش جمعیت در الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک سعی در افزایش سرعت همگرایی و ارایه جواب‌های بهینه‌تری نسبت به نتایج محققین گذشته شده‌است.

۲. مدل بهینه‌سازی

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه شبکه انتقال آب استفاده شده‌است. معمولاً برای استفاده از الگوریتم ژنتیک، سه مفهوم زیر مشخص می‌شود:

^۱ - Simpson et al.

^۲ - Dany et al

^۳ - Grey

^۴ - Carter

^۵ - Messy Genetic Algorithm (MGA)

^۶ - Simpson and Wu

^۷ - Wu et al.

^۸ - Ayuso and Montesions and Garcia-Guzm

^۹ - Van Zyl and Savic

^{۱۰} - Hillclimber

^{۱۱} - Ostfeld and Karpibka



- ۱- تعریف تابع هدف یا تابع برازندگی و قیود (فرمول بندی مسئله)
 - ۲- تعریف و پیاده سازی فضای ژنتیک (فضای طراحی)^۱
 - ۳- تعریف و پیاده سازی عملگرهای الگوریتم ژنتیک
- اگر این سه مفهوم به طور صحیح تعریف شوند، بدون شک الگوریتم ژنتیک به خوبی عمل خواهد کرد. در ادامه، هریک از سه مفهوم ذکر شده در الگوریتم استفاده شده در این تحقیق بررسی شده است.

۱-۲. تعریف تابع هدف و یا تابع برازندگی

در هر مسأله‌ی بهینه سازی، دو مفهوم تابع هدف و قیود باید به طور شفاف مشخص شوند. در این تحقیق، هدف طراحی شبکه‌ای با کمترین هزینه است. تابع هدف به صورت کل هزینه ساخت شبکه است و طبق رابطه زیر تعریف شده است:

$$C(\vec{D}) = \sum_k^{DP} C_k(d_k) L_k \quad (1)$$

که در آن DP ، L_k و $\vec{D}$ به ترتیب تعداد، طول و بردار حاوی قطر لوله‌های به کار برده شده در شبکه و $C_k(d_k)$ هزینه واحد طول لوله‌ای با قطر d_k هستند.

بعد از معرفی تابع هدف، قیود حاکم بر مسأله به صورت زیر تعریف می‌شود:

۱- قید فشار

اولین قید حاکم به صورت رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$H^{\min} \leq H(t) \leq H^{\max}, \forall t, i = 1, \dots, NJ \quad (2)$$

که در آن $H(t)$ هد در گره t ، NJ تعداد گره‌های موجود در شبکه، $H^{\min}$ حداقل فشار ممکن و $H^{\max}$ حداکثر فشار مجاز در شبکه است.

۲- قید سرعت

محدودیت سرعت در لوله‌های شبکه به صورت رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$V^{\min} \leq V(t) \leq V^{\max}, \forall t, i = 1, \dots, NP \quad (3)$$

که در آن $V(t)$ سرعت در لوله t ، NP تعداد کل لوله‌های موجود در شبکه اعم از لوله‌های شبکه موجود و طرح گسترش، $V^{\min}$ حداقل سرعت ممکن و $V^{\max}$ حداکثر سرعت مجاز در شبکه است. این قیود توسط ضرایب جریمه به تابع هدف اضافه شده‌اند. بدین منظور، برای هریک از قیود ذکر شده، متغیر جدیدی به صورت زیر معرفی شده است:

$$difHead = \sum_t^{NJ} \begin{cases} H(t) - H_{\min} & \text{if } H(t) \geq H_{\min} \\ H(t) - H_{\max} & \text{if } H(t) \geq H_{\max} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$difVelocity = \sum_t^{NP} \begin{cases} V(t) - V_{\min} & \text{if } V(t) \geq V_{\min} \\ V(t) - V_{\max} & \text{if } V(t) \geq V_{\max} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

با توجه به روابط (۴) و (۵)، رابطه‌ی (۱) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C(\vec{D}) = \sum_k^{DP} C_k(d_k) L_k + pre_penalty \times difHead + vel_penalty \times difvelocity \quad (6)$$

که در آن $pre_penalty$ ضریب جریمه مربوط به قید فشار و $pre_velocity$ ضریب جریمه مربوط به قید سرعت در شبکه است.

^۱ - Design space



۲-۲. تعریف و پیاده‌سازی فضای ژنتیک

از آنجا که کد باینری به عنوان یکی از پرکاربردترین روش کدگذاری در الگوریتم ژنتیک محسوب می‌شود، در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک باینری استفاده شده است. جهت کاهش طول کروموزم‌ها، متغیرها با کمترین طول ممکن به طوری که جواب‌ها از دقت کافی برخوردار باشد، نمایانده شده‌اند. با کاهش طول کروموزم، حجم فضایی که الگوریتم ژنتیک باید در آن به جستجو بپردازد و نیز حجم حافظه‌ی کامپیوتری مورد نیاز کاهش می‌یابد. متغیرهای تصمیم در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های انتقال آب دو متغیر تصمیم قطر و طول لوله‌ها معرفی می‌شوند. به منظور ایجاد امکان کنترل بهتر و بالا بردن انعطاف پذیری الگوریتم، برای هریک از فضاهای تصمیم یک کروموزم با طول مشخص در نظر گرفته شده است. به بیان ساده‌تر در این الگوریتم دو جمعیت مجزا در نظر گرفته شده‌اند. کروموزم‌های جمعیت اول حاوی قطر لوله‌ها و در جمعیت دوم کروموزم‌ها حاوی طول لوله‌ها هستند. این کروموزوم‌ها هریک حاوی ژن‌های ۴ بیتی برای هریک از لوله‌های شبکه است.

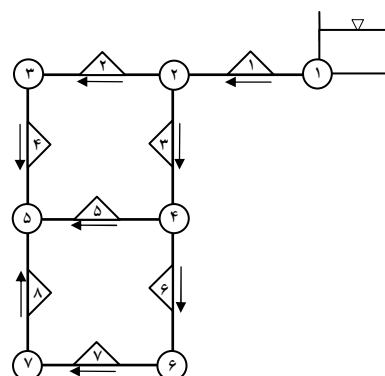
۳-۲. تعریف و پیاده‌سازی عملگرهای الگوریتم ژنتیک

آخرین مفهوم اساسی در معرفی یک الگوریتم ژنتیک کارآمد معرفی عملگرهای آن است. در شروع اجرای الگوریتم، ابتدا یک جمعیت اولیه با اندازه‌ی مناسب به طوری که فضای جستجو را پوشش دهد، انتخاب شده و پس از آن رمزگشایی کروموزوم‌ها انجام می‌گیرد. برای هریک از کروموزوم‌ها در جمعیت اولیه، برنامه‌ی شبیه‌ساز اجرا شده و با توجه به نتایج خروجی حاصل از آن و میزان برآورده شدن تابع هدف و قیود، برازندگی متناسب با هر کروموزوم تعیین می‌شود. انتخاب کروموزوم‌های قوی جهت تولیدمثل کروموزوم‌های جدید توسط روش‌های رتبه‌بندی، چرخ رولت و رقابتی انجام شده است. لازم به ذکر است که در تمامی مراحل ژنتیکی گزینش، ترکیب و جهش، نخبه‌گرایی رعایت شده است. برای تولید کروموزوم‌های جدید در مرحله‌ی ترکیب، از روش‌های تک‌نقطه‌ای، دونقطه‌ای، سه‌نقطه‌ای و پراکنده استفاده شده است.

۳. مطالعه‌ی موردی

۳-۱. مقدمه

شبکه‌ی انتقال مورد بررسی شبکه معرفی شده توسط آلپروویترز و شامیر (۱۹۹۷) است [۸]. شبکه‌ی انتقال آب مطابق شکل (۱)، متشکل از ۸ لوله است که به صورت یک سیستم دو حلقه‌ای طراحی شده است. این سیستم از طریق یک منبع با هد ثابت به صورت ثقلی تغذیه می‌شود. ارتفاع و میزان مصرف آب در هریک از گره‌ها در جدول (۱) ارایه شده است. مخزن این شبکه با هد ثابت ۲۱۰ متر شبکه را تغذیه می‌کند. تمام لوله‌ها از جنس فولاد با ضریب هیزن-ولیامز ۱۳۰ و به طول ۱۰۰۰ متر هستند. در جدول (۲) هزینه‌ی واحد طول لوله‌های مختلف مشخص شده است. لازم به ذکر است که به دلیل استفاده از واحد اینچ برای مشخص کردن قطر لوله‌ها در مرجع [۸]، در این مقاله نیز از این واحد استفاده شده است.



شکل ۱ - شبکه‌ی دو حلقه‌ای مورد مطالعه [۸]



جدول ۱ - مشخصات گره‌ها در شبکه‌ی شکل ۱

شماره گره	مصرف (m^3/h)	ارتفاع (m)
۲	۱۰۰	۱۵۰
۳	۱۰۰	۱۶۰
۴	۱۲۰	۱۵۵
۵	۲۷۰	۱۵۰
۶	۳۳۰	۱۶۵
۷	۲۰۰	۱۵۰

جدول ۲ - هزینه واحد طول لوله‌ها

قطر (in)	۱	۲	۳	۴	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸	۲۰	۲۲	۲۴
هزینه	۲	۵	۸	۱۱	۱۶	۲۳	۳۲	۵۰	۶۰	۹۰	۱۳۰	۱۷۰	۳۰۰	۵۵۰

۳-۲. شبیه‌سازی جریان در شبکه

همانطور که بیان شد، الگوریتم ژنتیک بر پایه‌ی انتخاب تصادفی جهت‌دار عمل می‌کند. این به این معناست که در هریک از تکرارهای الگوریتم ژنتیک، شرایط هیدرولیکی حاکم بر شبکه حاصل از برنامه‌ی شبیه‌سازی، جمعیت در تکرار بعدی را تعیین می‌کند. در این تحقیق، برنامه‌ی شبیه‌سازی جریان در شبکه در محیط نرم‌افزار *MATLAB* نوشته شده است. برای محاسبه‌ی افت طولی لوله‌ها از رابطه‌ی هیزن-وليامز استفاده شده است. ورودی برنامه شبیه‌سازی شامل قطر، طول و ضریب هیزن-وليامز لوله‌ها، هزینه‌ی هریک از اجزای شبکه و ضرایب جریمه‌ی انحراف قید فشار و انحراف قید سرعت است. خروجی این برنامه شامل سرعت در لوله‌ها، فشار در تمامی گره‌های موجود و مقدار تابع هدف است.

۳-۳. طراحی بهینه‌ی شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

دو پارامتر اصلی در روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، سرعت همگرایی و عدم توقف الگوریتم در نقاط حدی محلی است. در این بخش با معرفی عملگرهای مختلف انتخاب و ترکیب، به بررسی بهترین نوع الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه‌ی شبکه انتقال آب پرداخته شده است. معیار مقایسه علاوه بر دو پارامتر ذکر شده در بالا، میزان برآورده شدن تابع هدف و قیود مسئله است. در کلیه‌ی برنامه‌های بهینه‌سازی، اندازه جمعیت ۱۲۰ و نوع عملگر جهش تغییر بیت‌ها از صفر به یک و برعکس با احتمالی برابر نرخ جهش ۰/۰۵ انتخاب شده است. نخبه‌گرایی با انتقال بدون تغییر ۳۰٪ از بهترین جواب‌های هر نسل به نسل بعدی انجام شده است.

مقدار حداقل هد در گره‌ها برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شده است [۸]. حداکثر هد در گره‌های شبکه، حداقل و حداکثر سرعت در لوله‌ها با توجه به استانداردهای موجود به ترتیب ۵۵ متر، ۰/۳ و ۲ متر بر ثانیه انتخاب شده است. لازم به ذکر است که در مرجع [۸] اشاره‌ای به سه قید حداکثر هد، حداقل و حداکثر سرعت نشده است.

برای محاسبه‌ی میزان انحراف قید فشار و سرعت، از پارامتر آماری *RMSE* طبق رابطه ۷ استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left\{ \begin{array}{ll} (x_i - x_{max})^2 & \text{if } x_i > x_{max} \\ (x_{min} - x_i)^2 & \text{if } x_i \leq x_{min} \end{array} \right\}}{n}} \quad (7)$$

که در آن x_i مقدار پارامتر مورد نظر، x_{min} و x_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار مجاز پارامتر و n تعداد کل داده‌ها است. معیار توقف الگوریتم



ژنتیک یکی از مهمترین پارامترها در الگوریتم ژنتیک است. با توجه به نتایج حاصل از اجراهای پیاپی برنامه، معیار توقف عدم تغییر جواب در ۶۰۰ نسل پیاپی معرفی شد. بدین ترتیب، جواب به بهینه‌ی مطلق بسیار نزدیک می‌شود. جدول (۳) مشخصات دوازده حالت بررسی شده و جدول (۴) مشخصات بهینه‌ترین طراحی با استفاده از دوازده حالت معرفی شده در جدول (۳) را نشان می‌دهد. همانطور که در جدول (۴) دیده می‌شود، انحراف قید فشار در تمام حالات وجود دارد. جدول (۵) مقدار هد در گره‌های شبکه را در دوازده حالت طراحی نشان می‌دهد.

جدول ۳ - مشخصات دوازده حالت الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک

حالت	عملگر انتخاب	عملگر ترکیب
اول	رتبه‌بندی	تک نقطه‌ای
دوم	رتبه‌بندی	دو نقطه‌ای
سوم	رتبه‌بندی	سه نقطه‌ای
چهارم	رتبه‌بندی	پراکنده
پنجم	چرخ رولت	تک نقطه‌ای
ششم	چرخ رولت	دو نقطه‌ای
هفتم	چرخ رولت	سه نقطه‌ای
هشتم	چرخ رولت	پراکنده
نهم	رقابتی	تک نقطه‌ای
دهم	رقابتی	دو نقطه‌ای
یازدهم	رقابتی	سه نقطه‌ای
دوازدهم	رقابتی	پراکنده

جدول ۴ - مشخصات بهینه‌ترین طراحی در دوازده حالت بررسی شده

حالت	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	یازدهم	دوازدهم
هزینه‌ی شبکه	۳۹۹۴۹۷	۴۸۸۸۷۶	۴۲۰۰۶۳	۴۰۹۰۸۹	۳۸۳۴۷۰	۳۷۹۷۴۶	۴۳۶۸۸۱	۴۲۳۹۵۲	۳۸۸۳۷۰	۴۰۸۷۰۳	۴۱۰۸۴۲	۳۶۵۶۸۰
زمان اجرا (ثانیه)	۳۱۵۶	۲۰۲۰	۲۱۲۰	۱۵۷۸	۳۰۲۴	۱۶۵۵	۲۱۲۹	۱۹۶۴	۱۱۳۵	۵۹۴	۵۸۰	۷۶۱
تعداد نسل‌ها	۶۹۳۶	۴۵۱۲	۴۷۵۱	۴۳۶۱	۶۰۴۹	۳۶۲۸	۴۷۰۱	۴۹۳۵	۳۱۹۹	۱۷۴۷	۱۶۷۱	۲۷۵۳
RMSE قید سرعت (m/s)	۰	۰	۲/۰۲	۰	۰	۰/۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۱۴
RMSE قید فشار (m)	۲/۱۵	۰/۶۶	۰/۱۴	۲/۵۲	۴/۰۷	۳/۵	۰/۵۵	۳/۰۲	۰/۷۴	۱/۲۴	۱/۸۸	۲/۵۹

جدول ۵ - فشار در گره‌های شبکه در دوازده حالت بررسی شده (بر حسب متر آب)

حالت	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	یازدهم	دوازدهم
۲	۶۰/۲	۵۷/۴	۵۷/۴	۶۰/۷	۶۵/۰	۶۳/۵	۵۵/۴	۶۲/۳	۵۶/۸	۵۷/۸	۵۹/۶	۶۱/۳
۳	۳۶/۷	۴۲/۶	۴۲/۷	۴۵/۳	۴۳/۹	۴۵/۷	۴۰/۷	۴۶/۸	۳۱/۳	۴۳/۰	۴۳/۰	۳۸/۴
۴	۴۵/۱	۴۵/۵	۴۲/۶	۴۹/۵	۵۰/۹	۴۸/۵	۴۱/۴	۴۷/۳	۴۶/۹	۴۴/۴	۴۶/۵	۴۷/۲
۵	۴۳/۹	۴۸/۲	۴۹/۵	۵۰/۲	۴۵/۶	۴۵/۲	۴۱/۷	۴۹/۷	۳۲/۸	۴۴/۷	۴۲/۷	۴۴/۶
۶	۲۹/۹	۲۸/۴	۲۵/۴	۲۷/۷	۳۵/۴	۲۹/۶	۲۸/۷	۲۹/۳	۳۰/۴	۲۸/۹	۳۰/۴	۳۴/۱
۷	۲۹/۵	۳۴/۰	۳۱/۶	۳۳/۹	۳۰/۲	۲۹/۹	۲۹/۷	۳۷/۵	۲۹/۸	۳۰/۰	۲۹/۶	۳۰/۹



۴. بحث و نتیجه گیری

برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از بهینه‌سازی توسط دوازده حالت در نظر گرفته‌شده، معیارهای مهم جهت مقایسه‌ی نتایج و معرفی بهترین عملگرها برای طراحی بهینه شبکه انتقال آب به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

۱. هزینه‌ی شبکه
 ۲. توانایی الگوریتم در برآورده کردن قیود سرعت و فشار
 ۳. سرعت همگرایی
- با بررسی نتایج بدست آمده در جدول (۴)، کم‌هزینه‌ترین شبکه‌ها در حالات اول، پنجم، نهم و دوازدهم بدست آمده است. نقطه مشترک این حالات استفاده از عملگر ترکیب تک‌نقطه‌ای است. در حالت دوازدهم انحراف بیشتر قیود مشاهده می‌شود و این امر نامطلوب بودن این حالت را نشان می‌دهد. عیب روش‌های ترکیب دونقطه‌ای، سه‌نقطه‌ای و پراکنده نسبت به روش تک‌نقطه‌ای بدین معناست که در این روش‌ها، تغییرات بیشتری بر روی کروموزوم‌های والد داده می‌شود و این امر باعث از بین رفتن تعداد زیادی از جواب‌های مطلوب و یا نزدیک به مطلوب موجود در جمعیت می‌شود. معیار دوم جهت مقایسه‌ی نتایج، توانایی الگوریتم در برآورده کردن قیود سرعت و فشار است. نتایج ثبت شده در جدول (۴) نشان می‌دهد که الگوریتم تقریباً در تمامی حالات توانایی خوبی در ارضای قید سرعت دارد، ولی در مورد قید فشار انحرافات دیده می‌شود. میزان انحراف در حالات سوم، هفتم و نهم کمترین مقدار است. البته، در حالت سوم قید سرعت ارضا نشده است. پس در این قسمت دو حالت هفتم و نهم به عنوان حالات برتر مشخص می‌شوند.

سومین معیار سرعت همگرایی است. با مقایسه‌ی زمان اجرای حالات دوازده گانه، کمترین زمان اجرا در حالات هشت تا دوازده دیده می‌شود. نقطه‌ی مشترک این حالات استفاده از عملگر انتخاب رقابتی است. روش انتخاب چرخ رولت مبتنی بر برازندگی است. در این روش معمولاً مشکلاتی از قبیل کندی و همگرایی ناگهانی جستجو به خاطر کوچک‌شدن سریع فضای جستجو پیش می‌آید. در مسایل طراحی شبکه‌های انتقال آب، دامنه نوسان زیادی در پارامترهای هیدرولیکی شبکه (سرعت و فشار) وجود دارد. برای مثال، مشاهده سرعت برابر با ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در جریان بهینه‌سازی امری معمول است. در چنین شرایطی، این انحراف زیاد قیود باعث اضافه‌شدن جریمه زیادی به تابع هدف می‌شود. استفاده از عملگر انتخاب چرخ رولت باعث حذف سریع قسمت بزرگی از دامنه‌ی جستجو از فضای قابل قبول شده و سرعت همگرایی را به شدت کاهش می‌دهد. در روش رتبه‌بندی بهترین کروموزوم‌ها تفاوت چندانی با هم ندارند. این امر باعث کاهش شدید سرعت همگرایی می‌شود. در مسایل طراحی بهینه شبکه‌های انتقال آب جهت جلوگیری از به دام افتادن الگوریتم در بهینه‌ی محلی، نیاز به انتخاب جمعیتی با اندازه بزرگ است. در چنین مسایلی که تعداد حالات ممکن بالا است، روش انتخاب رتبه‌بندی سرعت همگرایی را به شدت کاهش می‌دهد [۱].

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، بهترین عملگرهای ژنتیک در این تحقیق، حالت نهم است. در این حالت، برای انتخاب از روش رقابتی و برای ترکیب از روش تک‌نقطه‌ای استفاده شده است. در این تحقیق، با معرفی کروموزوم‌های مجزا برای هریک از متغیرهای تصمیم (قطر و طول لوله‌ها) از ایجاد جواب‌های غیرممکن توسط عملگر ترکیب جلوگیری شد. با این کار، تمام جمعیت در هر نسل در تولید نسل بعدی مؤثر بوده و سرعت همگرایی به شدت افزایش می‌یابد.

همانطور که قبلاً بیان شد، این شبکه در گذشته توسط محققین مختلفی بررسی شده است. لیستی از این محققین و روش استفاده شده توسط آن‌ها به شرح زیر است:

۱. آلپرویتز و شامیر (۱۹۷۷): گرادیان برنامه‌ریزی خطی [۸]
۲. کسلر و شامیر^۱ (۱۹۸۹): گرادیان تابع هدف [۷]
۳. ایگر و همکاران^۲ (۱۹۹۴): برنامه‌ریزی خطی داخلی و گرادیان تابع هدف خارجی [۷]
۴. دراگون و همکاران^۳ (۱۹۹۷): الگوریتم ژنتیک [۷]
۵. استفیلد و کارپیکاک^۴ (۲۰۰۵): الگوریتم ژنتیک خارجی و برنامه‌ریزی خطی داخلی [۷]

در تمام تحقیقات پیشین، تنها قید محدودیت هد در گره‌ها در نظر گرفته شده است. در این روش‌ها، کم‌ترین هزینه ساخت شبکه و فشار در شش گره‌ی شبکه برای طرح بهینه در جدول (۷) نشان داده شده است. ستون آخر این جدول حاوی مشخصات شبکه‌ی طراحی شده در این تحقیق

^۱ - Kessler and Shamir

^۲ - Eiger et al.

^۳ - Dragan et al.

^۴ - Ostfeld and Karpibka



جدول ۷ - نتایج بهینه‌سازی

روش	۱	۲	۳	۴	۵	۶
هزینه	۴۹۷۵۲۵	۴۱۷۵۰۰	۴۰۲۳۵۲	۴۱۹۰۰۰	۴۰۷۴۹۲	۳۸۸۳۷۰
هد (m)	هد (m)	هد (m)	هد (m)	هد (m)	هد (m)	هد (m)
۵۳/۹	۵۳/۲	۵۳/۲	۵۳/۲	۵۳/۲	۵۳/۲	۵۶/۸
۳۲/۳	۲۹/۵	۲۹/۸	۳۰/۴	۳۰/۱	۳۱/۳	
۴۴/۹	۴۳/۶	۴۳/۸	۴۳/۴	۴۳/۱	۴۶/۹	
۳۲/۳	۲۹/۴	۲۹/۹	۳۳/۷	۳۰/۱	۳۲/۸	
۳۱/۱	۲۹/۶	۲۹/۸	۳۰/۴	۳۰/۰	۳۰/۴	
۳۱/۵	۲۹/۵	۲۹/۸	۳۰/۶	۳۰/۱	۲۹/۸	

با توجه به نتایج جدول (۷)، کمترین هزینه‌ی شبکه در ستون ششم و توسط روش معرفی شده در این مقاله بدست آمده است. در جدول (۷)، مقدار هد در گره‌های شبکه‌های طراحی شده توسط روش‌های مختلف مشخص شده و گره‌هایی که مقدار هد در آن‌ها از میزان مجاز تعدی کرده است با رنگ متفاوت مشخص شده است. این نتایج کارکرد قابل قبول روش ارائه شده در این تحقیق را در ارضای قیود هیدرولیکی و قابلیت اطمینان بالای آن را مشخص می‌کند. لازم به ذکر است که زمان لازم برای الگوریتم معرفی شده حدود یک دهم زمان همگرایی توسط روش‌های استفاده شده توسط محققین دیگر است.

۱۲. مراجع

- علیرضا، م.، (۱۳۸۶)، "مقدمه‌ای بر الگوریتم‌های ژنتیک و کاربردهای آن"، شرکت ناقوس اندیشه، تهران.
- پورشهایی، ش.، (۱۳۸۷)، "بهینه‌سازی موقعیت و ظرفیت تجهیزات کنترل جریان ناماندگار در سیستم‌های هیدرولیکی تحت فشار با منطق فازی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
- Wu, Z.Y. and Simpson, A.R., (2001), "Competent Genetic-Evolutionary Optimization of Water Distribution Systems," *Journal of Computation in Civil Engineering*, **15** (2), pp 89–101.
- Dany, G.C. and Simpson, A.R. and Murphy, L.J., (1996), "An Improved Genetic Algorithm for Pipe Network Optimization," *Journal of water Resource Research*, **32** (2), pp 449–458.
- Savic, D.A. and Walters, G.A., (1997), "Genetic Algorithms for Least Cost Design of Water Distribution Networks," *Journal of water Resource Planning and Management*, **123** (2), pp 67–77.
- Jung, B.S. and Karney, B.W., (2006), "Hydraulic Optimization of Transient Protection Devices Using GA and PSO Approaches," *Journal of water Resource Planning and Management*, **132** (1), pp 44–52.
- Ostfeld, A. and Karpibka, A., (2005), "A GA-LP Approach to Water Distribution Systems Optimal design," *Journal of water Resource Planning and Management*, **42** (11), pp 67–77.
- Alperovits, E. and Shamir, U., (1977), "Design of Optimal Water Distribution Systems," *Journal of water Resource Research*, **13** (6), pp 885–900.