

طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان: مقایسه عملکرد چهار الگوریتم

رامتین معینی

گروه عمران، دانشگاه اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۰۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹)

DOI: 10.18869/acadpub.jcme.36.1.127

چکیده - در این تحقیق از قابلیت‌های الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، در طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده می‌شود. بدین‌منظور دو فرمول‌بندی پیشنهاد می‌شود که در فرمول‌بندی اول قطر لوله‌ها و در فرمول‌بندی دوم تراز گره‌های شبکه‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم مسأله منظور می‌شود. به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان، چهار الگوریتم سیستم مورچه، سیستم مورچه برتر، سیستم مورچه ترتیبی و سیستم مورچه پیشینه - کمینه برای حل مسأله مذکور به کار گرفته می‌شود. مسائل نمونه‌های با استفاده از هر دو فرمول‌بندی الگوریتم پیشنهادی حل شده و نتایج با سایر نتایج موجود مقایسه می‌شود. نتایج نشان‌دهنده آن است که الگوریتم‌های پیشنهادی، الگوریتم‌های مناسب در حل مسأله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب است و در مقایسه با الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان، نتایج حاصل از الگوریتم سیستم مورچه پیشینه - کمینه مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: شبکه جمع‌آوری فاضلاب، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، طراحی، بهینه ابعاد، قطر لوله‌ها، تراز گره‌ها.

Optimal Design of Sewer Network Size using Ant Colony Optimization Algorithm: Comparing Performance of Four Different Algorithms

R. Moeini

Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract: In this paper, the features of Ant Colony Optimization Algorithm (ACO) are used to find optimal size for sewer network. Two different formulations are proposed. In the first formulation, pipes diameters and in the second formulation, nodal elevations of sewer network are taken as decision variables of the problem. In order to evaluate the performance of different ACOs, four algorithms of Ant System, Elitist Ant System, Ranked Ant System and Max-Min Ant System are used to solve this optimization problem. Different test examples are solved using two proposed formulations for each ACOs and the results are presented and compared with other available results. The results indicate the efficiency of the proposed methods in the solution of sewer network design optimization problem and the results of Max-Min Ant System are better in comparison with other ACOs.

Keywords: Sewer network, Ant Colony Optimization Algorithm (ACO), Design, Optimal size, Pipe diameters, Nodal elevations.

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: r.moeini@eng.ui.ac.ir

میانگین تعداد گزینه‌های تصمیم موجود در هر نقطه تصمیم مسأله	NO_{avg}	سطح مقطع لوله l ام در عمق جریان y_l	a_l
احتمال انتخاب دوباره بهترین جواب بهینه موضعی	P_{best}	مقدار تخلف از قید g ام	CSV_g
احتمال انتخاب گزینه تصمیم j ام در نقطه تصمیم i ام	$P_{ij}(m, t)$	قطر لوله l ام	d_l
توسط مورچه m ام در تکرار t ام		مجموعه (لیست) قطرهای تجاری بالادست لوله l ام	\bar{d}_l
مقدار دبی جریان فاضلاب در لوله l ام	Q_l	مجموعه قطرهای تجاری لوله‌های فاضلاب‌روها	\bar{D}
مقدار دبی موضعی جریان فاضلاب ورودی به گره i	q_i	عمق متوسط کارگذاری لوله l ام	\bar{E}_l
شعاع هیدرولیکی لوله l ام در عمق جریان y_l	r_l	حداکثر مقدار عمق کارگذاری لوله‌های فاضلاب‌روها	E_{max}
شیب طولی لوله l ام	S_l	حداقل مقدار عمق کارگذاری لوله‌های فاضلاب‌روها	E_{min}
حداقل مقدار شیب طولی لوله‌های فاضلاب‌روها	S_{min}	هزینه جواب به‌دست آمده توسط مورچه m ام در تکرار t ام	$f(S_m(t))$
جواب به‌دست آمده توسط مورچه m ام در تکرار t ام	$S_m(t)$	هزینه بهترین جواب به‌دست آمده توسط M مورچه در تکرار t	$f(S_l(t))$
بهترین جواب ساخته شده توسط M مورچه در تکرار t	$S_l(t)$	تابع هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب (تابع هدف مسأله)	F
سرعت جریان در لوله l ام	V_l	تابع هدف جریمه‌دار شده	F_p
حداکثر مقدار سرعت جریان در فاضلاب‌روها	V_{max}	شمارنده قیدها	g
حداقل مقدار سرعت جریان در فاضلاب‌روها	V_{min}	تعداد قیود مسأله	G
عمق جریان در لوله l ام	y_l	ارتفاع آدم‌رو m ام	h_m
مقدار ضریب وزن فرمون	α	شمارنده گره‌ها	i
مقدار ضریب جریمه ثابت	α_p	تعداد کل گزینه‌های تصمیم در نقطه تصمیم i ام	J
مقدار ضریب وزن هدایت‌گر کاوشی	β	تعداد کل گره‌های شبکه	K
نسبت پرشدگی جریان در لوله l ام	β_l	تابع هزینه ساخت آدم‌رو	K_m
حداقل مقدار نسبت پرشدگی جریان در لوله‌های فاضلاب‌روها	β_{min}	تابع هزینه لوله‌گذاری	K_p
حداکثر مقدار نسبت پرشدگی جریان در لوله‌های فاضلاب‌روها	β_{max}	طول لوله l ام	L_l
مقدار تغییر فرمون گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i	$\Delta\tau_{ij}$	شمارنده لوله‌ها	l
مقادیر هدایت‌گر کاوشی گزینه تصمیم j ام در نقطه تصمیم i ام	η_{ij}	تعداد کل آدم‌روها	M
ضریب تبخیر فرمون	ρ	شمارنده آدم‌روها	m
مرز پایینی فرمون در تکرار t ام	$\tau_{min}(t)$	ضریب زبری مانینگ	n
مرز بالایی فرمون در تکرار t ام	$\tau_{max}(t)$	تعداد کل لوله‌ها	N
غلظت فرمون گزینه تصمیم j ام در نقطه تصمیم i ام و	$\tau_{ij}(t)$		

تکرار t ام	$\tau_{ij}(t+1)$	تعداد لوله‌های متصل به گره i	N_i
غلظت فرمون گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i و		تعداد تکرار	nt
تکرار $t+1$ ام	ϕ	تعداد مورچه	na
فاکتور ارزش فرمون	σ		
تعداد مورچه برتر			

۱- مقدمه

امروزه با توجه به کاهش منابع مالی و ارزشمند بودن آنها لزوم توجه به صرفه‌جویی در ساخت پروژه‌های عمرانی ضروری است. یکی از مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین پروژه‌های عمرانی، احداث شبکه‌های فاضلاب است. فاضلاب مناطق صنعتی، تجاری و مسکونی به منظور استفاده مجدد از آنها و یا رهاسازی لازم است که توسط شبکه‌های فاضلاب جمع‌آوری شده و به تصفیه‌خانه‌ها منتقل شوند. عدم وجود شبکه مناسب برای جمع‌آوری فاضلاب خانگی، سلامت جامعه بشری را به خطر می‌اندازد.

با توجه به هزینه‌بر بودن احداث شبکه‌های فاضلاب، لازم است که روش‌های بهینه‌سازی، برای کاهش هزینه‌های اقتصادی در این شبکه‌ها، مورد استفاده قرار گیرد. طراحی و ساخت بهینه این شبکه‌ها، نیازمند مدل‌سازی مسأله در قالب یک مسأله بهینه‌سازی است. روش‌های مختلفی برای حل مدل بهینه‌سازی مسأله طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است که به‌کارگیری آنها با مزایا و معایب مختلفی همراه است. اصولاً چهار دسته روش کلی برای حل مسائل بهینه‌سازی از جمله مسأله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب ارائه شده است. این چهار دسته روش عبارتند از برنامه‌ریزی خطی^۱ (LP)، برنامه‌ریزی غیرخطی^۲ (NLP)، برنامه‌ریزی پویا^۳ (DP) و الگوریتم‌های فراکاوشی^۴ که از جمله آنها می‌توان الگوریتم ژنتیک^۵ (GA)، الگوریتم جفت‌گیری زنبور عسل^۶ (HBMO)، الگوریتم هوش جمعی^۷ (PSO)، اتوماتای سلولی^۸ (CA)، الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده^۹ (SA) و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان^{۱۰} (ACO) را نام برد. امروزه با توجه به قابلیت‌های

الگوریتم‌های فراکاوشی، استفاده از این الگوریتم‌ها در حل مسائل بهینه‌سازی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. هیستد [۱] و جیو و همکاران [۲] مروری بر کارهای انجام شده در زمینه طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب در چهل سال اخیر ارائه کردند که در ادامه به مهم‌ترین آنها اشاره می‌شود. دشر و دیویس [۳] و الیمام و همکاران [۴] از روش‌های کاوشی و ابتکاری در طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده کردند. روش برنامه‌ریزی ریاضی خطی توسط دجانی و هستی [۵] و سوامی و شارما [۶] در طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب با کمترین هزینه مورد استفاده قرار گرفت. پرایس [۷] و سوامی [۸] از روش برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی در طراحی شبکه بهینه جمع‌آوری فاضلاب استفاده کردند. روش برنامه‌ریزی پویا توسط برخی از محققان از جمله والش و براون [۹]، میز و ونزل [۱۰]، تمپلمن و والترز [۱۱]، گوپتا و همکاران [۱۲]، ین و همکاران [۱۳]، کولکارتی و خانا [۱۴]، بوتروس و همکاران [۱۵] و دیگو و همکاران [۱۶] در طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی نیز در این حوزه مورد توجه محققین قرار گرفته است. هینی و همکاران [۱۷]، لیانگ و همکاران [۱۸]، افشار و همکاران [۱۹] و حقیقی و بخشی‌پور [۲۰] از الگوریتم ژنتیک در طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب با کمترین هزینه استفاده کردند. اتوماتای سلولی نیز در طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب توسط جیو [۲۱]، جیو و همکاران [۲۲] و افشار و همکاران [۲۳] مورد استفاده قرار گرفته است. افشار [۲۴، ۲۵، ۲۶] از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در پیدا کردن جواب بهینه برای مسأله طراحی

بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب استفاده کرد. ایزکیودورو [۲۷] و نفیسی و احمدی [۲۸] از الگوریتم هوش جمعی ذرات در طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب خانگی استفاده کرد. الگوریتم نورد شبیه‌سازی شده نیز توسط کارویچ و میز [۲۹] در طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب مورد استفاده قرار گرفت.

امروزه استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی با توجه به قابلیت‌های آنها، به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های روش‌های سنتی و ریاضی مورد توجه قرار گرفته است. فلسفه پیدایش این روش‌ها را می‌توان در این حقیقت دانست که در مسائل بهینه‌سازی مهندسی تصمیم‌گیری با رسیدن به یک جواب مناسب و نه لزوماً بهینه مطلق صورت می‌پذیرد. شایان ذکر است که هریک از الگوریتم‌های فراکاوشی قابلیت‌ها و ضعف‌های خاص خود را دارا است و لذا استفاده هر یک از آنها برای حل مسئله‌ای خاص محدود می‌شود و در حالت کلی یک الگوریتم خاص برای حل تمامی مسائل بهینه‌سازی وجود ندارد. با توجه به موارد مذکور، هدف اصلی مقاله حاضر، ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف پیشنهادی بهینه‌سازی جامعه مورچگان در حل مسئله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب است.

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان، چهار الگوریتم سیستم مورچه^{۱۱} (AS)، سیستم مورچه برتر^{۱۲} (ASelite)، سیستم مورچه ترتیبی^{۱۳} (ASrank) و سیستم مورچه بیشینه-کمینه^{۱۴} (MMAS) در حل مسئله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور دو فرمول‌بندی پیشنهاد می‌شود که در فرمول‌بندی اول قطر لوله‌ها و در فرمول‌بندی دوم تراز گره‌های شبکه به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله منظور می‌شود. مسائل نمونه‌ای با استفاده از هر دو فرمول‌بندی الگوریتم‌های پیشنهادی حل شده و نتایج با سایر نتایج موجود مقایسه می‌شود. لذا ساختار تحقیق حاضر به شرح زیر است. در بخش دوم مدل بهینه‌سازی مسئله مذکور تعریف می‌شود. اصول و روابط حاکم بر الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در بخش سوم ارائه می‌شود. با

مشخص شدن روش تحقیق در بخش چهارم، مسائل نمونه‌ای در بخش پنجم براساس روش‌های پیشنهادی حل شده و نتایج مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- مدل بهینه‌سازی مسئله طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب

مدل بهینه‌سازی مسئله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب در یک جانمایی مشخص، با تعیین تابع هدف و قیود مسئله، تعریف می‌شود. در این تحقیق هدف حداقل‌سازی هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب است که به‌طور کلی تابع مقدار حجم خاک‌برداری، قطر لوله‌ها، تعداد و قطر آدم‌روها^{۱۵}، هد و دبی ایستگاه‌های پمپاژ و ارتفاع آدم‌روهای ریزشی^{۱۶} است. در این تحقیق طراحی بهینه ابعاد شبکه تقلی بدون در نظر گرفتن هزینه‌های پمپاژ و آدم‌روهای ریزشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به موارد مذکور، هدف مسئله حداقل‌سازی هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب است که تابع هزینه به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$F = \sum_{l=1}^N L_l K_p (d_l, \bar{E}_l) + \sum_{m=1}^M K_m (h_m) \quad (1)$$

که در رابطه فوق، F تابع هزینه ساخت شبکه جمع‌آوری فاضلاب، K_p تابع هزینه لوله‌گذاری، d_l قطر لوله l ام، \bar{E}_l عمق متوسط کارگذاری لوله l ام، L_l طول لوله l ام، N تعداد کل لوله‌ها، K_m تابع هزینه ساخت آدم‌رو، h_m ارتفاع آدم‌رو m ام و M تعداد کل آدم‌روها است.

تعریف مدل بهینه‌سازی مسئله نیازمند تعریف قیود هیدرولیکی و قابلیت استفاده و دسترسی است که شامل موارد زیر است:

قید پیوستگی جریان در گره‌های شبکه: بر این اساس مجموع دبی فاضلاب ورودی به هر گره با مجموع دبی فاضلاب خروجی از آن برابر است:

$$\sum_{j=1}^{N_i} \pm Q_j = -q_i \quad \forall i = 1, \dots, K \quad (2)$$

که در رابطه فوق، N_i تعداد لوله‌های متصل به گره i ، Q_j مقدار دبی جریان فاضلاب در لوله l ام (مابین گره i و گره j)

محدود می‌شود. لذا خواهیم داشت:

$$E_{\min} \leq \bar{E}_I \leq E_{\max} \quad \forall I=1, \dots, N \quad (5)$$

که در رابطه فوق، \bar{E}_I عمق متوسط کارگذاری لوله I ، E_{\max} حداکثر مقدار عمق کارگذاری لوله‌های فاضلاب‌روها و E_{\min} حداقل مقدار عمق کارگذاری لوله‌های فاضلاب‌روها است.

قید عمق جریان فاضلاب در لوله‌های فاضلاب‌روها:

به دلیل امکان وجود مواد درشت معلق در فاضلاب‌روها و امکان گیر کردن این مواد به کف فاضلاب‌رو و در نتیجه ته‌نشینی آنها، برای عمق جریان فاضلاب در لوله‌های فاضلاب‌روها یک مقدار حداقل منظور می‌شود. همچنین به منظور جلوگیری از تشکیل جریان تحت فشار در مجاری فاضلاب‌روها، برای عمق جریان فاضلاب در لوله‌های فاضلاب‌روها یک مقدار حداکثر نیز منظور می‌شود. قید مذکور را می‌توان براساس عمق نسبی جریان (نسبت پرشدگی جریان) به شکل زیر تعریف کرد:

$$\beta_{\min} \leq \beta_I \leq \beta_{\max} \quad \forall I=1, \dots, N \quad (6)$$

$$\beta_I = \left(\frac{y}{d} \right)_I \quad \forall I=1, \dots, N \quad (7)$$

که در رابطه فوق، β_I نسبت پرشدگی جریان در لوله I ، β_{\min} حداقل مقدار نسبت پرشدگی جریان در لوله‌های فاضلاب‌روها، β_{\max} حداکثر مقدار نسبت پرشدگی جریان در لوله‌های فاضلاب‌روها و y_I عمق جریان در لوله I است.

قید قاعده تلسکوپی لوله‌ها: در طراحی شبکه فاضلاب،

قطر لوله‌های فاضلاب‌رو خروجی از هر گره لازم است که بزرگتر یا مساوی قطر لوله‌های فاضلاب‌رو ورودی به آن گره باشد. لذا خواهیم داشت:

$$d_i \geq \bar{d}_i \quad \forall I=1, \dots, N \quad (8)$$

که در رابطه فوق، \bar{d}_i مجموعه (لیست) قطرهای تجاری بالادست لوله I است.

معادله هیدرولیکی مانینگ: سرعت جریان در لوله‌ها و سایر

پارامترهای هیدرولیکی جریان با استفاده از معادله هیدرولیکی مناسب محاسبه می‌شود. در این تحقیق از معادله هیدرولیکی مانینگ برای محاسبه سرعت جریان در لوله‌ها و سایر پارامترهای جریان استفاده می‌شود. لذا خواهیم داشت:

که ورودی به گره مثبت و خروجی از گره منفی است، q_i مقدار دبی موضعی جریان فاضلاب ورودی به گره i و K تعداد کل گره‌های شبکه است.

قید سرعت جریان در لوله‌های فاضلاب‌روها: سرعت جریان

در مقاطع فاضلاب‌رو لازم است که در یک محدوده مجاز حداکثر و حداقل قرار گیرد. سرعت حداقل برای جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد و مسدود شدن لوله‌های شبکه و سرعت حداکثر برای جلوگیری از سایش لوله‌های فاضلاب‌رو مدنظر قرار می‌گیرد. از آنجا که سایش لوله‌ها علاوه بر سرعت جریان و جنس مواد معلق به جنس لوله نیز بستگی دارد، لذا سرعت حداکثر مجاز تابعی از جنس لوله است. لذا خواهیم داشت:

$$V_{\min} \leq V_I \leq V_{\max} \quad \forall I=1, \dots, N \quad (3)$$

که در رابطه فوق، V_I سرعت جریان در لوله I ، V_{\max} حداکثر مقدار سرعت جریان در فاضلاب‌روها، V_{\min} حداقل مقدار سرعت جریان در فاضلاب‌روها و N تعداد کل لوله‌های شبکه است.

قید شیب حداقل لوله‌های فاضلاب‌روها: شیب لوله‌های

فاضلاب‌روها لازم است که از شیب حداقل مجاز بیشتر باشند. شیب حداقل معمولاً برای تأمین سرعت حداقل (سرعت شستشو) به منظور جلوگیری از ته‌نشینی مواد جامد مدنظر قرار می‌گیرد. همچنین شیب حداقل به منظور جلوگیری از ایجاد شیب منفی ناشی از کارگذاری ناصحیح، نیز در نظر گرفته می‌شود. لذا خواهیم داشت:

$$S_I \geq S_{\min} \quad \forall I=1, \dots, N \quad (4)$$

که در رابطه فوق، S_I شیب طولی لوله I و S_{\min} حداقل مقدار شیب طولی لوله‌های فاضلاب‌روها است.

قید عمق متوسط کارگذاری لوله‌های فاضلاب‌روها: عمق

کارگذاری لوله‌های فاضلاب‌روها لازم است که در یک محدوده مجاز حداکثر و حداقل قرار گیرد. حداقل مقدار عمق کارگذاری لوله‌ها، معمولاً به منظور جلوگیری از یخ‌زدگی، فشار ناشی از بارهای وارده خارجی در نظر گرفته می‌شود. همچنین به دلیل مشکلات ناشی از آب‌های زیرزمینی و محدودیت‌های حفاری در عمق زیاد، عمق کارگذاری لوله‌ها به میزان حداکثر مجاز نیز

nt، به‌طور خلاصه مراحل حل یک مسأله با استفاده از این الگوریتم را می‌توان مطابق مراحل شکل (۱) تعریف کرد [۳۲ و ۳۳]. شایان ذکر است که در این الگوریتم برای انتخاب گزینه تصمیم در هر نقطه تصمیم رابطه (۱۱) تعریف می‌شود. لذا خواهیم داشت:

$$P_{ij}(a, t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j=1}^J [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (11)$$

که در رابطه فوق، $P_{ij}(m, t)$ احتمال انتخاب گزینه تصمیم i در نقطه تصمیم i ام توسط مورچه m ام در تکرار t ام؛ η_{ij} مقادیر هدایت‌گر کاوشی گزینه تصمیم i ام در نقطه تصمیم i ام، $\tau_{ij}(t)$ غلظت فرمون گزینه تصمیم i ام در نقطه تصمیم i ام و تکرار t ام، J تعداد کل گزینه‌های تصمیم در نقطه تصمیم i ام و α, β مقادیر ضرایب وزن فرمون و هدایت‌گر کاوشی هستند.

به‌روزرسانی فرمون مسیره‌ها یکی از اصلی‌ترین مراحل حل مسأله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان است که تاکنون روابط مختلفی بدین منظور تعریف شده است و لذا الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان نیز بر این اساس پیشنهاد شده است. رابطه کلی به‌روزرسانی فرمون به شکل زیر است [۳۴ و ۳۵]:

$$\tau_{ij}(t+1) = T(\rho, \tau_{ij}(t), \Delta\tau_{ij}) \quad (12)$$

که در رابطه فوق، ρ ضریب تبخیر فرمون ($0 \leq \rho \leq 1$) و $\tau_{ij}(t+1)$ غلظت فرمون گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i و تکرار $t+1$ ام بوده که تابع ضریب تبخیر فرمون، مقدار تغییر فرمون ($\Delta\tau_{ij}$) و غلظت فرمون گزینه تصمیم j در نقطه تصمیم i و تکرار t ام ($\tau_{ij}(t)$) است. در الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان رابطه به‌روزرسانی فرمون به شکل‌های زیر بازنویسی می‌شود. به‌عنوان نمونه، در الگوریتم سیستم مورچه خواهیم داشت:

$$T = \rho\tau_{ij}(t) + \sum_{a=1}^{na} \frac{\phi}{f(S_a(t))} I_{S_a(t)}(i, j) \quad (13)$$

که در رابطه فوق، ϕ کمیتی که به مقدار فرمون بستگی دارد و

$$Q_1 = \frac{1}{n} a_1 \tau_1^\alpha S_1^\beta \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (9)$$

که در رابطه فوق، n ضریب زبری مانینگ، a_1 سطح مقطع لوله i ام در عمق جریان y_1 و τ_1 شعاع هیدرولیکی لوله i ام در عمق جریان y_1 است.

قید اقطار تجاری لوله‌ها: اقطار موجود برای لوله به‌صورت

پیوسته نیست، بلکه لازم است که مقدار آنها از فهرست اقطار تجاری انتخاب شود. لذا خواهیم داشت:

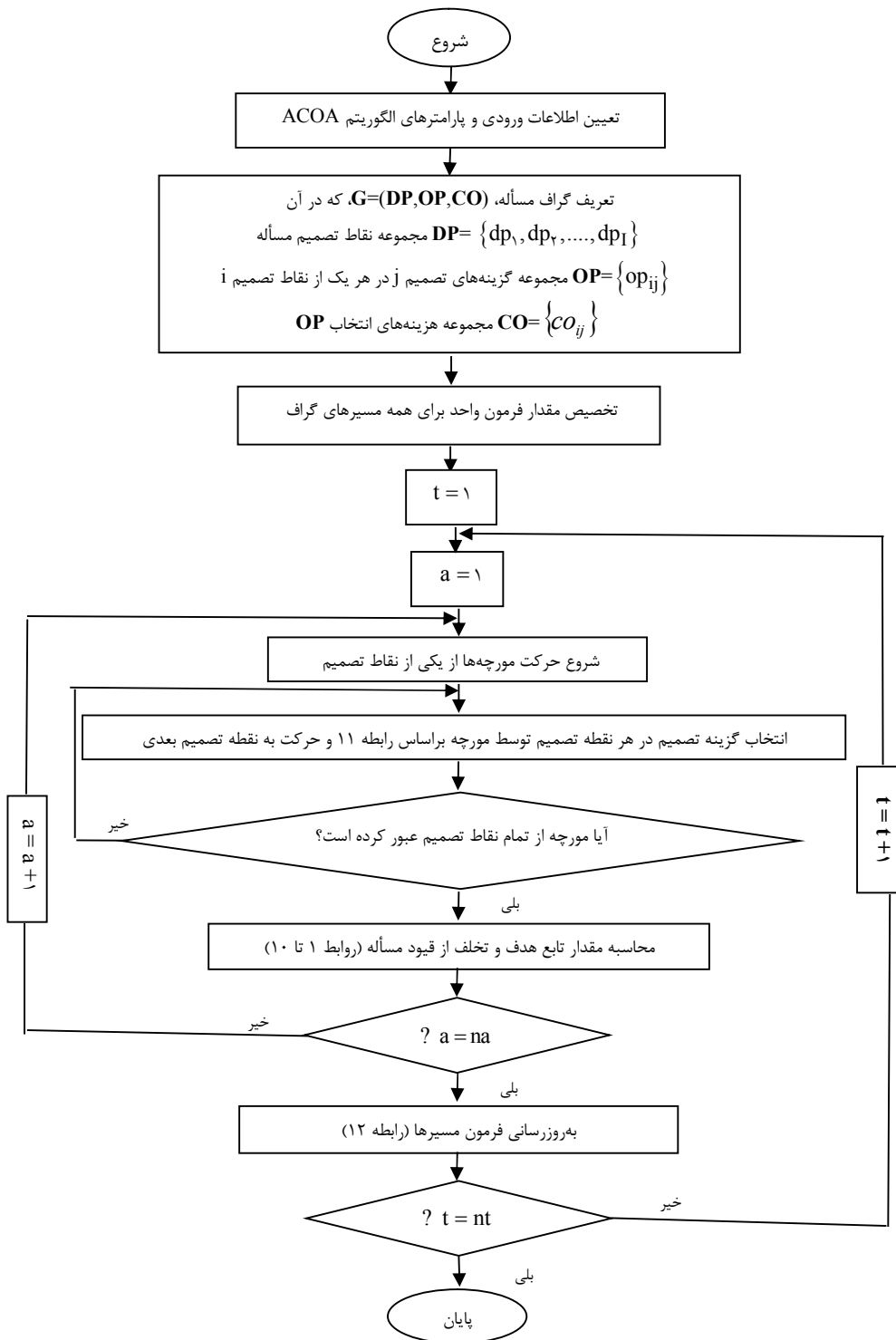
$$d_i \in \bar{D} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (10)$$

که در رابطه فوق، \bar{D} مجموعه قطرهای تجاری لوله‌های فاضلاب‌روها است.

با توجه به فرمول‌بندی ریاضی ارائه شده، مسأله طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب یک مسأله پیچیده غیرخطی مختلط عدد صحیح^{۱۷} (MINLP) است که در این تحقیق از قابلیت‌های الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان برای حل آن استفاده می‌شود.

۳- الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان

الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان بر مبنای رفتار طبیعی جامعه مورچگان در یافتن کوتاه‌ترین مسیر بین لانه و منبع غذا ارائه شده است. هنگامی که مورچه بین لانه و منبع غذایی در حرکت است ماده‌ای شیمیایی به نام فرمون^{۱۸} در مسیر حرکت خود باقی می‌گذارد. با افزایش غلظت فرمون مسیر کوتاه‌تر، سایر مورچه‌ها به عبور از این مسیر ترغیب می‌شوند. اولین الگوریتم پیشنهادی از دسته انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه مورچگان، الگوریتم سیستم مورچه بود که در سال ۱۹۹۱ توسط کلرنی و همکاران پیشنهاد شد [۳۰]. در طول سالیان اخیر این الگوریتم اولیه پیشنهادی توسعه یافت و الگوریتم‌های دیگری، با مبنای قرار دادن این الگوریتم پایه اولیه، پیشنهاد شد که از جمله آنها می‌توان به الگوریتم سیستم جامعه مورچه^{۱۹}، الگوریتم سیستم مورچه برتر، الگوریتم سیستم مورچه ترتیبی و الگوریتم سیستم مورچه پیشینه-کمینه اشاره کرد [۳۱]. با تعیین جامعه‌ای از مورچگان، na ، و تعداد تکرار،



شکل ۱- مراحل حل یک مسئله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان

$$\tau_{\max}(t) = \frac{1}{1-\rho} \frac{\phi}{f(S_1(t))} \quad (18)$$

$$\tau_{\min}(t) = \frac{\tau_{\max}(t)(1-\sqrt[n]{P_{\text{best}}})}{(NO_{\text{avg}}-1)\sqrt[n]{P_{\text{best}}}} \quad (19)$$

که در روابط فوق، $\tau_{\min}(t)$ مرز پایینی فرمون در تکرار t ام، $\tau_{\max}(t)$ مرز بالایی فرمون در تکرار t ام، P_{best} احتمال اینکه بهترین جواب بهینه موضعی دوباره تکرار شود، NO_{avg} میانگین تعداد گزینه‌های تصمیم موجود در هر نقطه تصمیم مسأله بوده و سایر پارامترها پیش از این تعریف شده است.

۴- روش تحقیق

در این تحقیق قابلیت‌های چهار الگوریتم مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان برای حل مدل ریاضی ارائه شده طراحی بهینه ابعاد شبکه فاضلاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ابتدا با تعریف متغیر تصمیم مسأله، نقاط تصمیم مسأله و گزینه‌های تصمیم مربوطه، گراف مسأله تعریف می‌شود. در این تحقیق برای استفاده از هر یک از الگوریتم‌های مورد استفاده دو فرمول‌بندی ارائه می‌شود که در فرمول‌بندی اول قطر لوله‌ها و در فرمول‌بندی دوم تراز ارتفاعی گره‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم مسأله منظور می‌شوند، در صورتی‌که افشار [۲۴، ۲۵ و ۲۶] فقط تراز گره‌ای را به‌عنوان متغیر تصمیم منظور کرد. همچنین در این تحقیق چگونگی اعمال قيود و محاسبه سایر پارامترهای مسأله متفاوت است.

در فرمول‌بندی اول، با انتخاب قطر لوله‌های شبکه به‌عنوان متغیر تصمیم مسأله، نقاط تصمیم مسأله لوله‌های شبکه است. همچنین گزینه‌های تصمیم در هر نقطه تصمیم، مجموعه اقطار تجاری موجود برای لوله‌ها است. ولیکن، در فرمول‌بندی دوم، با انتخاب تراز گره‌های شبکه به‌عنوان متغیر تصمیم مسأله، نقاط تصمیم مسأله گره‌های شبکه است. همچنین گزینه‌های تصمیم در هر نقطه تصمیم، مجموعه مقادیر گسسته‌سازی شده محدود مجاز ترازهای گره‌ای است. این محدوده به صورت $[Z - E_{\max}, Z - E_{\min}]$ تعریف می‌شود که Z تراز سطح زمین در هر گره است. شایان ذکر است که تعداد نقطه تصمیم در فرمول‌بندی اول برابر با تعداد لوله‌ها و در

آن را فاکتور ارزش فرمون τ^o می‌نامند؛ $S_a(t)$ جواب به‌دست آمده توسط مورچه a ام در تکرار t ام، $f(S_a(t))$ هزینه جواب به‌دست آمده توسط مورچه a ام در تکرار t ام بوده و سایر پارامترها پیش از این تعریف شده است. همچنین، اگر در نقطه تصمیم i گزینه تصمیم j توسط مورچه m ام انتخاب شود:

$$I_{S_m(t)}(i, j) = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (14)$$

در غیر این صورت علاوه بر این، در الگوریتم سیستم مورچه برتر خواهیم داشت:

$$T = \rho \tau_{ij}(t) + \sum_{a=1}^{na} \frac{\phi}{f(S_a(t))} I_{S_a(t)}(i, j) + \sigma \Delta \tau_{ij}^{gb}(t) \quad (15)$$

که در رابطه فوق، σ تعداد مورچه برتر، $\Delta \tau_{ij}^{gb}(t)$ تغییر فرمون گزینه‌های تصمیم انتخابی توسط σ مورچه برتر بوده و سایر پارامترها پیش از این تعریف شده است.

همچنین، در الگوریتم سیستم مورچه ترتیبی خواهیم داشت:

$$T = \rho \tau_{ij}(t) + \sum_{a=1}^{\sigma-1} (\sigma - a) \frac{\phi}{f(S_a(t))} I_{S_a(t)}(i, j) + \sigma \Delta \tau_{ij}^{gb}(t) \quad (16)$$

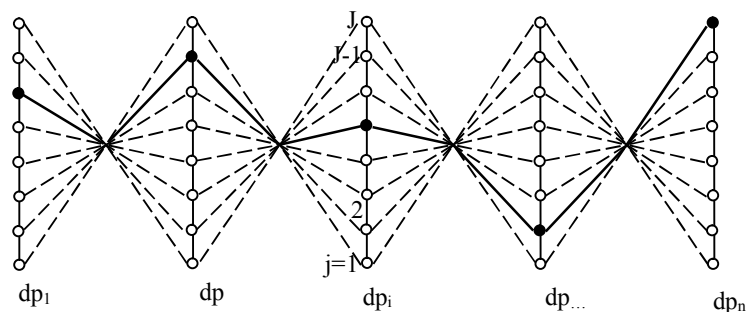
که پارامترهای رابطه فوق پیش از این تعریف شده است. شایان ذکر است که در این الگوریتم مورچه‌های برتر رتبه‌بندی شده و براساس رتبه مورچه‌ها، به‌روزرسانی فرمون انجام می‌شود.

همچنین، در الگوریتم سیستم مورچه پیشینه-کمینه خواهیم داشت:

$$T = \rho \tau_{ij}(t) + \frac{\phi}{f(S_1(t))} I_{S_1(t)}(i, j) \quad (17)$$

که در رابطه فوق، $S_1(t)$ بهترین جواب ساخته شده توسط M مورچه در تکرار t ، $f(S_1(t))$ هزینه بهترین جواب به‌دست آمده بوده و سایر پارامترها پیش از این تعریف شده است.

علاوه بر این در الگوریتم سیستم مورچه پیشینه-کمینه به‌منظور جلوگیری از وقوع همگرایی نا به‌هنگام و سریع جواب‌ها، یک مرز دینامیکی برای شدت فرمون مسیرها تعریف می‌شود و لذا همواره مقدار فرمون تمام مسیرها بین محدوده این دو مرز است. مرزهای تعریف شده به شکل زیر است:



شکل ۲- گراف تعریف شده برای حل مسأله با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان

به‌دست آمده برای گره‌ها به‌عنوان تراز بالادست و پایین‌دست کارگذاری لوله‌های متصل به آن منظور می‌شود.

همچنین با استفاده از فرمول‌بندی دوم پیشنهادی، ترازهای گره‌ای و در نتیجه تراز کارگذاری همه لوله‌های مسأله مشخص می‌شود. با معلوم بودن تراز کارگذاری بالادست و پایین‌دست لوله‌ها و طول لوله‌ها، شیب لوله‌ها قابل محاسبه است. شایان ذکر است که تا زمانی که شیب مثبت برای لوله‌ها حاصل نشود تعیین جانمایی شدنی^{۲۱} برای مسأله امکان‌پذیر نیست و لذا جواب به‌دست آمده در این حالت یک جواب ناشدنی^{۲۲} است. با تعیین جانمایی شدنی برای مسأله، تکمیل فرایند طراحی نیازمند محاسبه قطر لوله‌ها است. در اینجا، قطر لوله‌ها به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که محدودیت‌های مسأله حتی‌الامکان برآورده شود. بنابراین، برای به‌دست آوردن قطر بهینه هر لوله و با شروع از لوله‌های سرشاخه، برای هر لوله کوچکترین قطری که قیود مسأله را ارضا نماید، به‌عنوان قطر بهینه لوله مورد نظر انتخاب می‌شود.

شایان ذکر است که در روش‌های پیشنهادی جواب ساخته شده توسط مورچه‌ها برخی از قیود مسأله را تأمین نمی‌کند و لذا در اینجا از روش تابع جریمه برای تأمین قیود مسأله استفاده شده است. در اعمال قیود مسأله بهینه‌سازی مقید با استفاده از روش تابع جریمه، تابع هدف مسأله به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$F_p = F + \alpha_p \times \sum_{g=1}^G CSV_g \quad (20)$$

که در رابطه فوق، F_p تابع هدف جریمه دار شده؛ F تابع

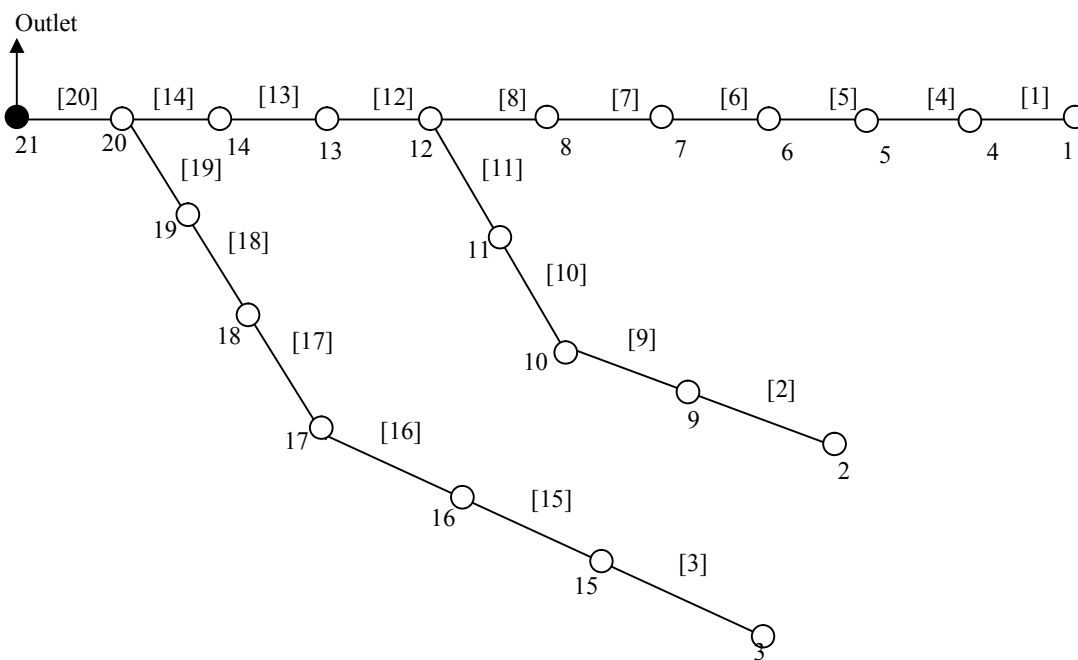
فرمول‌بندی دوم برابر با تعداد گره‌های شبکه فاضلاب بوده و لذا تعداد نقاط تصمیم در فرمول‌بندی دوم نسبت به فرمول‌بندی اول کاهش می‌یابد.

شکل (۲) گراف تعریف شده برای حل مسأله به‌کمک الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را نشان می‌دهد. در این شکل خطوط عمودی (dp_1, \dots, dp_n) نقاط تصمیم مسأله (لوله‌ها/گره‌ها)، دایره‌های توخالی گزینه‌های تصمیم در هر نقطه تصمیم (مقادیر اقطار تجاری لوله‌ها/مقادیر گسسته‌سازی شده محدوده مجاز تراز گره‌ای)، دایره‌های توپر گزینه‌های تصمیم انتخابی توسط مورچه فرضی، خط چین‌های مورب جواب‌های مسأله و خطوط پررنگ مورب یک جواب ساخته شده توسط مورچه فرضی است.

در فرمول‌بندی اول پیشنهادی، با تعیین قطر لوله‌ها توسط الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، تکمیل فرایند طراحی نیازمند محاسبه ترازهای گره‌ای بالادست و پایین‌دست لوله‌ها است. در ابتدا، شیب لوله‌ها با استفاده از معادله مانینگ و با فرض حداکثر نسبت پرشدگی جریان برای هر لوله محاسبه می‌شود. سپس، با شروع از سرشاخه‌ها و با منظور نمودن حداقل پوشش گره‌ای برای گره‌های سرشاخه‌ها، تراز گره‌های متصل به این گره محاسبه می‌شود و این روند تا محاسبه تمامی ترازهای گره‌ای ادامه می‌یابد. در نهایت، مقادیر پوشش گره‌ای و متوسط پوشش لوله‌ها محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که در این تحقیق طراحی شبکه فاضلاب ثقلی، بدون منظور نمودن پمپ و آدم‌روهای ریزشی مورد بررسی قرار می‌گیرد و لذا تراز

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مسأله نمونه اول (I)

شماره لوله	شماره گره بالا دست	شماره گره پایین دست	تراز گره (فوت)		طول لوله (فوت)	دبی طراحی (فوت مکعب بر ثانیه)
			بالا دست	پایین دست		
۱	۱۱	۲۲	۵۰۰	۴۹۵	۳۵۰	۴
۲	۲۲	۳۳	۴۹۵	۴۸۷	۴۰۰	۳
۳	۳۳	۴۲	۴۸۷	۴۸۰	۳۵۰	۲
۴	۱۲	۳۲	۴۹۰	۴۸۵	۴۰۰	۴
۵	۳۲	۴۲	۴۸۵	۴۸۰	۴۳۰	۴
۶	۴۲	۵۲	۴۸۰	۴۷۰	۵۵۰	۵
۷	۲۳	۳۴	۴۹۰	۴۸۵	۵۰۰	۸
۸	۳۴	۴۳	۴۸۵	۴۷۵	۴۵۰	۴
۹	۴۳	۵۲	۴۷۵	۴۷۰	۳۵۰	۴
۱۰	۵۲	۶۱	۴۷۰	۴۶۵	۵۰۰	۶
۱۱	۳۱	۴۱	۴۸۵	۴۷۵	۵۰۰	۹
۱۲	۴۱	۵۱	۴۷۵	۴۷۰	۳۵۰	۷
۱۳	۵۱	۶۱	۴۷۰	۴۶۵	۳۵۰	۴
۱۴	۶۱	۷۱	۴۶۵	۴۵۵	۵۶۵	۷
۱۵	۴۴	۵۳	۴۶۸	۴۶۴	۴۰۰	۴
۱۶	۵۳	۶۲	۴۶۴	۴۶۰	۳۰۰	۲
۱۷	۶۲	۷۱	۴۶۰	۴۵۵	۳۴۵	۳
۱۸	۷۱	۸۱	۴۵۵	۴۵۱	۴۰۰	۷
۱۹	۸۱	۹۱	۴۵۱	۴۴۸	۵۰۰	۲
۲۰	۹۱	۱۰	۴۴۸	۴۴۵	۶۱۲	۵



شکل ۴- جانمایی شبکه مسأله نمونه دوم (II)

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مسأله نمونه دوم (II)

شماره لوله	شماره گره	تراز گره (متر)		شماره گره	شماره لوله
		پایین دست	بالا دست		
۱	۱	۷۳/۶۶	۷۴/۵۹	۴	۱
۲	۲	۶۹/۹	۷۰/۷	۹	۲
۳	۳	۷۱/۵۰	۷۳	۱۵	۳
۴	۴	۷۲/۱	۷۳/۶۶	۵	۴
۵	۵	۷۱/۹۹	۷۲/۱	۶	۵
۶	۶	۶۹/۸۵	۷۱/۱۹	۷	۶
۷	۷	۶۸/۲۴	۶۹/۸۵	۸	۷
۸	۸	۶۷/۲۸	۶۸/۲۴	۱۲	۸
۹	۹	۶۹/۳	۶۹/۹	۱۰	۹
۱۰	۱۰	۶۸/۴	۶۹/۳	۱۱	۱۰
۱۱	۱۱	۶۷/۲۸	۶۸/۴	۱۲	۱۱
۱۲	۱۲	۶۶/۲۲	۶۷/۲۸	۱۳	۱۲
۱۳	۱۳	۶۵/۸۲	۶۶/۲۲	۱۴	۱۳
۱۴	۱۴	۶۵/۴۲	۶۵/۸۲	۲۰	۱۴
۱۵	۱۵	۷۰/۱	۷۱/۵	۱۶	۱۵
۱۶	۱۶	۶۸/۶	۷۰/۱	۱۷	۱۶
۱۷	۱۷	۶۶/۸	۶۸/۶	۱۸	۱۷
۱۸	۱۸	۶۶/۱	۶۶/۸	۱۹	۱۸
۱۹	۱۹	۶۵/۴۲	۶۶/۱	۲۰	۱۹
۲۰	۲۰	۶۴/۵	۶۵/۴۲	۲۱	۲۰

لوله‌گذاری و آدم‌رو مطابق روابط زیر تعریف می‌شود:

$$K_p = 1/93e^{3.43d_l} + 0.112\bar{E}_l + 0.437\bar{E}_l^{1.53} d_l \quad (22)$$

$$K_m = 41/46h_m$$

الگوریتم‌های مختلف جامعه مورچگان، به دلیل ماهیت تصادفی آنها دارای پارامترهای آزادی هستند که با تغییر مقدار این پارامترها، عملکرد الگوریتم و همگرایی و مرغوبیت جواب‌های حاصل از آنها تغییر خواهد کرد. بر این اساس باید قبل از به‌کارگیری الگوریتم، مقادیر مطلوب این پارامترها به‌منظور عملکرد بهینه الگوریتم تنظیم شود. لذا در اینجا مقادیر مطلوب پارامترهای الگوریتم‌های مورد استفاده با روش سعی و خطا حاصل می‌شود که در جدول (۳) ارائه شده است. همچنین در حل مسائل با استفاده از الگوریتم‌های پیشنهادی تعداد ۲۰۰۰۰۰ عملگر ارزیابی (۲۰۰ مورچه و ۱۰۰۰ تکرار) منظور شده است. علاوه بر این تعداد گسسته‌سازی محدوده متغیر تصمیم

مسأله دوم (II) قسمتی از شبکه جمع‌آوری شهر کرمان است که نخستین بار منصوری و خانجانی [۳۶] طرح کردند. شکل (۴) جانمایی شبکه جمع‌آوری فاضلاب مذکور را نشان می‌دهد که دارای ۲۰ لوله و ۲۱ گره است. شایان ذکر است که در شکل مذکور دایره‌های توخالی گره‌ها، دایره توپر گره خروجی (چاه)، اعداد مجاور دایره‌های شماره گره‌ها و اعداد داخل کروش شماره لوله‌ها هستند. به‌منظور طراحی شبکه مذکور از معادله مانینگ با ضریب زبری ثابت برابر با ۰/۱۳ استفاده می‌شود. در این مسأله حداقل و حداکثر سرعت به‌ترتیب برابر با ۰/۶ و ۳ متر بر ثانیه است. همچنین حداقل و حداکثر نسبت پرشدگی به‌ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۸۲ و حداقل پوشش ۲/۴۵ متر است. سایر مشخصات شبکه مورد نظر در جدول (۲) ارائه شده است. مجموعه قطرهای تجاری مورد استفاده در مسأله مذکور ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ میلی‌متر است. در این مسأله تابع هزینه

جدول ۳- مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم های مورد استفاده

مسئله نمونه	الگوریتم مورد استفاده	فرمول بندی	α	β	ρ	p_{best}	تعداد مورچه برتر
I	سیستم مورچه	اول	۱	۰	۰/۹۵	---	---
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	---	---
	سیستم مورچه برتر	اول	۱	۰	۰/۹۵	---	۳۰
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	---	۳۰
	سیستم مورچه ترتیبی	اول	۱	۰	۰/۹۵	---	۳۰
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	---	۳۰
	سیستم مورچه بیشینه- کمینه	اول	۱	۰	۰/۹۵	۰/۴	---
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	۰/۴	---
	سیستم مورچه	اول	۱	۰	۰/۹۵	---	---
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	---	---
	سیستم مورچه برتر	اول	۱	۰	۰/۹۵	---	۱۰
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	---	۱۰
II	سیستم مورچه ترتیبی	اول	۱	۰	۰/۹۵	---	۱۰
		دوم	۱	۰	۰/۹۵	---	۱۰
سیستم مورچه بیشینه- کمینه	اول	۱	۰	۰/۹۵	۰/۲	---	
	دوم	۱	۰	۰/۹۵	۰/۲	---	

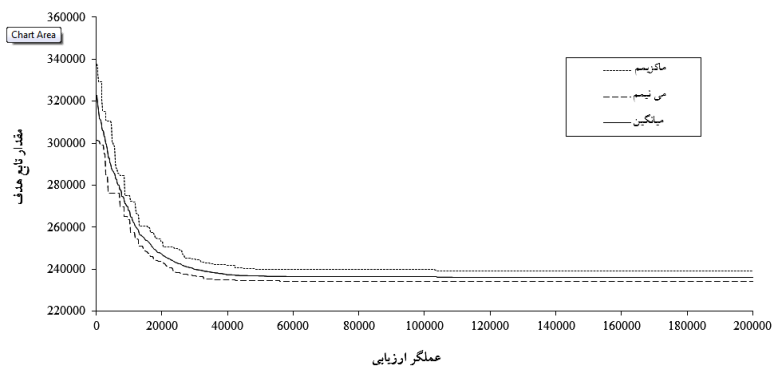
جدول ۴- مقادیر حداکثر، حداقل، میانگین و انحراف معیار جواب ها و تعداد جواب های شدنی حاصل از حل مسائل نمونه با استفاده از

الگوریتم های مختلف

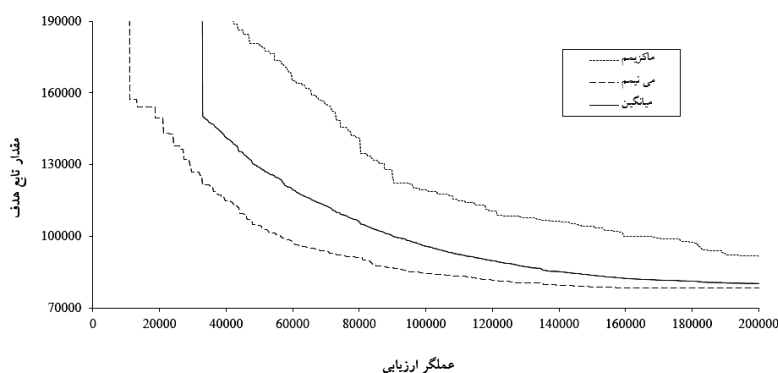
مسئله نمونه	الگوریتم مورد استفاده	فرمول بند	مقادیر جواب ها			انحراف معیار نرمال شده جواب ها	تعداد جواب های شدنی
			حداکثر	حداقل	میانگین		
I	سیستم مورچه	اول	---	---	---	---	۰
		دوم	۲۸۵۳۸۱	۲۹۱۸۸۱	۲۸۸۳۰۵	۰/۰۰۸۴	۱۰
	سیستم مورچه برتر	اول	۳۰۱۶۲۸	۳۰۱۶۲۸	۳۰۱۶۲۸	۰	۱۰
		دوم	۲۳۴۵۱۰	۲۴۱۹۰۰	۲۳۶۹۱۱	۰/۰۰۸۳	۱۰
	سیستم مورچه ترتیبی	اول	۳۰۱۶۲۸	۳۰۱۶۲۸	۳۰۱۶۲۸	۰	۱۰
		دوم	۲۳۴۳۰۹	۲۴۱۴۸۸	۲۳۶۳۸۶	۰/۰۰۸۲	۱۰
	سیستم مورچه بیشینه- کمینه	اول	۳۰۱۶۲۸	۳۰۱۶۲۸	۳۰۱۶۲۸	۰	۱۰
		دوم	۲۳۴۳۰۹	۲۳۹۰۰۷	۲۳۶۱۸۵	۰/۰۰۶۹	۱۰
	سیستم مورچه	اول	۷۸۳۰۷/۶	۷۹۲۱۸/۸	۷۹۱۲۷/۷	۰/۰۰۹۶	۱۰
		دوم	۸۸۲۵۹/۷	۱۳۴۹۸۹	۱۰۸۷۱۳	۰/۱۱۸۷	۱۰
	سیستم مورچه برتر	اول	۷۷۳۷۲/۷	۷۹۲۱۸/۸	۷۹۰۳۴/۲	۰/۰۰۷۴	۱۰
		دوم	۸۳۴۱۷/۹	۱۰۴۴۰۹	۹۳۵۴۹/۵	۰/۰۷۳۷	۱۰
II	سیستم مورچه ترتیبی	اول	۷۶۹۸۸/۶	۷۹۲۱۸/۸	۷۸۸۱۱/۲	۰/۰۰۱۹	۱۰
		دوم	۷۸۵۷۰/۸	۹۶۵۹۷/۴	۸۱۷۸۶/۴	۰/۰۶۴۶	۱۰
سیستم مورچه بیشینه- کمینه	اول	۷۵۹۹۰/۵	۷۹۲۱۸/۸	۷۸۱۹۸/۶	۰/۰۰۱۵	۱۰	
	دوم	۷۸۲۱۳/۸	۹۰۹۸۲/۵	۸۰۰۰۱/۲	۰/۰۴۸۷	۱۰	

(ترازگره ای) ۴۰ است. جدول (۴) ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان دهنده آن است که در حل مسائل نمونه با استفاده از هر دو فرمول بندی

نتایج حاصل از ۱۰ بار اجرای مدل بهینه سازی مسئله در



شکل ۵- تغییرات حداکثر، حداقل و میانگین مقدار تابع هدف مسأله نمونه اول (I) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه



شکل ۶- تغییرات حداکثر، حداقل و میانگین مقدار تابع هدف مسأله نمونه دوم (II) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه

I جواب‌های حاصل از فرمول‌بندی دوم از جواب‌های حاصل از فرمول‌بندی اول مطلوب‌تر است و در مسأله نمونه II جواب‌های حاصل از فرمول‌بندی اول از جواب‌های حاصل از فرمول‌بندی دوم مطلوب‌تر است که به علت آن هم در ادامه اشاره می‌شود. در حالت کلی و براساس تابع هدف تعریف شده مسأله، هزینه شبکه فاضلاب تابع قطر و پوشش متوسط لوله‌ها است که براساس شکل تابع تعریف شده و ضرایب مؤلفه‌های تابع تعریف شده، هزینه ساخت لوله‌ها که تابع قطر لوله‌ها بوده نسبت به هزینه جای‌گذاری لوله‌ها که تابع پوشش متوسط لوله‌ها است، بیشتر و یا کمتر بوده و لذا تعیین جواب مطلوب با استفاده از یکی از دو فرمول‌بندی پیشنهادی امکان‌پذیر است. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب نحوه همگرایی مقادیر حداقل،

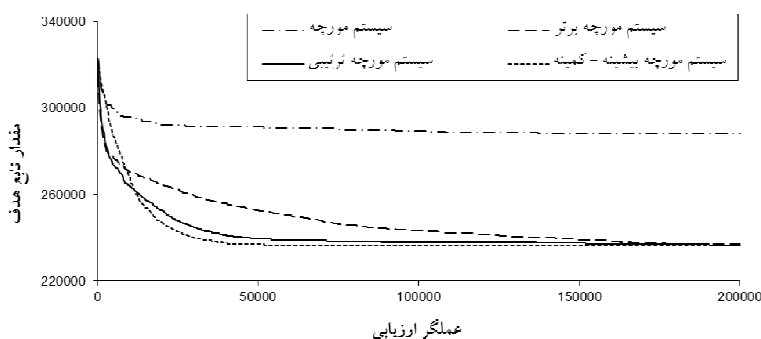
الگوریتم‌های پیشنهادی جواب‌هایی مناسب حاصل شده است، ولیکن در هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی جواب‌های به‌دست آمده از الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها مطلوب‌تر است. دلیل آن این است که در الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه با تعریف مرزهای دینامیکی برای شدت فرمان مسیرها از همگرایی سریع و نابه‌هنگام الگوریتم جلوگیری شده است و لذا جواب‌های حاصل شده، مطلوب‌تر است. شایان ذکر است که در هر دو فرمول‌بندی پیشنهادی، جواب‌های مرغوب برای هر دو مسأله پس از به‌کارگیری الگوریتم سیستم مورچه‌های پیشینه- کمینه به ترتیب توسط الگوریتم‌های سیستم مورچه ترتیبی، سیستم مورچه برتر و سیستم مورچه حاصل شده است. علاوه بر این، در مسأله نمونه

جدول ۵- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از فرمول بندی دوم الگوریتم مورچه بیشینه- کمینه (مسأله اول- I)

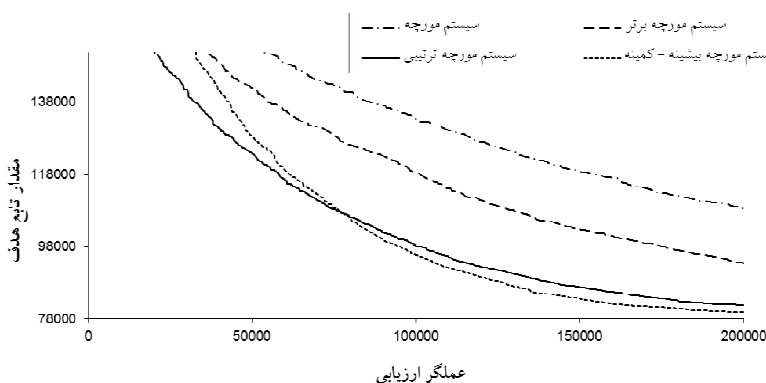
شماره لوله	شماره گره		پوشش لوله (ft)		قطر لوله (in)	شیب	نسبت پرشدگی	سرعت (ft/s)
	بالا دست	پایین دست	بالا دست	پایین دست				
۱	۱۱	۲۲	۸	۸	۱۲	۰/۰۱۴۲۹	۰/۸۵	۵/۶۱
۲	۲۲	۳۳	۸	۸	۱۵	۰/۰۲	۰/۷۴	۷/۲۲
۳	۳۳	۴۲	۸	۹	۱۵	۰/۰۲۲۸۶	۰/۸۴	۸/۱۷
۴	۱۲	۳۲	۸	۸/۵۹۷	۱۲	۰/۰۱۴	۰/۸۶	۵/۵۷
۵	۳۲	۴۲	۸/۵۹۷	۹	۱۵	۰/۰۱۲۵۶	۰/۶	۴/۷۵
۶	۴۲	۵۲	۹	۸	۲۱	۰/۰۱۶۳۶	۰/۶۲	۶/۷۷
۷	۲۳	۳۴	۹	۹/۳۹۸	۱۵	۰/۰۱۲۸	۰/۶۱	۴/۷۹
۸	۳۴	۴۳	۹/۳۹۸	۸	۱۸	۰/۰۱۹۱۱	۰/۷۷	۸/۱۵
۹	۴۳	۵۲	۸	۸	۲۱	۰/۰۱۴۲۷	۰/۷۹	۷/۸۶
۱۰	۵۲	۶۱	۸	۸/۷۹۸	۳۰	۰/۰۱۱۶	۰/۸۹	۹/۴۹
۱۱	۳۱	۴۱	۸	۸	۱۵	۰/۰۲	۰/۸۸	۷/۸۲
۱۲	۴۱	۵۱	۸	۸	۲۱	۰/۰۱۴۲۷	۰/۷۹	۷/۸۶
۱۳	۵۱	۶۱	۸	۸/۷۹۸	۲۱	۰/۰۱۶۵۷	۰/۸۸	۸/۸۹
۱۴	۶۱	۷۱	۸/۷۹۸	۸	۳۶	۰/۰۱۶۲۸	۰/۷۸	۱۱/۹۸
۱۵	۴۴	۵۳	۸/۱۹۸	۸/۳۹۸	۱۲	۰/۰۱۰۵	۰/۶۱	۳/۷۴
۱۶	۵۳	۶۲	۸/۳۹۸	۸	۱۵	۰/۰۱۲	۰/۷۹	۵/۷۷
۱۷	۶۲	۷۱	۸	۸	۱۸	۰/۰۱۴۴۹	۰/۷	۶/۸
۱۸	۷۱	۸۱	۸	۸	۴۲	۰/۰۱	۰/۸	۱۰/۵۲
۱۹	۸۱	۹۱	۸	۸/۱۹۸	۴۲	۰/۰۰۶۴	۰/۶	۶/۷۴
۲۰	۹۱	۱۰	۸/۱۹۸	۱۰	۴۲	۰/۰۰۷۸۴۳	۰/۶۵	۷/۴۳

جدول ۶- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به دست آمده با استفاده از فرمول بندی اول الگوریتم مورچه بیشینه- کمینه (مسأله دوم- II)

شماره لوله	شماره گره		پوشش لوله (m)		قطر لوله (mm)	شیب	نسبت پرشدگی	سرعت (m/s)
	بالادست	پایین دست	بالادست	پایین دست				
۱	۱	۴	۲/۸۰۸	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۰۲۲	۰/۸۲	۰/۶۴۸
۲	۲	۹	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۰۰	۰/۰۲۸	۰/۸۲	۱/۹۹۱
۳	۳	۱۵	۲/۴۵	۲/۶۰۴	۲۰۰	۰/۰۰۴۱	۰/۸۲	۰/۷۶۵
۴	۴	۵	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۰۲۶	۰/۸۲	۰/۷۰۶
۵	۵	۶	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۰۲۹	۰/۸۲	۰/۷۵۲
۶	۶	۷	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۰۳۳	۰/۸۲	۰/۷۸۹
۷	۷	۸	۲/۴۵	۲/۵۴۳	۲۵۰	۰/۰۰۳۸	۰/۸۲	۰/۸۵
۸	۸	۱۲	۲/۵۴۳	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۰۴۲	۰/۸۲	۰/۸۹۸
۹	۹	۱۰	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۰۰	۰/۰۲۹۳	۰/۸۲	۲/۰۳۴
۱۰	۱۰	۱۱	۲/۴۵	۴/۴۹۶	۲۵۰	۰/۰۰۹۵	۰/۸۲	۱/۳۴۶
۱۱	۱۱	۱۲	۲/۴۵	۴/۴۹۶	۲۵۰	۰/۰۱	۰/۸۲	۱/۳۸۴
۱۲	۱۲	۱۳	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۲۶۴	۰/۸۲	۲/۲۴۵
۱۳	۱۳	۱۴	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۲۸۹	۰/۸۲	۲/۳۵
۱۴	۱۴	۲۰	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۳۰۹	۰/۸۲	۲/۴۳
۱۵	۱۵	۱۶	۲/۶۰۴	۳/۷۹۴	۲۰۰	۰/۰۰۶۵	۰/۸۲	۰/۹۵۸
۱۶	۱۶	۱۷	۳/۷۹۴	۵/۶۳۷	۲۰۰	۰/۰۰۸۴	۰/۸۲	۱/۰۸۸
۱۷	۱۷	۱۸	۵/۶۳۷	۲/۴۵	۲۰۰	۰/۰۰۹۴	۰/۸۲	۱/۱۵۷
۱۸	۱۸	۱۹	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۰۰	۰/۰۱۵۱	۰/۸۲	۱/۴۶۲
۱۹	۱۹	۲۰	۲/۴۵	۲/۴۵	۲۵۰	۰/۰۰۵۶	۰/۸۲	۱/۰۳۵
۲۰	۲۰	۲۱	۲/۴۵	۳/۵۵۹	۴۰۰	۰/۰۰۶۳	۰/۸۲	۱/۵۰۴



شکل ۷- تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه اول (I) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم‌های مختلف پیشنهادی

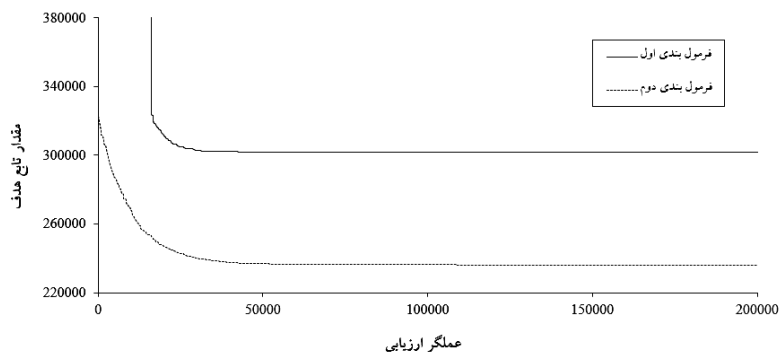


شکل ۸- تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه دوم (II) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم‌های مختلف پیشنهادی

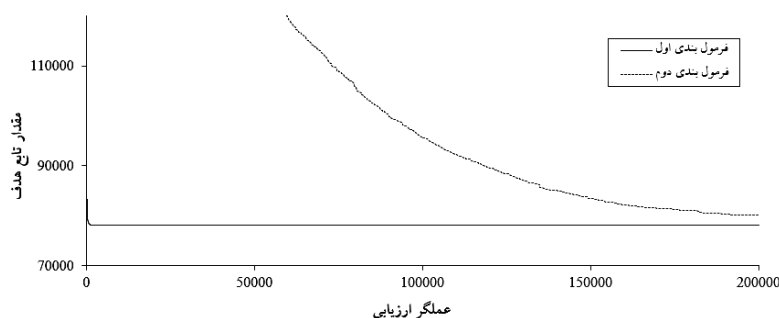
بندهای اول و دوم پیشنهادی برای هر یک از الگوریتم‌های پیشنهادی، شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است که شکل‌های مذکور به ترتیب تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسئله با استفاده از روش‌های اول و دوم پیشنهادی را نشان می‌دهد.

مسئله نمونه اول (I) پیش از این با استفاده از روش‌های مختلفی حل شده است که جدول (۷) نتایج حاصل را نشان می‌دهد. مسئله مذکور را در ابتدا میز و ونزل [۱۰] با به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی پویای گسسته^{۲۴} (DDP) حل کرده و مقدار ۲۶۵۷۷۵ را برای این مسئله به‌دست آوردند. در ادامه رابینسون و لابادیه [۳۷] با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا این مسئله را مورد بررسی قرار داده و جواب ۲۷۵۲۱۸ را برای آن به‌دست آوردند. همچنین مایلز و هینی [۳۸] با استفاده از روش کامپیوتری گسترده^{۲۵}، جواب بهینه ۲۴۵۸۷۴ را برای این مسئله به‌دست آوردند. افشار [۲۴، ۲۵ و ۲۶] مسئله مرجع مذکور را

حداکثر و میانگین مقدار تابع هدف با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشنهادی - کمینه برای مسائل اول (I) و دوم (II) را نشان می‌دهد. همچنین جداول (۵) و (۶) بهترین مقادیر پارامترهای هیدرولیکی به‌دست آمده برای مسائل اول (I) و دوم (II) با استفاده از روش‌های پیشنهادی را نشان می‌دهد. تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسائل اول (I) و دوم (II) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم‌های مختلف پیشنهادی به ترتیب در شکل (۷) و (۸) نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که با استفاده از الگوریتم سیستم مورچه پیشنهادی - کمینه در مقایسه با سایر الگوریتم‌های پیشنهادی جواب‌هایی مطلوب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر حاصل شده است و در نتیجه الگوریتم سیستم مورچه پیشنهادی - کمینه می‌تواند در حل مسئله بهینه‌سازی طراحی شبکه جمع‌آوری فاضلاب به‌کار گرفته شود. علاوه بر این به‌منظور مقایسه فرمول



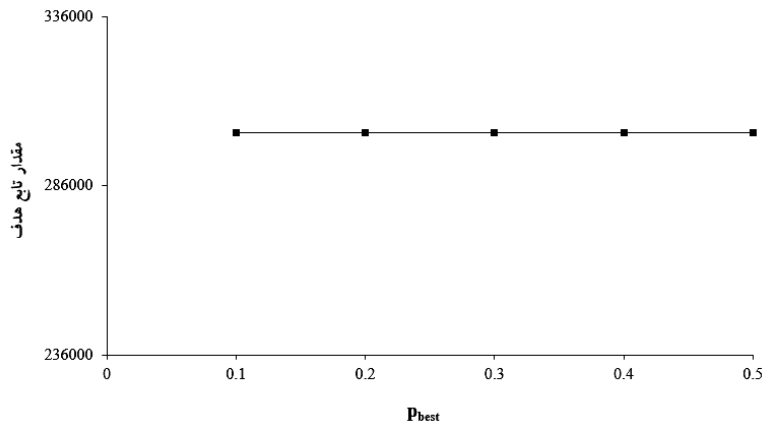
شکل ۹- تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه اول (I) با استفاده از فرمول‌بندی‌های اول و دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه - کمینه



شکل ۱۰- تغییرات میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه دوم (II) با استفاده از فرمول‌بندی‌های اول و دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه - کمینه

جدول ۷- مقادیر جواب بهینه حاصل از حل مسائل نمونه با استفاده از روش‌های مختلف

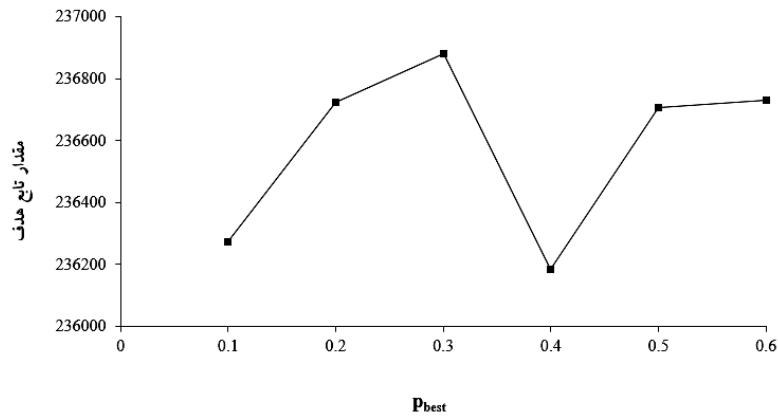
مسئله نمونه	روش مورد استفاده	مقدار جواب بهینه	تعداد عملگر ارزیابی
I	DDP (میز و ونزل)	۲۶۵۷۷۵	---
	DP (رایبسنون و لایادیه)	۲۷۵۲۱۸	---
	Spreadsheet (مایلز و هینی)	۲۴۵۸۷۴	---
	ACOA-AR (افشار)	۲۴۱۴۹۶	۲۹۹۰۰
	PCACOА (افشار)	۲۴۲۵۳۹	۱۳۹۰۰
	CACOА (افشار)	۲۴۲۱۱۹	۲۰۰۰۰
	RPSO (افشار)	۲۴۲۱۶۲	۳۰۰۰۰
	CA (افشار و همکاران)	۲۵۳۴۸۳	۵۰
	HPSO (نفیسی و احمدی)	۲۳۵۶۹۹	۸۰۰۰۰
	MMAS (تحقیق حاضر)	۲۳۴۳۰۹	۵۹۴۰۰
II	GA & NLP (منصوری و خانجانی)	۸۳۱۱۶	---
	NLP- BFGS (ستوده)	۸۲۷۳۲	---
	NLP- Fletcher-Reeves (ستوده)	۸۱۵۵۳	---
	GA (ستوده)	۷۷۷۳۶	۱۰۰۰۰۰
	CA (افشار و همکاران)	۸۰۸۷۹	۲۰
	HPSO (نفیسی و احمدی)	۷۶۳۴۲	۸۰۰۰۰
	MMAS (تحقیق حاضر)	۷۵۹۹۰/۵	۴۰۰۰



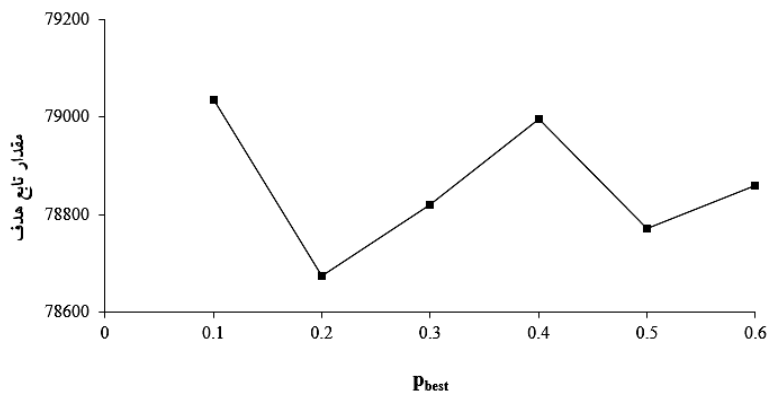
شکل ۱۱- میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه اول (I) با استفاده از فرمول‌بندی اول الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه به‌ازای P_{best} مختلف

مسئله نمونه اول (II) نیز پیش از این با استفاده از روش‌های مختلفی حل شده است که جدول (۷) نتایج حاصل را نشان می‌دهد. مسئله مذکور را در ابتدا منصور و خانجانی [۳۷] با به‌کارگیری روش برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم ژنتیک حل کرده و مقدار ۸۳۱۱۶ را برای این مسئله به‌دست آوردند. ستوده [۴۰] مسئله مذکور را به‌ترتیب با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی فلتچر- ریوس^{۳۱}، روش برنامه‌ریزی غیرخطی برایدن- فلتچر- گلدفرب- شنو^{۳۲} (BFGS) و الگوریتم ژنتیک حل کرده و جواب‌های ۸۱۵۵۳، ۸۲۷۳۲ و ۷۷۷۳۶ را برای آن به‌دست آوردند [۲۳]. در ادامه افشار و همکاران [۲۳] مسئله مذکور را با استفاده از الگوریتم اتوماتای سلولی (CA) مورد بررسی قرار داده و جواب‌های ۸۰۸۷۹ را برای این مسئله گزارش کردند. در نهایت نفیسی و احمدی [۲۸] مسئله نمونه II را با استفاده از الگوریتم هوش‌جمعی با قابلیت پرواز بازگشتی و حافظه هارمونی (HPSO) حل کرده و جواب ۷۶۳۴۲ را برای آن به‌دست آوردند. این در حالی است که در تحقیق حاضر بهترین جواب حاصل از روش‌های مختلف پیشنهادی برابر با ۷۵۹۹۰/۵ است. علاوه بر این در جدول (۷) هزینه محاسباتی روش‌های مورد استفاده در حل این مسئله مرجع نیز ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که جواب به‌دست آمده از به‌کارگیری فرمول‌بندی اول الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه نسبت

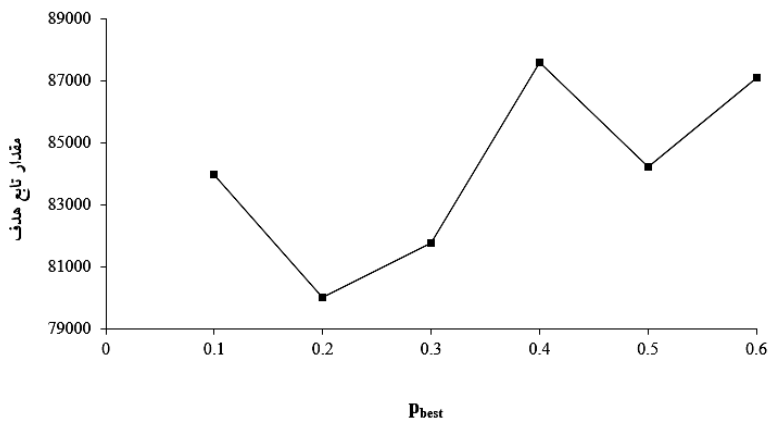
به‌ترتیب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و مکانیزم نظریف تطبیقی^{۲۶} (AR) و الگوریتم مقید بهینه‌سازی جامعه مورچگان^{۲۷} (PCACO) و الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان پیوسته^{۲۸} (CACOA) حل کرده و جواب‌های ۲۴۱۴۹۶، ۲۴۲۵۳۹ و ۲۴۲۱۱۹ را برای آن به‌دست آوردند. در ادامه افشار [۳۹] و افشار و همکاران [۲۳] مسئله مذکور را به‌ترتیب با استفاده از الگوریتم هوش‌جمعی ذرات (RPSO) و الگوریتم اتوماتای سلولی (CA) مورد بررسی قرار داده و جواب‌های ۲۴۲۱۶۲ و ۲۵۳۴۸۳ را برای این مسئله گزارش کردند. در نهایت نفیسی و احمدی [۲۸] مسئله نمونه I را با استفاده از الگوریتم هوش‌جمعی با قابلیت پرواز بازگشتی^{۲۹} و حافظه هارمونی^{۳۰} (HPSO) حل کرده و جواب ۲۳۵۶۹۹ را برای آن به‌دست آوردند. در صورتی که در تحقیق حاضر بهترین جواب حاصل از روش‌های مختلف پیشنهادی برابر با ۲۳۴۳۰۹ است. علاوه بر این در جدول (۷) هزینه محاسباتی روش‌های مورد استفاده در حل این مسئله مرجع نیز ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان‌دهنده آن است که جواب به‌دست آمده از به‌کارگیری فرمول‌بندی دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه نسبت به جواب به‌دست آمده از تمامی روش‌ها مطلوب‌تر بوده و هزینه محاسباتی آن نیز کمتر است.



شکل ۱۲- میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه اول (I) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه - کمینه به ازای P_{best} مختلف



شکل ۱۳- میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه دوم (II) با استفاده از فرمول‌بندی اول الگوریتم سیستم مورچه پیشینه - کمینه به ازای P_{best} مختلف



شکل ۱۴- میانگین مقدار تابع هدف مسئله نمونه دوم (II) با استفاده از فرمول‌بندی دوم الگوریتم سیستم مورچه پیشینه - کمینه به ازای P_{best} مختلف

فاضلاب مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور دو فرمول‌بندی پیشنهاد شد که در فرمول‌بندی اول قطر لوله‌ها و در فرمول‌بندی دوم تراز گره‌های شبکه‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم مسأله منظور شد. مسائل نمونه‌ای با استفاده از هر دو فرمول‌بندی الگوریتم‌های پیشنهادی حل شده و نتایج با سایر نتایج موجود مقایسه شد. نتایج نشان‌دهنده آن است که الگوریتم‌های پیشنهادی، الگوریتم‌های مناسب در حل مسأله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب است که در مقایسه با الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان، نتایج حاصل از الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه مناسب‌تر است. به‌عبارت دیگر نسبت به سایرهای مورد استفاده در حل مسائل نمونه، با استفاده از الگوریتم سیستم مورچه پیشینه- کمینه جواب‌هایی مطلوب‌تر و با هزینه محاسباتی کمتر برای مسائل نمونه حاصل می‌شود.

به جواب به‌دست آمده از تمامی روش‌ها مطلوب‌تر بوده و هزینه محاسباتی آن نیز کمتر است.

شایان ذکر است که هر یک از الگوریتم‌های مورد استفاده پارامترهایی دارند که لازم است مقادیر مطلوب آنها با روش سعی و خطا حاصل می‌شود. مقادیر مطلوب پارامترها برای حل مسائل نمونه تحقیق حاضر در جدول (۳) ارائه شد. در اینجا به‌عنوان نمونه به نتایج آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر p_{best} اشاره می‌شود و لذا بدین منظور شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) ارائه می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان، چهار الگوریتم سیستم مورچه، سیستم مورچه برتر، سیستم مورچه ترتیبی و سیستم مورچه پیشینه- کمینه در حل مسأله طراحی بهینه ابعاد شبکه جمع‌آوری

واژه‌نامه

- | | |
|---|---|
| 1. linear programming | 18. pheromone |
| 2. nonlinear programming | 19. ant colony system |
| 3. dynamic programming | 20. pheromone reward factor |
| 4. meta heuristic | 21. feasible |
| 5. genetic algorithm | 22. infeasible |
| 6. honey bees mating optimization | 23. fortran |
| 7. particle swarm optimization | 24. differential dynamic programming |
| 8. cellular automata | 25. spreadsheet |
| 9. simulated annealing | 26. adaptive refinement |
| 10. ant colony optimization algorithm | 27. partially constrained ant colony optimization algorithm |
| 11. ant system | 28. continues ant colony optimization algorithm |
| 12. elitist ant system | 29. fly-back mechanism |
| 13. ranked ant system | 30. harmony memory |
| 14. max-min ant system | 31. fletcher-reeves |
| 15. manhole | 32. broyden-fletcher-goldfarb-shanno |
| 16. drop | |
| 17. mixed integer nonlinear programming | |

مراجع

- Haestad, *Wastewater Collection System Modelling and Design*, Waterbury: Haestad methods, 2004.
- Guo, Y., Walters, G., and Savic, D., "Optimal Design of Storm Sewer networks: Past, Present and Future", *Proceeding of 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK, pp. 1-10, 2008.
- Deshler, D. P., and Davis, P. K., "Designing Sanitary Sewers with Microcomputers", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 112, No. 6, pp. 993-1007, 1986.
- Elimam, A. A., Charalambous, C., and Ghobrial, F. H., "Optimum Design of Large Sewer Networks" *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 115, No.

- 6, pp. 1171-1189, 1989.
5. Dajani, J. S., and Hasit, Y., "Capital Cost Minimization of Drainage Networks", *ASCE Journal of Environmental Engineering*, Vol. 100, No. 2, pp. 325-337, 1974.
 6. Swamee, P. K., and Sharma, A. K., "Optimal Design of a Sewer Line using Linear Programming" *Journal of Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, pp. 4430-4439, 2013.
 7. Price, R. K., "Design of Storm Water Sewers for Minimum Construction Cost", *proceeding of 1st International Conference on Urban Storm Drainage*, Southampton, United Kingdom, pp. 636-647, 1978.
 8. Swamee, P. K., "Design of Sewer Line", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 127, No. 9, pp. 776-781, 2001.
 9. Walsh, S. and Brown, L. C., "Least Cost Method for Sewer Design", *Journal of Environmental Engineering Division*, Vol. 99, No. 3, pp. 333-345, 1973.
 10. Mays, L. W., and Wenzel, H. G., "Optimal Design of Multilevel Branching Sewer Systems", *Water Resource Research*, Vol. 12, No. 5, pp. 913-917, 1976.
 11. Templeman, A. B., and Walters, G. A., "Optimal Design of Storm Water Drainage Networks for Roads", *Proceeding institute. of Civil Engineers*, London, pp. 573-587, 1979.
 12. Gupta, A., Mehndiratta, S. L., and Khanna, P., "Gravity Waste Water Collection Systems Optimization", *ASCE Journal of Environmental Engineering*, Vol. 109, No. 5, pp. 1195-1208, 1983.
 13. Yen, B. C., Cheng, S. T., Jun, B. H., Voohees, M. L., and Wenzel, H. G., "Illinois Least Cost Sewer System Design model", User's guide, Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin, 1984.
 14. Kulkarni, V. S., and Khanna, P., "Pumped Wastewater Collection Systems Optimization", *ASCE Journal of Environmental Engineering*, Vol. 111, No. 5, pp. 589-601, 1985.
 15. Botrous, A., El-Hattab, I., and Dahab, M., "Design of Wastewater Collection Networks using Dynamic Programming Optimization Technique", *Proceeding of the ASCE national conference on Environmental and Pipeline Engineering*, Kansas City, MO, United States, American Society of Civil Engineers, pp. 503-512, 2000.
 16. Diogo A. F., Walters G. A., de Sousa E. R., and Graveto V. M., "Three-Dimensional Optimization of Urban Drainage Systems", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 409-426, 2000.
 17. Heaney, J. P., Wright, L. T., Sample, D., Field, R., and Fan, C. Y., "Innovative Methods for the Optimization of Gravity Storm Sewer Design", *Proceedings the 8th International Conference on Urban Storm Drainage*, Sydney, Australia, pp. 1896-903, 1999.
 18. Liang, L. Y., Thompson, R. G., and Young, D. M., "Optimising the Design of Sewer Networks using Genetic Algorithms and Tabu Search", *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 11, No. 2, pp. 101-112, 2004.
 19. Afshar, M. H., Afshar, A., Marino, M. A., and Darbandi, A. A. S., "Hydrograph-Based Storm Sewer Design Optimization by Genetic Algorithm", *Canadian Journal Civil Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 310-325, 2006.
 20. Haghghi, A., and Bakhshpour, A. E., "Optimization of Sewer Networks using an Adaptive Genetic Algorithm", *Water Resource Management*, Vol. 26, No. 12, pp. 3441-3456, 2012.
 21. Guo, Y., "Sewer Network Optimal Design Based on Cellular Automata Principles", *Proceeding of 2005 XXXI IAHR Congress*, Seoul, Korea, pp. 6582-6593, 2005.
 22. Guo, Y., Walters, G. A., Khu, S. T., and Keedwell, E., "Optimal Design of Sewer Networks using Hybrid Cellular Automata and Genetic Algorithm", *Proceeding of IWA World Water Congress*, Beijing, China, 2006.
 23. Afshar, M. H., Shahidi, M., Rohania, M., and Sargolzaei, M., "Application of Cellular Automata to Sewer Network Optimization Problems", *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 304-312, 2011.
 24. Afshar, M. H., "Improving the Efficiency of Ant Algorithms using Adaptive Refinement: Application to Storm Water Network Design", *Advances in Water Resources*, Vol. 29, pp. 1371-1382, 2006.
 25. Afshar, M. H., "Partially Constrained Ant Colony Optimization Algorithm for the Solution of Constrained Optimization Problems: Application to Storm Water Network Design", *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 4, pp. 954-965, 2007.
 26. Afshar, M. H., "A Parameter Free Continuous Ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Design of Storm Sewer Networks: Constrained and Unconstrained Approach", *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, pp. 188-195, 2010.
 27. Izquierdo, J., Montalvo, I., Perez, R., and Fuenes, V. S., "Design Optimization of Wastewater Collection Networks by PSO", *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 56, No. 3, pp. 777-784, 2008.
۲۸. نفیسی، م.، احمدی، آ. "بهینه سازی شبکه های فاضلاب با الگوریتم دسته ذرات با قابلیت پرواز بازگشتی و مجهز به حافه هارمونی" *مجله آب و فاضلاب*، ش. ۹۴، ص. ۷۶-۸۷، ۱۳۹۳.
29. Karovic, O., and Mays, L. W., "Sewer System Design using Simulated Annealing in Excel", *Water*

- Resource Management*, Vol. 28, pp. 4551-4565, 2014.
30. Colomi, A., Dorigo, M., and Maniezzo, V., "Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process", Technical Report 91-016, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
31. Moeini, R., and Afshar, M. H., "Application of an Ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Operation of Reservoirs: A Comparative Study of Three Proposed Formulations", *Scientia Iranica. Transactions A: Civil Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 273-285, 2009.
32. Afshar, M. H., and Moeini, R., "Partially and Fully Constrained Ant Algorithms for the Optimal Solution of Large Scale Reservoir Operation Problems", *Journal Water Resource Management*, Vol. 22, No. 1, pp. 1835-1857, 2008.
33. Moeini, R., and Afshar, M. H., "Constrained Ant Colony Optimization Algorithm for the Layout and Size Optimization of Sanitary Sewer Networks", *Urban Water*, Vol. 10, No. 3, pp.154-173, 2013.
۳۴. افشار، م. ه. ، رضایی، ا.، معینی، ر.، " الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان در مساله ی بهره برداری بهینه از مخازن سدها: مطالعه ی مقایسه ای چهار الگوریتم"، نشریه مهندسی عمران فردوسی مشهد، سال ۲۵، شماره ۲، ص. ۱۱۷-۱۳۴، ۱۳۹۳.
۳۵. معینی، ر. " ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه سازی جامعه مورچگان در حل مساله بهره برداری بهینه از سیستم چند مخزنه: مقایسه چهار الگوریتم" *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، سال ۱۱، ش. ۲، ص. ۴۶-۲۹، ۱۳۹۴.
۳۶. منصور، م. ر.، خانجانی، م. ج.، " بهینه سازی شبکه های فاضلاب با برنامه ریزی غیر خطی"، *مجله آب و فاضلاب*، ش. ۳۰، ص. ۳۰-۲۰، ۱۳۷۸.
37. Robinson, D. K., and Labadie, J. W., "Optimal Design of Urban Storm Water Drainage System", *International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics, and Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, KY, USA, pp. 145-156, 1981.
38. Miles, S. W., and Heaney, J. P., "Better than Optimal Method for Designing Drainage Systems", *Water Resource Planning and Management*, Vol. 114, No. 5, pp. 477-499, 1988.
39. Afshar, M. H., "Rebirthing Particle Swarm Optimization Algorithm: Application to Storm Sewer Network Design" *Canadian journal of civil engineering*, Vol. 35. No.10. pp.1120-1127.
۴۰. ستوده، م. ه. " طراحی بهینه شبکه های فاضلاب"، پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران، سازه های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.