

## طراحی بهینه مبتنی بر عملکرد شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب

سمانه آخوندیان\*<sup>۱</sup> و مسعود تابش<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش آب، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup>دانشیار دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۰۴/۲۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۹۰/۰۵/۰۳، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۵/۲۹)

### چکیده:

با توجه به هزینه بالای ساخت سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب و نقش کلیدی که این سیستم‌ها در ارائه خدمات به ساکنین شهرها و حفاظت محیط زیست ایفا می‌کنند، بهینه نمودن هزینه‌های ساخت و اجرای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب نقش اساسی در اجرای سریعتر و هر چه بیشتر چنین طرح‌هایی در سراسر کشور خواهد داشت. براساس تجارب کشورهای پیشرفته در زمینه نگهداری و بهره‌برداری از شبکه‌های موجود، علاوه بر بهینه نمودن هزینه‌های ساخت شبکه، بهینه‌سازی عملکرد سیستم به منظور کاهش هزینه‌های زمان بهره‌برداری و نگهداری شبکه از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین طرح شبکه‌ای با سرویس‌دهی مطلوب و قابلیت اطمینان بالا که قادر به انتقال فاضلاب بدون ایجاد بار هیدرولیکی اضافی به سیستم باشد، باید مورد توجه قرار گیرد. در این تحقیق، بهینه‌سازی شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی با هدف حداقل ساختن هزینه‌های ساخت و راهبری شبکه با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و همچنین گنجاندن قیود شاخص‌های عملکرد شبکه و قید قابلیت اطمینان علاوه بر قیود مرسوم در طراحی شبکه‌های فاضلاب انجام شده است. در این راستا کوشش شده است تعریف مناسبی از قابلیت اطمینان شبکه فاضلاب ارائه شود و از شاخص‌های عملکرد شبکه در ارزیابی کارآمدی آن استفاده گردیده است. عملکرد مناسب مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها با حل مسأله نمونه در حالت مشابه از نظر قیود، نشان داده شده است. همچنین با حل مسأله نمونه در حالت‌هایی که قید عملکرد هیدرولیکی شبکه و قابلیت اطمینان منظور شده است، مشاهده می‌شود با افزایش اندکی در هزینه ساخت شبکه از احتمال بروز مشکلات ناشی از تحمیل اضافه بار هیدرولیکی به سیستم و اثرات زیست محیطی کاسته می‌شود.

**کلید واژه:** شبکه جمع‌آوری فاضلاب - بهینه‌سازی - الگوریتم ژنتیک - شاخص عملکرد هیدرولیکی - قابلیت اطمینان

### مقدمه

مطلوب و قابلیت اطمینان بالا که قادر به انتقال فاضلاب بدون ایجاد بار هیدرولیکی اضافی به سیستم باشد، باید مورد توجه قرار گیرد.

مسأله بهینه‌سازی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی مقید می‌باشد که تاکنون از روش‌های مختلفی برای حل آن استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به روش برنامه‌ریزی پویا که از روش‌های متداول طراحی بهینه شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب می‌باشد و دارای قابلیت بالایی در مورد متغیرهای گسسته می‌باشد اشاره کرد [۱-۶]. این روش در مورد متغیرهای پیوسته دارای قابلیت مناسب نبوده و همچنین دارای مشکل ابعادی بوده و در شبکه‌های بزرگ مشکل ساز می‌باشد. دیگر روش‌های پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی، روش برنامه‌ریزی غیرخطی است که در حالت کلی تنها برای متغیرهای پیوسته کاربرد دارد. [۷-۹] سایر روش‌ها شامل روش برنامه‌ریزی خطی [۱۰-۱۱] و روش‌های ابتکاری [۱۲-۱۴]، در تحقیقات کمتری بکار رفته‌اند. با توجه به روند سریع رشد

سیستم جامع فاضلاب شهری شامل شبکه جمع‌آوری، تصفیه‌خانه فاضلاب و آبهای دریافت‌کننده فاضلاب می‌باشد. در این سیستم، شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری وظیفه انتقال فاضلاب‌های خانگی از محل‌های تولید به تصفیه‌خانه را برعهده دارند. باتوجه به اینکه احداث شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب نیاز به صرف هزینه‌های کلان داشته و منابع مالی موجود نیز محدود می‌باشند، امکان ایجاد وقفه در چنین پروژه‌هایی به علت ناکافی بودن منابع مالی دور از انتظار نمی‌باشد. بنابراین نیاز به استفاده از روش‌های پیشرفته طراحی با هدف انتخاب کم‌هزینه‌ترین طرح ممکن، همواره مورد توجه بوده است و از دهه‌های گذشته تلاش‌های گسترده‌ای در این راستا انجام شده است. همچنین تجارب حاصل از نگهداری و بهره‌برداری از شبکه‌های موجود نشان می‌دهد که بهینه نمودن عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌های زمان بهره‌برداری و نگهداری شبکه نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و طراحی شبکه‌ای با سرویس‌دهی

مجزای جمع آوری فاضلاب در مقایسه با روش درهم، از نظر ایمنی و حفظ مسائل زیست محیطی و همچنین با توجه به شرایط اقلیمی و توپوگرافی شهرهای مختلف کشور گزینه مناسب تری می باشد.

### محدودیت‌های طراحی [۲۳]

- حداقل قطر فاضلابرو: حداقل قطر لوله‌های فاضلاب خانگی ۲۰۰ میلی‌متر می باشد.

- حداقل پوشش خاک: براساس عمق یخ‌زدگی و میزان بارهای وارده و وجود یا عدم وجود طبقه زیرزمین و عمق آن تعیین می‌شود، حداقل عمق خاک را در صورت نداشتن طبقه زیرزمین، می‌توان تا ۱/۵ متر انتخاب کرد.

- حداقل سرعت مجاز: به منظور جلوگیری از ته‌نشین شدن مواد و گرفتگی مجاری فاضلابرو همواره باید یک حداقل سرعت، بعنوان سرعت شستشو در نظر گرفت. کمترین سرعت لازم برای ته‌نشین نشدن مواد آلی، ۰/۳ متر بر ثانیه و برای مواد معدنی مانند، شن و ماسه ۰/۶ تا ۰/۷۵ متر بر ثانیه می‌باشد. با استفاده از سرعت شستشو می‌توان شبکه را طوری طرح نمود که حداقل روزی یکبار سرعت فاضلاب به مقدار سرعت شستشو برسد. بنابراین حداقل سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه در حالت نیمه پر توصیه می‌گردد. بدیهی است مقدار سرعت شستشو برای زمان شروع بهره‌برداری نیز باید محاسبه شده و در صورتی که کمتر از ۰/۷۵ متر بر ثانیه باشد، استفاده از حوضچه‌های شستشو توصیه می‌گردد.

- حداکثر سرعت: از نقطه نظر مقاومت لوله‌ها به سایش باید سرعت از حدی بیشتر نشود که این مقدار به جنس لوله بستگی دارد.

- حداقل و حداکثر ارتفاع مجاز فاضلاب: برای جلوگیری از باز ایستادن مواد درشت و معلق در فاضلاب و ته‌نشین شدن آنها در کف فاضلابرو عمق فاضلاب در لوله نباید از ۰/۱ قطر آن کمتر و برای لوله‌های با قطر کم نباید از دو تا سه سانتیمتر کمتر شود. از طرفی در حالت وقوع حداکثر جریان فاضلاب طراحی قطر فاضلابرو باید بگونه‌ای باشد که براحتی جریان را از خود عبور دهد و همواره جریان با سطح آزاد برقرار باشد.

- حداقل و حداکثر شیب فاضلابرو: شیب فاضلابرو باید به اندازه‌ای باشد که سرعت‌های حداقل و حداکثر مجاز را تأمین نماید.

- ترازبندی و تصاعد قطرهای فاضلابرو: به دلیل انتقال ثقلی جریان در شبکه فاضلاب، ترازبندی فاضلابروها باید بگونه‌ای باشد تا سبب اختلال در حرکت جریان فاضلاب نگردد. بدین منظور عمق قرارگیری تاج فاضلابرو

تکنولوژی در سخت‌افزار کامپیوترها و همچنین نرم‌افزارهای برنامه‌نویسی در سالهای اخیر، استفاده از روش‌های جدید بهینه‌سازی، بخصوص الگوریتم‌های تکاملی کاربرد بیشتری یافته است. بطور مثال از روش الگوریتم ژنتیک [۱۰] و [۱۵]، روش الگوریتم ژنتیک و روش جستجوی تابو [۱۶]، روش الگوریتم مورچگان [۱۷] و روش الگوریتم PSO [۱۸] برای بهینه‌سازی شبکه فاضلاب استفاده شده است.

در زمینه عملکرد سیستم جمع‌آوری فاضلاب و قابلیت اطمینان شبکه تحقیقات معدودی انجام گرفته است از آن جمله می‌توان به تلاشهای انجام شده توسط Mays et al. که به بررسی قابلیت اطمینان در شبکه‌های آبرسانی پرداختند [۱۹]، Ermolin که قابلیت اطمینان در شبکه جمع‌آوری فاضلاب را مورد بررسی قرار داد [۲۰]، Sousa و همکاران با در نظر گرفتن شاخص‌هایی به بررسی عملکرد بهینه شبکه در شرایط بهره برداری پرداختند [۲۱] و Tabesh & Madani که از منحنی‌های جریمه<sup>۱</sup> برای محاسبه شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی<sup>۲</sup> المانهای شبکه فاضلاب استفاده نموده و سپس شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه را توسط توابع تعمیم بدست آوردند [۲۲] اشاره کرد. دو محقق آخر با در دست داشتن نتایج حاصل از تحلیل هیدرولیکی شبکه جمع‌آوری فاضلاب، شامل نسبت پرشدگی لوله‌ها و سرعت جریان و در نظر گرفتن محدودیت‌های تعریف شده در استانداردها برای حداکثر و حداقل سرعت مجاز و محدودیت ارتفاع جریان در لوله، منحنی‌های جریمه را برای این پارامترها ترسیم نمودند [۲۲]. در تحقیق حاضر از این شاخص‌های هیدرولیکی بعنوان قید مسأله بهینه‌سازی و همچنین برای تعریف قابلیت اطمینان شبکه استفاده شده است.

با پیوند دو دسته تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی بهینه شبکه از نظر هیدرولیکی و ارزیابی عملکرد سیستم‌های در حال بهره‌برداری، با در نظر گرفتن شاخص‌های عملکرد سیستم در طراحی بهینه شبکه می‌توان از تجارب بهره‌برداری شبکه‌های موجود استفاده نمود. با توجه به اینکه به این موضوع در تحقیقات گذشته پرداخته نشده است، بنابراین در این تحقیق طراحی بهینه شبکه‌های فاضلاب با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان هیدرولیکی سیستم با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک که کارایی آن نسبت به سایر روش‌ها در تحقیقات گذشته به اثبات رسیده است، بررسی شده است.

### مدلسازی هیدرولیکی شبکه فاضلاب

در مدل پیشنهادی، سیستم جمع‌آوری فاضلاب شهری به روش مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه‌های

$$\frac{h}{D} = \frac{1 - \cos(\alpha/2)}{2} \quad (۲)$$

$$\frac{v}{V} = \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{\alpha}\right)^{2/3} \quad (۳)$$

$$\frac{q}{Q} = \frac{(\alpha - \sin \alpha)^{5/3}}{2\pi\alpha^{2/3}} \quad (۴)$$

که  $h$  و  $v$  و  $q$  به ترتیب ارتفاع، سرعت و دبی جریان در حالت نیمه پر می‌باشد.

روابط فوق نشان می‌دهد که نسبت‌های دبی جریان و سرعت، در حالت نیمه پر به حالت پر، تابعی از نسبت پرشدگی فاضلابرو می‌باشند.

برای محاسبه نسبت پرشدگی در مدل پیشنهادی، رابطه زیر براساس روابط (۲) و (۴) و برازش منحنی مقادیر نسبت پرشدگی ( $h/D$ ) و نسبت دبی جریان در حالت نیمه پر به حالت پر ( $q/Q$ ) بدست آمده و در مدل‌سازی هیدرولیکی استفاده شده است:

$$\frac{h}{D} = 4.221\left(\frac{q}{Q}\right)^5 - 11.67\left(\frac{q}{Q}\right)^4 + 12.3\left(\frac{q}{Q}\right)^3 + 6.176\left(\frac{q}{Q}\right)^2 + 2.093\left(\frac{q}{Q}\right) + 0.055 \quad (۵)$$

این رابطه برای ( $h/D$ ) بین ۰/۱ تا ۰/۸۲ دارای ضریب همبستگی ۰/۹۹۹ می‌باشد.

### شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی شبکه

در مدل پیشنهادی از شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی معرفی شده توسط Tabesh & Madani برای ارائه رابطه قابلیت عملکرد و همچنین بعنوان قیود طراحی استفاده شده است [۲۲]. شاخص‌های عملکرد بر اساس منحنی‌های جریمه برای ارتفاع فاضلاب و سرعت جریان در لوله‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. محور قائم منحنی جریمه که از صفر تا یک با گام‌های ۰/۲۵ تقسیم بندی شده است، عملکرد هیدرولیکی اجزای شبکه را به صورت کمی که دارای مفهوم کیفی است، بیان می‌کند. در این محور مقادیر عددی صفر برای حالت عدم سرویس‌دهی، ۰/۲۵ برای حالت سرویس‌دهی غیرقابل قبول، ۰/۵ برای سرویس‌دهی قابل قبول، ۰/۷۵ برای سرویس‌دهی مناسب و یک برای بهترین حالت سرویس‌دهی در نظر گرفته شده است. محور افقی نیز براساس پارامتر در نظر گرفته شده شامل سرعت یا ارتفاع جریان و با توجه به محدودیت‌های تعریف شده در استاندارد طراحی تقسیم‌بندی می‌شود. دو منحنی ارائه شده برای محاسبه شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه بصورت زیر می‌باشند:

پائین دست باید همواره برابر یا بیشتر از عمق قرارگیری تاج فاضلابروهای بالادست خود باشد. همچنین برای جلوگیری از پس‌زدگی فاضلاب، قطر فاضلابرو پائین دست باید همواره برابر و یا بزرگتر از قطر فاضلابرو بالادست خود باشد.

### فرضیات مدل‌سازی هیدرولیکی

جریان در فاضلابروها معمولاً به صورت آزاد و تحت تأثیر نیروی ثقل انجام می‌گیرد. برای بدست آوردن فرمول‌هایی که بتوان به راحتی با آنها محاسبه شبکه را انجام داد فرض‌هایی انجام می‌گیرد که کاربرد آنها تقریب‌هایی به همراه دارد. این فرض‌ها عبارتند از [۲۳]:

- جریان فاضلاب دائمی (ماندگار) است.
- جریان فاضلاب یکنواخت است.
- جریان فاضلاب با دبی ثابت است.
- توزیع سرعت در سطح مقطع جریان، ثابت و برابر سرعت متوسط می‌باشد.
- فاضلاب ماده‌ای غیرقابل تراکم فرض شده یعنی وجود گازها در آن نادیده گرفته شده است.

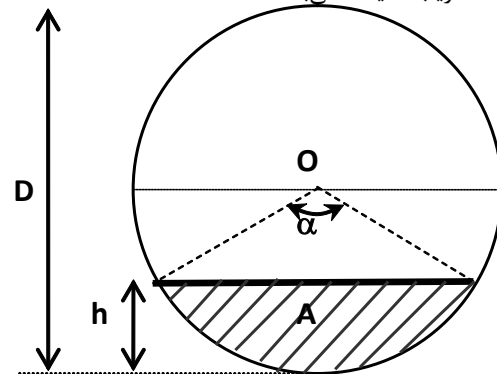
### رابطه جریان

معادله مانینگ معروف‌ترین معادله طراحی شبکه فاضلاب می‌باشد و به علت سادگی کاربرد و دقت نسبتاً خوب آن کاربرد وسیعی دارد. در مدل پیشنهادی از رابطه مانینگ در حالت نیمه پر استفاده شده است.

بر اساس فرمول مانینگ رابطه زیر برای لوله با جریان پر بکار می‌رود.

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} A \quad (۱)$$

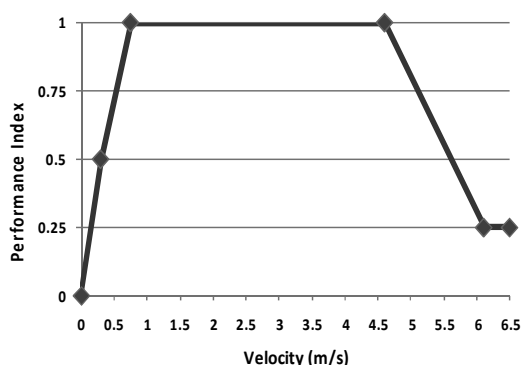
که در آن  $Q$  دبی فاضلاب،  $V$  سرعت متوسط آن و  $A$  سطح مقطع جریان،  $R$  شعاع هیدرولیکی،  $S$  شیب فاضلابرو و  $n$  ضریب مانینگ می‌باشد.



شکل ۱- مقطع فاضلابرو دایره‌ای

نسبت پرشدگی فاضلابرو و نسبت‌های سرعت و دبی در حالت نیمه پر به پر بصورت زیر می‌باشند:

بر اساس [۲۴] ۶/۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. با توجه به توصیه [۲۳] به در نظر گرفتن سرعت ۰/۷۵ متر بر ثانیه بعنوان سرعت شستشو و سرعت ۴/۶ بعنوان حد بالای سرعت بهینه [۲۴]، محدوده سرعت بین ۰/۷۵ تا ۴/۶ متر بر ثانیه بعنوان بهترین حالت سرویس‌دهی و شاخص عملکرد یک، محدوده صفر تا ۰/۳ متر بر ثانیه شاخص ۰/۲۵ به معنی سرویس‌دهی غیرقابل قبول و برای مقدار صفر شاخص عملکرد عدم سرویس‌دهی انتخاب شده است. برای مقادیر بیش از ۶/۱ متر بر ثانیه بدلیل افزایش افت در شبکه و ایجاد سایش در لوله‌ها و کاهش عمر مفید شبکه، شاخص عملکرد ۰/۲۵ انتخاب شده است.



شکل ۳- منحنی جریمه برای ارزیابی ارتفاع فاضلاب درون آدم‌روها [۲۲]

برای بدست آوردن شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه از توابع وزن استفاده می‌شود. Tabesh & Madani برای تعمیم شاخص عملکرد هیدرولیکی از نقطه نظر نسبت پرشدگی لوله‌ها و یا سرعت جریان در هر المان به کل شبکه از میانگین‌گیری وزنی استفاده نمودند [۲۲]. ضریب وزنی براساس حجم هر لوله در نظر گرفته شده است. رابطه شاخص هیدرولیکی کل شبکه بر اساس نسبت پرشدگی و سرعت جریان بصورت زیر می‌باشد:

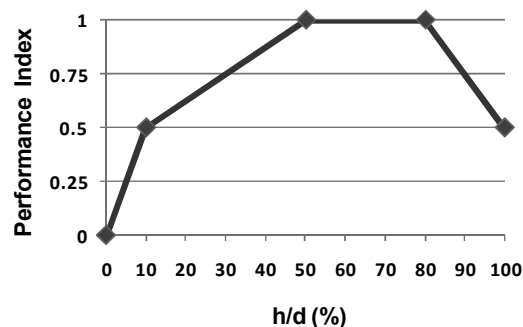
$$PI_N = W_1 (PI_{EIJ}) = \frac{\sum_{IJ \in NP} V_{IJ} PI_{EIJ}}{\sum_{IJ \in NP} V_{IJ}} \quad (6)$$

$$V_{IJ} = \frac{\pi D_{IJ}^2 L_{IJ}}{4} \quad (7)$$

که در آن  $W_1$  تابع تعمیم (وزن)،  $PI_N$  شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه از نقطه نظر سرعت و یا ارتفاع فاضلاب درون لوله‌ها،  $NP$  تعداد کل لوله‌ها در شبکه،  $PI_{EIJ}$ ،  $V_{IJ}$ ،  $D_{IJ}$  به ترتیب شاخص عملکرد هیدرولیکی، حجم، قطر و طول لوله  $IJ$  می‌باشند.

### الف- منحنی جریمه برای ارزیابی قابلیت عملکرد براساس نسبت پرشدگی فاضلاب در لوله

این منحنی در شکل ۲ نشان داده شده و محور افقی آن برحسب درصد نسبت ارتفاع فاضلاب به قطر لوله درجه‌بندی شده است. در این نمودار برای مقدار  $h/D$  بین ۰/۵ تا ۰/۸ شاخص عملکرد یک، به مفهوم بهترین حالت سرویس‌دهی می‌باشد. براساس استانداردهای طراحی حداقل مقدار ۰/۱ برای  $h/D$  پیشنهاد می‌شود، بنابراین مقدار ۰/۱ بعنوان آستانه نهایی سرویس‌دهی غیرقابل قبول و برای ارتفاع صفر، شاخص عملکرد صفر، به معنای عدم سرویس‌دهی در نظر گرفته شده است. محدوده بین ۰/۱ تا ۰/۵ محدوده‌ای است که عملکرد هیدرولیکی شبکه در حال افزایش است و از نظر عملکرد، قابل قبول محسوب می‌شود. در محدوده نهایی بین ۰/۸ تا ۱ وضعیت هیدرولیکی شبکه نزول می‌کند و احتمال ناپایداری جریان و جهش از یک عمق نرمال به عمق دیگر تحت تاثیر امواج و موانع وجود خواهد داشت. به دلیل اینکه پس از پر شدن لوله‌ها با توجه به وجود آدم‌روها امکان افزایش ارتفاع فاضلاب و قابلیت انتقال جریان تا حد قابل قبول وجود دارد، برای اعداد بزرگتر و یا برابر یک، منحنی جریمه بر روی عدد ۰/۵ یعنی سرویس‌دهی قابل قبول ثابت می‌ایستد.



شکل ۲- منحنی جریمه برای ارزیابی مقادیر ارتفاع فاضلاب در لوله [۲۲]

### ب- منحنی جریمه برای ارزیابی قابلیت عملکرد براساس مقادیر سرعت

این منحنی در شکل ۳ نمایش داده شده و محور افقی آن، سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه می‌باشد. بر اساس استانداردهای طراحی، سرعت حداقل برای جلوگیری از ته‌نشین شدن مواد آلی موجود در فاضلاب برابر ۰/۳ متر بر ثانیه و برای جلوگیری از رسوب مواد معلق معدنی موجود در فاضلاب برابر ۰/۶ تا ۰/۷۵ متر بر ثانیه است. بنابراین عدد ۰/۳ متر بر ثانیه بعنوان آستانه نهایی عملکرد غیرقابل قبول اختصاص داده شده است. همچنین حداکثر سرعت مجاز

هر مرحله و قابلیت‌های گرافیکی آن بوده است. اجرای برنامه توسط کامپیوتری با پردازنده‌ای با مشخصات:  
Intel® Core™ 2 Quad CPU Q6600 @ 2.40 GHz  
انجام شده است. زمان مورد نیاز برای اجرا، بستگی به اندازه شبکه فاضلاب (تعداد لوله‌ها)، تابع هدف تعریف شده و قیود استفاده شده دارد.

### پارامترهای مدل جمعیت اولیه و روش کدگذاری

هر متغیر تصمیم بعنوان یک ژن در نظر گرفته می‌شود و مجموعه متغیرهای تصمیم (ژن‌ها) یک کروموزوم و مجموعه کروموزوم‌ها جمعیت (فضای جستجو) را شکل می‌دهند. هر کروموزوم شامل یک سری از قطرهای استاندارد به تعداد لوله‌های شبکه بوده و نشان دهنده طرح یک شبکه جمع‌آوری فاضلاب (یک راه حل برای مسأله) می‌باشد. از روش کدگذاری گری (Gray) برای تبدیل پارامترهای واقعی به مقادیر کدگذاری شده استفاده شده است. تعداد بیت‌های مربوط به هر متغیر تصمیم (ژن) که در اینجا قطر هر لوله می‌باشد براساس تعداد قطرهای استاندارد که در طراحی استفاده می‌شود، تعیین می‌گردد. بعنوان مثال در صورتی که تعداد قطرهای استاندارد در نظر گرفته شده در ابتدای طراحی برابر ۱۶ عدد باشد، برای کدگذاری هر قطر به چهار بیت نیاز است تا ۱۶ حالت مختلف بدست آید (۲<sup>۴</sup>). بنابراین اگر شبکه‌ای با n لوله و برای کدگذاری قطر هر لوله m بیت لازم باشد، طول هر کروموزوم برابر n x m بیت خواهد شد. جمعیت اولیه بصورت تصادفی از اعداد صفر و یک به تعداد بیت‌های کروموزوم‌های مورد نیاز تولید می‌شود.

### تابع برازندگی

تابع هدف بصورت کمینه کردن هزینه‌های ساخت و اجرای شبکه شامل، خرید و اجرای لوله‌ها، آدم‌روها، ایستگاه‌های پمپاژ و آدم‌روهای ریزشی تعریف شده است:

$$\text{Minimize } C_T = \sum_{i=1}^{NP} (C_{P_i} \times L_i + C_{m_i}) + \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^{NPu} C_{Pump}(j) + \sum_{k=1}^{NDR} C_{Drop}(k)$$

که در آن C<sub>T</sub> هزینه کل ساخت و اجرای شبکه، C<sub>P<sub>i</sub></sub> هزینه واحد طول کارگذاری لوله نام، L<sub>i</sub> طول لوله نام، C<sub>m<sub>i</sub></sub> هزینه آدم‌رو در بالادست لوله نام، C<sub>Pump(j)</sub> هزینه ایستگاه پمپاژ نام در صورت وجود در انتهای لوله نام و C<sub>Drop(k)</sub> هزینه آدم‌رو ریزشی نام در صورت وجود در انتهای لوله نام می‌باشند. NP و NPu و NDR به ترتیب تعداد لوله‌ها، پمپها و آدم‌روهای ریزشی می‌باشند.

### قابلیت اطمینان شبکه

قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب عبارت است از احتمال جمع‌آوری جریان فاضلاب تولیدی در محدوده ارتفاع و سرعت مناسب. در این مطالعه سعی می‌شود رابطه‌ای براین اساس و با استفاده از شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی شبکه بسط داده شود. در رابطه پیشنهادی احتمال عملکرد مناسب سیستم در زمان افزایش بار هیدرولیکی شبکه و شوک‌پذیر بودن سیستم بعنوان قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شده است. بررسی روند تغییرات شاخص‌های هیدرولیکی شبکه در اثر تغییرات دبی جریان، حاکی از آن است که شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پرشدگی لوله (PI<sub>h</sub>) در مقایسه با شاخص عملکرد هیدرولیکی از نظر سرعت جریان (PI<sub>v</sub>)، دارای حساسیت بیشتری بوده و روند تغییرات آن متناسب با تغییرات دبی می‌باشد. لذا شاخص مناسب تری جهت بسط رابطه قابلیت اطمینان شبکه است. رابطه قابلیت اطمینان شبکه بصورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$R = a(PI_h)_1 + b(PI_h)_2 + c(PI_h)_3 \quad (8)$$

که در آن R قابلیت اطمینان کل شبکه، (PI<sub>h</sub>)<sub>1</sub> شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پرشدگی لوله در زمانیکه دبی برابر با دبی طراحی است، (PI<sub>h</sub>)<sub>2</sub> شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پرشدگی لوله در زمانیکه دبی یک و نیم برابر دبی طراحی است و (PI<sub>h</sub>)<sub>3</sub> شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پرشدگی لوله در زمانیکه دبی دو برابر دبی طراحی است. a و b و c نیز ضرایبی هستند که با استفاده از داده‌های تاریخی و رکوردهای ثبت شده شبکه‌های فاضلاب مشخص می‌شوند.

### مدل پیشنهادی

مدل پیشنهادی در این تحقیق شامل یک مدل بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن تابع هدف بصورت هزینه ساخت و اجرای شبکه تعریف شده است. مدلسازی هیدرولیکی شبکه‌ها، توسط مدل هیدرولیکی که بصورت تابعی در درون مدل بهینه‌سازی تعریف شده است، انجام می‌شود. مدلسازی هیدرولیکی شبکه براساس فرمول مانینگ صورت می‌گیرد. متغیر تصمیم در این مدل بهینه‌سازی، قطر فاضلاب‌روها در نظر گرفته شده است. برنامه مربوط به مدل پیشنهاد شده شامل مدل بهینه‌سازی و مدل طراحی هیدرولیکی شبکه، بصورت M-FILE ها و تابعی در محیط نرم‌افزار MATLAB ویرایش ۷.۳.۰ (R۲۰۰۶b) نوشته شده است. دلیل انتخاب این نرم‌افزار، سهولت برنامه‌نویسی، امکان مشاهده نتایج اجرای برنامه در

(۱۷)  $(PI_v)_i \geq (PI_v)_{\min}$   
 که  $(PI_v)_i$  شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان در لوله نو  $(PI_v)_{\min}$  حداقل مقدار تعیین شده برای این شاخص می‌باشند.

قید حداقل مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پر شدگی لوله برای کل شبکه:

$$(18) \quad (PI_h)_N \geq (PI_h)_{\min}$$

که  $(PI_h)_N$  شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه بر اساس نسبت پر شدگی لوله و  $(PI_h)_{\min}$  حداقل مقدار تعیین شده برای این شاخص می‌باشند.

قید حداقل مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان در کل شبکه:

$$(19) \quad (PI_v)_N \geq (PI_v)_{\min}$$

که  $(PI_v)_N$  شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان در کل شبکه و  $(PI_h)_{\min}$  حداقل مقدار تعیین شده برای این شاخص می‌باشند.

قید حداقل قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه:

$$(20) \quad R \geq R_{\min}$$

که  $R$  قابلیت اطمینان هیدرولیکی شبکه و  $R_{\min}$  حداقل مقدار تعیین شده برای آن می‌باشند.

### تابع هدف مسأله نامقید

باتوجه به اینکه مسأله بهینه سازی شبکه جمع‌آوری فاضلاب یک مسأله مقید می‌باشد، برای تبدیل مسأله مقید به مسأله بهینه‌سازی نامقید از روش متداول توابع جریمه<sup>۲</sup> استفاده شده است. با این روش برای هر تخلف از قیود یک جریمه اختصاص داده شده و این مقدار در تابع هدف قرار داده می‌شود. مقدار مناسب جریمه برای هر قید در هر مسأله متفاوت بوده و از طریق سعی و خطا بدست می‌آید.

بنابراین تابع هدف مسأله به شکل زیر در می‌آید:

$$(21) \quad \text{Minimize } C_T(x) + \gamma \sum P[b_i(x)]$$

که  $C_T$  هزینه کل برای ساخت و اجرای شبکه که در رابطه (۹) تعریف گردید،  $X$  یک بردار  $m$  بعدی،  $P$ : تابع جریمه،  $b_i(x)$ : قید  $i$ ام مسأله و  $\gamma$ : ضریب جریمه می‌باشند.

از آنجائی که متغیر تصمیم در مدل پیشنهادی قطر لوله می‌باشد که از میان قطرهای استاندارد انتخاب می‌شود بنابراین قید حداقل قطر مجاز همواره رعایت می‌شود. قیود حداقل سرعت مجاز و حداقل شیب مجاز و حداکثر نسبت پر شدگی لوله و حداقل و حداکثر پوشش خاک در فرآیند مدلسازی هیدرولیکی ارضا می‌شوند. بنابراین شکل نرمال‌سازی شده قیود باقی‌مانده که در تابع جریمه باید لحاظ شوند بصورت زیر می‌باشند. در زمانیکه قید  $i$ ام مسأله برقرار باشد، تابع جریمه برابر صفر و درغیر این صورت بزرگتر از صفر می‌باشد.

$C_{Pi}$  خود تابعی غیرخطی از قطر لوله و عمق متوسط خاکبرداری،  $C_{mi}$  تابعی از ارتفاع آدم رو و  $C_{Pump}$  تابعی از مقدار جریان و ارتفاع پمپاژ و  $C_{Drop}$  نیز تابعی از ارتفاع ریزش می‌باشند.

### محدودیت‌های طراحی

قیود طراحی شامل قیود ذکر شده در بخش مدلسازی هیدرولیکی به شرح زیر می‌باشند:

قید حداقل و حداکثر سرعت مجاز:

$$(10) \quad V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max}$$

که  $V_i$  سرعت در لوله  $i$ ام در دبی طراحی و  $V_{\max}$  حداکثر سرعت مجاز و  $V_{\min}$  حداقل سرعت مجاز می‌باشند.

قید حداقل و حداکثر شیب مجاز:

$$(11) \quad S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max}$$

که  $S_i$  شیب لوله  $i$ ام و  $S_{\max}$  حداکثر شیب مجاز و  $S_{\min}$  حداقل شیب مجاز می‌باشند.

قید حداقل قطر:

$$(12) \quad D_i \geq D_{\min}$$

که  $D_i$  قطر لوله  $i$ ام و  $D_{\min}$  حداقل قطر می‌باشند.

قید حداقل و حداکثر پوشش خاک:

$$(13) \quad HD_{\min} \leq X_i \leq HD_{\max}$$

که  $X_i$  عمق متوسط کارگذاری لوله  $i$ ام و  $HD_{\max}$  حداکثر پوشش مجاز و  $HD_{\min}$  حداقل پوشش خاک می‌باشند.

قید حداکثر نسبت پر شدگی لوله:

$$(14) \quad \left(\frac{h}{d}\right)_i \leq \left(\frac{h}{d}\right)_{\max}$$

قید افتار پیشرونده:

$$(15) \quad D_{down} \leq D_{up}$$

که  $D_{down}$  قطر فاضلابرو پائین دست و  $D_{up}$  قطر فاضلابرو بالادست می‌باشند. قطر فاضلابرو پائین دست همواره باید بزرگتر یا برابر قطر فاضلابرو بالادست آن باشد.

علاوه بر قیود هیدرولیکی مرسوم که ذکر شد، قید شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پر شدگی لوله و قید شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان در دبی طراحی برای هر لوله و برای کل شبکه و همچنین قید قابلیت اطمینان در مسأله منظور شده‌اند.

قید حداقل مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پر شدگی لوله در هر لوله:

$$(16) \quad (PI_h)_i \geq (PI_h)_{\min}$$

که  $(PI_h)_i$  شاخص عملکرد هیدرولیکی لوله  $i$ ام بر اساس نسبت پر شدگی لوله و  $(PI_h)_{\min}$  حداقل مقدار تعیین شده برای این شاخص می‌باشند.

قید حداقل مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی بر اساس سرعت جریان در هر لوله:

- ۲- بارگذاری ماتریس مشخصات شبکه شامل:
- شماره لوله، شماره آدمرو ورودی، شماره آدمرو خروجی، تراز زمین در آدمرو بالادست، تراز زمین در آدمرو پائین دست، طول لوله و مقدار جریان طراحی در هر لوله.
- ۳- تولید جمعیت اولیه بصورت تصادفی از اعداد صفر و یک، تعداد بیتها در هر کروموزوم (Nt) برابر با nbits x npar بوده و جمعیت اولیه ماتریسی از صفر و یک و به اندازه nbits x npar می باشد.
- ۴- تبدیل پارامترهای کدگذاری شده به پارامترهای واقعی، هر پارامتر کدگذاری شده هم‌ارز یک قطر لوله می باشد.
- ۵- مدلسازی هیدرولیکی هر شبکه (کروموزوم) و محاسبه تابع هزینه (برازندگی) هر شبکه، شامل هزینه‌های ساخت و اجرای شبکه به‌علاوه هزینه‌های تخلف از قیود.
- ۶- شروع حلقه بهینه‌سازی:
- ۱-۶- انتخاب بهترین جوابها
- ۲-۶- تولید نسل جدید با اعمال عملگرهای تزیویج و جهش بر روی کروموزومهای انتخاب شده.
- ۷- مدلسازی هیدرولیکی هر شبکه (کروموزوم نسل جدید) و محاسبه تابع برازندگی آن.
- ۸- تکرار این حلقه تا فرارسیدن شرط توقف الگوریتم که رسیدن به تعداد تعیین شده نسلها و یا کمترین هزینه لازم می باشد.
- ۹- انتخاب بهترین کروموزوم به عنوان جواب

### حل مسأله نمونه

در این بخش مدل پیشنهادی از طریق حل یک مسأله نمونه مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مدل ارائه شده بدون در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان و شاخص‌های عملکرد سیستم جهت مقایسه با سایر مدل‌های بهینه‌سازی شبکه فاضلاب، در نظر گرفته شده است. سپس با حل مجدد مسأله توسط مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن قیود شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی و قید قابلیت اطمینان به مقایسه نتایج پرداخته شده است.

این مسأله قسمتی از شبکه جمع آوری فاضلاب شهر کرمان است که توسط [۲۵]، با استفاده از برنامه‌ریزی مقید و بکارگیری مدل هیزن-ویلیامز اصلاح شده و مانینگ با ضریب زبری ثابت و همچنین توسط [۹]، با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی و سه مدل الگوریتم ژنتیک با متغیرهای تصمیم متفاوت حل شده است. جانمایی شبکه در شکل ۴ نشان داده شده است.

تابع هدف (تابع هزینه) بکاررفته در مسأله بهینه‌سازی، بصورت زیر تعریف شده است:

$$\left| \frac{D_{down}}{D_{up}} \right| - 1 \leq 0 \quad (22)$$

$$\left| \frac{S_i}{S_{max}} \right| - 1 \leq 0 \quad (23)$$

$$\left| \frac{(PI_h)_{min}}{(PI_h)_i} \right| - 1 \leq 0 \quad (24)$$

$$\left| \frac{(PI_h)_{min}}{(PI_h)_N} \right| - 1 \leq 0 \quad (25)$$

$$\left| \frac{(PI_v)_{min}}{(PI_v)_i} \right| - 1 \leq 0 \quad (26)$$

$$\left| \frac{(PI_v)_{min}}{(PI_v)_N} \right| - 1 \leq 0 \quad (27)$$

$$\left| \frac{R_{min}}{R} \right| - 1 \leq 0 \quad (28)$$

### پارامترهای الگوریتم ژنتیک

انتخاب کروموزوم‌های برازنده در این مدل توسط روش رتبه‌بندی<sup>۴</sup> انجام شده و از عملگر تزیویج تک‌نقطه‌ای برای ترکیب کروموزوم‌های والد استفاده شده است. پس از اعمال عملگر جهش و تولید نسل جدید، فرآیند ارزیابی و تولید نسل ادامه داشته تا زمانیکه به معیار همگرایی الگوریتم که تعداد تعیین شده نسل‌ها و یا رسیدن به حداقل هزینه لازم می باشد، دست یابد.

### الگوریتم مدل پیشنهادی

مراحل مختلف اجرای برنامه به ترتیب زیر است:

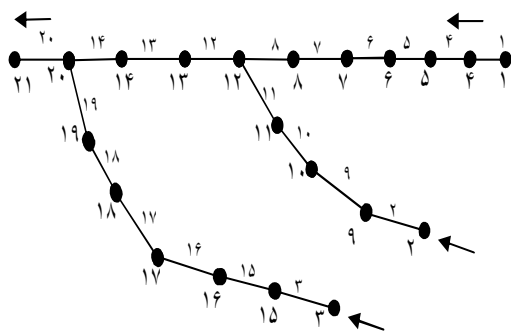
۱- ورود اطلاعات مورد نیاز طراحی بهینه شبکه شامل موارد زیر:

- پارامترهای الگوریتم ژنتیک:

تعداد متغیرهای بهینه سازی (npar)، اندازه جمعیت (popsize)، نرخ تزیویج، نرخ جهش، تعداد بیت‌ها در هر پارامتر (nbits) و معیار توقف (حداکثر تعداد نسلها و حداقل هزینه لازم)

- پارامترهای مورد نیاز برای طراحی هیدرولیکی و محاسبه تابع هزینه شامل:

ضریب زبری مانینگ، حداقل و حداکثر سرعت مجاز، حداقل و حداکثر پوشش خاک، حداکثر نسبت پرشدگی لوله، حداقل مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی نسبت پرشدگی، حداقل مقدار شاخص عملکرد هیدرولیکی سرعت جریان، حداقل مقدار قابلیت اطمینان و مقدار ضرایب جریمه.



شکل ۴- جانمایی شبکه مسأله نمونه

جدول ۱: مشخصات شبکه

شماره لوله	تراز زمین (m)			طول لوله (m)	شماره آدمرو		
	بالادست	منزل	زیر		بالادست	منزل	زیر
۱	۷۴/۵۹	۷۳/۶۶	۲۷/۹	۲۶۰	۴	۱	۱
۲	۷۰/۷	۶۹/۹	۵۴/۹	۳۰۰	۹	۲	۲
۳	۷۳	۷۱/۵	۲۱/۱	۴۰۰	۱۵	۳	۳
۴	۷۳/۶۶	۷۲/۱	۳۰/۴	۴۶۰	۵	۴	۴
۵	۷۲/۱	۷۱/۱۹	۳۲/۴	۲۶۰	۶	۵	۵
۶	۷۱/۱۹	۶۹/۸۵	۳۴	۳۰۰	۷	۶	۶
۷	۶۹/۸۵	۶۸/۲۴	۳۶/۶	۴۵۰	۸	۷	۷
۸	۶۸/۲۴	۶۰/۲۸	۳۸/۷	۴۰۰	۱۲	۸	۸
۹	۶۹/۹	۶۹/۳	۵۶/۲	۲۷۰	۱۰	۹	۹
۱۰	۶۹/۳	۶۸/۴	۵۸	۳۱۰	۱۱	۱۰	۱۰
۱۱	۶۸/۴	۶۷/۲۸	۵۹/۶	۴۴۰	۱۲	۱۱	۱۱
۱۲	۶۷/۲۸	۶۶/۲۲	۹۶/۷	۴۷۰	۱۳	۱۲	۱۲
۱۳	۶۶/۲۲	۶۶/۲۲	۱۰۱/۲	۳۵۰	۱۴	۱۳	۱۳
۱۴	۶۶/۲۲	۶۵/۸۲	۱۰۴/۷	۳۴۰	۲۰	۱۴	۱۴
۱۵	۶۵/۸۲	۷۱/۵	۲۶/۴	۴۰۰	۱۶	۱۵	۱۵
۱۶	۷۰/۱	۶۸/۶	۳۰	۴۰۰	۱۷	۱۶	۱۶
۱۷	۶۸/۶	۶۶/۸	۳۱/۹	۵۰۰	۱۸	۱۷	۱۷
۱۸	۶۶/۸	۶۶/۸	۴۰/۳	۴۰۰	۱۹	۱۸	۱۸
۱۹	۶۶/۸	۶۵/۴۲	۴۴/۶	۵۹۰	۲۰	۱۹	۱۹
۲۰	۶۵/۴۲	۶۵/۴۲	۱۶۵/۹	۳۲۰	۲۱	۲۰	۲۰

جدول ۲: مقادیر واقعی و کدگذاری شده

کد گری	قطر لوله (mm)	کد گری	قطر لوله (mm)
1100	۶۰۰	0000	۲۰۰
1101	۶۵۰	0001	۲۵۰
1111	۷۰۰	0011	۳۰۰
1110	۸۰۰	0010	۳۵۰
1010	۹۰۰	0110	۴۰۰
1011	۱۰۰۰	0111	۴۵۰
1001	۱۲۰۰	0101	۵۰۰
1000	۱۵۰۰	0100	۵۵۰

$$\text{Minimize } C_T = \sum_{i=1}^{NP} (C_{Pi} + C_{mi}) \quad (29)$$

که  $C_{Pi}$  هزینه واحد طول لوله نام در شبکه فاضلاب و تابعی از قطر و میانگین عمق خاکبرداری لوله  $i$  می باشد و به صورت زیر نوشته می شود [۲۵]:

$$C_{Pi} = 1.93e^{3.43D} + 0.812d_i^{1.53} + 0.437d_i^{1.47}D_i \quad (30)$$

که در آن  $e$  عدد نپر،  $D_i$  قطر لوله  $i$  و  $d_i$  متوسط عمق خاکبرداری در لوله نام می باشد (هر دو بر حسب متر) می باشند.  $C_m$  هزینه ساختمان آدم رو می باشد و عبارت است از [۲۵]:

$$C_m = 41.46 E_m \quad (31)$$

که در آن  $E_m$  ارتفاع آدمرو در بالادست لوله نام بر حسب متر می باشد.

فرضیات و محدودیت های بکاررفته در حل مسأله اصلی به شرح زیر می باشند:

ضریب زبری مانینگ:  $0.13$ ، ارتفاع زبری:  $8/6$  میلی متر، حداقل سرعت:  $0.6$  متر بر ثانیه، حداکثر سرعت:  $3$  متر بر ثانیه و حداقل پوشش:  $2/45$  متر.

مشخصات شبکه مسأله نمونه طراحی در جدول ۱-۴ آمده است.

فرضیات و پارامترهای طراحی در نظر گرفته شده در این تحقیق، برای حل مسأله عبارتند از: حداکثر نسبت پرشدگی:  $0.82$ ، اندازه جمعیت در الگوریتم ژنتیک:  $50$  و حداکثر تعداد نسلها:  $500$ ، نرخ تزویج:  $0.5$  و نرخ جهش:  $0.01$ .

همچنین سری قطرهای استاندارد در این مسأله شامل  $16$  قطر لوله در نظر گرفته شده است و برای کدگذاری متغیرها از رشته چهار بیتی و از روش گری (Gray) استفاده شده است. نحوه هم ارزسازی، پارامترهای واقعی و پارامترهای کد گذاری شده در جدول ۲ آورده شده است.

مسأله نمونه در پنج حالت زیر حل شده است:

۱- بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک و با استفاده از مدل هیدرولیکی مانینگ با ضریب زبری ثابت بدون در نظر گرفتن قید قابلیت عملکرد هیدرولیکی یا شاخص عملکرد هیدرولیکی

۲- شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه براساس نسبت پرشدگی لوله ( $PI_p$ ) بعنوان قید طراحی در نظر گرفته شده است.

۳- شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه براساس سرعت جریان ( $PI_v$ ) بعنوان قید طراحی در نظر گرفته شده است.

۴- هر دو شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه همزمان بعنوان قیود مسأله بهینه سازی در نظر گرفته شده است.

۵- قید قابلیت اطمینان بصورت ترکیب احتمالی از شاخص عملکرد هیدرولیکی براساس نسبت پرشدگی در



**حالت دوم (با در نظر گرفتن قید  $PI_h$  کل شبکه):**

در این حالت با قرار دادن مقدار حداکثر نسبت پرشدگی برابر یک و با در نظر گرفتن شاخص  $PI_h$  کل شبکه بعنوان قید، مسأله حل شده است. حداقل مقدار  $PI_h$  کل شبکه برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

در این حالت هزینه شبکه، ۷۴۳۵۸/۶۶ بدست می‌آید که نسبت به حالت قبل کمی کاهش داشته است. از آنجائی که  $PI_h$  در حالت قبل به دلیل محدودیت‌های در نظر گرفته شده برابر ۰/۹۸۵ بدست آمده، لذا با تخفیف محدودیت‌ها و استفاده از قید  $PI_h$  بجای یک عدد مشخص، بدیهی است که هزینه کمتری بدست می‌آید. همچنین با توجه به اینکه نتایج حاصل از حل مسأله در این حالت به نتایج حالت قبل بسیار نزدیک می‌باشد می‌توان از عملکرد مناسب قید عملکرد هیدرولیکی براساس نسبت پرشدگی بجای قید حداکثر مقدار پرشدگی اطمینان حاصل کرد.

**حالت سوم (با در نظر گرفتن قید  $PI_v$  کل شبکه):**

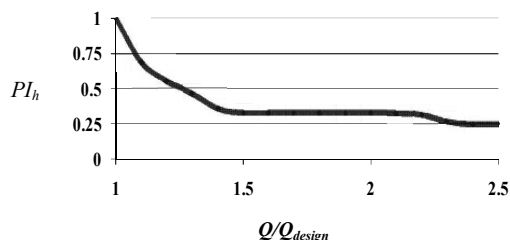
در این حالت بسط محدوده تعریف شده برای سرعت حداقل و حداکثر مجاز به مقدار ۰/۱ تا ۸ متر بر ثانیه و حداکثر نسبت پرشدگی برابر با یک و با در نظر گرفتن شاخص  $PI_v$  کل شبکه بعنوان قید، مسأله حل شده است. حداقل مقدار  $PI_v$  کل شبکه برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است. در این حالت هزینه شبکه، ۷۴۲۷۵/۹۸ و  $PI_v$  کل شبکه، ۰/۹۷۷۵ بدست آمده است.

**حالت چهارم (با در نظر گرفتن قیود  $PI_h$  و  $PI_v$  کل شبکه):**

در این حالت تغییرات اعمال شده در حالت‌های دو و سه بطور همزمان اعمال شده است. حداقل مقدار  $PI_h$  و  $PI_v$  کل شبکه برابر ۰/۹۸ در نظر گرفته شده است. در این حالت هزینه شبکه، ۷۴۶۵۳ و  $PI_v$  کل شبکه، ۰/۹۸۱ و  $PI_h$  کل شبکه، ۰/۹۹۳ بدست آمده است.

**حالت پنجم (با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان):**

در این حالت ابتدا تغییرات شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی شبکه با تغییر دبی از یک تا ۲/۵ برابر دبی



شکل ۵- نمودار تغییرات  $PI_h$  در مقابل تغییرات دبی طراحی

زمان افزایش دبی بعنوان قید مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است.

**حالت اول (بدون در نظر گرفتن قید عملکرد هیدرولیکی):**

نتیجه حاصل از حل مسأله فوق توسط مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک ارائه شده در این تحقیق با استفاده از مدل هیدرولیکی مانینگ با ضریب زبری ثابت، با نتایج سایر روش‌های بهینه‌سازی این مسأله که توسط [۲۵] و [۹] انجام شده‌است، در جدول ۳ مقایسه شده است. با مقایسه نتیجه حل مسأله در شرایط مساوی با سایر روش‌ها، با استفاده از فرمول مانینگ با ضریب زبری ثابت و بدون در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان و یا عملکرد هیدرولیکی، مشاهده می‌شود مدل پیشنهادی در این تحقیق دارای عملکرد مناسبی می‌باشد و هزینه بدست آمده در حد جوابهای مراجع دیگر است. تفاوت مشاهده شده بین جوابها می‌تواند ناشی از تفاوت در متغیرها و الگوریتم‌های متفاوت بهینه‌سازی باشد. در هر صورت با حل این مثال در حالت اول صحت عملکرد مدل مشخص می‌شود و از این مدل در حالت‌های دیگر با افزودن قیود عملکرد هیدرولیکی و قابلیت اطمینان استفاده می‌شود.

لازم به ذکر است که در حالت اول مقدار شاخص  $PI_h$  کل شبکه برابر با ۰/۹۸۵ و شاخص  $PI_v$  کل شبکه نیز ۰/۹۹ بدست آمده است. در حالت‌های بعدی سعی شده است با حذف قیود و یا انتخاب محدوده وسیع‌تر برای قیود مدل‌سازی هیدرولیکی و جایگزین نمودن شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی بعنوان قیود مسأله بهینه‌سازی به حل مسأله پرداخته شود.

**جدول ۳: نتایج تابع هزینه با حل مسأله به روش‌های مختلف**

هزینه*	متغیر تصمیم	روش بهینه‌سازی
۸۳۱۱۶	عمق کارگذاری متوسط و اختلاف ارتفاع دوسر لوله	برنامه‌ریزی غیرخطی به روش جهات امکانپذیر [25]
۸۲۷۳۲/۱	شیب لوله	برنامه‌ریزی غیرخطی به روش BFGS [9]
۸۱۵۵۳/۴	شیب لوله	برنامه‌ریزی غیرخطی به روش فلتنچر-ریوس [9]
۷۷۳۳۷۲	شیب لوله	الگوریتم ژنتیک [9]
۷۹۹۵۵/۸	تراز کارگذاری لوله در بالادست و پائین‌دست	الگوریتم ژنتیک [9]
۸۵۱۰۰/۲	تراز لوله به همراه ارتفاع ریزش یا پمپاژ در گره	الگوریتم ژنتیک [9]
۷۴۴۰۵	قطر لوله‌ها	الگوریتم ژنتیک (تحقیق حاضر)

\*: به دلیل مشخص نشدن واحدی برای هزینه‌ها در تحقیق اولیه، در تحقیقات بعدی و همچنین مقاله حاضر نیز واحدی برای هزینه‌ها در نظر گرفته نشده است.

جدول ۴: مقایسه نتایج حل مسأله در پنج حالت

حالت	قیود	هزینه	$(PI_h)_N$	$(PI_v)_N$
۱	-	۷۴۴۰۵	۰/۹۸۵	۰/۹۹
۲	$(PI_h)_N > ۰/۹$	۷۴۳۵۸/۶۶	۰/۹۸	۰/۹۹
۳	$(PI_v)_N > ۰/۹$	۷۴۲۷۵/۹	۰/۹۸	۰/۹۹
۴	$(PI_h)_N > ۰/۹۸$ $(PI_v)_N > ۰/۹۸$	۷۴۶۵۳	۰/۹۸۱	۰/۹۷۷۵
۵	$R > ۰/۸۵$	۷۷۶۸۳	-	۰/۹۹۳

در جدول فوق،  $(PI_h)_N$  و  $(PI_v)_N$  شاخص عملکرد هیدرولیکی کل شبکه به ترتیب از نقطه نظر ارتفاع فاضلاب درون لوله‌ها و سرعت جریان و R قابلیت اطمینان کل شبکه می‌باشد.

### جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق مدل الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شبکه‌های مجزای فاضلاب شهری با در نظر گرفتن قطر لوله‌ها بعنوان متغیرهای تصمیم و استفاده از روش کدگذاری گری ارائه گردید. برای مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه از فرمول مانینگ با ضریب زبری ثابت استفاده شد. همچنین مدل هیدرولیکی بکاررفته قادر است، در صورت نیاز، هزینه‌های ایستگاه پمپاژ و آدم‌روهای ریزی را نیز محاسبه نماید.

تفاوت عمده مدل پیشنهادی با سایر روش‌های ارائه شده، در نظر گرفتن قید عملکرد هیدرولیکی و قابلیت اطمینان شبکه بعنوان یکی از قیود بهینه‌سازی می‌باشد. قیود عملکرد هیدرولیکی شبکه براساس روابط ارائه شده برای شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی شبکه فاضلاب در تحقیقات قبلی می‌باشد. قید قابلیت اطمینان، بصورت احتمال وجود اضافه بار هیدرولیکی و پس‌زدگی در شبکه تعریف شده و رابطه‌ای براساس شاخص‌های عملکرد هیدرولیکی برای آن تعریف شده است.

عملکرد مناسب مدل پیشنهادی در مقایسه با سایر مدل‌ها در حالتی که قید عملکرد هیدرولیکی و قابلیت اطمینان در نظر گرفته نشده است، با حل مسأله نمونه در حالت اول، نشان داده شده است. در حالت‌هایی که قید عملکرد هیدرولیکی شبکه و قابلیت اطمینان در مسأله منظور شده است، مشاهده می‌شود با افزایش اندکی در هزینه ساخت شبکه از احتمال بروز مشکلات ناشی از تحمیل اضافه بار هیدرولیکی به سیستم و اثرات زیست

طراحی برای شبکه طراحی شده در حالت اول، بررسی شده و نتایج در شکل ۵ ارائه شده است.

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه بر اساس نسبت پرشدگی لوله‌ها، روند نزولی داشته و برای افزایش دبی از ۱/۴ تا ۱/۵ تا دو برابر دبی طراحی، شاخص عدد ثابتی را نشان می‌دهد و دوباره با افزایش بیش از دو برابر، روند کاهشی ادامه یافته و سپس در عدد ۰/۲۵ به معنای عدم سرویس‌دهی در زمانی که تمام لوله‌ها تحت فشار قرار گرفته‌اند، ثابت می‌شود. در مورد شاخص عملکرد براساس سرعت لوله، بدلیل این که سرعت با افزایش دبی به سرعت در شرایط پر لوله نزدیک شده، که همواره عددی در محدوده سرویس‌دهی مطلوب می‌باشد، از حساسیت کمتری نسبت به شاخص پرشدگی لوله برخوردار است.

بنابراین در مسأله بهینه‌سازی از قید قابلیت اطمینان بصورت ترکیبی احتمالی از شاخص عملکرد هیدرولیکی براساس نسبت پرشدگی لوله استفاده شده است. رابطه پیشنهادی برای قابلیت اطمینان بصورت زیر است:

$$R = 0.7(PI_h)_1 + 0.2(PI_h)_2 + 0.1(PI_h)_3 \quad (۳۳)$$

که در آن R: قابلیت اطمینان کل شبکه،  $(PI_h)_1$ : شاخص عملکرد هیدرولیکی براساس نسبت پرشدگی لوله در زمانی که دبی برابر با دبی طراحی است،  $(PI_h)_2$ : شاخص عملکرد هیدرولیکی براساس نسبت پرشدگی لوله در زمانی که دبی یک و نیم برابر دبی طراحی است و  $(PI_h)_3$ : شاخص عملکرد هیدرولیکی براساس نسبت پرشدگی لوله در زمانی که دبی دو برابر دبی طراحی می‌باشند.

در این رابطه، قابلیت اطمینان شبکه بصورت مجموع شاخص عملکرد هیدرولیکی در سه حالت مختلف، بدون افزایش بار هیدرولیکی و با افزایش ۵۰ و ۱۰۰ درصدی دبی جریان فاضلاب بکار رفته است و ضرایب ۰/۷، ۰/۲ و ۰/۱ به ترتیب برای احتمال وقوع سه حالت ذکر شده در طول عملکرد شبکه اعمال شده اند. لازم به ذکر است که بدلیل عدم وجود داده‌های مورد نیاز از شبکه مورد نظر به ناچار این ضرایب بصورت فرضی در نظر گرفته شده اند.

برای حل مسأله، قید قابلیت اطمینان، بزرگتر و یا برابر با ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. در این حالت هزینه شبکه، ۷۷۶۸۳ بدست می‌آید که حدود ۴/۴ درصد نسبت به هزینه محاسبه شده در حالت اول افزایش دارد. بنابراین با افزایش اندکی در هزینه ساخت شبکه، احتمال بروز مشکلات ناشی از تحمیل اضافه بار هیدرولیکی به سیستم کاهش داده می‌شود. مدت اجرای برنامه در این حالت ۳۰ دقیقه می‌باشد. جدول ۴ نتایج حل مسأله در پنج حالت ذکر شده را بصورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد.

شود. همچنین امکان در نظر گرفتن حداکثر نمودن قابلیت اطمینان شبکه جمع آوری فاضلاب، بعنوان هدف دیگر مسأله بهینه سازی شبکه فاضلاب علاوه بر هدف کاهش هزینه ساخت شبکه وجود داشته و پیشنهاد می شود برای حل این مسأله از الگوریتم های بهینه سازی با چند تابع هدف (MOA) استفاده شود.

محیطی کاسته می شود. برای انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می شود در رابطه ارائه شده برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه که بر اساس شاخص های عملکرد هیدرولیکی بر اساس نسبت پرشدگی بدست آمد، از سایر شاخص های عملکرد شبکه نیز استفاده گردد و برای بهبود رابطه مذکور بررسی های بیشتری انجام

## مراجع

- 1- Haith, D., (1966), "Vertical Alignment of Sewers and Drainage System by Dynamic Programming", Thesis presented to the Massachusetts Institute of Technology, at Cambridge, Mass., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science.
- 2- Merritt, L.B., Bogan, R.H., (1973), "Computer-Based Optimal Design of Sewer Systems", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 99, No. 1, pp. 35-53.
- 3- Argaman, Y., Shamir, U., and Spivak, E., (1973), "Design of Optimal Sewerage Systems", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 99, No. 5, pp. 703-716.
- 4- Gupta, A., Mehndiratta, S.L. And Khanna, P., (1983), "Gravity Wastewater Collection Systems Optimization", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 109, pp. 1195-1209.
- 5- Kulkarni, V.S., and Khanna, P., (1985). "Pumped wastewater collection system optimization", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 5, pp. 589-601.
- 6- Md. M. Rashid, P.E. and Donald F. Hayes, (2011), "Dynamic Programming Methodology for Prioritizing Sewerage Projects", Journal of Water Resources Planning & Management, ASCE, Vol. 137, No.2, pp.193-204.
- 7- Holland, M.E., (1966), "Computer model of wastewater collection systems", Water Resources Group, Harvard University, Mass.
- 8- Swamee, P.K., (2001), "Design of Sewer Line", Journal of Environmental Engineering, Vol. 127, No. 9, pp. 776-781.
- 9- Afshar, M.H., and Sotoodeh, M.H., (2003), "Optimal design of sewer networks using mathematical programming and Genetic algorithm methods", Proceedings of Second National Congress on Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
- 10- Fisher, J.M., (1970), "Design of sewer systems", Proceedings of 6th Annual American Water Resources Conference, Las Vegas, Nev.
- 11- Elimam, A.A., Charalambous, C., and Ghobrial, F.H., (1989), "Optimum Design of Large Sewer Networks", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 6, pp. 1171-1190.
- 12- Desher, D.P., and Davis, P.K., (1989), "Designing sanitary sewers with microcomputers", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 6, pp. 993-1007.
- 13- Miles, S.W. And Heaney, J.P., (1988), "Better than "Optimal" Method for Designing Drainage Systems", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 5, pp. 477-499.
- 14- Charalambous, C., and Elimam, A.A., (1990), "Heuristic Design of Sewer Networks", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 1181-1199.
- 15- J. I. Wilson, P. J. Smith, A. Witt and M. E. Canning, (2010), "Wastewater Collection System Optimization for Cost-Effective and Sustainable Capital Improvement Planning", Water Practice & Technology, Vol. 5, No. 4, IWA Publishing.
- 16- Liang, L.Y. and Thompson, R.G., (2004), "Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search", Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 11, No. 2,

pp. 101-112.

17- Afshar, M.H., (2007), "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.

18- Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., and Fuertes, V.S., (2008), "Design optimization of wastewater collection networks by PSO", *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 56, No. 3, pp. 777-784.

19- Mays, L.W., Lansey, K.E., Cullinare, M.J., Goodrich, J., Goulter, I., Yu-Chun Su., Woodburn, J., Tung, Y. K., Hobbs, B.F., Beim, G.K., Ning Duan, Wunderlich, W.O., & Bouchert, F. (Eds.), (1989), "Reliability analysis of water distribution systems", New York: ASCE.

20- Ermolin, Y.A., (2001), "Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures", *Urban Water*, Vol. 3, pp. 271-276.

21- Vitor Sousa, Filipa Ferreira, N. Almeida, José Saldanha Matos, José Martins and Ana Teixeira, (2009), "A simplified technical decision support tool for the asset management of sewer networks", *Water Asset Management International*, Vol. 5, No. 1, IWA Publishing.

22- Tabesh, M., and Madani, S., (2006), "A Performance Indicator for Wastewater Collection Systems", *Water Practice & Technology*, Vol. 1, No. 4, IWA Publishing.

23- Monzavi M.T., (2000). *Wastewater collection systems*. University of Tehran Press, 9th Edition.

24- Walski, M., Barnard, E.B., Harold, E., Merritt, L.B., Walker, N., and Whitman, B.E., (2004), *Wastewater Collection System Modeling and Design*, Haestad Method Company.

25- Mansouri, M.R., Khanjani, M.J., (1999), "Optimization of wastewater collection systems using nonlinear programming method", *J. of Water & Wastewater*, Vol. 30, pp. 20-30, (In Farsi).

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Penalty Curve
- 2- Hydraulic Performance Indicators
- 3- Penalty Function
- 4- Rank Selection