ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

شماره مجوز مجله:۸۰۴۰۰ زمان چاپ:۱۴۰۱/۲/۱۵

طراحی بهینه شبکه‌های فاضلاب شهری با استفاده از نرم‌افزار گمز (GAMS) (مطالعه موردی: شبکه شهر ارومیه)

علی فلاحیه جهانگیری[۱]

۱- کارشناس مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آبادان، آبادان، ایران

(alifj.eng@gmail.com)

چکیده

کمبود یک شبکه فاضلاب کارا و موثر، باعث به خطر افتادن سلامت عمومی و افزایش بیماری‌های واگیردار در جوامع امروزی شهری می‌شود. هزینه‌های زیاد احداث این شبکه‌ها به خصوص در شهرهای بزرگ و وجود محدودیت‌های مالی باعث ورود روش‌های مختلف بهینه‌سازی در طراحی این نوع شبکه‌ها شده است. مسئله طراحی شبکه‌های فاضلاب، دارای متغیرهای گسسته و پیوسته فراوان است. علاوه بر آن، پیچیدگی زمانی غیرخطی این نوع مسائل باعث به کار بردن روش‌های مختلف بهینه‌سازی در طراحی شبکه‌های فاضلاب شده است. پژوهش حاضر مبتنی بر ارائه روش بهینه‌سازی با استفاده از نرم افزار بهینه‌سازی گمز (GAMS) برای طراحی شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است. به منظور تدوین مدل بهینه‌سازی، تابع هزینه-ای بر اساس متغیرهای تصمیم شیب و قطر لوله‌ها استخراج شده و به عنوان تابع هدف کمینه‌سازی هزینه به کار گرفته شده است. نتایج حاصله نشان‌دهنده کارایی مدل بهینه‌سازی ارائه شده در کمینه‌سازی هزینه اجرای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است؛ از مزیت‌های این مدل، توجه به مسائل خاص هر لوله با توجه به تفاوت سرعت جریان و شعاع هیدرولیکی در ارضای قیود هیدرولیکی منتج شده از معادله مانینگ می‌باشد. در این پژوهش همچنین با ارائه روش برنامه ریزی غیر خطی (nonlinear programming) و استفاده از معروف ترین سالور این نوع مدل یعنی Baron برای محاسبه شیب و قطر بهینه در طراحی شبکه‌های فاضلاب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله برای شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر ارومیه بیانگر کاهش هزینه اجرای شبکه و بهینه‌ترین حالت سایز لوله‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی: شبکه جمع‌آوری فاضلاب، قطر بهینه، بهینه‌سازی، GAMS

۱- مقدمه

شبکه‌های توزیع آب شهری برای ارتباط بین مصرف کننده و منبع آب احداث می شوند و از جمله پیچیده ترین زیرساخت های شهری هستند که طراحی و توسعه آنها نیازمند تحلیل های گسترده و صرف هزینه قابل توجه است. هزینه بالای این شبکه ها سبب شده است که تلاش های زیادی در راستای اجرای سیستم هایی که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه هستند انجام گیرد، تا علاوه بر انتقال آب، نیاز های مصرف کنندگان نیز با کمیت و کیفیت مناسب تامین شود. منظور از طراحی بهینه سیستم های توزیع آب، تعیین بهترین ترکیب ممکن از مولفه های سیستم به نحوی است که سبب کاهش در هزینه ها گردد و قیود طراحی مسئله و نیاز مصرف کنندگان با حداکثر قابلیت اطمینان تامین شود. در عمل، این بهینه سازی بر اساس

متغیرهایی که یک سیستم توزیع آب دارد به شکل های گوناگون اتفاق می افتد و شرایط متفاوتی برای اجرای صحیح و طراحی قیود یک چنین شبکه هایی وجود دارد (مقدم و همکاران، ۱۳۹۲).

امروزه حل مسائل بهینه‌سازی و پیدا کردن جواب بهینه برای آنها درحوزه‌های مختلف مهندسی ازجمله طراحی شبکه جمع-آوری فاضلاب از اهمیت زیادی برخوردار است. برای حل مسائل بهینه‌سازی روش‌های مختلفی پیشنهاد و به کار گرفته شده است که در چهار دسته کلی برنامه‌ریزی ریاضی خطی (LP)، برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی (NLP)، برنامه‌ریزی پویا (DP) الگوریتم فراکاوشی تقسیم‌بندی می‌شوند (معینی و افشار، ۱۳۹۱). برخی از این روش‌ها جواب بهینه مطلق تولید می‌نمایند و برخی دیگر تنها به رسیدن به جواب خوب و مناسب اکتفا می‌کنند.

طراحی شبکه فاضلاب خانگی شامل دو بخش طراحی جانمایی شبکه و طراحی ابعاد شبکه برای یک جانمایی مشخص است. این دو بخش مستقل از یکدیگر نیستند و برای دستیابی به طراحی بهینه، این دو بخش باید همزمان با یکدیگر منظور شوند. مساله طراحی بهینه همزمان جانمایی و ابعاد شبکه جمع آوری فاضلاب خانگی یک مساله پیچیده مقید غیرخطی مختلط عدد صحیح (MINLP) است که حل آن با روش‌های سنتی پیشنهادی به سادگی امکان‌پذیر نبوده و لذا برای حل آن باید یک روش مناسب ارائه شود.

در این تحقیق از قابلیت‌های ویژه‌ی نرم‌افزار گمز (GAMS) استفاده شده است. نرم افزار گمز به عنوان یک ابزار قدرتمند و فراگیر برای حل مدل های ریاضی حتی در ابعاد بزرگ روز به روز نقش پررنگ تری در رشته های مهندسی ایفا می کند، یعنی هر جا نیاز به تصمیم گیری بهینه با محدودیت زمان، هزینه و منابع داشته باشیم باید از مدل سازی ریاضی استفاده کرده که گمز از ابزارهای بسیار کارآمد حل این نوع مدل ها است.

شبکه‌های فاضلاب به عنوان یکی از مهم‌ترین زیرساخت‌های شهری نقش مهمی در زندگی روزانه افراد ایفا می‌کند. عدم وجود یک شبکه‌ی فاضلاب موثر در مناطق شهری سبب به خطر افتادن سلامت افراد و مشکلات زیست محیطی می‌شود. از طرفی هزینه‌های بالای ساخت این شبکه‌ها، یکی از محدودیت‌های مهم در ساخت آن‌هاست. از آنجاییکه هزینه ی اجرای شبکه‌ی فاضلاب خانگی به ویژه برای شهرهای بزرگ زیاد است، هر گونه بهینه‌سازی در فرآیند طراحی شبکه موجب کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی سرمایه خواهد شد. بدین ترتیب به کارگیری روش‌های مختلف بهینه‌سازی موجب کاهش هزینه‌های اجرایی شبکه-های فاضلاب می‌شود.

بدین جهت محققین زیادی با به‌کارگیری روش‌های مختلف بهینه‌سازی و ابتکاری سعی در کاهش هزینه‌های اجرایی شبکه‌های فاضلاب داشته‌اند. طراحی شبکه‌های فاضلاب عمدتا شامل دو بخش مشخص کردن جانمایی شبکه و طراحی اجزاء شبکه برای یک جانمایی معلوم است؛ اما این دو بخش مستقل از یکدیگر نیستند و طراحی یک شبکه بهینه مطلوب نیازمند منظور نمودن همزمان این دو بخش است. منظور از بهینه‌سازی جانمایی تعیین بهینه‌ترین درخت به دست آمده از جانمایی پایه به همراه قطر و شیب آن است. هدف بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب به حداقل رساندن هزینه‌های ساخت و نگهداری با توجه به قیدهای هیدرولیکی و ساختگاهی است.

در همین راستا پژوهشگران زیادی در سراسر جهان به این موضوع پرداخته‌اند که در ذیل به تعدادی از آن‌ها به طور اختصار اشاره می گردد. تیان و هه (۲۰۲۲) یک مدل ریاضی برنامه ریزی غیر خطی را برای طرح شبکه های جمع آوری لوله های فاضلاب شهری با در نظرگرفتن حداقل هزینه کل سالانه شبکه های لوله های جمع آوری فاضلاب تدوین کردند. قیود اصلی محدود کننده در تابع هدف این مدل شامل افت سرتاسر و انتهای انشعاب شبکه، قطر استاندارد و شیب طولی می‌باشند. .این پژوهشگران یک روش بهینه سازی ترکیبی را را مبتنی بر آزمون و خطا و روش تجمعی برنامه نویسی پویا برای سیستم لوله قطر بزرگ ارائه کردند. برای این کار، شبکه لوله های جمع آوری فاضلاب منطقه ای را در شهر Taizhou را در نظر گرفتند و نتایج آنها حاکی از این است که روش بهینه سازی پیشنهادی می تواند برای این نوع از مسائل بهینه سازی در یک شبکه بزرگ را به سرعت و با دقت حل کند. به این ترتیب یک مرجع تئوری را برای طراحی بهینه شبکه های لوله های زهکشی باران شهری پیشنهاد کردند (Tian and He, 2022). ناوین و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از الگوریتم فراابتکاری PSO (بهینه

سازی ازدحام ذرات) به بررسی مساله بهینه‌سازی شبکه فاضلاب شهر Sudarshanpura (واقع در جیپور، هند) پرداختند. هدف این مقاله، حل مسئله جانمایی شبکه فاضلاب و بهینه‌سازی اندازه اجزا شبکه است. در این مدل از تابع LQ (مجموع حاصل‌ضرب طول لوله و دبی آن از یک طرح) برای یافتن جانمایی فاضلاب بهینه از دیگر طرح‌های تولید شده، استفاده شده است. نتایج نشان داد که طرح فاضلاب بهینه برای بهینه سازی یک سیستم کلی، شبکه ای که تابع LQ دارای حداقل مقدار خود باشد (Navin et all, 2021).

حسن و همکاران (۲۰۲۱) در یک کار ترکیبی با به کار بردن الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه نویسی فراابتکاری (HP)، ظراحی بهینه شبکه‌های بزرگ فاضلاب را بررسی کردند. مساله اصلی مرتبط با طراحی بهینه شبکه های فاضلاب، دستیابی به طرح‌های کاربردی است که کمترین هزینه ساخت ممکن را ارائه کنند. مهم‌ترین دلایل استفاده از این مدل ترکیبی این است که تعیین طراحی بهینه شبکه های بزرگ فاضلاب به دو مرحله نیاز دارد: می توان از GA برای بدست آوردن قطر بهینه استفاده کرد و سپس می توان از HP برای به دست آوردن شیب بهینه و سایر مشخصات هیدرولیکی شبکه استفاده کرد. بدین منظور از شبکه های بزرگ واقع در شهر مقدس کربلا در عراق، که شامل ۹۰ لوله و ۹۱ منهول (چاهک بازدید) و ۳۵۴ لوله و ۳۵۵ منهول (چاهک بازدید) استفاده گردید. پس از آن تعیین هزینه های طرح های اجرا شده در مقایسه با طرح های به دست آمده از این مدل برای این نوع شبکه ها، باعث کمینه کردن هزینه‌های اقتصادی به میزان ۲۳,۷٪ و ۲۶,۶٪ برای شبکه‌های متوسط و بزرگ (به ترتیب) می شوند (Waqed H. Hassan et al, 2021). دوک و همکاران (۲۰۲۰) طی پژوهشی با استفاده از یک مدل‌سازی قوی ریاضی به بهینه‌سازی جانمایی شبکه فاضلاب و طراحی هیدرولیکی آن پرداختند. بر اساس انتخاب این مدل، سرعت جریان و جهت هر لوله را با استفاده از برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (mix-integer programming) تعیین می‌کند که منجر به یک شبکه مانند شبکه درختی توسعه یافته می شود. این طرح بندی شبکه یک مدل دوم را تعیین می کند که ویژگی های هیدرولیکی را شامل می شود که از جمله قطر و ارتفاعات بالادست و پایین دست از لوله ها را تعیین می کند، با استفاده از یک الگوریتم کوتاه ترین مسیر این مدل ها در یک طرح تکراری تعبیه شده اند که هزینه را اصلاح می کند. این ساختار با موفقیت بر روی یک شبکه فاضلاب واقعی واقع در بوگوتا، کلمبیا ارزیابی شد. بر طبق نتایج آن‌ها برای هردو مدل، روش پیشنهادی راه حل بهتری با کاهش هزینه تا ۴۲ درصد ارائه کرد (Duque et all, 2020). معینی و افشار (۲۰۱۹) در یک کار ترکیبی با بهره گیری از کارایی الگوریتم بهینه سازی مورچه (ACOA) و استفاده از الگوریتم رشد درختی (TGA) و همچنین روش های برنامه نویسی غیر خطی (NLP)، الگوریتم ترکیبی ACOA-TGA-NLP را برای بهینه سازی اندازه لوله از شبکه‌های فاضلاب شهری پیشنهاد دادند. راه حل موثر بهینه سازی اندازه لوله شبکه فاضلاب نیاز به تعیین مکان های لوله، قطر لوله، عمق متوسط پوشش لوله، ارتفاع پمپ با به حداقل رساندن هزینه کل شبکه فاضلاب با توجه به محدودیت های موجود می‌باشد. در روش پیشنهادی، از TGA برای تولید جانمایی درخت‌مانند از طرح پایه تعریف‌شده برای شبکه فاضلاب استفاده می‌شود، از ACOA برای تعیین قطر بهینه لوله‌های موجود، و در نهایت NLP برای تعیین شیب‌های لوله‌ای که از آن‌ها مشخصات باقی‌مانده شبکه مانند مکان لوله و ارتفاعات پمپ/شیب‌شکن تعیین می‌شود. الگوریتم ترکیبی پیشنهادی ACOA-TGA-NLP دو مزیت قابل توجه نسبت به سایر روش های موجود دارد. ابتدا این روش برای شبکه های فاضلاب پمپی و گرانشی قابل استفاده است. دوم، محاسبات طولانی و پیچیده را در مقایسه با روش‌های دیگر به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده کارایی و اثربخشی روش‌های پیشنهادی و به‌ویژه روش ACOA-TGA-NLP است. در واقع، الگوریتم بهینه ACOA-TGA-NLP برای شبکه ارائه شده باعث کمتر شدن هزینه‌های یک شبکه آب فاضلاب به میزان قابل توجهی می‌شود (Moeini and Afshar, 2019). حسن و اتیه (۲۰۱۹) در مقاله‌ای یک روش پیشنهادی را برای تعیین تاثیر الگوریتم ژنتیک (GA) در مدل بهینه سازی GA-TGA از جانمایی بهینه شبکه‌های فاضلاب معرفی کردند. این الگوریتم بهینه‌سازی محیط در محیط نرم افزار MATLAB کدنویسی و پیاده سازی شده است. برای یک مطالعه موردی شبکه‌های فاضلاب این روش حاضر استفاده شد. نتایج حاکی از این بود که این روش پیشنهادی از نظر بهینه-سازی موثر است و قادر به یافتن یک راه حل بهینه یا نزدیک به بهینه است (Hassan and Attiyah, 2019). احمدی و

همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی با ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات اکتشافی (HPSO) به بررسی حل مسائل بهینه‌سازی شبکه فاضلاب پرداختند. محدودیت های مساله و تابع هدف در دو سطح مورد بررسی قرار گرفتند و مشاهده شد که همگرایی الگوریتم PSO را افزایش می دهد. سپس الگوریتم HPSO با برنامه-نویسی پویا (DP) ترکیب می شود تا یک الگوریتم ترکیبی به نام برنامه‌نویسی پویا با بهینه‌سازی ازدحام ذرات اکتشافی (DPHPO) تعیین شود. در مقایسه با وضعیتی که در آن یک الگوریتم تکاملی (فراابتکاری) به تنهایی استفاده شود، پارتیشن‌بندی DP به کار رفته در HPSO منجر به کاهش تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری در الگوریتم فراابتکاری و همچنین کاهش تغییرات در تابع هدف نهایی می‌شود. روش‌های پیشنهادی برای سه مساله از شبکه فاضلاب مورد نظر آزمایش شد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های بهینه‌سازی دیگر نشان‌دهنده برتری این الگوریتم‌ها نسبت به موارد دیگر دارد (Ahmadi et all, 2018). ناوین و ماتور (۲۰۱۶) در پژوهش خود، یک روش جدید برای بهینه‌سازی مسائل جانمایی و تعیین اندازه قطر شبکه فاضلاب ارائه کردند. الگوریتم تولید تعداد از پیش تعریف شده توالی درختی برای تولید جانمایی فاضلاب یک شبکه فاضلاب پایه به ترتیب افزایش طول، معرفی شد. این طرح‌بندی‌های تولید شده به ترتیب صعودی (تجمعی) مرتب شده‌اند. چیدمان مرتب شده جریان به صورت جداگانه برای اندازه اجزای فاضلاب بهینه شده است. مشخص شد که طرح فاضلاب بهینه برای بهینه سازی کل سیستم، طرحی است که در آن جریان تجمعی کل، حداقل مقدار را داشته باشد. الگوریتم اصلاح‌شده بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MPSO) برای تعیین بهینه اندازه اجزای طرح‌بندی انتخاب شده است. روش پیشنهادی برای مساله طراحی شبکه فاضلاب Sudarshanpura (واقع در جیپور، هند) اعمال شد. نتایج برای هزینه بهینه در مقابل جریان تجمعی جانمایی ارائه شدند. بیشتر نتایج MPSO با الگوریتم اصلی PSO مقایسه شده است. نتایج نشان داد که حداقل طرح CQ کمینه هزینه کل را دارد و هزینه کل طرح فاضلاب به طور کلی با CQ طرح افزایش می یابد. همچنین دیده شد که راه حل الگوریتم PSO اصلاح شده در مقایسه با یک الگوریتم PSO اصلی در تمام طرح های با اندازه سایز 1000 بهتر بود (Navin and Mathur, 2016).

در ایران نیز تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

معصومی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی مقایسه قابلیت الگوریتم جهش تصادفی قورباغه با دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی در طراحی شبکه‌های فاضلاب شهری پرداختند. الگوریتم جهش تصادفی قورباغه یکی از الگوریتم-های فراکاوشی جدید است که قابلیت خود را در حل تعداد زیادی از مسائل بهینه‌سازی نشان داده است. در این تحقیق، قابلیت الگوریتم جهش تصادفی قورباغه در حل مساله طراحی بهینه شبکه‌های فاضلاب شهری مورد بررسی قرار گرفت. قطر لوله‌ها به عنوان متغیرهای تصمیم گسسته و عمق کارگذاری لوله‌ها به عنوان متغیرهای تصمیم پیوسته، همزمان در این تحقیق به عنوان مجهولات مساله مطرح بوده‌اند. همچنین سه شبکه فاضلاب با ۱۳، ۴۱ و ۶۵ متغیر تصمیم (به صورت ترکیبی از تعداد لوله‌ها و تعداد گره‌ها) به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. رعایت قیودات متعدد فنی، اجرایی و هیدرولیکی نیز با تعریف توابع جریمه مناسب کنترل شده است. نتایج نشان داد که نتایج بدست آمده از الگوریتم جهش تصادفی قورباغه در مقایسه با بهترین پاسخ بدست آمده از الگوریتم-های ژنتیک، هوش تجمعی ذرات و رقابت زیست طبیعی در مسائل اول و سوم به ترتیب منجر به کاهش هزینه به میزان ۰/۴۳ و ۳/۲ درصد شده و در مسئله دوم نیز در مقایسه با دیگر روش‌ها، با کمترین میزان تعداد فراخوانی تابع هدف به تابع هدفی برابر دست یافته است (معصومی و همکاران، ۱۴۰۰). اعرابی و همکاران (۱۴۰۰) طی پژوهشی با رویکرد مساله بهینه‌سازی چند هدفه، شبکه توزیع آب شهر زاهدان را مورد آنالیز و تحلیل قرار دادند. بدین منظور یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی چندهدفه با توابـع هدف کمینه‌سازی هزینه تعویض لوله‌ها و بیشینه‌سازی اطمینان‌پذیری سیستم توزیع آب، برای بهبود عملکرد هیدرولیکی شـبکه توسعه داده شد. در این راستا مدل شبیه‌ساز EPANET با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در محیط نرم افزار MATLAB تلفیق شد. پس از انجام بهینه‌سازی در فاز ۱، نتایج به صورت یک جبهه پرتو بین ضریب اطمینان شبکه و هزینه بازسازی ارائـه شد. یکی از پاسخ‌های بهینه موجود بر روی نمودار به عنوان طرح نهایی انتخاب شد. در این طرح بهینـه ۲۲ لولـه بـا مبلـغ ۲۷۶ میلیون تومان و ضریب اطمینان ۲/۴۸ درصد تعویض شد. پس از اعمال

تغییرات در قطر لوله ها بـر اسـاس طـرح فـاز ۱ مـدل به عنوان مدل پایه فاز ۲ بهینه‌سازی شد. در فاز ۲ نیز ۳۲ لوله انتخاب و نوسازی شد. به همین ترتیب پس از پایان فاز ۴ مشخص شد که ضریب اطمینان شبکه به صورت چشمگیری ۱۵۰ درصد افزایش داشت و فشار تمامی گره‌های شبکه در محدوه مجاز قرار داشت. بر اساس نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان اینگونه اظهارنظر کرد که استفاده از روش به کار برده شده در این پژوهش در شرایط کمبود بودجه می‌تواند بسیار مؤثر باشد که علاوه بر مدیریت بودجه موجب افزایش ضـریب اطمینـان شـبکه می‌شود (اعرابی و همکاران، ۱۴۰۰).

علیرضا ندائی جوان و احمد ندائی جوان (۱۳۹۹) بهینه سازی طراحی شبکه جمع آوری فاضلاب شهری را با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی انجام دادند در این تحقیق با استفاده از آمار اخذ شده از شرکت آبفای ارومیه با استفاده از نرم افزار یک تابع هزینه استخراج شد که هزینه متوسط را در مقابل شیب و قطر لوله به عنوان خروجی می دهد. سپس با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی در محیط نرم افزار MATLAB مدلی طراحی شده است که قابلیت طراحی شبکه های فاضلاب با رعایت قیود هیدرولیکی و برخی الزامات اجرایی را با کمینه کردن هزینه دارا می باشد. نتایج حاکی از کارایی موثر الگوریتم شبکه عصبی در مساله بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب دارد (علیرضا ندائی جوان و احمد ندائی جوان، ۱۳۹۱). اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۷) بهینه سازی شبکه توزیع را با رویکرد بیشینه‌سازی سود در هماشهر استان کرمان انجام دادند. در این پژوهش بهینه‌سازی براساس تابع هدف دومنظوره بخشی از شبکه توزیع آب هماشهر واقع در استان کرمان مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به اقلیم خاص منطقه حایز اهمیت است. در بهینه‌سازی یک شبکه توزیع آب علاوه بر بعد مالی مسأله، باید به ابعاد دیگری همچون فشار، سرعت آب در لوله ها که در طراحی شبکه نقش اساسی دارد توجه کرد. در این تحقیق بعد فشار به عنوان تابع هدف دوم و اعمال سرعت به عنوان قید محدودیت در نظر گرفته شده است. بدین منظور برای تحلیل هیدرولیکی در این مطالعه شبکه توزیع توسط مدل WaterGEMS آنالیز شده و بعد از آن با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انجام گرفت. بهینه‌سازی از بین چند سناریو براساس تابع دو هدفه انجام و سناریویی که از نظر کاهش هزینه و بهبود فشار شبکه در وضعیت مطلوبی قرار داشت انتخاب شد که بعد از بهینه سازی، در حدود ۱۵ درصد از هزینه کل پروژه صرفه جویی صورت گرفته است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷).

شفیعی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی بهینه‌سازی دوهدفه شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری با رویکرد حداکثر سازی قابلیت عملکرد هیدرولیکی پرداختند. در این تحقیق، از الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II به منظور بهینه‌سازی استفاده شد و نمودار پارتو بین اهداف تعریف شده رسم شده است. نتایج نشان داد که با افزایش قابلیت عملکرد سیستم، به هزینه‌های اجرای شبکه افزوده می‌شود و با افزایش ۵۰۰۰ واحدی هزینه می‌توان به مقدار ۶ درصد به مقدار قابلیت عملکرد هیدرولیکی شبکه افزود (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۷). معینی (۱۳۹۶) فرمول‌بندی جدید الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان را در طراحی بهینه جانمایی و ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی پمپ دار پیشنهاد داد. در الگوریتم پیشنهادی تراز گره‌های بالادست و پایین-دست لوله‌ها به عنوان متغیر تصمیم مسأله در نظر گرفته شد. با تعیین تراز گره‌های بالادست و پایین‌دست لوله‌ها با استفاده از فرمول‌بندی جدید الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، روشی تک مرحله‌ای، ابتکاری و بر مبنای قضاوت مهندسی برای تعیین جانمایی شبکه فاضلاب خانگی با شیب معلوم لوله‌ها ارائه شد. مسائل نمونه‌ای با استفاده از الگوریتم پیشنهادی حل شده و با نتایج حاصل از به کارگیری فرم اولیه الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در تعیین تراز کارگذاری لوله‌ها و روشی ابتکاری بر مبنای قضاوت مهندسی در تعیین جانمایی شبکه، مقایسه شد. نتایج نشان دهنده آن است که الگوریتم پیشنهادی، روشی مناسب در حل مسأله طراحی بهینه همزمان جانمایی و ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی پمپدار و ثقلی است (معینی، ۱۳۹۶). بخشی پور و همکاران (۱۳۹۶) بهینه سازی جامع شبکه های جمع آوری فاضلاب را با استفاده از الگوریتم های ژنتیک خود سازگار شونده در شهر شاوور انجام دادند. در این پژوهش، یک مدل ریاضی معرفی شد که به واسطه آن امکان بهینه‌سازی همزمان هر دو مساله وجود خواهد داشت. برای طراحی پلان شبکه از روش حلقه به حلقه بهره گرفته شد. سپس، از یک مدل بدون شرط جهت طراحی هیدرولیکی اجزاء شبکه استفاده می شود. درنهایت دو روش معرفی شده در قالب یک مساله بهینه‌سازی جهت یافتن طرح اقتصادی شبکه به هم متصل می شوند. درنهایت قابلیت روش با بهینه‌سازی شبکه فاضلاب

شهر شاوور در استان خوزستان ارزیابی گردید. نتایج حاکی از سرعت بالا و قابلیت اطمینان روش در حل مسایل بزرگ مقیاس است. همچنین در مناطق مسطح بهینه‌سازی همزمان جانمایی لوله ها و مشخصات هیدرولیکی آن ها تاثیر قابل توجهی در کاهش هزینه های اجرایی دارد (بخشی‌پور و همکاران، ۱۳۹۶).

نفیسی و احمدی (۱۳۹۲) در تحقیق خود به بررسی بهینه سازی شبکه‌های فاضلاب با استفاده از الگوریتم گروه خرده‌های اصلاح شده پرداختند. آن‌ها در این مطالعه، از الگوریتم گروه خرده‌ها با قابلیت پرواز بازگشتی (PSOPC) در بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب استفاده کردند.تابع هدف شامل حداقل کردن هزینه های حفاری و تهیه ی لوله ها با توجه به قطرهای موجود در بازار، و مدل هیدرولیکی به کار رفته بر اساس معادله ی مانینگ است. محدودیت های در نظر گرفته شده شامل حداقل و حداکثر سرعت مجاز جریان، حداکثر و حداقل عمق استغراق نسبی، حداقل شیب جانمایی لوله ها و حداقل عمق حفاری شبکه است. استفاده از مفهوم پرواز بازگشتی مانع ازخروج متغیرها از کران درنظر گرفته شده برای آن ها می شود. وارد کردن مستقیم قیدهای مسئله در این الگوریتم سبب می شودکه هر ذره یک جواب ممکن را با توجه به قیدهای ساختگاهی و هیدولیکی اتخاذ کرده و نیاز به سایر روش های کنترلی قیدها مانند تابع جریمه نباشد. نتایج حاکی از بهبود محسوسی نسبت به دیگر الگوریتم ها می‌باشد (نفیسی و احمدی ،۱۳۹۲).

علیرغم قابلیت‌های گسترده و استفاده فراوان از الگوریتم‌های فراابتکاری و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای مسائل بهینه‌سازی و ارائه مدل‌های بهینه‌سازی برای کمینه کردن مقادیر هزینه طراحی و اجرای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری به خصوص در شهرهای بزرگ، این موضوع کماکان مورد توجه بسیاری از محقیقن سراسر جهان می‌باشد. در کشور ما نیز، با توجه به شرایط اقتصادی حاکم بر کشور، موضوع کمینه شدن هزینه‌های طراحی و اجرا هر پروژه ای همواره چالش می‌باشد. لذا در این پژوهش سعی شده است که مدلی برای مساله طراحی بهینه جانمایی و ابعاد شبکه فاضلاب خانگی ارائه شود.

در این تحقیق تلاش شده است با به کارگیری و استفاده از نرم افزار گمز (کدنویسی در محیط نرم افزار GAMS) روشی مناسب و جدید برای حل مساله طراحی جامع بهینه شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی ارائه شود. در این پژوهش ابتدا توضیحاتی مختصر درباره الگوریتم پیشنهادی ارائه می شود و سپس مدل بهینه سازی مساله طراحی جامع بهینه شبکه جمع-آوری فاضلاب خانگی برای مطالعه موردی در شهر ارومیه توضیح می‌شود. در انتها نتایج مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- نرم افراز GAMS

تکنولوژی GAMS یک سیستم جامع طراحی شده بری تسهیل کار مدل‌سازانی است که پدیده‌های واقعی را به مدل ریاضی (به صورت ویژه مدل‌های بهینه سازی) تبدیل می‌کنند. GAMS مخفف "General Algebraic Modeling System" است. لازم به ذکر است برخلاف نام این نرم افزار، فقط برای مدل های ریاضی با معادلات جبری استفاده نمی‌شود. با توجه به اینکه برای حل معادلات دیفرانسیل در مشتقات جزئی نیاز به انتقال این معادلات به سیستم معادلات جبری می‌باشد که این معادلات با توجه به روش‌های تکرار حل می‌شوند، می‌توان گفته که GAMS کاربرد وسیعی دارد. این نرم‌افزار یک سیستم قوی و انعطاف پذیر برای حل مسائل برنامه‌ریزی خطی (LP) برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) برنامه‌ریزی صحیح مختلط (MIP) برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط (MINLP) و مسائل مکمل خطی (MCP) می‌باشد (نیک‌خواه و ربیعی، ۱۳۹۵).

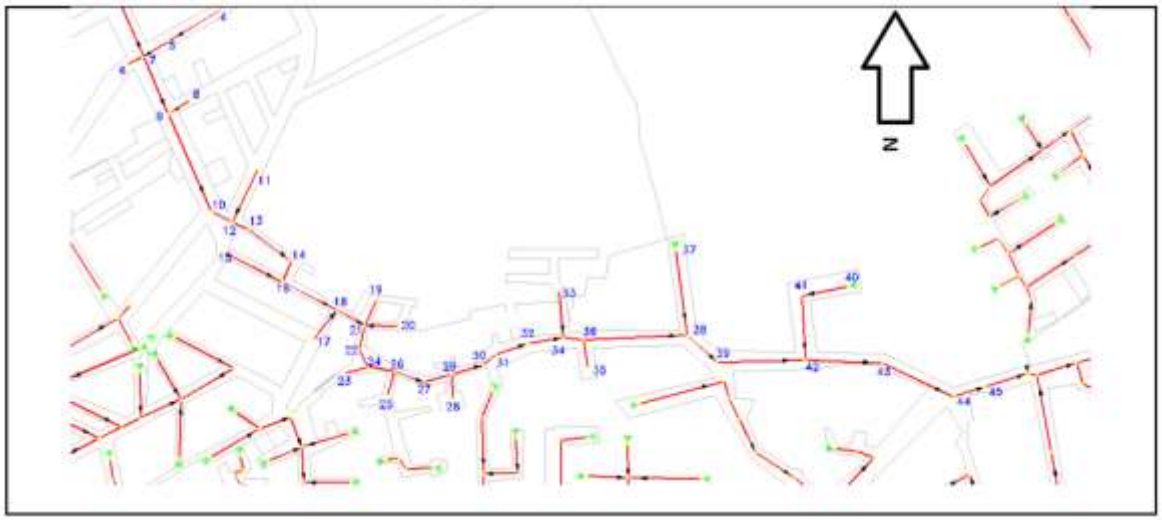
مدل GAMS به گونه ای تعریف می‌شود که کاربرد آن را برای کاربران و کامپیوتر آسان می کند. در حقیقت برنامه GAMS مستندی از مدل است و دیگر به توضیحات جداگانه گذشته نیازی ندارد. هم‌چنین طراحی GAMS با ویژگی‌های زیر بیانگر نیازهای کاربر به مستندات است:

۱-تمامی تغییرات داده‌ها به صورت خلاصه و جبری مشخص شده‌اند. در حقیقت می‌توان همه داده‌ها را در جزئی‌ترین شکل آن‌ها وارد کرد. در ضمن تغییرات ایجاد شده در ساخت مدل و هم‌چنین در گزارش‌گیری، برای بررسی در دسترس هستند.

۲-متن توصیفی بخشی از تعریف نمادها را تشکیل می‌دهند، و با نمایش مقادیر متناظر، این متن نیز مشاهده می‌شود.
۳-تمامی اطلاعات مورد نیاز برای درک مدل در مستند آن موجود است (طلوع، ...).

۲-۲- منطقه مورد مطالعه

شبکه فاضلاب انتخاب شده در این مطالعه قسمتی از شبکه فاضلاب ارومیه است (شکل ۱). بر اساس مبانی طرح فاضلاب ارومیه، سرانه فاضلاب تولیدی برابر با ۲۱۰ لیتر در روز به ازای هر نفر، تراکم جمعیت برابر با ۱۵۰ نفر در هکتار، ضریب بهره-برداری از شبکه برابر با ۱، ضرایب حداکثر ساعتی و روزانه به ترتیب برابر با ۰/۱۶۷ (جمعیت بر حسب هزار نفر/۵) و ۱، حداقل عمق لوله‌ها برابر با ۲ متر، نشتاب برابر با ۲۳ مترمکعب در روز برای هر کیلومتر طول لوله، حداکثر سرعت جریان برابر با ۳/۵ متر در ثانیه و حداقل نسبت پرشدگی لوله برابر با ۰/۱ است.



شکل (۱)- شمای کلی از محدوده مورد مطالعه ازشبکه فاضلاب شهر ارومیه

۲-۳- ساختار مدل بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی شبکه‌های فاضلاب حداقل کردن هزینه‌های احداث است. تابع هدف به منظور برآورد هزینه‌های ساخت شبکه همراه با محدودیت‌های مدل کمینه‌سازی هزینه اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب به صورت روابط (۱) و (۲) تعیین می-شود.

$$ObjectiveFunction: Minimize(Cost = f(D,S)) \quad (۱)$$

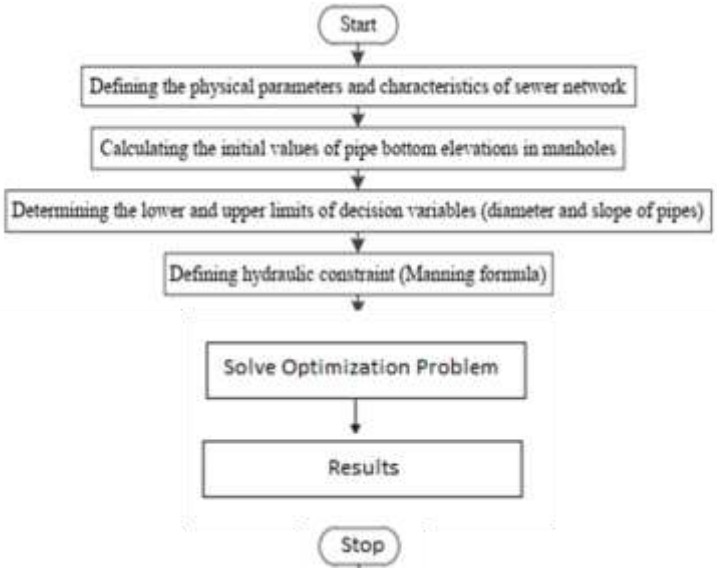
$$Subjectedto:$$

$$S_{min} \le S \le S_{max}\ ,\ D_{min} \le D \le D_{max}\ , \quad (۲)$$

$$V \le V_{max}\ ,(\frac{h}{d})_{\min} \le \frac{h}{d} \le (\frac{h}{d})_{\max}, V = \frac{۱}{n} R^{\frac{۲}{۳}} S^{\frac{۱}{۲}}$$

که در این معادلات Cost: هزینه اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب به عنوان تابعی از قطر لوله (D) و شیب لوله (S) است.d: عمق لوله و پارامترهای S_{min} و S_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار مجاز شیب طولی لوله‌ها، D_{min} وD_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار مجاز قطر لوله‌ها،V و V_{max} به ترتیب سرعت جریان در داخل لوله و حداکثر مقدار مجاز آن $\frac{h}{d}$ و $(\frac{h}{d})_{\min}$؛ و $(\frac{h}{d})_{\max}$ نسبت پرشدگی، حداقل و حداکثر نسبت پرشدگی مجاز لوله، R :شعاع هیدرولیکی لوله n :ضریب مانینگ بوده که برای لوله‌های پلی‌اتیلن با توجه به سطح صاف و صیقلی بودن آنها ۰/۰۱۱ در نظر گرفته شده

است. لازم به ذکر است قطر لوله‌ها با افزایش تلسکوپی در جهت جریان در نظر گرفته شده‌اند (قاعده تلسکوپی). بدین ترتیب در جهت جریان قطر لوله‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. فلوچارت محاسباتی مدل بهینه‌سازی پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲)- فلوچارت محاسباتی مدل بهینه سازی ارائه شده

۲-۴- قیود و محدودیت های مورد مطالعه

برای بهینه‌سازی طراحی شبکه فاضلاب ارومیه، حداکثر سرعت جریان برابر با ۳/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده و برای شیب لوله‌ها نیز محدوده ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۳، برای قطر لوله‌ها محدوده ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر و برای پرشدگی (استغراق) لوله‌ها محدوده ۰/۱ تا ۰/۹۹۹ تعیین شده است.

۲-۵- تشریح الگوریتم مورد استفاده از GAMS

در این بخش ابتدا روش مورد استفاده از نرم افزار گمز برای تابع هدف مساله و سپس نحوه چگونگی ارضای قیود این تابع هدف شرح داده می‌شود.

نوع مدل از نوع برنامه ریزی غیر خطی (nonlinear programming) است و با استفاده از معروف ترین سالور این نوع مدل یعنی Baron در نرم افزار حل شده است. در مطالعه حاضر، با تعریف سطوح ارضای قیود در شبکه‌های فاضلاب (شبکه شهر ارومیه) با استفاده از نرم افزار GAMS نرخ کارایی و اثربخشی آن نشان داده می شود.

۳- نتایج و بحث

برای بررسی کارایی نرم افزار GAMS نمونه ای از شبکه ی فاضلاب شهر ارومیه به عنوان مطالعه‌ی موردی در ادبیات بهینه-سازی شبکه‌های فاضلاب، حل و نتایج آن تحلیل شد. در اولین گام از این پژوهش تابع هزینه اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب استخراج شد. ارائه تابعی ثابت که به صورت کلی و همواره نشانگر هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری از شبکه‌های فاضلاب باشد غیرممکن است؛ چرا که در هر منطقه با توجه به خصوصیات آن و نوع شبکه هزینه های متفاوتی ایجاد می‌شود. در این مطالعه بر اساس فهرست بهای پایه شبکه جمع‌آوری فاضلاب و با استفاده از صورتجلسات کارگاهی و صورت وضعیت‌های پیمانکاران در آن منطقه خاص، تابع هزینه‌ای مختص منطقه‌ای با بافت زمین دج با ۳۰٪ سنگ استخراج شد.

با برازش یک معادله (صفحه) بر مقادیر واقعی شیب، قطر و هزینه اجرای واحد طول شبکه فاضلاب، تابع برآورد هزینه به صورت معادله (۳)۰به دست آمد. در این برازش مقدار شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با ۷۲۶۳/۵۴ تومان بوده است. بدین ترتیب با تقریب می‌توان گفت که در برآورد هزینه اجرای واحد طول شبکه فاضلاب با استفاده از رابطه ارائه شده، به طور متوسط حدود ۷۰۰۰ تومان خطا می‌تواند وجود داشته باشد که با توجه به هزینه بالای اجرای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب، این مقدار خطا مقدار قابل قبولی می‌تواند باشد.

$$UnitCost = (۲.۷۷۵۳ \times ۱۰^{۵})D^{۲} + (۱.۹۱۹۵ \times ۱۰^{۸})S^{۲} - ۵۶۵۹۳D + (۱.۴۹۲۸ \times ۱۰^{۵}) \qquad (۳)$$

در این رابطه D: قطر لوله (متر)، S : شیب لوله و UnitCost : هزینه اجرا (تومان به ازای هر متر طول لوله) است. می¬توان گفت که مبانی و ضوابط طراحی شبکه‌های فاضلاب مجزا با واقعیت‌های موجود تطابق نداشته و اصلاح ضوابط و یا اصلاح روش-های نصب انشعاب فاضلاب امری ضروری است.

۳-۱- نتایج مدل شبکه شهر ارومیه

نمونه‌ای از نتایج به دست آمده برای بهینه‌سازی شبکه فاضلاب ارومیه لحاظ در جدول (۱) نشان داده شده است. طبق این جدول در شبکه بهینه به دست آمده اثری از منهول-های ریزشی دیده نمی‌شود. بر اساس مدل بهینه‌سازی اجرا شده در نرم افزار گمز (GAMS) برای دو متغیر تصمیم قطر و شیب چون ارتباط و تاثیر مستقیم بر تابع هدف و هزینه‌های اجرا دارد مقادیر کمینه آن‌ها به دست آمد.

جدول (۱)-نتایج به دست آمده برای بهینه‌سازی شبکه فاضلاب ارومیه

Path No	Pipe diameter (mm)	Pipe slope (m/m)	Pipe filling ratio (h/d)	V (m/s)	R (m)
4	200	0.00050	0.1	2.09853981	1.048907868
5	200	0.00050	0.746629833	0	0
6	200	0.00050	0.999	3.5	2.259246359
7	200	0.00050	0.1	0.595953909	0.158737865
8	200	0.00050	0.746002901	1.723240755	0.780513574
9	200	0.00050	0.787389484	1.475859351	0.618627157
10	200	0.00050	0.1	0.345989307	0.070219145
11	200	0.00050	0.1	3.5	2.259246359
12	200	0.00050	0.999	3.5	2.259246359
13	200	0.00050	0.999	0.733022939	0.21653987
14	200	0.00050	0.1	0.590380462	0.15651627
15	200	0.00050	0.1	0.445076321	0.102450306
16	200	0.00050	0.1	0.857033774	0.273752712
17	200	0.00050	0.999	1.136515751	0.418046617
18	200	0.00050	0.884983059	3.5	2.259246359
19	200	0.00050	0.1	1.906101474	0.907988923
20	200	0.00050	0.1	1.984493997	0.96457546
21	200	0.00050	0.1	1.752050716	0.800168654
22	200	0.00050	0.399809967	3.5	2.259246359
23	200	0.00050	0.1	3.5	2.259246359
24	200	0.00050	0.999	0.989436097	0.339580818
25	200	0.00050	0.683023565	2.152375064	1.089528142
26	200	0.00050	0.1	0.50932551	0.125416497

27	200	0.00050	0.86348911	1.184577481	0.444842971
28	200	0.00050	0.1	3.5	2.259246359
29	200	0.00050	0.1	0.980014469	0.334742038
30	200	0.00050	0.1	0.668269114	0.188490128
31	200	0.00050	0.999	2.189484467	1.11782631
32	200	0.00050	0.1	0	0
33	200	0.00050	0.1	2.029548436	0.997609681
34	200	0.00050	0.419935039	0.574927656	0.150411598
35	200	0.00050	0.999	2.683630013	1.516859951
36	200	0.00050	0.1	0	0
37	200	0.00050	0.999	3.5	2.259246359
38	200	0.00050	0.1	3.5	2.259246359
39	200	0.00050	0.1	3.5	2.259246359
40	200	0.00050	0.1	0.62125396	0.168952755
41	200	0.00050	0.1	0.863258339	0.276740485
42	200	0.00050	0.999	3.5	2.259246359
43	200	0.00050	0.1	0	0
44	200	0.00050	0.999	1.767188404	0.810561187
45	200	0.00050	0.1	1.260778467	0.488449533

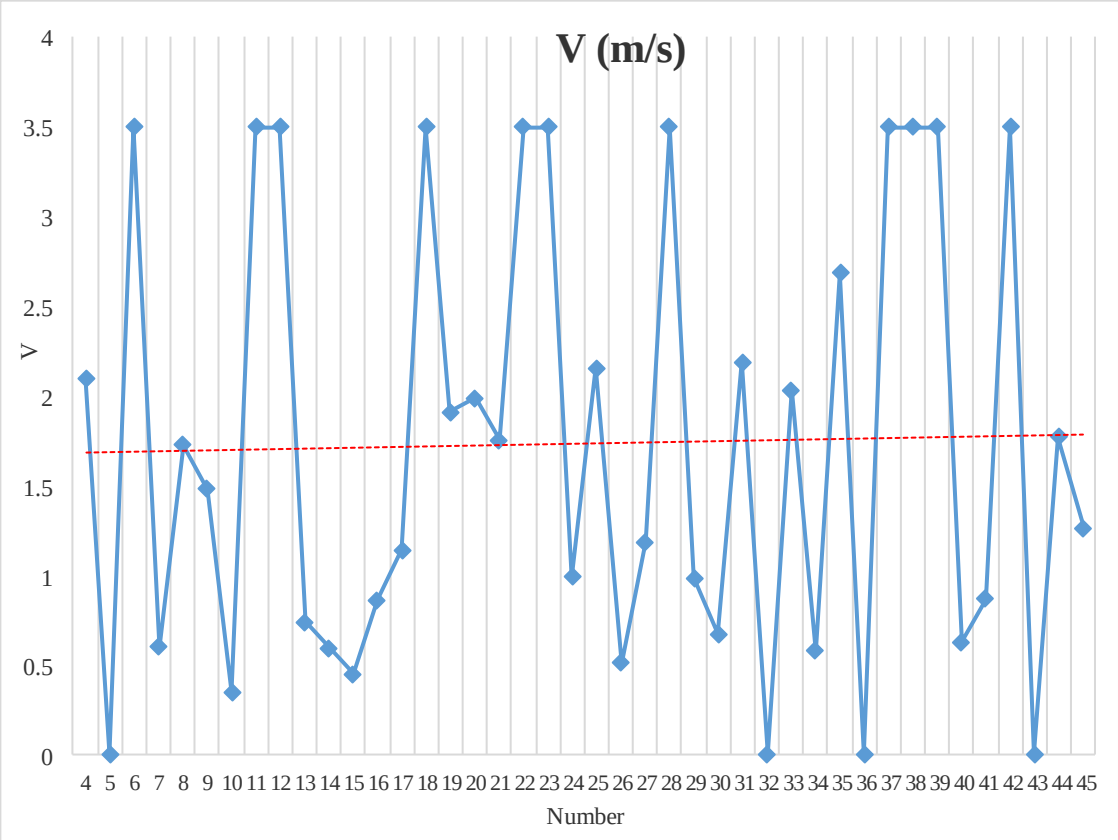
مقادیر قطر به دست آمده برای شبکه فاضلاب ارومیه و هزینه اجرا در وضعیت موجود طرح، حالت بهینه ارائه شده است. طبق این جدول مقادیر بهینه ارائه شده برای هر لوله در شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر ارومیه با استفاده از نرم افزار گمز محاسبه شد. این مقادیر برای پارامتر تصمیم شیب هم تعیین شد و با توجه به اثر مستقیم این دو پارامتر(قطر و شیب) در تابع هدف برآورد هزینه، منجر به کاهش هزینه توسط مدل بهینه سازی در عین رعایت قیود هیدرولیکی و اجرایی، می‌تواند نشان‌دهنده کارآمدی آن باشد. این مقادیر در حالت کمینه مقدار خود در اجرای شبکه است که با توجه به هزینه‌های بالای اجرای شبکه-های فاضلاب باعث کاهش رقم قابل توجهی در هزینه‌ها شود. همچنین مقدار تابع هدف در جدول (۲) محاسبه شده است.

جدول (۲)-هزینه به دست آمده برای شبکه فاضلاب ارومیه

Cost Uni	Value
Obj	6269760

۳-۲- مقادیر سرعت جریان در مدل شبکه شهر ارومیه

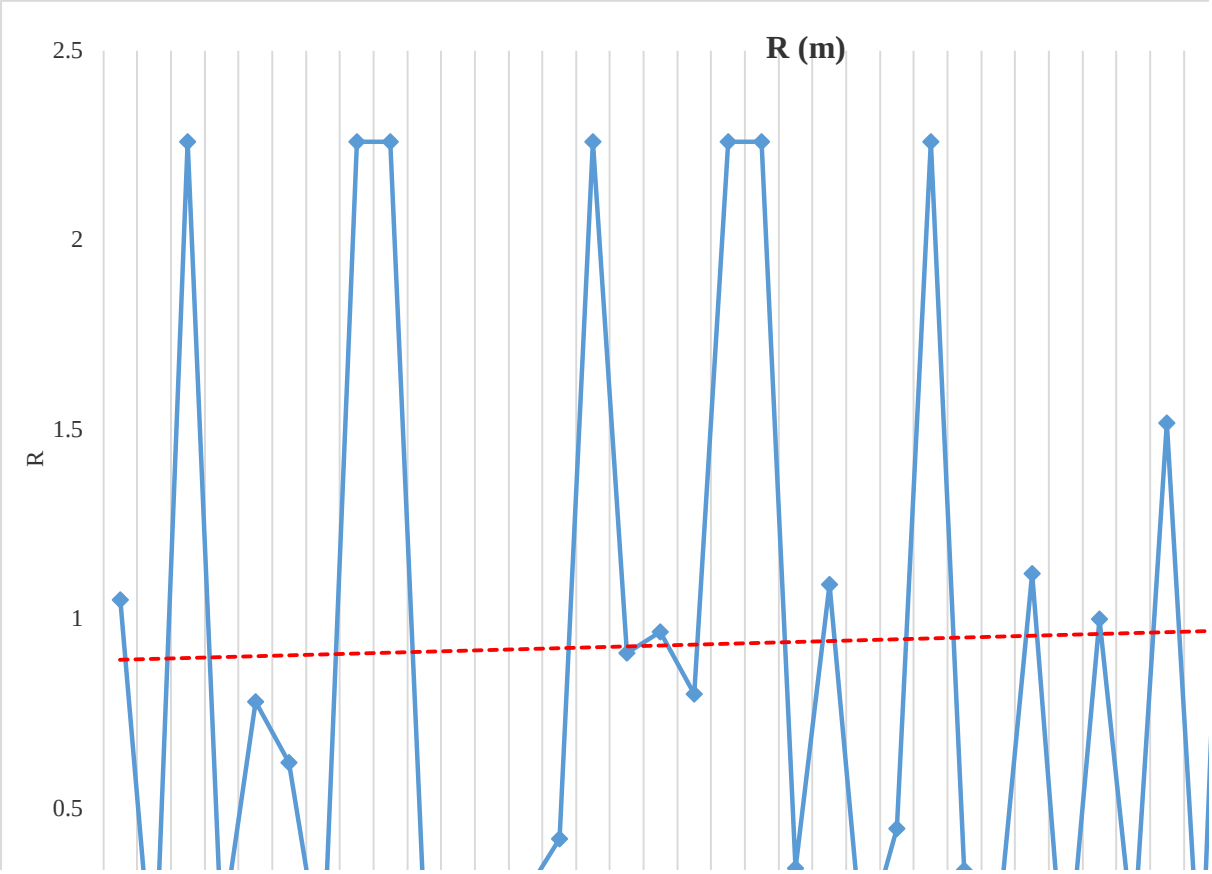
در این مدل مقادیر بهینه متفاوتی برای سرعت محاسبه شد و نتایج آن در شکل (۳) نمایش داده شد. بر اساس این شکل، به طور کلی روند (خط قرمز) این مقایر با شیب کم صعودی می باشد. بنابراین سرعت متغیر بوده و مقادیر مختلفی برای هر لوله به دست آمد.



شکل (۳)-مقادیر سرعت بهینه لوله‌های شبکه فاضلاب ارومیه

۳-۳- مقادیر شعاع هیدرولیکی در مدل شبکه شهر ارومیه

مشابه مقادیر سرعت جریان، در این مدل مقادیر بهینه متفاوتی برای شعاع هیدرولیکی محاسبه شد و نتایج آن در شکل (۴) نمایش داده شد. بر اساس این شکل، به طور کلی روند (خط قرمز) این مقایر با شیب تندتری نسبت به روند سرعت، صعودی می باشد. بنابراین این پارامتر نیز متغیر بوده و مقادیر مختلفی برای هر لوله به دست آمد.



شکل (۴)-مقادیر شعاع هیدرولیکی بهینه لوله‌های شبکه فاضلاب ارومیه

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از جمع آوری آمار و اطلاعات مربوط به اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهر ارومیه، تابع هزینه‌ای بر اساس متغیرهای شیب و قطر لوله‌ها (متغیر تصمیم) استخراج شده است. سپس مدلی برای کمینه‌سازی (Min) هزینه اجرای شبکه جمع‌آوری فاضلاب با استفاده از نرم افزار گمز (GAMS) تدوین شده است. نتایج حاصله نشان‌دهنده اثربخشی و کارایی این مدل در کمینه‌سازی هزینه اجرای شبکه‌های جمع‌آوری فاضلاب است.

نتایج بیانگر کاهش قابل توجه سایز لوله‌ها (سایز ایده‌آل) و در نتیجه افزایش هزینه اجرای شبکه می‌شود.

۵- مراجع

۱. اعرابی پیمان، پیرزاده بهاره و جعفری اصل جعفر. نوسازی و ارتقای سیستم‌های توزیع آب شهری با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه (مطالعه موردی: بخشی از شبکه توزیع آب شهر زاهدان). مجله آب و فاضلاب. ۳۲(۶): ۱-۱۶، ۱۴۰۰ doi: 10.22093/wwj.2021.255434.3078

۲. بخشی پور ابراهیم، آیتی امین، حبیبی سید امیرهوشنگ و حقیقی علی. بهینه سازی جامع شبکه های جمع آوری فاضلاب با استفاده از الگوریتم های ژنتیک خود سازگار شونده (مطالعه موردی شهر شاوور). کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر،تهران، ایران، ۱۳۹۶، https://civilica.com/doc/709018

۳. شفیعی احمد، تابش مسعود و محمدحسین پوینده‌پور. بهینه‌سازی دوهدفه شبکه جمع‌آوری فاضلاب شهری با رویکرد حداکثرسازی قابلیت عملکرد هیدرولیکی، دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران و دومین همایش ملی عرضه و تقاضای آب شرب و بهداشت. اصفهان، ایران، ۱۳۹۷

۴. خلیفه سعید ، اسماعیلی کاظم و خلیفه حمید. بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با رویکرد بیشینه‌سازی سود (مطالعه موردی: هماشهر استان کرمان). علوم و مهندسی آب و فاضلاب، دوره (۳)، شماره (۲)، صفحات (۳۵-۴۴)، ۱۳۹۷

۵. معینی رامتین. فرمول‌بندی جدید الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در طراحی بهینه جانمایی و ابعاد شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی پمپ‌دار. مجله پژوهش آب ایران، ۱۱۹:۲۴-۱۲۷، ۱۳۹۶

۶. معینی، رامتین و افشار، محمد هادی. بهینه‌سازی طراحی جامع تصفیه‌خانه و شبکه جمع‌آوری فاضلاب خانگی باالگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان، مجله آب و فاضلاب، شماره ۱، صص ۲۴-۱۴، ۱۳۹۱

۷. مقدم، علیرضا و همکاران، مقایسه و ارزیابی الگوریتم های ژنتیک و بهینه سازی ازدحام ذرات در طراحی بهینه شبکه های توزیع آب شهری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب، صص ۲۰-۱۶، ۱۳۹۲

۸. معصومی, فریبرز, معصوم زاده, سینا, ظفری, نگین, اسفندمز, سارا. مقایسه قابلیت الگوریتم جهش تصادفی قورباغه با دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی در طراحی شبکه‌های فاضلاب شهری. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، انتشار آنلاین از تاریخ ۱۳ آذر ۱۴۰۰ 1400; doi: 10.22060/ceej.2021.19609.7215

۹. نفیسی، محسن و احمدی، آزاده. بهینه سازی شبکه های فاضلاب با استفاده از الگوریتم گروه خرده های اصلاح شده. پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران، ۱۳۹۲، https://civilica.com/doc/269293

۱۰. ندائی جوان، سیدعلیرضا و ندائی جوان، سیداحمد. بهینه سازی طراحی شبکه جمع آوری فاضلاب شهری با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی،یازدهمین کنفرانس ملی مهندسی عمران، معماری و توسعه شهری، بابل، ۱۳۹۹، https://civilica.com/doc/1133657

۱۱. نیک‌خواه سامان و ربیعی عباس، آموزش کاربردی نرم افزار GAMS، زنجان: انتشارات دانشگاه زنجان، ۱۳۹۵

12. Ahmadi A; Zolfagharipoor M.A; and Nafisi M. (2018). Development of a Hybrid Algorithm for the Optimal Design of Sewer Networks. J. Water Resour. Plann. Manage, 144(8): 04018045. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000942
13. Duque, Natalia, Daniel Duque, Andrés Aguilar, and Juan Saldarriaga. (2020). "Sewer Network Layout Selection and Hydraulic Design Using a Mathematical Optimization Framework" Water 12, no. 12: 3337. https://doi.org/10.3390/w12123337
14. Moeini, R.; Afshar, M. H. (2019). Extension of the Hybrid Ant Colony Optimization Algorithm for Layout and Size Optimization of Sewer Networks. Journal of Environmental Informatics, Vol. 33 Issue 2, p68-81. 14p.
15. Navin, Praveen K.; Mayank Varshney, Mathur, Yogesh P., and Harshil Bhatt. (2021). An optimization procedure for the layout and component size optimization of sewer network. xIlkogretim Online - Elementary Education Online, Vol 20 (Issue 5): pp.2924-2933. doi: 10.17051/ilkonline.2021.05.319
16. Navin, Praveen K.; Mathur, Yogesh P. (2016). Layout and Component Size Optimization of Sewer Network Using Spanning Tree and Modified PSO Algorithm. Water Resources Management, 30(10), 3627–3643. doi:10.1007/s11269-016-1378-7
17. Waqed H. Hassan, Musa H. Jassem, and Safaa S. Mohammad. (2020) Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1067, 4th International Conference on Engineering Sciences (ICES 2020) 5th-6th December 2020, Kerbala, Iraq
18. Waqed H. Hassan and Zahraa H. Attiyah. (2019). Layout Optimization of Sewer Networks by Adaptive Genetic Algorithmin A Hybrid Model. Journal of Engineering and Applied Sciences 14 (Special Issue 6): pp 9467-9476.
19. Tian, J., and He, G. (2022). Study on Optimal Design Method of Urban Sewage Collection Network Layout. Polish Journal of Environmental Studies, 31(2), pp.1823-1836. https://doi.org/10.15244/pjoes/143301