

## بهینه‌سازی سیستم‌های آبرسانی تحت فشار به روش برنامه‌ریزی خطی در حالت جریان میرا

مجید کیانفرد<sup>۱\*</sup> و جواد احدیان<sup>۲</sup>

### چکیده

امروزه استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای بهینه‌کردن پروژه‌های اجرایی اجتناب‌ناپذیر است یکی از این الگوریتم‌ها سامانه برنامه‌ریزی خطی است. این روش شامل یک تابع هدف است که با توجه به محدودیت‌های فنی به حداقل کردن هزینه‌ها و یا حداکثر کردن سود می‌پردازد. در این پژوهش با توجه به کلیه پارامترها، ابتدا معادلات مربوط به بخش لوله‌گذاری، سامانه پمپاژ و سازه‌های کنترلی جریان‌های میرا به دست آمده است سپس با توجه به یک بررسی موردی صحت معادلات به دست آمده بررسی شد. لازم به ذکر است که محدودیت‌های سامانه شامل فشار، سرعت در لوله‌ها و دبی و هد مورد نیاز سامانه است. بررسی موردی مربوط به طرح آبرسانی به منطقه قلعه مدرسه بهبهان است که در این پژوهش ابتدا سامانه در حالت تجربی اجرا شده بررسی شد سپس هر سه بخش سامانه با استفاده از سیستم برنامه‌ریزی خطی بهینه شد که مقایسه هزینه‌های اجرایی حالت تجربی با حالت بهینه شده نشان از کاهش ۳/۳۹، ۱۷/۳۴ درصدی به ترتیب در بخش‌های لوله‌گذاری، خرید و راه‌اندازی پمپ‌ها و همچنین کاهش ۲/۷۴ درصدی در هزینه‌های سازه‌های حفاظتی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** برنامه‌ریزی خطی، سازه‌های حفاظتی، ضربه قوچ، فشار منفی.

**ارجاع:** کیانفرد م. و احدیان ج. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی سیستم‌های آبرسانی تحت فشار به روش برنامه‌ریزی خطی در حالت جریان میرا. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۳۷-۴۶.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، شرکت آب و فاضلاب روستایی خوزستان.

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

\* نویسنده مسئول: [majidkianfard@yahoo.com](mailto:majidkianfard@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۲۶

## مقدمه

پژوهش‌های بهینه‌سازی انجام شده از سوی پژوهش‌گران مختلف می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

شاکبولای (۱۹۶۹) اولین افرادی بودند که با استفاده از برنامه‌ریزی خطی سعی در بهینه کردن قطر لوله‌های شبکه شهر نیویورک کردند. ایشان برنامه‌ریزی خطی خود را با جای‌گذاری ساده در معادله هاینز ویلیامز انجام دادند. ساویچ و والترز (۱۹۹۷) از الگوریتم ژنتیک برای طراحی بهینه شبکه‌های آبرسانی استفاده کردند. جواب‌های به دست آمده از این روش، در مقایسه با سایر پژوهش‌های قبلی، در استفاده از پارامترهای متفاوت الگوریتم ژنتیک است. افشار و ماری (۲۰۰۶) الگوریتم مورچگان را برای آرایش بهینه شبکه‌های شاخه‌ای ارائه کردند. این پژوهش‌گران آرایش بهینه حاصل از این روش را با روش‌های تجربی مقایسه کردند که نتایج به طور محسوسی کارایی روش الگوریتم مورچگان را نشان می‌داد. طاهرشمسی و هوشیاری‌پور (۱۳۹۰) در مورد کاربرد روش بهینه‌سازی غیرخطی در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری پژوهش کردند. در این پژوهش نتایج این روش، با روش نیوتن-رافسون که یک روش مرسوم در تحلیل شبکه‌های توزیع آب شهری است مقایسه شد. کریستودولو و الیانز (۲۰۱۱) با روش کلونی مورچگان به بهینه‌سازی مسیر عبور لوله پرداختند. ایشان با استفاده از این روش بهترین مسیر عبور لوله را در شبکه آب شهری مشخص کردند. سومایدا و همکاران (۲۰۱۱) از طریق بررسی هزینه‌های لوله و پمپ در روند اجرای پروژه‌ها با شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم‌افزار GANEO و همچنین استفاده از الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی اقتصادی طراحی لوله‌های آبرسان پرداختند. کولکارنی (۲۰۱۱) به وسیله الگوریتم ژنتیک و با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی به بهینه‌سازی هزینه‌ها با ارضای نیازهای شبکه پرداخت. بابایی و همکاران (۲۰۱۲) به بهینه‌سازی عملکرد پمپ با توجه به محدودیت‌های کیفی در شبکه توزیع آب پرداختند. ایشان عملکرد پمپ را با توجه به کیفیت آب بررسی کردند و دریافتند هرچه کیفیت آب بالاتر باشد، مصرف انرژی کاهش می‌یابد. ایشان با استفاده از اطلاعات خروجی شبیه‌ساز هیدرولیکی EPANET بهینه‌سازی را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع مورچه‌ها انجام دادند که محدودیت بهینه‌سازی آن‌ها پارامترهای کیفی آب بود. کولهو و همکاران (۲۰۱۲) الگوریتم‌های بهینه‌ساز مختلف برنامه‌ریزی پمپ در سامانه‌های تأمین آب را تجزیه و تحلیل

به دلیل وجود جریان‌های مخرب میرای هیدرولیکی در هنگام اجرای پروژه‌های آبی تحت فشار شناخت این پدیده و مقابله با آن لازم و ضروری است؛ اما راه‌های مقابله با این پدیده‌ها مختلف است که باید روشی انتخاب شود که علاوه بر کنترل این پدیده، حداقل هزینه را دربرگیرد. امروزه برای حداقل کردن هزینه‌ها با رعایت استانداردها، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز متداول شده که روش برنامه‌ریزی خطی از جمله این الگوریتم‌ها است. این روش از جمله ابزارهای متعارفی است که سبب صرفه‌جویی هزینه برای واحدهای صنعتی، تجاری و سایر بخش‌های جامعه می‌شود (نظری و علوی‌متین، ۱۳۸۵). بنابراین برای بهینه‌سازی شبکه‌های تحت فشار ابتدا باید سامانه از نظر هیدرولیکی بررسی دقیق شود؛ زیرا مسائل هیدرولیکی از مهم‌ترین محدودیت‌های الگوریتم‌های بهینه‌ساز هستند. در حالت وقوع جریان میرا در سیستم‌های آبرسانی تحت فشار، پارامترهای هیدرولیکی دچار تغییرات شدید گشته که باید در روش‌های بهینه‌سازی فیزیکی شبکه این تغییرات مدنظر قرار گیرد. پدیده ضربه قوچ حاصل جریان‌های میرای هیدرولیکی بوده که از این‌رو، معادلات لازم در بررسی این پدیده شامل معادلات دینامیک اندازه حرکت (معادله (۱)) و پیوستگی (معادله (۲)) در شرایط ناپایدار است (محمودیان شوشتری، ۱۳۸۸):

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

که در این معادلات،  $V$  جریان،  $\rho$  چگالی سیال و  $a$  سرعت موج فشاری حاصل از پدیده ضربه قوچ است. پدیده ضربه قوچ از تغییر ناگهانی سرعت جریان آب در خط لوله ناشی می‌شود. ژوکوفسکی (۱۸۹۸) رابطه‌ای برای مقایسه حداکثر تغییرات فشار ناشی از تغییرات ناگهانی ارائه کرد (به نقل از نجمایی، ۱۳۷۳):

$$\Delta H = \frac{a \Delta V}{g} \quad (3)$$

که در آن  $\Delta H$  حداکثر تغییر ارتفاع فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ (متر)،  $a$  سرعت انتشار موج فشاری در خط لوله (متر بر ثانیه)،  $\Delta V$  تغییرات سرعت جریان (متر بر ثانیه)،  $g$  شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه) است. از جمله

تابع هدف مربوط به هر بخش آورده شده است؛ لازم به توضیح است که قیود و محدودیت‌های فنی مربوط به بخش پمپاژ، با توجه به هد و دبی مورد نیاز شبکه مشخص می‌شود. مقدار دبی پمپاژ با توجه به هدف‌های سامانه‌ی آب‌رسانی به طور کلی از معلومات مسئله است؛ فشار مورد نیاز نیز برابر مجموع افت‌های موجود در شبکه به انضمام یک حداقل مقدار است. این حداقل مقدار با توجه به استانداردهای خاص و متناسب با هدف سامانه انتخاب می‌شود (برای مثال فشار شبکه در ورودی روستا حداقل ۲۰ متر آب انتخاب می‌شود). با این توصیف بهینه‌سازی سامانه پمپاژ به این صورت است که باید پمپ و یا ترکیبی از چند پمپ، به گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر تأمین دبی و فشار کاری مورد نیاز سامانه، حداقل هزینه را به دنبال داشته باشد. در مورد شبکه لوله‌گذاری پارامترهای تعیین کننده، قطر و فشار کاری لوله‌ها هستند. متغیر قطر در بحث لوله‌گذاری مربوط به محدودیت سرعت در سامانه بوده که سرعت در محدوده خاصی تعریف می‌شود و متغیر فشار مربوط به فشار موجود در سامانه برای انتخاب لوله با تحمل فشار کاری مورد نیاز شبکه است. در سازه‌های حفاظتی باتوجه به عملکرد آن‌ها و همچنین نیاز سامانه، اندازه، نوع و تعداد این سازه‌ها تعیین می‌شود؛ به طور مثال در حالتی که فشار منفی در سامانه باشد، نیاز به سازه‌هایی است که به سامانه سیال تزریق کند؛ تا از پدیده جدایی ستون آب جلوگیری شود. در این پژوهش برای مشخص کردن نوع جریان میرای هیدرولیکی از خروجی‌های مدل هیدرولیکی HAMMER بهره گرفته شد و همچنین برای یک منطقه واقعی به کمک این مدل شبیه‌سازی ماندگار و میرا انجام شد. از طرفی با توجه به نتایج به دست آمده در خصوص تغییرات فشار (مثبت و منفی) در این شبکه، سازه‌های حفاظتی مورد نیاز نیز تعیین و در شبکه قرار داده شد. در نهایت حالت‌های مختلف از نظر کنترل جریان میرا در نظر گرفته شد که با استفاده از سیستم بهینه‌سازی، بهترین حالت تعیین شد. در نهایت به این نکته پی برده می‌شود که در رابطه با کنترل جریان‌های میرای هیدرولیکی هر سه بخش شبکه آبرسانی تحت فشار بر این پدیده مؤثر هستند. بنابراین در این پژوهش با توجه به ارتباط محدودیت‌های فنی هر سه بخش، بهینه‌سازی انجام شد. بهینه‌سازی در این پژوهش به وسیله نرم‌افزار LINGO11 انجام شد که سیستم مورد بررسی (تابع هدف به همراه قیود) به زبان این نرم‌افزار

کردند که در پژوهش وی رابطه‌ای برای استفاده الگوریتم‌های بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی برای پمپ در سامانه‌های تأمین آب بسط داده شد.

بر اساس آنچه که در بخش مروری بر منابع ارائه شد، هزینه‌های نگهداری تأسیسات انتقال آب در برابر صدمات ناشی از جریان‌های میرای هیدرولیکی مهم است که این امر استفاده از روش‌های نوین برای کاهش حداکثری این هزینه‌ها را توجیه می‌کند؛ از این رو، در این پژوهش، یکی از این روش‌های بهینه‌سازی (روش بهینه‌سازی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی) برای بهینه نمودن تأسیسات و سامانه‌های سیستم انتقال آب از جمله، خطوط لوله، تأسیسات مقابله با جریان میرای هیدرولیکی، سیستم پمپاژ و غیره بررسی شده است.

#### مواد و روش‌ها

برای کسب بهترین جواب از دیدگاه اقتصادی با توجه به محدودیت‌های موجود در منابع، که به طور معمول حداقل کردن هزینه‌ها و یا دستیابی به حداکثر سود است، روش‌های مختلف بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. یکی از راه‌های دستیابی به بهترین نتیجه استفاده از الگوریتم برنامه‌ریزی خطی است، که حالت خاصی از برنامه‌ریزی غیرخطی بوده که در آن تابع هدف و قیدها همگی خطی هستند. شکل کلی برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر است (مهرگان، ۱۳۹۰).

$$\text{Max or Min } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \quad (4)$$

(۵) یا آزاد در علامت  $\sum_{i=1}^m a_{ij} X_j (\leq \text{or } \geq \text{or } =) b_i$  and  $X_j \geq 0$  که در آن  $X_j$  متغیرهای تصمیم،  $b_i$  عددهای سمت راست یا مقادیر منابع،  $Z$  تابع هدف،  $n$  تعداد متغیرهای تصمیم،  $C_j$  ضریب متغیرهای تصمیم در تابع هدف،  $m$  تعداد معادلات الزام‌آور یا قیودات و  $a_{ij}$  ضرایب متغیرهای تصمیم در محدودیت‌ها هستند. در این پژوهش تابع هدف خطی ارائه شده در پژوهش‌های گذشته با اضافه کردن پارامترهای فشاری لوله در شرایط غیرماندگار و همچنین اضافه نمودن هزینه‌های بهره‌برداری تکمیل و توسعه داده شد. بهینه نمودن بخش‌های یک سامانه‌ی آب‌رسانی تحت فشار با در نظر گرفتن قیدهای فنی مربوط به هر بخش انجام می‌شود که این بخش‌ها شامل سامانه پمپاژ، شبکه لوله‌گذاری و سازه‌های حفاظتی جریان‌های میرا است. در بندهای آتی

لوله‌گذاری و هم بخش پمپاژ و هم سازه‌های حفاظتی سامانه فرموله شوند یعنی بخش‌های ذکر شده بالا باید به‌همراه قیود مربوط به آن‌ها به صورت خطی درآیند که معادله (۶) نمایش تابع هدف خطی بخش لوله‌گذاری به همراه قیود آن است:

$$\text{Min } Z(DN_i, Pr_i) = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{ND} \sum_{k=1}^{NPr} [(L_{ijk})(VP_{ijk})X_{ijk} + S_{ijk}] \times CRF = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{ND} \sum_{k=1}^{NPr} [(L_{ijk})(VP_{ijk})X_{ijk} + 0.08L_{ijk}] \times CRF \quad (6)$$

که در رابطه (۷)، پارامتر  $\gamma$  عمر مفید پروژه است که براساس هدف سامانه و میزان سرمایه‌گذاری اولیه مشخص می‌شود و به طور معمول در حدود ۲۵ سال در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس در بررسی موردی نیز عمر مفید برابر با ۲۵ سال در نظر گرفته شد. پارامتر  $i$  نرخ بهره سالانه است (هزینه استفاده از سرمایه است که به طور معمول برابر با ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود). به طور کلی تابع هزینه ایستگاه پمپاژ به صورت تابعی خطی به صورت زیر بیان می‌شود (شاهی‌نژاد، ۱۳۹۰):

$$CRF = \frac{i(1+i)^Y}{(1+i)^Y - 1} \quad (7)$$

$$\text{Min } Z(Pu) = \sum_{i=1}^{N_{Pu}} [V_{Pui} + V_{en} H_{Pui} + S_i] \times CRF = \sum_{i=1}^{N_{Pu}} [V_{Pui} + V_{en} H_{Pui} + 0.08V_{Pui}] \times CRF \quad (8)$$

که در آن  $e$  نرخ سالانه‌ی تعدیل انرژی است. این پارامتر در کشورهای توسعه یافته عدد پایینی را به خود اختصاص می‌دهد. برای کشور ایران در بیشتر پروژه‌ها براساس تجربیات موجود مقدار آن به طور معمول برابر با ۸ درصد انتخاب می‌شود. فشار موجود،  $P_i$ ، در یک سامانه آبرسانی تحت فشار باید در محدوده مشخصی قرار داشته باشد؛ یعنی مقدار آن از حداقل فشار،  $P_{min}$ ، کمتر نشده و از مقدار حداکثر مجاز،  $P_{max}$ ، نیز نباید بیشتر شود. به عبارت دیگر هد فشاری شبکه باید چنان باشد که حداقل فشار لازم برای انتقال سیال به محل مورد نظر آماده شود. همچنین هد فشاری نباید آن قدر زیاد باشد که سبب شکستگی خطوط لوله شود؛ پس محدودیت هد فشاری به صورت زیر نوشته می‌شود:

برنامه‌نویسی و کدنویسی گردید. در نهایت با استفاده از این سیستم بهینه‌سازی، بهترین حالت در شبکه‌ی واقعی که در بخش‌های زیر به آن اشاره می‌شود استخراج شد.

## نتایج و بحث

برای بهینه‌کردن یک مسئله ابتدا نیاز به فرمولاسیون مسئله مورد بررسی است که در شبکه‌های تحت فشار باید هم بخش

باید به این نکته توجه شود که مهم‌ترین پارامترهای تعیین هزینه بخش لوله‌گذاری، قطر (DN)، و فشار کاری لوله (Pr)، است. همچنین در معادله بالا،  $Z$  تابع هدف،  $L_{ijk}$  طول لوله نام به قطر  $Z$  و فشار کارکرد  $k$ ،  $VP_{ijk}$  هزینه واحد طول لوله مربوطه،  $NP$  تعداد لوله‌های موجود در سامانه،  $X_{ijk}$  متغیر صفر و یک مربوط به موجود بودن لوله در بازار،  $NPr$  تعداد فشارهای کاری موجود در سامانه،  $S_{ijk}$  هزینه بهره‌برداری و نگهداری است که به صورت درصدی از قیمت واحد سازه در نظر می‌گیرند و در این پژوهش برابر ۸ درصد قیمت واحد سازه مورد نظر در نظر گرفته شد و  $CRF$  فاکتور بازیافت سرمایه بوده که برابر است با (اسکونژاد، ۱۳۷۵):

در معادله (۸) پارامتر  $N_{Pu}$  تعداد پمپ‌های موجود در سامانه،  $V_{pui}$  هزینه خرید پمپ نام،  $H_{pui}$  فشار کل ایجاد شده با پمپ نام،  $V_{en}$  هزینه انرژی واحد سالانه در واحد هد فشاری است و برابر است با (کلر و بلیزنر، ۱۹۹۲):

$$V_{en} = \frac{V_{fu} Q_s T \cdot EAE}{102 \eta_i} \quad (9)$$

که  $Q_s$  دبی کل سامانه (لیتر بر ثانیه)،  $V_{fu}$  هزینه سوخت مربوط به یک کیلووات ساعت،  $\eta_i$  راندمان کلی پمپ  $i$  نام و  $EAE$  فاکتور هزینه انرژی سالانه می‌باشد که برابر است با (کلر و بلیزنر، ۱۹۹۲):

$$EAE = \frac{(1+e)^Y - (1+i)^Y}{(1+e) - (1+i)} \left[ \frac{i}{(1+i)^Y - 1} \right] \quad (10)$$

که در آن‌ها  $X_{ij}$  متغیر صفر و یک است که (شاهی‌نژاد، ۱۳۹۰):

$$\sum_{ij} X_{ij} = 1 \quad (14)$$

تابع هدف بهینه‌سازی سازه‌های حفاظتی شامل هزینه‌های خرید و اجرای سازه و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری سالیانه است. به طور کلی هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری نیز مطابق سامانه لوله‌گذاری و پمپاژ بوده و معمولاً به صورت درصدی از قیمت خرید و اجرای سازه فرض می‌گردد. لذا مقدار آن در حدود ۰/۰۸ قیمت سازه در نظر گرفته می‌شود. با این توضیح تابع هدف سازه‌های حفاظتی مطابق معادله زیر می‌باشد:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^6 [V_i Y_i + S_i] \times \text{CRF} = \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^6 [V_i Y_i + 0.08 V_i] \times \text{CRF}$$

که در آن  $Y_i$  تعداد سازه استفاده شده از نوع  $i$ ام،  $V_i$  هزینه خرید و کارگذاری سازه  $i$ ام می‌باشد. به طور کلی مشخصات معادله (۱۵) طی جدول ۱ آورده شده است:

جدول ۱- تعریف متغیرهای ریاضی برای سازه‌های حفاظتی

نوع سازه	چرخ طیار	Bypass	شیر هوا	شیرایمنی	مخزن موج‌گیر تحت فشار	مخزن موج‌گیر روباز
تعداد سازه‌های نوع $i$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$
هزینه خرید و راه‌اندازی	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
هزینه بهره‌برداری و تعمیرات	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$

که در آن پارامتر،  $L$  طول لوله است. موقعی که فشار سامانه از حد مجاز بیشتر شود از شیرهای ایمنی،  $Y_4$ ، استفاده می‌کنند. حجم مخازن موج‌گیر تحت فشار حداکثر ۵۰ مترمکعب است و زمانی که  $H_p \leq aV_0/g$  در خط لوله رخ دهد، این نوع سازه‌های حفاظتی برتری دارند. از طرفی در بیشتر مواقع می‌توان از مخازن تحت فشار،  $Y_5$ ، استفاده کرد. برای استفاده از مخزن موج‌گیر روباز یک‌طرفه باید شرط زیر برقرار باشد:

$$Z_0 \ll H_0 \quad (22)$$

یعنی اینکه ارتفاع سطح آب در مخزن،  $Z_0$ ، از خط تراز هیدرولیکی،  $H_0$ ، خیلی پایین‌تر است. شرط استفاده از مخازن موج‌گیر روباز دو طرفه به صورت زیر است:

$$Z_0 = H_0 \quad (23)$$

$$\frac{P_i}{\gamma} \geq \frac{P_{\min}}{\gamma} \text{ و } \frac{P_i}{\gamma} \leq \frac{P_{\max}}{\gamma} \quad (11)$$

به طور کلی براساس رابطه انرژی، تابع خطی محدودیت سامانه لوله‌گذاری بین دو گره در صورتی که گره اول  $i$  و گره بعدی  $j$  باشد برابر است با:

$$\frac{P_i}{\gamma} + Z_i - \sum_{j=1}^{Nd} h_{f(i-j)} x_{ij} - \frac{P_j}{\gamma} - Z_j = 0 \quad (12)$$

که در آن،  $Z$  ارتفاع گره از سطح مبنا،  $h_{f(i-j)}$  افت اصطکاک بین گره‌های  $i$  با  $j$  و  $x_{ij}$  متغیر صفر و یک موجود بودن لوله در بازار با قطر مدنظر است. از طرفی محدودیت سرعت سیال در خط لوله نیز به صورتی تعریف می‌شود، که نه سبب رسوب‌گذاری و کاهش کیفیت آب در شبکه شده،  $V_{\min}$  و نه سبب افت هیدرلیکی زیاد در لوله و افزایش هزینه‌های انرژی،  $V_{\max}$ ، شود. به طور کلی به ازای لوله‌های موجود در شبکه رابطه خطی زیر صادق است:

$$V_{\min} \leq \frac{4Q_j}{\pi} \frac{ND}{j=1} \frac{x_{ij}}{D_i^2} \leq V_{\max} \quad (13)$$

محدودیت استفاده از سازه‌های کنترلی به طور خلاصه به شرح زیر است:

$$Y_i \geq 0 \text{ و } Y_i \text{ عدد صحیح} \quad (16)$$

$$Y_1 \leq N_{Pu} \quad (17)$$

$$Y_2 \leq N_{Pu} \quad (18)$$

برای استفاده از Bypass باید شرایط زیر باشد یعنی:

$$H_p < \frac{aV_0}{g} \quad (19)$$

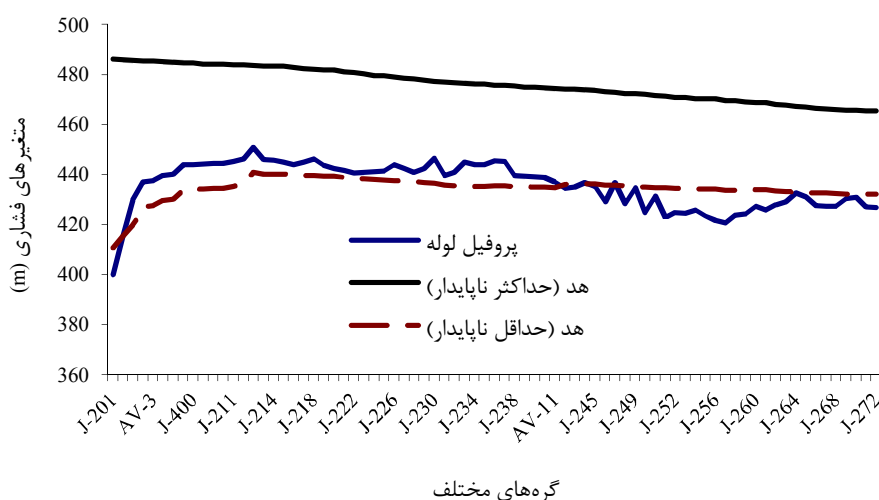
$$Z_S > Z_{Pu} \quad (20)$$

که در آن‌ها  $H_p$  هد فشاری پمپ،  $Z_S$  ارتفاع منبع تغذیه،  $Z_{Pu}$  رقوم ارتفاعی پمپ و  $a$  سرعت موج است.

$$Y_3 \leq 1.2 \frac{L}{700} \quad (21)$$

خط لوله و سایر مشخصات هندسی) وارد مدل WATER GEMS شده و سامانه در حالت پایدار بررسی می‌شود. سپس مدل اجرا شده به فایل قابل استفاده در WATER HAMMER که نرم‌افزار تعیین شرایط ناپایدار هیدرولیکی است، تبدیل می‌شود. آن‌گاه مدل بدون هیچ سازه حفاظتی در این نرم‌افزار اجرا می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مشکل فشار منفی و احتمال پدیده‌ی جدایی ستون آب وجود دارد. شکل ۱ احتمال وقوع جدایی ستون آب در طول خط لوله‌ی مذکور را نشان می‌دهد.

پس از به دست آمدن توابع هدف بخش‌های مختلف سامانه‌ی انتقال و همچنین سازه‌های حفاظتی و کنترل که همگی در مهار جریان‌های میرای هیدرولیکی نقش مؤثر دارند، به بررسی یک نمونه عملی پرداخته می‌شود. پژوهش موردی مربوط به پروژه آبرسانی به منطقه قلعه مدرسه بهبهان است که خط انتقال اصلی طرح با معادلات به دست آمده بهینه می‌شود. مراحل بهینه‌سازی به این صورت است که ابتدا اطلاعات و مشخصات سامانه انتقال و پمپاژ به صورت تجربی و رعایت اصول اولیه (شامل قطر و فشار کاری

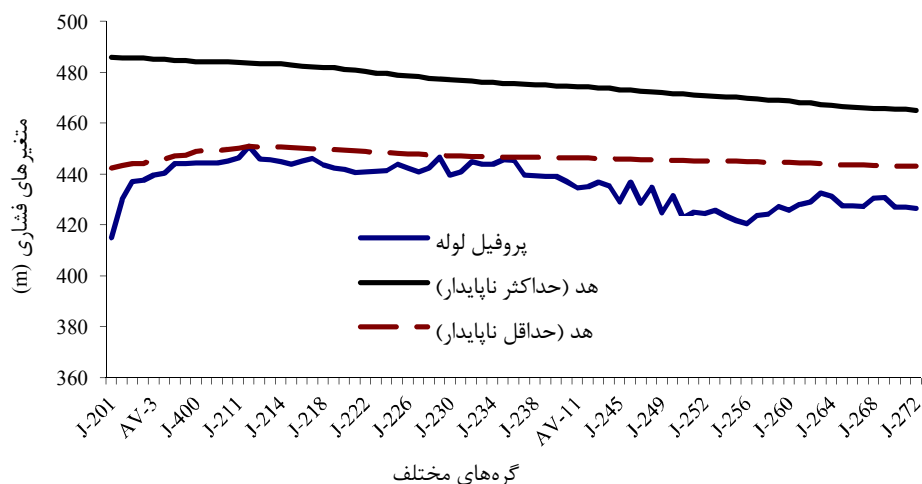


شکل ۱- حالت سناریوی تجربی قبل از نصب سازه‌های حفاظتی

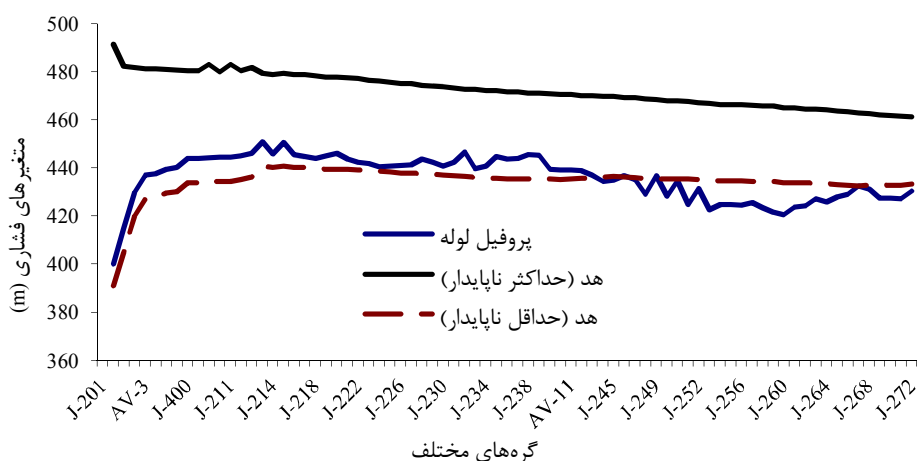
قبل از زبان برنامه‌نویسی LINGO کدنویسی شد. پس از اجرای مدل بهینه شده در نرم‌افزار، فشار در گره‌ها و بهترین قطر لوله در خروجی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه هم شبکه لوله‌گذاری و هم نوع پمپ‌ها و همچنین سازه‌های حفاظتی جریان‌های میرا در اثرات این پدیده مؤثر هستند؛ بنابراین هر سه بخش یاد شده به نوعی سازه حفاظتی بوده و باید بهینه‌یابی شوند که پمپ‌ها با توجه به هد و دبی مورد نیاز شبکه، خط انتقال با توجه به محدودیت سرعت ۱/۵ متر بر ثانیه در لوله‌ها و فشار در گره‌ها بین ۲۰ تا ۱۰۰ متر بهینه شده‌اند. در این مرحله عمل بهینه‌سازی بدون اضافه کردن سازه‌های حفاظتی انجام شد. پس برای بررسی احتمال وقوع پدیده جدایی ستون آب اطلاعات بهینه‌سازی شده دوباره در مدل WATER HAMMER وارد شد. سپس نرم‌افزار WATER HAMMER اجرا شد و مشخص شد که با شبکه بهینه شده بدون سازه حفاظتی مشکل پدیده فشار منفی وجود دارد. شکل ۳ این موضوع را نمایش می‌دهد.

در ادامه، به صورت تجربی چندین حالت، از سازه‌های مورد نیاز برای رفع این پدیده استفاده شد. شایان ذکر است که حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده در عمل به لحاظ اجرایی و اقتصادی نشان می‌دهد که ترکیب مخزن موج‌گیر تحت فشار و شیر هوا نسبت به سایر روش‌های حفاظتی نتایج بهتری را به همراه دارد. با اضافه کردن مخزن موج‌گیر و شیر هوا در نقاط مختلف خروجی نرم‌افزار WATER HAMMER نشان می‌دهد که مشکل جدایی ستون آب بر طرف شده است. شکل ۲ پروفیل طولی مسیر را در حالت استفاده از سازه‌های حفاظتی نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به دلیل محدودیت، ارائه کلیه سناریوها ممکن نبوده و فقط سناریویی که به لحاظ تجربی حداقل هزینه‌ها را به همراه دارد، آورده شده است.

پس از استخراج بهترین حالت استفاده از سازه‌های حفاظتی (به صورت تجربی) عمل بهینه‌سازی باید انجام شود. بدین منظور از مدل LINGO11 استفاده شد. بر این اساس کلیه توابع هدف و قیود مسئله بر اساس معادلات ارائه شده در



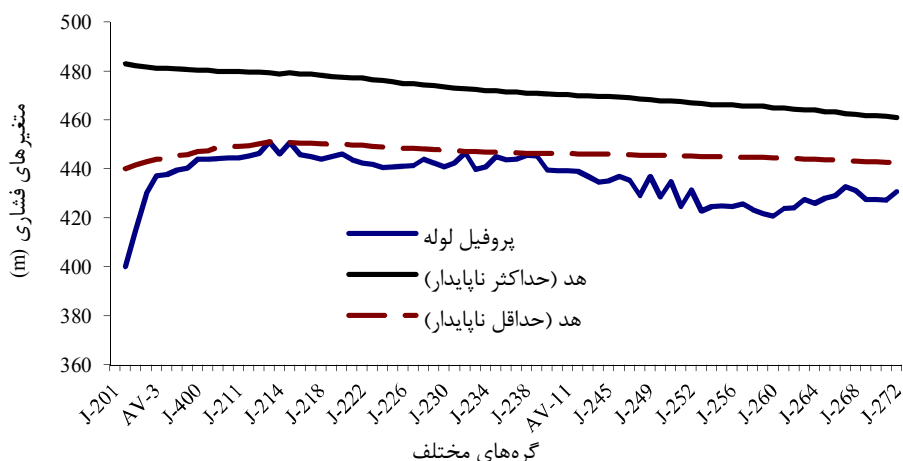
شکل ۲- حالت سناریوی تجربی بعد از ایجاد سازه‌های حفاظتی



شکل ۳- شبکه بهینه شده قبل از نصب سازه‌های حفاظتی

مسئله اعم از کارایی و هزینه تمام شده سازه‌ها که در حقیقت تعیین کننده انتخاب نوع سازه است، وارد مدل بهینه‌سازی شد و نرم‌افزار با توجه به نیاز مسئله بهترین انتخاب را از میان سازه‌ها انجام داد. در نهایت خروجی نرم‌افزار بهینه‌ساز یک مخزن موج‌گیر تحت فشار ۲۰ مترمکعبی و سه شیر هوا بود. با اجرای مخزن موج‌گیر تحت فشار در محل ایستگاه پمپاژ و نصب شیرهای هوا در نقاط مرتفع و بحرانی مسیر، خروجی نرم‌افزار HAMMER نشان از رفع مشکل پدیده فشار منفی داشت. از این رو احتمال بروز پدیده مخرب جدایی ستون آب کاهش می‌یابد. شکل ۴ این موضوع را نشان می‌دهد.

بر اساس شکل ۳ مشخص است که شبکه بهینه‌سازی داری فشار منفی در هنگام وقوع جریان میرا است. به طور کلی مکانی که خط تراز پیزومتریک پروفیل طولی لوله را قطع می‌کند، احتمال جدایی ستون آب وجود دارد. در چنین شرایطی با استفاده از شیر هوا و مخزن موج‌گیر می‌توان این پدیده را از بین برد. با تزریق سیال در سامانه می‌توان از پدیده جدایی ستون آب جلوگیری کرد. با این توضیح با قرار دادن مخزن به حجم‌های مختلف و قرارگیری شیرها در مکان‌های متفاوت سامانه مورد تحلیل ماندگار و غیرماندگار شد. سپس داده‌های در نظر گرفته شده در سناریوهای مختلف جهت بهینه‌سازی وارد مدل LINGO11 شد. بهینه‌سازی سازه‌های حفاظتی به این صورت بود که قیود



شکل ۴- شبکه بهینه شده بعد از نصب سازه‌های حفاظتی بهینه شده

J-240 در جدول ۲ بررسی شده است. در این جدول حداقل فشار این نقاط در حالت عدم وجود سازه‌های کنترلی و در زمان نصب سازه‌های کنترلی نشان داده شده است.

بر اساس شکل ۴ مشخص است که در هیچ مکانی در طول پروفیل خط لوله فشار منفی به وقوع نمی‌پیوندد. در ضمن برای بهتر مشخص کردن تأثیر سازه‌های حفاظتی در سناریوهای مختلف، چهار نقطه J-230، J-220، J-212 و

جدول ۲- بررسی هیدرلیکی نقاط مختلف در سناریوهای مختلف

J-212	J-220	J-230	J-240	نقاط مورد بررسی
فشار منفی حداکثر	-۲/۹۰	-۳/۷۰	-۳/۲۰	حداقل فشار قبل از نصب سازه‌های کنترلی در سناریوی بهینه‌شده
۰/۰۰	۷/۴۰	۷/۴۰	۷/۲۰	حداقل فشار بعد از نصب سازه‌های کنترلی در سناریوی بهینه‌شده
فشار منفی حداکثر	-۵/۶۰	-۵/۶۰	-۵/۰۰	حداقل فشار قبل از نصب سازه‌های کنترلی در سناریوی تجربی
۰/۰۰	۷/۳۰	۶/۷۰	۵/۹۰	حداقل فشار بعد از نصب سازه‌های کنترلی در سناریوی تجربی

محدودیت‌های هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود و سپس با برآورد اقتصادی بهترین حالت تعیین می‌شود) و حالت بهینه‌سازی شده با مدل LINGO11 با یکدیگر مقایسه شدند. در جدول ۳ مقایسه هزینه‌های اجرایی در سناریوی تجربی با سناریوی بهینه‌شده آورده شده که به صورت درصد کاهش هزینه‌ها ارائه شده است.

با توجه به بهینه‌سازی انجام شده و کاهش برخی از قطرهای لوله در بخش‌های مختلف و همچنین بهینه‌سازی سازه‌های حفاظتی اقدام به بررسی‌های اقتصادی شد. بدین منظور بهترین حالت تجربی به دست آمده (که به طور معمول با روش آزمون و خطا قابل دستیابی است و در عمل به این صورت است که سناریوهای تجربی مختلفی با لحاظ

جدول ۳- مقایسه اقتصادی سناریوهای تجربی با حالت بهینه‌شده

بخش‌های سیستم	هزینه سناریوی تجربی (ریال)	هزینه سناریوی بهینه‌شده (ریال)	درصد کاهش هزینه در هر بخش
لوله‌گذاری خط اصلی	۷۸۳۱۹۹۱۱۲۸	۷۵۶۶۱۶۳۱۰۰	۳/۳۹
خرید پمپ و راه‌اندازی	۲۰۵۰۰۰۰۰	۱۶۹۴۴۵۲۰۰	۱۷/۳۴
سازه‌های حفاظتی	۵۱۹۸۵۵۰۰	۵۰۵۵۹۱۰۰	۲/۷۴
جمع کل	۸۵۵۶۸۴۶۱۲۸	۸۲۴۱۱۹۹۳۰۰	۳/۶۹



جلوگیری از نوسانات شدید فشار در جریان میرا ۱۳ عدد بوده و این در حالی است که در روش بهینه‌سازی خطی این تعداد ۳ عدد محاسبه شد.

✓ در بررسی موردی کاهش هزینه‌ها در حالت بهینه‌سازی شده نسبت به حالت تجربی به شکلی است که در سامانه پمپاژ ۱۷/۳۴ درصد، در سامانه خطوط لوله ۳/۳۹ درصد و در سازه‌های حفاظتی ۲/۷۴ درصد کاهش هزینه محاسبه شده است.

### سپاس‌گزاری

این پژوهش با حمایت فنی و اقتصادی شرکت آب و فاضلاب روستایی استان خوزستان و پارک علم و فناوری و معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران انجام شد که بدین‌وسیله از آن‌ها قدردانی می‌شود.

### منابع

۱. اسکونژاد م. م. ۱۳۷۵. اقتصاد مهندسی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران. ۴۱۷ ص.
۲. شاه‌نژاد ب. ۱۳۹۰. طراحی بهینه سیستم‌های انتقال و توزیع شبکه‌های تحت فشار با استفاده از برنامه‌ریزی خطی مختلط اعداد حقیقی و صحیح. پایان‌نامه دکترا. دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۵۸ ص.
۳. طاهر شمسی ا. و هوشیاری پور ف. ۱۳۹۰. کاربرد روش بهینه‌سازی غیرخطی در طراحی شبکه‌های توزیع آب شهری. چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران. ۱۳ و ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۰. دانشگاه صنعتی امیرکبیر. تهران.
۴. محمودیان شوستری م. ۱۳۸۸. اصول جریان در مجاری روباز. انتشارات دانشگاه شهید چمران. اهواز. ۹۸۵ ص.
۵. مهرگان م. ر. ۱۳۹۰. پژوهش عملیاتی (برنامه‌ریزی خطی و کاربردهای آن). نشر کتاب دانشگاهی. تهران. ۵۳۶ ص.
۶. نجمایی م. ۱۳۷۳. ضربه قوچ. انتشارات دانشگاه علم و صنعت. تهران. ۴۱۵ ص.
۷. نظری ر. و علوی متین ی. ۱۳۸۵. پژوهش عملیاتی (تئوری و کاربردها). انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز. ۳۵۳ ص.
8. Afshar E. and Mari M. A. 2006. Application of Ant Algorithm for Layout Optimization of Tree

همان‌طوری که در جدول ۳ مشخص است، در حالت بهینه‌سازی هزینه‌های اجرای طرح نسبت به بهترین حالت در سناریوی تجربی در هر سه بخش لوله‌گذاری، پمپ‌ها و سازه‌های کنترلی کاهش می‌یابد. این موضوع برای بخش پمپاژ بیشترین کاهش را به همراه دارد. در بخش لوله‌گذاری، بهینه‌سازی با در نظر گرفتن لوله‌هایی با قطر کمتر و به صورت تلسکوپی با اعمال تأمین نیازهای طرح همراه خواهد بود. در بخش پمپاژ، بهینه‌سازی با اعمال پمپ‌های ترکیبی که بتواند هد و دبی مورد نیاز سیستم را تأمین کند همراه است. از طرفی در بخش سازه‌های حفاظتی نیز با اعمال محدودیت‌ها می‌توان اثر بهینه‌سازی را به روشنی دریافت. این در حالی است که در کلیه سناریوهای تجربی در بهترین حالت با توجه به قطر لوله‌ها و فشار شبکه، نیاز به نصب ۱۳ عدد شیر هوا در نقاط بلند پروفیل است؛ در صورتی که خروجی نرم‌افزار بهینه‌ساز سه شیر هوا را نتیجه می‌دهد. همچنین نتایج این جدول نشان می‌دهد، بخش زیاد هزینه‌ها مربوط به خرید و اجرای لوله‌گذاری بوده که به عدم صحیح بودن مطلق سامانه‌های گذشته مبنی بر انتخاب لوله با قطر بزرگ‌تر برای کنترل پدیده ضربه قوچ پی برده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد روش برنامه‌ریزی خطی قابلیت بهینه کردن تمامی بخش‌های سامانه را داشته و علاوه بر سرعت عمل بالا، سبب جلوگیری از هدررفت هزینه‌ها می‌شود. این روش در بخش‌های مختلف سامانه با رعایت محدودیت‌های فنی بهترین تصمیم را می‌گیرد.

### نتیجه‌گیری

بر اساس مباحث ارائه شده، نتایج حاصل از موضوع این پژوهش را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

✓ استفاده از بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی خطی سبب کاهش هزینه‌های احداث شبکه‌های تحت فشار می‌شود.

✓ همان‌گونه که در بخش نتایج بررسی موردی مشاهده شد، ارتباط بین ساختار یک شبکه بر اساس محدودیت‌های فنی و هیدرلیکی با یک مدل بهینه‌سازی همانند LINGO در بهینه‌سازی مؤلفه‌های یک شبکه می‌تواند بسیار مؤثر باشد.

✓ در بررسی موردی، روش تجربی نشان داد که در بهترین حالت تعداد شیرهای هوای مورد نیاز برای

- Networks. Engineering Optimization. 38(3) 353-369.
9. Babaei N. Tabesh. M. and Nazif S. 2012. Optimizing Pump Performance Considering the Qualitative Constraints in Water Distribution Networks. International Conference on Ecological, Environmental and Biological Sciences (ICEEBS'2012) Jan. 7- 8. 2012 Dubai.
  10. Christodoulou S. and Ellians G. 2011. Ant Colony Optimization for Level of Service Improvements in Piping Networks. EWRA: European Water 33. E.W. Publications: 3-10.
  11. Coelho B. Tavares A. and Andrade-Campos A. 2012. Analysis of diverse optimization algorithms for pump scheduling in water supply systems. International Conference on Engineering Optimization Rio de Janeiro. Brazil. 01 - 05 July 2012.
  12. Keller J. and R.D. Blisner. 1992. Sprinkler and Trickle Irrigation. Avi Book. Van Nostrand Reinhold. New York. 712 p.
  13. Kulkarni M. S. 2011. Optimization of Pipe Distribution Network for Irrigation by Genetic Algorithm. International Journal of Earth Science and Engineering. 4(6): 231-234.
  14. Schaake J. and Lai D. 1969. Linear Programming and Dynamic Programming Applications to Water Distribution Network Design. Dept. of Civil Eng., Massachusetts Inst. of Technol. Cambridge. 222 p.
  15. Savic D. A. and Walters G. A. 1997. Genetic Algorithm for Least-Cost Design of Water Distribution Networks. Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE. 23(2): 67-77.
  16. Somaida M. Elzahar M. and Sharaan M. 2011. A Suggestion of Optimization Process for Water Pipe Networks Design. 2011 International Conference on Environment And Bio Science IPCBEE. IACSIT Press. Singapore. 21: 68-73.