

طراحی سیستم عرضه آب مطمئن در شرایط عدم حتمیت مطالعه موردی: حوضه آبریز زاینده‌رود

مصطفی مردانی^۲

محمود صبوحی صابونی^۱

پذیرش ۹۱/۸/۴

آخرین اصلاحات دریافتی ۹۱/۷/۶

دریافت ۸۹/۹/۳۰

چکیده

سیستم شبکه توزیع آب شامل انواع منابع عرضه و مراکز تقاضا است. عدم اطمینان در مقدار تقاضا و عرضه در این سیستم‌ها باعث بروز مشکلات فراوانی برای تصمیم‌گیرندگان و طراحان می‌شود. روشهای گوناگونی برای غلبه بر مشکل عدم حتمیت در این نوع از سیستم‌ها مطرح است. در مطالعه حاضر از بهینه‌سازی با پارامترهای کنترل‌کننده میزان محافظه‌کاری (میزان عدم حتمیت)، برای بهینه‌سازی تخصیص آب، در شبکه عرضه آب حوضه آبریز زاینده‌رود استفاده شد. تابع هدف مورد مطالعه، حداقل کردن هزینه‌های مربوط به مراحل طراحی و بهره‌برداری این شبکه عرضه بود. یک دوره‌ی ۱۵ ساله طراحی و بهره‌برداری، شامل دو دوره ۵ ساله طراحی برای گسترش و ایجاد تأسیسات جدید و یک دوره ۱۰ ساله بهره‌برداری در شبکه توزیع آب در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که هزینه کل طرح توسعه شبکه توزیع آب در منطقه مورد مطالعه، برابر با ۱/۳۱ میلیارد دلار است. بر اساس یافته‌ها، افزایش حوضچه‌های آبهای زیرزمینی برای جبران کمبود آب در منابع آب زیرزمینی توصیه می‌شود. افزون بر آن، افزایش راندمان آبیاری هزینه‌های مربوط به شبکه توزیع آب بخش کشاورزی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، شبکه توزیع آب، محافظه‌کاری، عدم حتمیت

Reliable Water Supply System Design under Uncertainty Case Study: Zayandehroud River Basin

Mahmood Sabouhi Sabouni¹

Mostafa Mardani²

(Received Dec. 21, 2010 Revised Sep. 27, 2012 Accepted Oct. 25, 2012)

Abstract

Water distribution network system includes multiple sources of supply and demand centers. Uncertainty in the amount of demand and supply on these systems causes many problems for decision-makers and designers. Various methods were proposed to overcome the uncertainty problem in these systems. In this study, to allocation of water in the water supply network of Zayandehroud basin, optimization with degree of conservative (degree of uncertainty) controller parameters were used. The objective function of the study was to minimize the water distribution network costs. A 15-year design and operation period (2024-2009) including two 5-year course designed to expand and create new facilities and a 10-year period of operation in the water distribution network was considered. The results showed that the total cost of development of water distribution networks in the study area is 1/31 billion dollars. Based on the findings, increased groundwater fed ponds to compensate for water shortage in the groundwater resources is recommended. In addition, Increase irrigation efficiency reduces costs related to the water distribution network of agricultural sector.

Keywords: Optimization, Water Distribution Network, Conservative, Uncertainty.

1. Assoc. Prof. of Agriculture Economy, College of Agriculture, Zabol University, Zabol (Corresponding Author) (+98 542) 2232112 msabuhi39@yahoo.com
2. Ph.D. Student of Agriculture Economy, College of Agriculture, Zabol University, Zabol

۱- دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل (نویسنده مسئول) msabuhi39@yahoo.com (۰۵۴۲) ۲۲۳۱۱۲

۲- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل

۱۳۸۹، به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های چند مخزنی (مخازن حوضه کرخه) پرداخته‌اند. در مطالعه آنها مدل‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های پیچیده چند مخزنی به روش الگوریتم جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک صورت گرفته است. نتایج نشان داده که الگوریتم جامعه مورچگان با افزایش متغیرهای تصمیم، علاوه بر افزایش زمان محاسبات، با کاهش میزان بهینگی مواجه خواهد شد و بدون ایجاد راهکارهای محدودیتی، این مدل از حل مسائل پیچیده منابع آب ناتوان خواهد بود [۱۱].

منطقه مورد نظر در مطالعه حاضر، حوضه آبریز زاینده‌رود بود که بین عرض‌های جغرافیای ۱۱' و ۳۱' تا ۴۱' و ۳۲° شمالی و طولهای جغرافیایی ۲' و ۵۰' تا ۲۵' و ۳۵° غربی محدود شده است. متوسط ارتفاع زمین از سطح دریاهای آزاد در این حوضه بین ۲۰۰ متر در غرب و ۱۰۰۰ متر در شرق متفاوت است [۱۲]. قسمت عمده حوضه آبریز زاینده‌رود در استان اصفهان و بخش‌هایی از آن در استان‌های چهارمحال و بختیاری، فارس و یزد قرار دارد. گسترده‌ترین آبخوان‌ها در این حوضه محدوده‌های کوهپایه-سگری، اصفهان-برخوار، مهیار جنوبی-دشت آسمان، لنجانان و نجف‌آباد را تشکیل می‌دهند [۱۳].

هدف مطالعه حاضر تخصیص بهینه جریان آب و همچنین تعیین ظرفیت تأسیسات و هزینه کل مربوط به شبکه عرضه آب در حوضه آبریز زاینده‌رود بود. به‌علت پیچیدگی و گستردگی شبکه‌های توزیع و همچنین بالا بودن سهم استان اصفهان در این حوضه، برای گره‌های آبهای زیرزمینی، تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب، مناطق شهری و کشاورزی، شهرها و دشت‌های خاصی در استان اصفهان در نظر گرفته شد. این نواحی به گونه‌ای انتخاب شدند که هم قسمت اعظم مصارف و منابع آب را به خود اختصاص می‌دهند و هم می‌توانند معیاری برای بقیه نقاط استان اصفهان که قسمت عمده حوضه آبریز زاینده را تشکیل می‌دهد، تلقی شوند. در این میان عدم توجه به مسئله عدم حتمیت باعث ایجاد هزینه‌های پیش‌بینی نشده مازاد، برای اعمال تغییرات در این سیستم‌ها خواهد شد که این مسئله در مطالعات داخلی برای کاهش هزینه‌های این نوع سیستم‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برای توسعه سیستم عرضه آب در مناطق مورد نظر از روش بهینه‌سازی با پارامترهای کنترل‌کننده میزان محافظه‌کاری استفاده شد. استفاده از این روش قدرتمند و انعطاف‌پذیر در مطالعات داخلی به ندرت دیده می‌شود. تنها مطالعه داخلی که تاکنون با استفاده از این روش انجام شده است، مطالعه مردانی و همکاران در سال ۱۳۹۰ برای تعیین الگوی کشت در شهرستان مشهد است [۱۴]. مطالعات خارجی در زمینه مدیریت منابع آب نیز محدود به مطالعه ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ است [۷].

تمام تصمیم‌هایی که برای طراحی یا گسترش سیستم‌های توزیع آب باید گرفته شوند با عدم حتمیت روبرو است. اندازه و ظرفیت اجزاء مربوط به سیستم‌های عرضه آب، معمولاً بر اساس پیش‌بینی عواملی مثل جمعیت و شرایط آب و هوا در آینده طراحی می‌شوند. عدم اطمینان در پیش‌بینی این عوامل جزء اصلی سیستم‌های عرضه آب است [۱]. اخیراً از روشهای مختلف بهینه‌سازی در شرایط عدم حتمیت برای طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های عرضه آب استفاده شده است [۲-۵]. در اکثر این تحقیقات از برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای یا چند مرحله‌ای خطی و یا غیر خطی استفاده شده که هدف اصلی در آنها حداقل کردن هزینه‌های کل و یا حداکثر کردن سود انتظاری بوده است.

مقصود و همکاران در سال ۲۰۰۵، به تخصیص بهینه آب برای یک سد غیر تنظیمی در بخش جنوبی ایالت کالیفرنیا به سه بخش کشاورزی، شهری و صنعتی پرداخته‌اند. در مطالعه آنها از روش برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای فازی با پارامترهای بازه‌ای^۱ برای طراحی سیستم مدیریت منابع آب این منطقه تحت شرایط عدم حتمیت استفاده شده است. نتایج نشان داده که سود خالص سیستم با استفاده از IFTSP تحت سناریوی اهداف تخصیص آب بهینه‌سازی شده، $10^6 \times [325,577]$ دلار است [۶]. ژانگ و همکاران، در سال ۲۰۰۹ به طراحی یک سیستم عرضه آب در منطقه‌ای فرضی تحت شرایط عدم حتمیت پرداخته‌اند. آنها برای اعمال شرایط عدم حتمیت در مدل، از روش بهینه‌سازی با پارامترهای کنترل‌کننده میزان محافظه‌کاری^۲ و یا بهینه‌سازی قوی^۳ استفاده کرده‌اند. پس از بررسی جوابهای بهینه مشخص شده که این روش ابزار مفیدی برای طراحی سیستم عرضه آب در شرایط عدم حتمیت است [۷].

در ایران تحقیقات بسیار اندکی در زمینه‌ی حداقل کردن هزینه هنگامت سیستم‌های شبکه توزیع و عرضه آب و به تبع آن بهینه کردن این سیستم‌ها انجام شده است. نویان‌پور و همکاران در سال ۱۳۸۷ با استفاده از منطق فازی و توجه به هزینه‌های گوناگون خطوط انتقال آب، مسیر بهینه خطوط انتقال آب برای آبرسانی به اراضی روستای سیاهپوش را تعیین کرده‌اند [۸]. تابش و ذیحی در سال ۱۳۸۷ با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک به بررسی تاثیر قیود کیفی در بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب پرداخته‌اند [۹]. در زمینه بهینه‌سازی تخصیص آب بین بخش‌های مختلف مصرفی، رستگاری‌پور و صبوحی در سال ۱۳۸۹، در مطالعه‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چند مرحله‌ای به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد کارده پرداخته‌اند [۱۰]. برهانی داریان و مرادی در سال

¹ Interval-Parameter Fuzzy Two-Step Stochastic programming (IFTSP)

² Degree of Conservatism Control Parameters

³ Robust Optimization

در مطالعه حاضر سیستم عرضه آب در حوضه آبریز زاینده رود (برخی مناطق استان اصفهان) با توجه به شرایط عدم حتمیت برای یک دوره ۱۵ ساله در قالب یک مسئله غیرخطی با اعداد مختلط^۱ طراحی شد. مسئله مورد نظر در نرم افزار Lingo 10 کدنویسی و با استفاده از بهینه سازی سراسری^۲ در کلاس INLP^۳ حل شد. حد نوسان بهینگی غیرخطی (NOPTOL)^۴ در این مسئله $10^{-7} \times 2$ (مقدار قراردادی نرم افزار) در نظر گرفته شد. این مقدار تعیین کننده حد نوسان در مقدار بهینه تابع هدف است. البته این عمل به طور غیرمستقیم و توسط کنترل تعدیل در متغیرها پس از حل مسئله غیرخطی انجام می شود. همچنین، حد نوسان بهینگی (OPTOL)^۵ در بهینه سازی سراسری (حد نوسان (مستقیم) مقدار بهینه تابع هدف به عنوان بهترین جواب بهینه امکان پذیر) 10^{-6} در نظر گرفته شد.

۲- مواد و روشها

طرح کلی سیستم عرضه آب در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل مجموعه گره ها (N) با مستطیل و مجموعه ای کمان ها (A) با خطوط جهت دار مشخص شده است. N شامل ۸ گره است که عبارت اند از: گره منابع (N_S - آبهای ورودی، آبهای زیرزمینی، بالادست رودخانه و پایین دست رودخانه)، گره کاربران (N_U - مناطق شهری و کشاورزی) و تصفیه خانه های آب و فاضلاب (N_{WT} و N_{WWT}). یک رودخانه شامل یک گره بالادست (N_{RD}) و یک گره پایین دست (N_{RU}) است که به وسیله یک کمان به هم متصل شده اند. منابع آب موجود شامل منابع ذخیره ای (N_{SS}) و غیر ذخیره ای (N_{NS}) است. کمان ۴ برای انتقال آبهای ورودی به مناطق تغذیه مصنوعی ذخایر آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه یک دوره ۱۵ ساله (از سال ۱۳۸۸ تا ۱۴۰۳) طراحی شد و بهره برداری با وجود زیرساخت های شبکه عرضه آب در سال اول (۱۳۸۸) در نظر گرفته شد. این دوره ۱۵ ساله شامل دو دوره طراحی ۵ ساله برای گسترش و ایجاد تأسیسات جدید در شبکه عرضه است. اتمام دوره اول طراحی که در ۵ سال اول است ($\Delta 0^0 = 1$) با سال اول بهره برداری از شبکه برابر است. همچنین اتمام دوره دوم طراحی با سال ششم دوره بهره برداری برابر است. کل دوره بهره برداری از سال پنجم تا سال پانزدهم ($\Delta 0^0 = 2$) به مدت ده سال است.

از ۳۹ دشت (محدوده مطالعاتی) موجود در استان، شش

دشت کوهپایه-سگزی، برخوار-اصفهان، نجف آباد، کرون، مهیار شمالی، و مهیار جنوبی-دشت آسمان برای مطالعه بر روی آبهای زیرزمینی و مناطق کشاورزی انتخاب شدند. وجود قسمت اعظم شبکه های آبیاری شامل هفت شبکه آبیاری اصلی (رودشت، آبشار، نکوآباد، برخوار، مهیار و جرقویه، خمیران و حنا) در این دشت ها، علت انتخاب آنها برای مطالعه حاضر بود. این شبکه های آبیاری سالانه به طور متوسط ۶/۷ مترمکعب در ثانیه آب را به مناطق کشاورزی انتقال می دهند. همچنین شهر اصفهان به عنوان نماینده برای گره های مناطق شهری و تصفیه خانه های آب و فاضلاب در نظر گرفته شد. اطلاعات مربوط به طول، اختلاف ارتفاع و جریانی که در حال حاضر (سال ۱۳۸۸) بین دو سر لوله ها و کانال ها وجود دارد در شکل ۱ مشاهده می گردد. آب ورودی قابل دسترس در استان اصفهان عمدتاً مربوط به سه تونل کوه رنگ ۱، کوه رنگ ۲ و چشمه لنگان است. این سه تونل آب را از زیرشاخه های فرعی حوضه آبریز کارون به بستر رودخانه زاینده رود منتقل می کند [۱۲ و ۱۵]. اطلاعات مورد نیاز برای بهینه کردن تابع هدف در جدول ۱ ذکر شده است. کلیه اطلاعات مورد استفاده در مطالعه حاضر از شرکت آب منطقه ای، شرکت میراب زاینده رود، شرکت آب و فاضلاب و جهاد کشاورزی استان اصفهان و همچنین پایگاه اطلاعاتی سازمان نقشه برداری کشور دریافت شد [۱۵-۱۸].

برای تبیین مدل بهینه سازی با پارامترهای کنترل کننده میزان محافظه کاری، مسئله بهینه یابی زیر در نظر گرفته می شود

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } cx \\ & \text{subject to } \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} x_j \leq b_i, \quad \forall i, j \in J_i \end{aligned} \quad (1)$$

$$l \leq X \leq u.$$

که در این رابطه

J_i زیرمجموعه ای از شاخصهای مرتبط با پارامتر نامطمئن \tilde{a}_{ij} است که برای هر محدودیت i مشخص می شود. فرض می شود که \tilde{a}_{ij} ها مستقل، متقارن و کراندار در محدوده $[1, -1]$ هستند. برای کنترل میزان محافظه کاری، پارامتر Γ_i تعریف می شود که می توان عدد حقیقی در دامنه J_i $[0, 1]$ را به آن نسبت داد. در رابطه ۲، مدل ۱ به صورت بهینه سازی با پارامترهای کنترل کننده میزان محافظه کاری بازنویسی شده که باعث بهبود قابلیت اعتماد به سیستم ها در شرایط عدم حتمیت می گردد [۱۹]

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } cx \\ & \text{subject to } \sum_i \tilde{a}_{ij} x_j + \max_{\{s \in \{t_i\} | s \in \{t_i\} | s \in \{t_i\} | s \in \{t_i\}\}} \left\{ \sum_{j \in J_i} \tilde{a}_{ij} y_j + (\Gamma_i - [\Gamma_i]) \hat{a}_{ij} y_i \right\} \leq b_i, \quad \forall i \\ & -y_j \leq x_j \leq y_j, \quad \forall j \in J_i \\ & l \leq X \leq u, \\ & y \geq 0 \end{aligned}$$

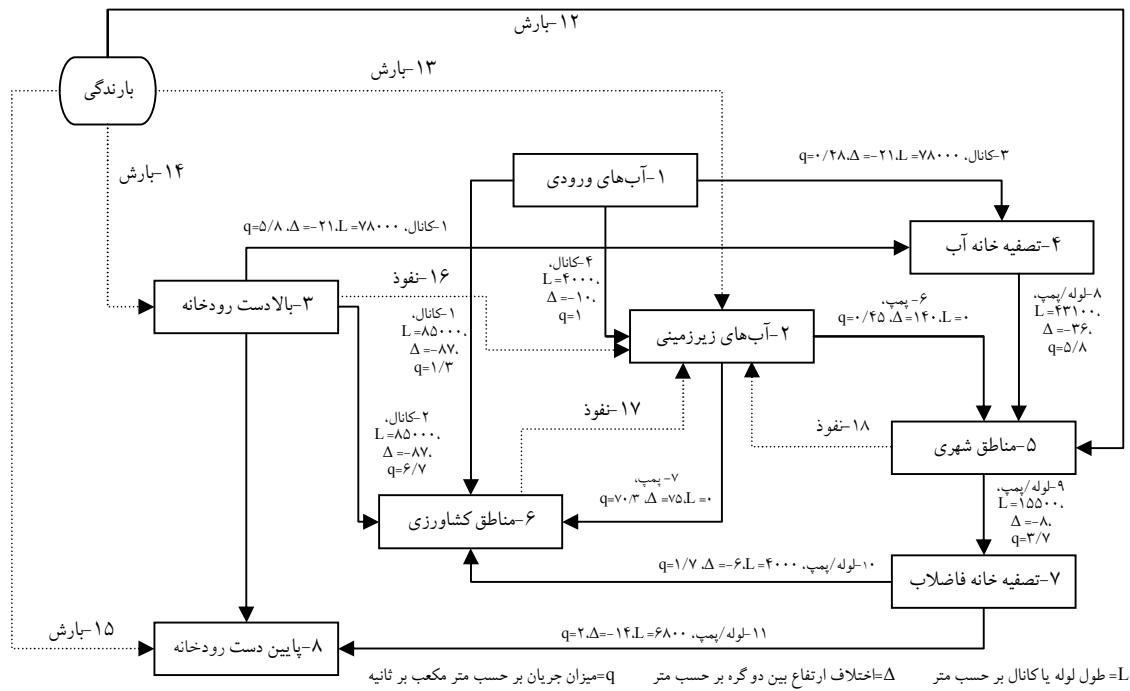
¹ Mixed-Integer Nonlinear Problem

² Global Optimization

³ Integer Nonlinear Program

⁴ Nonlinear Optimality Tolerance

⁵ Optimality Tolerance



شکل ۱- صورت کلی شبکه توزیع آب در حوضه آبریز زاینده رود

جدول ۱- اطلاعات مربوط به سیستم عرضه آب برای مناطق تحت مطالعه

| پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---------|---------|
| ضریب دارسی-وایسباخ، f | ۰/۰۲ | - |
| ضریب مانینگ، n | ۰/۰۱۳ | - |
| شیب جانیی کانال، Z | ۳ | - |
| آب‌های ورودی قابل دسترس، $I\bar{W}$ | ۲۵/۲۳ | m^3/s |
| نرخ بهره، I/I | ۱۰ | %/yr |
| ضریب تعدیل شهری، CITY | ۰/۹۲ | - |
| مقدار بارش سالانه، \bar{P} | ۱۸۶/۹ | mm/yr |
| ضریب همستگی، ρ_i | ۰/۳ | - |
| مساحت حوضه آبریز، A_b | ۴۱۵۰۰ | km^2 |
| میزان ذخیره آب زیرزمینی اولیه، IGS | ۱۵۳/۰۷ | km^3 |
| میزان ذخیره آب زیرزمینی مورد نیاز، RS_2 | ۱۵۷/۹۷ | km^3 |
| میزان جریان مورد نیاز در پایین دست رودخانه، RQ_8 | ۶/۰۲ | m^3/s |
| قیمت واحد هر واحد از آب‌های ورودی، C_{IW} | ۰/۱۱۶* | s/m^3 |
| میزان مصرف آب کشاورزی (دوره ۵- بهره‌برداری) \bar{D}_{AG}^O | ۸۲/۸ | m^3/s |
| میزان مصرف آب کشاورزی (دوره ۱۰- بهره‌برداری) \bar{D}_{AG}^O | ۷۹/۴ | m^3/s |
| جمعیت اولیه متقاضی آب شهری | ۱۶۰۲۰۰۰ | نفر |
| نرخ رشد جمعیت | ۱/۶ | %/yr |
| تقاضای اولیه آب شهری | ۸/۲۵ | m^3/s |

* قیمت هر واحد از آبهای ورودی بر اساس تعرفه وزارت نیرو برای برداشت آب از سد زاینده‌رود (۱۱۰ ریال برای هر مترمکعب) بر حسب دلار در نظر گرفته شده است.

می‌گیرد. به عبارت دیگر، هر قدر میزان محافظه‌کاری سیستم در مقابل عدم حتمیت افزایش یابد از ظرفیت سیستم کاسته می‌شود. در مدل ۲ فرض بر این است که ضرایب پارامترها مستقل هستند. این

که در آن b_i مقادیر سمت راست محدودیت i است و برای هر i ، $|x_j^*| \cdot y_j$ در این روش بین میزان محافظه‌کاری سیستم در مقابل عدم حتمیت (Γ_i) و ظرفیت سیستم (x_i) یک ارزیابی انجام

فرض در مسائلی از قبیل سیستم‌های عرضه آب بعید به نظر می‌رسد (به‌عنوان مثال بین پارامترهای میزان بارندگی و میزان تقاضای آب ارتباط وجود دارد و با افزایش میزان بارندگی میزان تقاضا برای آب افزایش می‌یابد). بنابراین، این روش برای متغیرهای تصادفی

غیر مستقل نیز توسعه داده شد [۱۹]. اگر تعدادی از منابع عدم حتمیت روی سیستم تأثیر گذارند، i امین محدودیت در این سیستم‌ها به صورت زیر است

Maximize cx

$$\text{subject to } \sum_i \bar{a}_{ij} x_i + \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq K_i, S_i = [\Gamma_i], t_i \in K_i \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{k \in S_i} \left| \sum_{j \in J_i} g_{kj} x_j \right| + (\Gamma_i - [\Gamma_i] \sum_{j \in J_i} g_{t_j j} x_j) \right\} \leq b_i, \quad \forall i$$

$$l \leq X \leq u, \quad (3)$$

که برای مدل ۳ نیز صادق است. یک سطح مطلوب احتمال انحراف محدودیت Γ_i از کران آن محدودیت در نظر گرفته می‌شود و با توجه به تعداد پارامترهای نامطمئن در آن محدودیت مقدار Γ_i محاسبه می‌شود. طریقه محاسبه این پارامتر توسط برسی‌ماس و سیم در سال ۲۰۰۴ به‌طور کامل توضیح داده شده است [۱۹].

تابع هدف مورد نظر در این مطالعه یک تابع چند جمله‌ای است که به وسیله آن می‌توان هزینه‌های مربوط به ایجاد تأسیسات جدید، خرید آبهای ورودی و تعمیر و نگهداری سیستم‌های شبکه‌ی عرضه آب را به حداقل رساند. این تابع به صورت زیر ارائه می‌گردد [۲۰-۲۳]

که در آن $|K_i|$ تعداد منابع عدم حتمیت است که روی ضرایب محدودیت Γ_i تأثیر دارند. g_{ki} یک سطح حداکثر را برای تأثیر همبستگی منبع $k \in K_i$ روی پارامتر \tilde{a}_{ij} مشخص می‌کند. با جاگذاری x^* در مدل ۲ به‌عنوان جواب بهینه، احتمال انحراف محدودیت Γ_i از کران خود، به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{pr} \left(\sum_j \tilde{a}_{ij} x_j^* > b_i \right) \leq B(n, \Gamma_i) \quad (4)$$

تابع هدف :

(۵)

$$\text{Minimize } Z(k_{ij}^t, d_{ij}^t, \chi_{ij}^t, H_{ij}^t, w_i^t, w_i^o, q_{ij}^t, q_{ij}^o) = \sum_{t \in T} \left(\frac{1}{(1+I)^{t-1}} \sum_{(i,j) \in A_p} x_{ij}^t (57.198 + 0.35k_{ij}^t + 0.62k_{ij}^{t.54} + 0.0018k_{ij}^{t.9} + 0.0062k_{ij}^{t.83} - 0.062k_{ij}^{t.73} + 0.02k_{ij}^{t.18} + 0.23k_{ij}^{t.93} + 0.0022k_{ij}^{t.71}) L_{ij} \right) +$$

$$\sum_{t \in T} \left(\frac{1}{(1+I)^{t-1}} \sum_{(i,j) \in A_c} 1.45 \left(55.30 L_{ij} d_{ij}^t \frac{\text{ENR}^t \text{CITY}}{2877} \right) \right) + \sum_{t \in T} \left(\frac{1}{(1+I)^{t-1}} \sum_{(i,j) \in A_p \cup A_u} \mu_{ij}^t (500 \chi_{ij}^t H_{ij}^{t.04}) \right) +$$

$$\sum_{t \in T} \left(\frac{1}{(1+I)^{t-1}} \sum_{i \in N_{WT}} (2897.13 w_i^t + 35987) \right) + \sum_{t \in T} \left(\frac{1}{(1+I)^{t-1}} \sum_{i \in N_{WWT}} (10811.92 w_i^t + 5454228) \right) +$$

$$\sum_{o=1}^{10} \left(\frac{1}{(1+I)^{o-1}} \left(\sum_{(i,j) \in A_p} x_{ij}^o (27.7 + 0.3q_{ij}^o) L_{ij} + \sum_{(i,j) \in A_c} \left(0.0254 L_{ij} q_{ij}^{o.572} + (0.078 + 0.0135 q_{ij}^o) L_{ij} \frac{\text{ENR}^o}{1850} \right) \right) \right) +$$

$$\sum_{(i,j) \in A_p \cup A_u} \left(79.47 \Delta_{ij} q_{ij}^o + 4560 q_{ij}^{o.58} + 320 q_{ij}^{o.935} \frac{\text{ENR}^o \text{CITY}}{2877} \right) +$$

$$\sum_{i \in N_{WT}} (28.97 w_i^t + 360) + \sum_{i \in N_{WWT}} (108.12 w_i^t + 54542) \Delta o^o + \sum_{o=1}^{10} \left(\frac{1}{(1+I)^{o-1}} C_{IW} \sum_{j \in N} q_{IW,j}^o \right) \Delta o^o.$$

ظرفیت پمپ برای کمان (i,j) در دوره طراحی t , $H_{i,j}^t$ فشار پمپ (هد) برای کمان (i,j) در دوره طراحی t , $w_{i,j}^t$ ظرفیت تأسیسات تصفیه‌خانه در دوره طراحی t , $q_{i,j}^o$ نرخ جریان برای کمان (i,j) در

که در این رابطه Z شیب جانبی کانال، $k_{i,j}^t$ قطر لوله برای کمان (i,j) در دوره طراحی t , $d_{i,j}^t$ عمق کانال برای کمان (i,j) در دوره طراحی t , $\chi_{i,j}^t$

و فاضلاب به ظرفیت این تأسیسات (W_{ij}^t) بستگی دارد (جمله چهارم رابطه ۵). تمام هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری از سیستم عرضه آب برای هر دوره‌ی بهره‌برداری 0 در جمله پنجم محاسبه می‌شود. پارامتر Δ_{ij} مربوط به اختلاف ارتفاع بین دو نقطه انتهایی لوله‌ها است. در یک سیستم عرضه آب می‌توان آبهای ورودی را با پرداخت هزینه‌ی هر واحد حجم (C_{IW}) از حوضه‌های آبریز مجاور خریداری کرد. این هزینه در جمله پنجم رابطه ۵ قرار دارد.

تمام هزینه‌ها توسط عامل $1/(1+I)^{t-1}$ به ارزش فعلی در سال اول تبدیل شده‌اند. I در این معادلات معرف نرخ بهره است. در ادامه به معرفی پارامترهای نامطمئن و محدودیت‌های موجود در مدل پرداخته می‌شود.

در سیستم‌های عرضه آب به علت پیش‌بینی تقاضای مصرف کنندگان برای آب و همچنین پیش‌بینی‌های مربوط به بارندگی، عدم حتمیت جزء ذات این سیستم‌ها است. پارامترهای نامطمئن در مطالعه حاضر عبارت‌اند از: مقدار بارش (\bar{P}^0)، مقدار تقاضای آب برای مصرف کنندگان (\bar{D}_i^0) و مقدار آب ورودی قابل دسترس ($I\bar{W}^0$). برای جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد مدل، فرض بر این است که تمامی متغیرهای تصادفی کران‌دار و دارای توزیع متقارن هستند. بر این اساس محدودیت‌های سیستم عرضه آب در منطقه مورد مطالعه به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۷]

سال بهره‌برداری 0، L_{ij} طول کمان (i,j) ، $\mu_{i,j}^t$ متغیر دو گانه‌ای که ارزش صفر را برای عدم وجود لوله و ارزش یک را برای وجود لوله در دوره طراحی t می‌گیرد، CITY ضریب تعدیل شهری، ENR^t شاخص هزینه ساخت و ساز در سال t ، نرخ بهره، A مجموعه‌ای از کمان‌ها (i,j) از گره i به گره j ، Δ_{ij} اختلاف ارتفاع بین گره i و j (EL_i, EL_j)، N مجموعه‌ای از گره‌ها در شبکه توزیع آب، $\Delta 0$ طول دوره بهره‌برداری 0، جمله اول در رابطه ۵، مربوط به هزینه‌ی لوله‌گذاری از گره i به گره j است که تابعی از قطر لوله در سال t است (k_{ij}^t). هنگامی که لوله‌ای وجود ندارد، ضرب کردن طول لوله (L_{ij}) در مقدار ثابت موجود در این جمله ($57/198$)، هزینه‌ای مثبت را به تابع هدف اضافه می‌کند. متغیر دوتایی (χ_{ij}^t) ، برای جلوگیری از این خطا تعریف می‌گردد که نشان دهنده وجود (۱) و یا عدم وجود (۰) لوله از گره i به گره j در سال t است. در جمله دوم، هزینه ساخت کانال‌ها مطرح است که تابعی از عمق کانال (d_{ij}^t) است. CITY و ENR پارامترهایی هستند که به ترتیب برای محاسبه هزینه‌های متغیر محلی (ضریب تعدیل شهری) و شاخص هزینه‌های ساخت و ساز استفاده می‌شوند. در این جمله متغیر دوتایی χ_{ij}^t برای تعیین وجود یا عدم وجود پمپ در سال t تعریف شده است. در جمله سوم، هزینه نصب ایستگاه‌های پمپاژ در نظر گرفته شده که تابعی از فشار پمپ یا هد (H_{ij}^t) و ظرفیت پمپ (χ_{ij}^t) است. هزینه ساخت و گسترش تأسیسات تصفیه خانه‌های آب

¹ Binary Variable

محدودیت‌ها:

$$-q_{45}^0 - q_{25}^0 + \bar{D}_5^0 - A_{DO-OUT} \bar{P}^0 + \max \left\{ \hat{D}_5^0 + (\Gamma_1 - 1) \left| -A_{DO-OUT} \hat{P}^0 (1 + \rho_1) \right|; (\Gamma_1 - 1) \hat{D}_5^0 + \left| -A_{DO-OUT} \hat{P}^0 (1 + \rho_1) \right| \right\} \leq 0. \quad (6)$$

$$-q_{16}^0 - q_{26}^0 - q_{36}^0 - q_{76}^0 + \bar{D}_6^0 - A_{AG} \bar{P}^0 + \max \left\{ \hat{D}_6^0 + (\Gamma_2 - 1) \left| -A_{AG} \hat{P}^0 (1 + \rho_2) \right|; (\Gamma_2 - 1) \hat{D}_6^0 + \left| -A_{AG} \hat{P}^0 (1 + \rho_2) \right| \right\} \leq 0. \quad (7)$$

$$q_{12}^0 + q_{14}^0 + q_{16}^0 - I\bar{W}^0 + \max \left\{ \left| I\bar{W}^0 \right| + (\Gamma_3 - 1) \left| \rho_3 \hat{P}^0 A_b \right|; (\Gamma_3 - 1) \left| I\bar{W}^0 \right| + \left| \rho_3 \hat{P}^0 A_b \right| \right\} \leq 0 \quad (8)$$

$$-q_{78}^0 + q_{34}^0 + q_{36}^0 + q_{32}^0 - 0.3A_b \bar{P}^0 + \Gamma_4 \left| -0.3\hat{P}^0 \right| + RQ_8 \leq 0. \quad (9)$$

$$-IGS - 0.1A_b \sum_{k=1}^0 \bar{P}^k - \sum_{k=1}^k (q_{12}^k + q_{32}^k + q_{52}^k + q_{62}^k - q_{25}^k - q_{26}^k) + RS_2 + \left| -0.1A_b \sum_{k=1}^0 \Gamma_{k+4} \hat{P}^k \right| \leq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} q_{ij}^0 \leq w_i^t \quad \forall j \in N_{WT} \cup N_{WWT}, t \leq 0, \quad \forall 0 \in O, \quad \forall t \in T. \quad (11)$$

$$\sum_{j \in N} q_{ij}^0 - \sum_{j \in N} q_{ij}^0 = 0, \quad i \in N_{NS} \setminus (N_{RU} \cup N_{RD}), \quad \forall 0 \in O. \quad (12)$$

$$q_{ij}^0 \leq \frac{1.49}{n_{ij}} \sqrt{2} \left(\sqrt{1 + z_{ij}^2} - z_{ij} \right) d_{ij}^{t, k_3} S_{ij}^{1/2}, \quad \forall (i, j) \in A_C, \quad t \leq 0, \quad \forall 0 \in O, \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$\begin{aligned} q_{ij}^o &\geq 0.5\chi_{ij}^t, & \forall (i,j) \in A_U, & t \leq O, & \forall o \in O, & \forall t \in T, \\ q_{ij}^t &\leq 1.5\chi_{ij}^t, & \forall (i,j) \in A_U, & t \leq o, & \forall o \in O, & \forall t \in T. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\left(\left(\frac{4}{3} H_{ij}^t - \frac{H_{ij}^t q_{ij}^{o^2}}{3\chi_{ij}^t} \right) - \frac{8fL_{ij}}{g\pi^2 k_{ij}^t} q_{ij}^{o^2} - \Delta_{ij}^o \right) \geq H_{\min,ij} - 1000(1 - \mu_{ij}^t), \quad \forall (i,j) \in A_P, t \leq o, \forall o \in O, \forall t \in T. \quad (15)$$

$$\left(\frac{4}{3} H_{ij}^t - \frac{H_{ij}^t q_{ij}^{o^2}}{3\chi_{ij}^t} - \Delta_{ij}^o \right) \geq H_{\min,ij} - 10000(1 - \mu_{ij}^t), \quad \forall (i,j) \in A_U, t \leq o, \forall o \in O, \forall t \in T. \quad (16)$$

$$q_{ij}^o, H_{ij}^t, d_{ij}^t, w_{ij}^t \geq 0, \quad \forall (i,j) \in A, \quad i \in N_{WT} \cup N_{WWT}, \quad \forall t \in T, \quad \forall o \in O. \quad (17)$$

$$k_{ij}^t, \chi_{ij}^t \geq \varepsilon, \quad \forall (i,j) \in A_P \cup A_U, \quad \forall t \in T. \quad (18)$$

$$q_{ij}^o \leq M_{ij}^o x_{ij}^o, \quad \forall (i,j) \in A_P, \quad t \leq o, \quad \forall o \in O, \quad \forall t \in T. \quad (19)$$

$$q_{ih}^o \leq M_{ij}^o \mu_{ij}^o \quad \forall (i,j) \in A_U, \quad t \leq o, \quad \forall o \in O, \quad \forall t \in T. \quad (20)$$

دیگر از کل بارشهای ایجاد شده برای محدوده حوضه آبریز (A_p) ۳۰ درصد به صورت جریان سطحی در رودخانه و ۱۰ درصد به صورت ذخیره آبهای زیرزمینی برای مناطق تحت مطالعه در دسترس است. همچنین تمام حجم آب ورودی برای این مناطق در نظر گرفته شد.

برای تأمین نیازهای زیست محیطی در گره پایین دست رودخانه، یک حداقل جریان (RQ_i) در این گره مورد نیاز است که این پارامتر تخلیه آب مورد نیاز از گره i در دوره بهره‌برداری 0 است محدودیت (۹) مربوط به تأمین حداقل نیازهای زیست محیطی در گره پایین دست رودخانه است.

برای حفظ قابلیت یک سیستم عرضه آب، آبهای موجود در منابع ذخیره‌ای باید از یک حجم معین مورد نیاز بیشتر باشند (محدودیت (۱۰)). در این محدودیت IGS میزان ذخیره‌ی اولیه آبهای زیرزمینی برای مناطق تحت بررسی است.

کلیه جریان‌های ورودی به تأسیسات تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب نباید از ظرفیت آنها بیشتر باشد. همچنین، جریان‌های ورودی و خروجی در گره‌های غیر ذخیره‌ای (N_{NS}) باید در تعادل باشند. محدودیتهای (۱۱) و (۱۲) به ترتیب مربوط به جریان‌های ورودی به تأسیسات تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و جریان‌های ورودی و خروجی در گره‌های غیر ذخیره‌ای هستند.

ظرفیت یک کانال با استفاده از معادله مانینگ و مشخصات هیدرولیکی (شیب (S)، زبری (n) و شیب جانبی کانال‌ها (Z)) برآورد می‌شود. جریانی که از هر کانال می‌گذرد نباید از ظرفیت کانال‌ها بیشتر باشد (محدودیت ۱۳).

برای حفظ کارایی پمپ‌ها در تمام دوره بهره‌برداری، نرخ جریان تخلیه‌ی پمپ باید بین ۵۰ تا ۱۵۰ درصد از ظرفیت طراحی پمپ

که در این روابط

T مجموعه‌ای از دوره‌های طراحی شبکه‌های توزیع آب $t \in T, 0$ مجموعه‌ای از دوره‌های بهره‌برداری توزیع آب $O \in O, A_{DO-out}$ مساحت محدوده خارج از مناطق شهری، A_{AG} مساحت مناطق کشاورزی تحت آبیاری، $H_{\min, ij}$ حداقل فشار مورد نیاز در محل اتصال پمپ به انتهای لوله از گره i به گره j ، k مجموعه‌ای از منابع عدم قیمت $k \in K, A$ مساحت حوضه آبریز، ρ_A ضرایب همستگی بین بارش و تقاضای آب و f ضریب دارسی و ایسباخ است. محدودیتهای (۶) و (۷) به ترتیب مربوط به تقاضای آب کشاورزی و شهری است. A_{AG} و A_{DO-out} به ترتیب مساحت محدوده خارج از مناطق شهری و مساحت مناطق کشاورزی تحت آبیاری برای دشت‌های هفتگانه تحت بررسی است. دو پارامتر Γ_1 و Γ_2 پارامترهای کنترل کننده میزان محافظه‌کاری هستند و به دلیل وجود عدم اطمینان در پیش‌بینی تقاضای آب و بارندگی در این محدودیتهای تعریف می‌شوند که مقادیری را در دامنه‌ی [۰, ۲] به خود اختصاص می‌دهند.

محدودیت (۸) مربوط به آبهای ورودی قابل دسترس است. با تعریف پارامتر Γ_3 با دامنه‌ی [۰, ۲]، این محدودیت به صورت یک محدودیت با پارامترهای کنترل کننده میزان محافظه‌کاری در نظر گرفته می‌شود. فرض می‌شود که ۳۰ درصد از رواناب‌های حاصل از بارندگی در محدوده حوضه‌ی آبریز (A_p) به داخل گره بالادست رودخانه (N_{RU}) جریان پیدا می‌کند و ۱۰ درصد از آن به داخل سفره‌های آب زیرزمینی نفوذ می‌کند. در این مطالعه به دلیل اینکه قسمت عمده حوضه آبریز مربوط به استان اصفهان و به خصوص مناطق تحت بررسی است، فرض بر این است که کل این ۴۰ درصد نفوذ و جریان در دشت‌ها و مناطق تحت بررسی است. به عبارت

(χ_{ij}^t) باشد (محدودیت ۱۴).

کمان‌های مربوط به خطوط لوله باید با یک حداقل انرژی، آب مورد نیاز گره‌های پایین دست را تأمین کنند. اگر اختلاف ارتفاع بین دو انتهای لوله نتواند بر افت فشار داخل لوله غلبه کند به نصب یک ایستگاه پمپ در کمان مربوطه منجر می‌شود. در محدودیت (۱۵) افت فشار در لوله به وسیله‌ی معادله داریسی-وایسباخ اندازه‌گیری می‌شود. دو جمله اول این محدودیت، انرژی افزوده شده به وسیله پمپ را نشان می‌دهد. بنابراین، حداقل انرژی افزوده شده به وسیله پمپ در محدودیت ۱۶ نشان داده شده است.

متغیرهای تصمیم جریان در کمان‌ها، فشار، پمپاژ، عمق کانال، ظرفیت پمپ و ظرفیت تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب باید غیر منفی باشند. همچنین، برای جلوگیری از ایجاد خطا در معادلات هیدرولیکی ۱۵ و ۱۶ متغیرهای تصمیم قطر لوله و ظرفیت پمپ نباید صفر باشند. به این منظور محدودیت‌های (۱۷) تا (۲۰) مربوط به حدود متغیرهای تصمیم ارائه می‌گردد. در این محدودیت‌ها ϵ یک عدد بسیار کوچک (10^{-5}) است و سطح عدم اطمینان را نشان می‌دهد و M_{ij}^0 یک عدد بزرگ در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

مسئله بهینه‌سازی در مطالعه حاضر شامل ۱۷۶ متغیر تصمیم با ۲۰ متغیر دوتایی بود. مدل برای احتمال انحراف محدودیت از کران آن به مقدار ۱۰٪ ($p=0/1$) بهینه شد. به عبارت دیگر، محدودیت‌هایی که در آنها پارامتر نامطمئن وجود دارد در حداقل ۹۰ درصد مواقع امکان پذیر باقی خواهند ماند. طبق رابطه‌ی $\Gamma_1, 3$ تا Γ_{14} به ترتیب برابر با: $\{2, 2, 1, 1, 2, 1, 3, 3, 4/2, 4/34, 4/61, 4/91, 4/93, 5/29\}$ است. در جدول ۲ جریان‌های تخصیصی به هرکمان و در هر دوره بهره‌برداری نشان داده شده است. با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که تقاضای آب شهری در مدل بهینه‌سازی با پارامترهای کنترل کننده میزان محافظه‌کاری با سطح احتمال $p=0/1$ تنها توسط گره تصفیه‌خانه آب تأمین می‌شود. میزان جریان تخصیصی از گره تصفیه‌خانه آب به گره مناطق شهری در طول دوره بهره‌برداری افزایش یافته است. این جریان از ۹/۰۷ مترمکعب در ثانیه در سال اول دوره بهره‌برداری به ۱۲/۵۹ مترمکعب در ثانیه در سال دهم دوره بهره‌برداری، به دلیل افزایش رشد جمعیت در طول این دوره، افزایش یافته است. سال اول بهره‌برداری ۱۳۹۴ و سال دهم ۱۴۰۳ است. میزان ذخیره آبهای زیرزمینی در سال اول دوره بهره‌برداری ۱۵۳/۰۷ کیلومتر مکعب بود که حدود ۴/۷ کیلومتر مکعب کمتر از میزان ذخیره آب زیرزمینی مورد نیاز برای حفظ قابلیت سیستم عرضه آب است (جدول ۱). این کمبود در ۵ سال اول دوره بهره‌برداری توسط خرید

آبهای ورودی و همچنین برداشت کمتر از گره آبهای زیرزمینی (جریان تخصیصی صفر برای تمام دوره‌های بهره‌برداری برای گره مناطق شهری و کم کردن جریان برای گره مناطق کشاورزی) تأمین خواهد شد. به دلیل تأمین کمبود آب در این دوره ۵ ساله، میزان بهره‌برداری از آبهای ورودی در دوره بهره‌برداری دوم (از سال ۶ تا ۱۰) صفر است. البته افزایش جریان تخصیصی از گره تصفیه‌خانه فاضلاب به مناطق کشاورزی از مقدار ۱/۷ مترمکعب در ثانیه در سال ۱۳۸۸ به مقدار ۸/۴۵ مترمکعب در ثانیه در سال اول و ۱۲/۰۲ مترمکعب در ثانیه در سال دهم بهره‌برداری رسید، و در نتیجه استفاده به مراتب کمتر از گره آبهای زیرزمینی برای مناطق کشاورزی موجب جبران قسمتی از کمبود ذخیره در گره آبهای زیرزمینی می‌شود. وجود هزینه‌ی مربوط به خرید آبهای ورودی باعث می‌شود که جریان‌های تخصیصی از گره آبهای ورودی به گره‌های تصفیه‌خانه آب و مناطق کشاورزی صفر شوند و مقدار آب مورد نیاز این دو گره از منابع دیگر تأمین شوند. برای تأمین میزان جریان آبی که از گره آبهای زیرزمینی به مناطق کشاورزی کسر شده، به میزان جریان آب از گره بالا دست رودخانه و تصفیه‌خانه فاضلاب به گره مناطق کشاورزی اضافه شده است. این اضافه جریان باعث می‌شود که ظرفیت تأسیسات تصفیه‌خانه فاضلاب از ۳/۷ مترمکعب در ثانیه در سال اول (۱۳۸۸) به ۹/۳۰ مترمکعب در ثانیه در اتمام دوره اول طراحی و به ۱۲/۰۲ مترمکعب در ثانیه در اتمام دوره دوم طراحی ارتقا یابد.

در جدول ۳ مقدار بهینه متغیرهای تصمیم مربوط به طراحی کانال‌ها در سیستم عرضه آب نشان داده شده است. با توجه به این جدول، تغییرات اندکی در توسعه کانال‌ها بین دو دوره طراحی وجود خواهد داشت. به دلیل وجود افزایش تقاضا برای آب شرب، عمق کانال انتقال آب از گره پایین دست رودخانه به گره تصفیه‌خانه آب از ۲/۶ متر در دوره طراحی اول به ۲/۹ متر در دوره طراحی دوم افزایش می‌یابد. برای جبران کمبود ذخیره آبهای زیرزمینی، یک کانال انتقال آب از گره آبهای ورودی به گره آبهای زیرزمینی (حوضچه‌های تغذیه آب مصنوعی) با عمق ۳/۳ متر مورد نیاز است. ملاحظه می‌شود که حتی با وجود اینکه جریان انتقالی توسط این کانال در دوره دوم طراحی صفر است (جدول ۲)، برای جبران کمبود ذخیره آب در گره آبهای زیرزمینی، احداث این کانال ضروری است. همچنین، هزینه زیاد برای خرید آبهای ورودی و فاصله زیاد این گره با گره‌های تصفیه‌خانه آب و مناطق کشاورزی موجب حذف کمان‌ها از گره آبهای ورودی به گره تصفیه‌خانه آب و مناطق کشاورزی می‌شود (شکل ۱). عمق کانال برای این کمان‌ها صفر شده است.

جدول ۲- جریان‌های تخصیصی (m^3/s) در طول دوره بهره‌برداری با سطح احتمال انحراف هر محدودیت از کران آن به مقدار ۱۰٪

| شرح | دوره بهره‌برداری | | | | | | | | | |
|--|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ۱۰ | ۹ | ۸ | ۷ | ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ |
| جریان تخصیصی از بالا دست رودخانه به تصفیه‌خانه آب (FRIUTWT) | ۱۲/۵۹ | ۱۲/۰۳ | ۱۱/۵۲ | ۱۰/۹۷ | ۱۰/۴۵ | ۹/۸۹ | ۹/۶۷ | ۹/۴۸ | ۹/۲۸ | ۹/۰۷ |
| جریان تخصیصی از بالا دست رودخانه به مناطق کشاورزی (FRIUTAG) | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۱۴ | ۹/۶۳ |
| جریان تخصیصی از آب‌های ورودی به تصفیه‌خانه آب (FIWTWT) | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| جریان تخصیصی از آب‌های ورودی به آب‌های زیرزمینی (FIWTGW) | . | . | . | . | . | ۶/۱۵ | ۲۲/۵۳ | ۲۲/۵۳ | ۲۲/۵۳ | ۲۲/۵۳ |
| جریان تخصیصی از آب‌های ورودی به مناطق کشاورزی (FIWTAG) | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| جریان تخصیصی از آب‌های زیرزمینی به مناطق شهری (FGWTD0) | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |
| جریان تخصیصی از آب‌های زیرزمینی به مناطق کشاورزی (FGWTAG) | ۵۶/۸۲ | ۵۶/۸۲ | ۵۶/۸۲ | ۵۶/۸۲ | ۵۶/۸۲ | ۵۷/۰۲ | ۵۷/۰۲ | ۵۷/۰۲ | ۵۷/۰۲ | ۵۷/۱۹ |
| جریان تخصیصی از تصفیه‌خانه آب به مناطق شهری (FWTTDO) | ۱۲/۵۹ | ۱۲/۰۳ | ۱۱/۵۲ | ۱۰/۹۷ | ۱۰/۴۵ | ۹/۸۹ | ۹/۶۷ | ۹/۴۸ | ۹/۲۸ | ۹/۰۷ |
| جریان تخصیصی از مناطق شهری به تصفیه‌خانه فاضلاب (FDOTWW) | ۱۲/۰۲ | ۱۱/۴۷ | ۱۰/۹۲ | ۱۰/۳۹ | ۹/۸۴ | ۹/۳۰ | ۹/۰۹ | ۸/۸۸ | ۸/۶۸ | ۸/۴۵ |
| جریان تخصیصی از تصفیه‌خانه فاضلاب به مناطق کشاورزی (FWWTAG) | ۱۲/۰۲ | ۱۱/۴۷ | ۱۰/۹۲ | ۱۰/۳۹ | ۹/۸۴ | ۹/۳۰ | ۹/۰۹ | ۸/۸۸ | ۸/۶۸ | ۸/۴۵ |
| جریان تخصیصی از تصفیه‌خانه فاضلاب به پایین دست رودخانه (FWWTRID) | . | . | . | . | . | . | . | . | . | . |

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول ۳- متغیرهای تصمیم مربوط به طراحی کانال‌ها با سطح احتمال انحراف هر محدودیت از کران آن به مقدار ۱۰٪

| شرح | عمق کانال (m) | |
|---|---------------|--------------|
| | دوره طراحی ۱ | دوره طراحی ۲ |
| جریان تخصیصی از بالا دست رودخانه به تصفیه‌خانه آب (FRIUTWT) | ۲/۶۰ | ۲/۹۰ |
| جریان تخصیصی از بالا دست رودخانه به مناطق کشاورزی (FRIUTAG) | ۲/۱۰ | ۲/۱۰ |
| جریان تخصیصی از آب‌های ورودی به تصفیه‌خانه آب (FIWTWT) | . | . |
| جریان تخصیصی از آب‌های ورودی به آب‌های زیرزمینی (FIWTGW) | ۳/۳۰ | ۳/۳۰ |
| جریان تخصیصی از آب‌های ورودی به مناطق کشاورزی (FIWTAG) | . | . |

منبع: یافته‌های تحقیق

ثانیه در دوره طراحی دوم افزایش می‌یابد. البته ظرفیتهای ذکر شده برای تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب فقط برای شهر اصفهان محاسبه شده است. ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه آب اصفهان هم اکنون ۱۲/۵ مترمکعب در ثانیه است که به مناطق دیگر غیر از شهر اصفهان نیز آبرسانی انجام می‌دهد. همچنین، به دلیل مقابله با کمبود ذخیره آب زیرزمینی، کمان مربوط به انتقال آب از گره آب‌های زیرزمینی به مناطق شهری حذف شده است (متغیر دوتایی مربوط به این کمان مقدار صفر را به خود اختصاص داده است). عدم وجود کمان (لوله) برای انتقال آب از گره تصفیه‌خانه فاضلاب به پایین دست رودخانه نیز دو دلیل عمده دارد. اول اینکه فاصله موجود بین گره تصفیه‌خانه فاضلاب و مناطق کشاورزی کمتر از پایین دست رودخانه است که

در جدول ۴ مقدار بهینه متغیرهای تصمیم مربوط به طراحی لوله‌ها و پمپ‌ها در سیستم عرضه آب نشان داده شده است. با توجه به این جدول ظرفیت پمپ‌ها برای انتقال آب از گره تصفیه‌خانه آب به گره مناطق شهری از ۷/۷۳ به ۹/۰۴ مترمکعب در ثانیه و برای انتقال فاضلاب تصفیه شده از گره تصفیه‌خانه فاضلاب به مناطق کشاورزی از ۷/۳۰ به ۹/۶۰ مترمکعب در ثانیه در بین دو دوره طراحی افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت در مورد تصفیه‌خانه آب این است که ظرفیت این گره از ۹/۸۹ مترمکعب در ثانیه در دوره طراحی اول به ۱۲/۵۹ مترمکعب در ثانیه در دوره طراحی دوم افزایش می‌یابد. ظرفیت تصفیه‌خانه فاضلاب نیز از ۸/۴۵ مترمکعب در ثانیه در دوره طراحی اول به ۱۲/۰۲ مترمکعب در

جدول ۴- متغیرهای تصمیم مربوط به طراحی لوله‌ها و پمپ‌ها در دو دوره طراحی با سطح احتمال انحراف هر محدودیت از کران آن به مقدار ۱۰٪

| شرح | قطر لوله (mm) | | ظرفیت پمپ (m ³ /s) | | فشار پمپ (هد) (m) | |
|--|---------------|--------------|-------------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | دوره طراحی ۱ | دوره طراحی ۲ | دوره طراحی ۱ | دوره طراحی ۲ | دوره طراحی ۱ | دوره طراحی ۲ |
| جریان تخصیصی از آب های زیرزمینی به مناطق شهری (FGWTD0) | - | - | - | - | - | - |
| جریان تخصیصی از آب‌های زیرزمینی به مناطق کشاورزی (FGWTAG) | - | - | ۶۱/۳۰ | ۶۱/۱۳ | ۱۰۲/۶۰ | ۱۰۲/۶۰ |
| جریان تخصیصی از تصفیه‌خانه آب به مناطق شهری (FWTTDO) | ۲۱۲ | ۲۱۲ | ۷/۷۳ | ۹/۰۴ | ۳۸/۲۰ | ۳۸/۲۰ |
| جریان تخصیصی از مناطق شهری به تصفیه‌خانه فاضلاب (FDOTWW) | ۱۹۷ | ۱۹۷ | ۱۱/۰۱ | ۱۱/۰۱ | ۲۱/۳۰ | ۲۱/۳۰ |
| جریان تخصیصی از تصفیه‌خانه فاضلاب به مناطق کشاورزی (FWWTAG) | ۱۸۳ | ۱۸۳ | ۷/۳۰ | ۹/۶۰ | ۱۰/۷۰ | ۱۰/۷۰ |
| جریان تخصیصی از تصفیه‌خانه فاضلاب به پایین دست رودخانه (FWWTRID) | - | - | - | - | - | - |

منبع: یافته‌های تحقیق

آن به حوضچه‌های تغذیه آب مصنوعی جبران می‌شود. هزینه خرید این مقدار آب معادل ۰/۶۵۶ میلیارد دلار است. کل هزینه مربوط به طرح نیز ۱/۳۱ میلیارد دلار برآورد شد. بنابراین، حدود ۵۰ درصد کل هزینه مربوط به خرید آبهای ورودی برای جبران کمبود مقدار آب موجود در گره آبهای زیرزمینی است.

۵- پیشنهاد

به دلیل کمبود شدید آب در سفره‌های آب زیرزمینی، اضافه کردن حوضچه‌های تغذیه‌ی آب مصنوعی در اطراف آبخوان‌ها توصیه می‌شود. بخش اعظم مصرف آبهای سطحی و زیرزمینی در مناطق کشاورزی است. بنابراین، می‌توان با افزایش راندمان آبیاری (استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته آبیاری) هزینه‌های مربوط به خرید آب برای تأمین کمبود ذخیره آب در گره آبهای زیرزمینی را کاهش داد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده سهم بخش صنعت و آبهای خروجی به‌عنوان گره‌های جداگانه، در محاسبات مربوط به بهینه‌سازی شبکه عرضه آب منظور شود. همچنین، فرض غیر متقارن بودن پارامترهای تصادفی موجود در مدل نیز می‌تواند در مطالعات آینده مد نظر قرار گیرد.

خود موجب کاهش هزینه است. دوم اینکه این امر موجب استفاده کمتر گره مناطق کشاورزی از گره آبهای زیرزمینی می‌شود. در نهایت هزینه کل مربوط به تابع هدف در این مطالعه برابر با $10^9 \times 1/31$ دلار برآورد گردید. از این هزینه $10^8 \times 6/56$ دلار به خرید آبهای ورودی از زیر شاخه‌های حوضه آبریز کارون (تونلهای کوه‌رنگ ۱، ۲ و چشمه‌لنگان) برای تأمین کمبود آبهای زیرزمینی اختصاص می‌یابد. در ضمن قیمت هر واحد حجم از آبهای ورودی ۰/۱۱۶ دلار به ازای هر متر مکعب آب در نظر گرفته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که به دلیل کمبود ذخیره آب در گره آبهای زیرزمینی تغییرات عمده‌ای در سیستم کنونی عرضه آب رخ می‌دهد. کاهش برداشت آب از این گره توسط حذف انتقال آب از گره آبهای زیرزمینی به مناطق شهری و کاهش برداشت آب از این گره برای گره مناطق کشاورزی (از مقدار ۷۰/۳ مترمکعب در ثانیه در سال ۱۳۸۸ به ۵۷/۱۹ مترمکعب در ثانیه در سال اول بهره‌برداری) باعث جبران مقداری از این کمبود در طی دوره بهره‌برداری می‌شود. البته قسمت عمده این کمبود توسط خرید آب‌های ورودی و انتقال

- 1-Watkins, D.W., and McKinney, D.C. (1997). "Finding robust solutions to water resources problems." *J. Water Resources Planning and Management*, 123 (1), 49-58.
- 2-Elshorbagy, W., Yakowitz, D., and Lansey, K. (1997). "Design of engineering systems using a stochastic decomposition approach." *J. Engineering Optimization*, 27 (4), 279-302.
- 3-Jenkins, M.W., and Lund, J.R. (2000). "Integrating yield and shortage management under multiple uncertainties." *J. Water Resources Planning and Management*, 126 (5), 288-297.
- 4-Lund, G.R., and Israel, M. (1995). "Optimization of transfer in urban water supply planning." *J. Water Resources Planning and Management*, 121 (1), 41-48.
- 5-Wilchfort, G., and Lund, J.R. (1997). "Shortage management modeling for urban water supply systems." *J. Water Resources Planning and Management*, 123 (4), 250-258.
- 6-Maqsood, I., Huang, G.H., and Yeomans, J.S. (2005). "An interval-parameter fuzzy two-stage stochastic program for water resources management under uncertainty." *European J. of Operational Reserch*, 165, 208-225.
- 7-Chung, G., Lansey, K., and Bayraksan, G. (2009). "Reliable water supply system design under uncertainty." *J. Environmental Modelling and Software*, 24 (4), 449-462.
- 8- Nabaviavpour, M., Pourabade, M., and Pourabade, T. (2008). "Water pipeline path optimization by artificial intelligence (fuzzy logic), case study: Water delivery to Siahpoush rural lands." *Fourth National Congress on Civil Engineering*, University of Tehran. (In Persian)
- 9- Tabesh, M., and Zabihi, M. (2008). "Effects of qualitative constraints in water distribution network optimization." *Fourth National Congress on Civil Engineering*, University of Tehran. (In Persian)
- 10- Rastegaripour, F., and Sbouhi, M. (2010). "An optimization model for kardeh reservoir operation using interval-parameter, multi-stage, stochastic programming." *J. Water and Wastewater*, 75, 88-98. (In Persian)
- 11- Borhani, A., and Moradi, A.M. (2010). "Application of ant-colony-based algorithms to multi-reservoir water resources problems." *J. Water and Wastewater*, 76, 81-91. (In Persian)
- 12- Hoseini Abari, S.H. (2000). *Zayandehrood, from source to swamp*, Golha Pub., Isfahan. (In Persian)
- 13- Safavi, H.R., and Afshar, A. (2006). "Integrated water resources modeling, case study: Zayandehrood basin." *Second Conference on Water Resources Management*, Isfahan University of Tech., Isfahan. (In Persian)
- 14- Mardani, M., Sakhdari, H., and Sabouhi, M. (2011). "Application of multi-objective programming and degree of conservative controller parameters in agricultural planning, the case study: Mashhad district." *J. Agricultural Economics Research*, 2, 161-187.
- 15- Regional Water Organization of Isfahan Province. (2008). *Statistics of water transfer between basins*, Isfahan. (In Persian)
- 16- Database of Regional Water Organization of Isfahan Province. (2009). *Department of basic studies of water resources*, <<http://www.esrw.ir/reports/studies-department.dot>>. (May 2009)

- 17- Jihad-e-Keshavarzi Organization of Isfahan Province. (2009). *Statistics relating to the use of agriculture inputs*, Isfahan. (In Persian)
- 18- Database of Mapping Organization of Iran. (2009). <<http://www.ncc.org.ir>>. (May 2009).
- 19-Bertsimas, D., and Sim, M. (2004). "The price of robustness." *Operations Research*, 52 (1), 35-53.
- 20-Clark, R.M., Sivaganesan, M., Selvakumar, A., and Sethi, V. (2002). "Cost models for water supply distribution systems." *J. Water Resources Planning and Management*, 128 (5), 312-321.
- 21-US. Army Corps of Engineers. (1980). *Methodology for areawide planning studies*, Engineer Technical Letter No. 1110-2-502, Washington, D.C.
- 22-Walski, T.M., Brill, E.D., Gessler, J., Goulter, I.C., Jeppson, R.M., Lansey, K., Lee, H., Liebman, J.C., Mays, L., Morgan, D.R., and Ormsbee, L. (1987). "Battle of the network models: Epilogue." *J. Water Resources Planning and Management*, 113 (2), 191-203.
- 23-Tang, C.C., Brill, E.D., and Pfeffer, J.T. (1987). "Optimization techniques for secondary wastewater treatment system." *J. Environmental Engineering*, 113 (5), 935-951.