dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

Original Paper

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No. 3, pp: 21-39

Determining the Minimum Price of Drinking Water and Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement in Urban Distribution Network

M. Vafaee[1], H. Nozari[2], S. Marofi[3]

1. PhD Student, Dept. of Water Engineering Science, Faculty of Agricultural, University of Bu Ali-Sina , Hamedan, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering Science, Faculty of Agricultural, University of Bu Ali-Sina, Hamedan, Iran
(Corresponding Author) hanozari@yahoo.com
3. Prof., Dept. of Water Engineering Science, Faculty of Agricultural, University of Bu Ali-Sina, Hamedan, Iran

(Received July 30, 2020 Accepted Nov. 10, 2020)

To cite this article:
Vafaee, M., Nozari, H., Marofi, S. 2021."Determining the minimump of drinking water and optimal scheduling of water pipe replacement in urban distribution network" Journal of Water and Wastewater, 32(3), 21-39.
Doi: 10.22093/wwj.2020.241842.3053 (In Persian)

Abstract

In urban water distribution networks, as the age of the pipes increased, the rates of pipe breakage and water losses increased which causes financial losses to the water and sewerage company. Therefore, to reduce the number of breaks and leaks in pipes, worn pipes should be replaced. Replacing old pipes is an expensive and costly procedure. Thus, it may be more economical to replace the pipe at the appropriate time. In this research, the urban water supply network of Hamedan was simulated by using system dynamics approach. Then the optimal time for pipe replacement was estimated by using analytical solution of the net present value equation and the combined method of system dynamics-net present value. Also, in order to improve the financial balance of Hamadan Water and Sewerage Company, the optimal price of drinking water was determined by using the Powell optimization algorithm method. Dynamic simulation was performed in VENSIM. To test the model, the simulated data were compared with the observed data collected from the water and sewerage organization of Hamedan over the period 2014 to 2018. To statistical analysis and calculating statistical, the root mean square error, standard error and correlation coefficient (R^2) were used. Base on the results, for the

Benefit-Cost variable, the RMSE index was calculated to be 0.006, the SE to be 0.010 and the R^2 to be 0.991. Comparison of the standard error showed that the difference between the observed and simulated values of the standard error of the Benefit-Cost variable is less than about one percent. The result indicate that the presented model has the very high accuracy. Base on the results of the study, the optimal time for pipe replacement is 2041. Finally, the results of this study show that the financial balance of the company can be increased by determining the optimal price of drinking water. However, the level of social welfare can be improved by increasing the renewal coefficient of pipes. Conclusion: Therefore, the system dynamics method and Powell algorithm can be used to determine the optimal scheduling of water pipe replacement, to reduce losses to water and sewage companies and to reduce the number of failure of water supply pipes.

Keywords: Replacement Time, Net Present Value, Optimization, Drinking Water Distribution Network, System Dynamics Approach.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۳، صفحه: ۳۹-۲۱

تعیین حداقل قیمت آب شرب و بهینه‌سازی زمان جایگزینی لوله‌های شبکه توزیع آب شهری

مریم وفایی[۱]، حامد نوذری[۲]، صفر معروفی[۳]

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
۲- دانشیار، گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(نویسنده مسئول) hanozari@yahoo.com
۳- استاد، گروه علوم مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(دریافت ۹۹/۵/۹ پذیرش ۹۹/۸/۲۰)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
وفایی، م.، نوذری، ح.، معروفی، ص.، ۱۴۰۰، " تعیین حداقل قیمت آب شرب و بهینه‌سازی زمان جایگزینی لوله‌های شبکه توزیع آب شهری"
مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۳)، ۳۹-۲۱. **Doi: 10.22093/wwj.2020.241842.3053**

چکیده

شکست لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب شهری به‌دلیل افزایش سن لوله‌ها، علاوه بر هدررفت قابل‌توجهی از آب شبکه، باعث زیان مالی شرکت آب و فاضلاب نیز می‌شود. بنابراین برای کاهش تعداد شکست لوله‌ها و جلوگیری از نشت، باید لوله‌های فرسوده را تعویض کرد. از سوی دیگر عملیات جایگزینی هزینه زیادی دارد. بنابراین تعیین زمان مناسب جایگزینی و نوسازی شبکه، برای کاهش تعداد شکست لوله‌های شبکه از یک سو و کاهش هزینه‌های تعویض از سوی دیگر، ضروری است. در این پژوهش با استفاده از روش پویای سیستم، شبکه آب‌رسانی شهر همدان شبیه‌سازی و سپس با استفاده از روش‌های حل تحلیلی معادله ارزش فعلی خالص و روش ترکیبی پویایی سیستم-ارزش فعلی، بهترین زمان جایگزینی لوله‌های شبکه، بهینه‌سازی شد. همچنین با استفاده از روش الگوریتم بهینه‌سازی پاول و به‌منظور بهبود توازن مالی شرکت آب و فاضلاب شهر همدان، میزان بهینه قیمت آب شرب تعیین شد. شبیه‌سازی به روش پویا در محیط برنامه‌نویسی VENSIM انجام شد و برای ارزیابی دقت روش‌های مذکور، از اطلاعات و داده‌های ۵ ساله (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷) شرکت آب و فاضلاب شهر همدان استفاده شد. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل آماری از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا، خطای استاندارد و ضریب تبیین استفاده شد. بر اساس نتایج، برای متغیر منفعت به هزینه، شاخص RMSE برابر ۰/۰۰۶، SE برابر ۰/۰۱۰ و R^2 برابر ۰/۹۹۱ محاسبه شد. خطای استاندارد متغیر منفعت به هزینه نشان داد که میزان اختلاف بین مقدار مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده این متغیر، کمتر از حدود یک درصد است که نشان از دقت بسیار بالای مدل دارد. طبق نتایج روش‌های ارائه شده در این پژوهش، زمان بهینه جایگزینی لوله‌ها در شبکه آب شرب شهر همدان، سال ۱۴۲۰ است. در نهایت، نتایج این پژوهش نشان داد که با تعیین قیمت بهینه آب شرب، می‌توان بیلان مالی شرکت را افزایش داد و علاوه بر جلوگیری از ضرردهی شرکت آب و فاضلاب، با افزایش ضریب نوسازی لوله‌ها، سطح رفاه اجتماعی را نیز بالا برد. بنابراین می‌توان از روش پویایی سیستم و الگوریتم پاول برای بهینه‌سازی حداقل قیمت آب شرب، کاهش زیان وارده به شرکت‌های آب و فاضلاب و کاهش تعداد شکست لوله‌های آب‌رسانی، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: زمان جایگزینی، ارزش فعلی، بهینه‌سازی، شبکه توزیع آب شرب، روش پویایی سیستم

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

۱- مقدمه

خرابی و شکست لوله‌ها در شبکه توزیع آب، چالش‌های زیادی را برای شرکت‌های آب و فاضلاب در سراسر جهان ایجاد می‌کند. خوردگی و پوسیدگی لوله‌ها منجر به شکست لوله‌ها، نشت جریان، کاهش ظرفیت حمل آب، افزایش هزینه‌های تعمیرات، کاهش ظرفیت آتش‌نشانی و آلودگی آب می‌شود (Qasemnezhad and Moteie, 2017).

یکی از راهکارها و کلیدهای مهم مدیریت بهینه بهره‌برداری، اتخاذ استراتژی‌های صحیح نوسازی و بازسازی در شبکه‌های توزیع آب شهری، پیش‌بینی نرخ شکست لوله‌ها و ارزیابی قابلیت کاربری آنها است (Kropp et al., 2009).

در کلان شهر تهران بر اساس وضعیت موجود تلفات آب بین ۲۵ تا ۳۰ درصد حجم کل آب تأمین است، یکی از عوامل اصلی آن، پوسیدگی و شکست لوله‌ها است (Jalili Ghazizadeh et al., 2008).

در کانادا و آمریکا در سال ۲۰۰۰ به‌طور متوسط ۷۰۰ شکست لوله در روز رخ داده است که هزینه‌ای معادل با ۱۰ میلیارد دلار در سال برای این دو کشور در بر داشته است (Kabir et al., 2015).

در شبکه‌های توزیع آب ایران نیز در سال ۱۹۹۷، حدود یک میلیون شکست گزارش شده است که بیش از ۲۰ درصد از کل درآمدهای شرکت آب و فاضلاب کشور را برای تعمیر، بازسازی و اصلاح به خود اختصاص داده است (Beigi, 1999).

در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی برای به حداقل رساندن هزینه‌های تحمیلی به سیستم تأمین آب انجام شده است. بر اساس نتایج این پژوهش‌ها، روش‌ها و مدل‌های گوناگونی به‌صورت فیزیکی، توصیفی و آماری برای نوسازی شبکه‌های آب‌رسانی و همچنین زمان جایگزینی بهینه معرفی شده است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های راهنمای عمومی نوسازی[1] اشاره کرد، این نوع مدل‌ها مشخص می‌کنند که کدامیک از لوله‌ها باید نوسازی شوند، ولی در آنها مسئله اولویت‌بندی نوسازی، با توجه به مسائلی مانند میزان بودجه در دسترس و وضعیت عملکرد شبکه مطرح نیست.

با استفاده از هزینه‌های ناشی از شکست و جایگزینی لوله‌ها، زمان بهینه جایگزینی لوله‌ها تعیین می‌شود (Shamir and Howard, 1979).

در پژوهشی دیگر، مدل برنامه‌ریزی اولویت‌بندی نوسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب را با کمترین اطلاعات قابل‌دسترس ارائه دادند. طبق نتایج فشار، سرعت جریان و قطر لوله از پارامترهای مؤثر در مدل برنامه‌ریزی نوسازی شبکه به شمار می‌رود (Salehi et al., 2018).

همچنین به توسعه مدل اولویت‌بندی برای بازسازی لوله‌های شبکه‌های توزیع آب با حداقل اطلاعات ساختاری پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که با مدل ارائه شده می‌توان با دقت قابل‌قبولی اولویت‌بندی و سیاست‌های بازسازی لوله‌های شبکه را تعیین کرد (Salehi et al., 2019).

مدل‌های بحران[2] نیز از جمله مدل‌هایی هستند که برنامه‌ریزی نوسازی در آنها بر مبنای ریسک شکست لوله و اثرات بحرانی این شکست بر وضعیت شبکه انجام می‌شود (Kleiner et al., 2010).

با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی، اثر هر لوله را در قالب عملکرد کل شبکه مورد توجه قرار می‌دهند. این مدل‌ها شامل مدل‌هایی از نوع بهینه‌سازی عملکرد سیستم با قید هزینه معلوم و مدل‌هایی از نوع حداقل‌سازی هزینه، با قید سطح عملکرد معلوم برای سیستم هستند (Tabesh and Karimi, 2006).

در پژوهشی یک رویکرد تحلیلی برای برنامه‌ریزی جایگزینی لوله را بررسی و روابط نمایی را برای تعیین زمان جایگزینی بهینه ارائه دادند (Shamir and Howard, 1979).

در پژوهشی دیگر قوانین جایگزینی لوله‌های اصلی آب را بیان کرد. والکسی مدل‌هایی برای پیش‌بینی شکست‌های مکرر و زمان جایگزینی به‌صورت روابط ریاضی و نمایی ارائه داد. ایشان در پژوهش خود نشان داد اگر هزینه نوسازی لوله‌های آب‌رسانی و مزایای حاصل از نوسازی و جایگزینی لوله‌ها با ارزش ریالی آن تعیین شود، می‌توان دوره جایگزینی را با تجزیه‌وتحلیل اقتصادی (منفعت به هزینه) محاسبه کرد (Walski,1987).

همچنین در پژوهشی به بررسی نقش نشت و شکست در شبکه‌های آب و راه‌حل‌های اقتصادی آن پرداختند. در این پژوهش روشی ارائه دادند که زمان جایگزینی بهینه برای لوله‌های شبکه آب را می‌توان محاسبه کرد. این کار از طریق تحلیل اقتصادی انجام شد که تمام هزینه‌های مربوط به تعمیرات و جایگزینی مورد توجه قرار

[1] Models of General Renovation Guideline

[2] Critical Models

گرفت و با استفاده از روش ارزش فعلی، تجزیه‌وتحلیل اقتصادی انجام شد.

در پژوهش بیان شده، زمان جایگزینی لوله‌های شبکه با توجه به جنس آنها بررسی شد. نتایج نشان داد بهینه‌ترین زمان جایگزینی متعلق به جنس لوله چدنی، با زمان ۶۹ سال است (Kanakoudis and Tolikas, 2001).

در پژوهشی دیگر سیاست جایگزینی بهینه برای لوله‌های منفرد در شبکه‌های توزیع آب بررسی شد. در این رابطه یک مدل ریاضی تهیه شده است که هدف آن پشتیبانی از تصمیم برای تعمیر یا تعویض لوله‌های اصلی در حالت عدم‌موفقیت است (Luong and Nagarur, 2001).

در پژوهش دیگری به برنامه‌ریزی برای نوسازی جریان لوله آب اصلی، ضمن در نظر گرفتن شکست لوله، زیر ساخت‌های اقتصادی آب پرداختند. در این پژوهش زمان جایگزینی بهینه و پیش‌بینی شکستگی لوله‌های آب، با استفاده از یک فرایند (پواسون غیرهمگن) تعیین شد (Kleiner et al., 2010).

در پژوهشی به رویکرد اقتصادی برای پیش‌بینی دوره بهینه نوسازی لوله آب بر اساس ریسک و میزان نرخ شکست اشاره شد (Kibum et al., 2019). این پژوهش روشی را برای محاسبه مزایای نوسازی لوله آب بر اساس برآورد ریسک تأمین آب‌رسانی ارائه می‌دهد. دوره نوسازی تعیین شده، با یک دیدگاه اقتصادی و بر اساس روش منفعت به هزینه به‌دست آمده است.

با استفاده از اطلاعات شکست لوله‌ها در شبکه توزیع آب، به تعیین زمان بهینه نشت‌یابی و نوسازی شبکه پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد با انجام ساده‌سازی‌هایی در محاسبه تابع تغییرات نرخ حوادث برحسب زمان، تعیین نحوه تغییر هزینه‌های واحد نسبت به زمان اهداف موردنظر در دستیابی به یک روش کاربردی برنامه‌ریزی نوسازی را با دقتی قابل‌قبول تأمین کند. طبق یافته‌های پژوهش، زمان بهینه نوسازی لوله‌ها با جنس‌های مختلف به‌ترتیب برای گالوانیزه و پلی‌اتیلن برابر ۱۴/۹ و ۱۶/۲ برحسب سال گزارش شد (Tabesh and Karimi, 2006).

با استفاده از مدل‌های رگرسیونی به پیش‌بینی میزان شکست لوله‌های شبکه توزیع آب شهری در ناحیه یک منطقه یک تهران پرداختند. نتایج نشان دادند که از میان مدل‌های آماری بررسی شده، مدل رگرسیون لجستیک عملکرد بهتری داشته و با احتمال بالاتری می‌تواند حوادث آینده را پیش‌بینی کند (Qasemnezhad and Moteie, 2017).

با توجه به پژوهش‌های انجام شده، محدودیت‌ها و پیچیدگی مدل‌هایی که تاکنون تهیه شده است و زمان‌بر بودن اجرای آنها، به ویژه انواع مدل‌های بهینه‌سازی که نیازمند داده‌های گسترده و متعددی است (Tabesh and Karimi, 2006)، در این مقاله روش پویایی سیستم پیشنهاد و ارائه شده است. البته پژوهش‌های مختلفی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم در خصوص شبیه‌سازی شبکه توزیع آب شرب انجام شده است. به‌عنوان مثال کی و چانگ در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ در شهر فلوریدا با استفاده از پویایی سیستم‌ها، اقدام به ارزیابی تقاضای آب خانگی کردند. نتایج نشان داد بین نرخ بیکاری و درآمد متوسط سالانه، به‌عنوان دو شاخص اصلی اقتصاد کلان و دیگر عوامل اقتصادی–اجتماعی تعاملاتی وجود دارد که باعث تأثیر بر تقاضای خانگی می‌شود (Qi and Chang, 2011).

در پژوهشی دیگر مدل پویایی را برای مدیریت آب شهری به‌منظور شبیه‌سازی تعاملات تقاضای آب شهری، جامعه، اقتصاد، آب و هوا و اقدامات حفاظت از آب برای شهر ماکائو به کار گرفتند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که جمعیت، تغییرات دما و بارندگی بر تقاضای آب اثر می‌گذارد. افزایش رشد اقتصادی باعث افزایش تقاضای آب در منطقه مورد مطالعه می‌شود. مدل پویایی سیستم نشان داد با اجرای برنامه یکپارچه حفاظت از آب و افزایش فرهنگ حفاظت از آن، تقاضای آب را ۱۷/۵ درصد در شهر ماکائو کاهش خواهد داد (Wei et al., 2016).

همچنین در پژوهشی به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی عرضه و تقاضای آب در شنزن با روش پویایی سیستم پرداختند. نتایج نشان داد در سال‌های آینده مقدار جدیدی از تولید آب سطحی و آب مصرفی داخلی سرانه و تلفات آب شبکه در این منطقه اضافه می‌شود (Tianhonga et al., 2019).

فرمانی انتظام و همکاران در سال ۲۰۱۹ سیاست‌های پایدار آب شرب شهری را با رویکرد پویایی سیستم در شهر قم بررسی کردند. در این پژوهش با به‌کارگیری پویایی سیستم و استفاده از محیط VENSIM، سیاست‌های پایداری آب شرب شهری در یک افق ۳۰ ساله شناسایی و ارائه شد (Fermani Eantzam et al., 2019).

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

با بررسی پژوهش‌های انجام شده پیشین، ملاحظه می‌شود تاکنون از روش پویایی سیستم، برای شبیه‌سازی سیستم شبکه توزیع آب شرب و تعیین بهترین زمان جایگزینی لوله‌های شبکه، استفاده نشده است. همچنین پژوهشی روی تعیین حداقل قیمت آب شرب برای کاهش ضرر و زیان شرکت آب و فاضلاب با استفاده از روش ترکیبی پویایی سیستم و الگوریتم بهینه‌سازی پاول انجام نشده است. به همین منظور با توجه به ضرورت مدیریت منابع آب و بهبود و توسعه شیوه‌های مدیریتی از یک سو و مزایای استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در حل مسائل، از قبیل سرعت اجرای بالا و امکان دسترسی کاربر به خطوط برنامه، سادگی حذف یا اضافه کردن یک پارامتر و بررسی تأثیر آن بر کل سیستم از سوی دیگر، تصمیم به استفاده از روش تحلیل پویایی سیستم در شبیه‌سازی شبکه توزیع آب شرب گرفته شد. همچنین به‌منظور تعیین بهترین زمان جایگزینی لوله‌های شبکه، از روش ترکیبی پویای سیستم-ارزش فعلی خالص [1] استفاده و نتایج آن با نتایج حل تحلیلی معادله ارزش فعلی خالص [2] مقایسه شد. از سوی دیگر به منظور تعیین حداقل قیمت آب شرب برای کاهش ضرر و زیان شرکت آب و فاضلاب شهر همدان و کاهش تعداد شکست لوله‌های آب‌رسانی، از روش پاول که یک روش بهینه‌سازی مستقیم و از کاراترین و دقیق‌ترین روش‌های حل مسائل بهینه‌یابی نامقید برای مسائل گسسته به شمار می‌رود، استفاده شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مورد بررسی

در این پژوهش از اطلاعات دریافتی ۵ ساله (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷) سازمان آب و فاضلاب شهر همدان استفاده شد. جمعیت شهری ۵۸۴۵۲۴ نفر، جمعیت تحت پوشش آب شهری ۵۵۴۵۲۴ نفر، تعداد مشترکین آب خانگی ۲۰۳۵۳۴ فقره، تعداد مشترکین آب غیرخانگی ۱۱۱۳۰ فقره، قدمت لوله‌های شبکه، ۱تا ۲۵ سال، طول شبکه توزیع آب ۱۰۵۱ کیلومتر، طول خط انتقال آب ۱۷۴/۱۴ کیلومتر و تعداد انشعابات آب ۱۶۹۰۷۴ فقره است. همچنین تعداد شکستگی در شبکه توزیع آب در سال ۱۳۹۷ برابر ۶۴۰ برحسب تعداد شکست‌ها در هر کیلومتر از لوله در سال بوده است.

فرض می‌شود که تغییرات نرخ شکست برحسب زمان به‌صورت خطی است (Tabesh and Karimi, 2006).

۲-۲- روش‌شناسی پژوهش

۲-۲-۱- روش مدل‌سازی پویایی سیستم

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی سیستم توزیع آب شهری، از رویکرد پویایی سیستم و از محیط برنامه‌نویسی VENSIM DSS که ابزاری برای مدل‌سازی به زبان پویایی سیستم است، استفاده شد. این روش مبتنی بر مکانسیم‌های بازخوردی پویا در سیستم‌ها است و با تکیه بر نمودارهای علت و معلولی، چگونگی وقوع وقایع را توضیح می‌دهد (Hosseini, 2009). فرایندهای بازخوردی شامل حلقه‌های بازخوردی مثبت و منفی است که روابط علت و معلولی یک سیستم را نشان می‌دهند و در واقع، ساختار اصلی یک سیستم هستند. در صورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته در یک جهت باشند رابطه عِلّی مثبت و در صورتی که تغییرات متغیر مستقل و وابسته عکس یکدیگر باشند، رابطه عِلّی منفی خواهد بود. پس از ترسیم نمودارهای علت و معلولی باید نمودارهای حالت و جریان را ترسیم کرد. با استفاده از ساختارهای ذخیره و جریان، تأخیر زمانی و عملکردهای غیرخطی توضیح داده می‌شود (Sterman, 2000). در واقع، حالت‌ها انباشتگی‌های سیستم هستند و نشان‌دهنده وضعیت سیستم بوده و تصمیم‌ها و فعالیت‌های سیستم بر پایه آنها انجام می‌شود. جریان‌ها نیز نشان‌دهنده فرایندهایی هستند که متغیر حالت را پر یا خالی می‌کنند. می‌توان گفت که در یک سیستم، بر اساس متغیر حالت، تصمیم‌ها اتخاذ شده و با تغییر متغیرهای جریان آن، تصمیم‌ها اعمال می‌شوند (Nozari et al., 2018).

۲-۲-۲- روش NPV

در علم اقتصاد، ارزش فعلی [3]، وجوه نقدی است که در آینده به‌طور یک جا، یا به مرور، دریافت یا پرداخت خواهد شد. ارزش فعلی با تغییر نرخ تنزیلی (نرخ بهره) که برای دریافت‌ها یا پرداخت‌های آینده استفاده می‌شود، تغییر می‌کند. یکی از اساسی‌ترین مفاهیم در امور مالی این است که، پول دارای ارزش زمانی است و وجوه نقد در حال حاضر، ارزشی بیش از وجوه نقدی دارد که انتظار می‌رود در

[1] System Dynamic-Net Present Value (SD-NPV)
[2] Net Present Value (NPV)
[3] Present Value

آینده دریافت شود (Mohammadi and Safaei, 2015). به‌عبارت دیگر یک دلار دریافت شده در زمان حال را می‌توان سرمایه‌گذاری کرد، به طوری که در زمان آینده، بیش از یک دلار خواهد شد (Andreou, 1987, Brown and Abraham, 2012).

مجیدیان در سال ۱۹۹۷، در روش NPV، تمامی هزینه‌ها یا درآمدها بسته به اینکه در چه زمانی به وقوع خواهند پیوست را با نرخ بهره مناسبی طبق معادله ۱ محاسبه کرد (Majidian, 1997)

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{CR_t}{(1+R)^t} \qquad (۱)$$

که در آن

t زمان انجام هزینه یا واقع شدن درآمد، R نرخ بهره و CR_t مقدار هزینه بر اساس جریان نقدینگی است. پروژه‌ای اقتصادی‌تر است که که ارزش فعلی هزینه‌هایش کمتر باشد (Sconezhad, 1996).

۲-۲-۳- روش برآورد حل تحلیلی معادله NPV

کاناکودیس و تولیکاس تغییرات نرخ شکست برحسب زمان را به‌صورت تابع نمایی نشان دادند و همچنین آنالیز اقتصادی را براساس فرض تابع سن شکست لوله‌ها بررسی کردند (معادله ۲) (Kanakoudis and Tolikas, 2001)

$$N(t) = N(t_0) * e^{A(t-t_0)} \qquad (۲)$$

که در آن

$N(t)$ تعداد شکست‌ها در زمان t در هر کیلومتر از لوله، $N(t_0)$ تعداد شکست‌ها در زمان t_0، A نرخ رشد برحسب بر سال، t زمان برحسب سال و t_0 زمان اولیه اجرای مدل برحسب سال است. در پژوهش‌های انجام شده در بسیاری از شبکه‌های آب شرب، پارامتر A در بازه بین ۰/۱۵۰ تا ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است (Andreou.,1993).

نرخ رشد نیز، متوسط تغییری است که هر سال در یک دوره خاص اتفاق می‌افتد. در این پژوهش روش محاسبه پارامتر A طبق اختلاف تعداد شکست لوله‌ها در گذشته و حال و تقسیم حاصل آن بر تعداد شکست لوله‌ها درگذشته به‌دست آمده است (Mark et al., 2010).

نرخ رشد شکست لوله‌ها از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ محاسبه می‌شود و در نهایت از نرخ‌های شکست لوله‌های محاسبه شده میانگین هندسی گرفته می‌شود. بنابراین طبق محاسبات انجام شده در منطقه مورد ارزیابی، پارامتر A برابر ۰/۱۵۰ محاسبه شد.

هزینه‌های تعمیر لوله‌های شبکه $C_{Rr}(t)$، را می‌توان مطابق با معادله زیر محاسبه کرد

$$C_{Rr}(t) = UC_{Rr} * N(t) = UC_{Rr}(t) * N(t_0) \qquad (۳)$$

که در آن

UC_{Rr} هزینه واحد تعمیرات برحسب ریال در تعمیر است. کاناکودیس و تولیکاس مقدار NPV هزینه‌های تعمیرات را برابر با معادله ۴ دانستند (Kanakoudis and Tolikas, 2001)

$$PV[C_{Rr}(t)] = \frac{C_{Rr}(t)}{(1+R)^{(t-t_p)}} = \frac{UC_{Rr} * N(t)}{(1+R)^{(t-t_p)}} = \frac{UC_{Rr}(t) * N(t_0) * e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{(t-t_p)}} \qquad (۴)$$

که در آن

t_P زمان فعلی و R میانگین نرخ تورم سالانه برحسب درصد است. بازه تغییرات این پارامتر در پژوهش‌های گذشته با توجه به منطقه مورد مطالعه‌ای متفاوت بوده است. تابش و کریمی پارامتر R را ۲۵ درصد و همچنین عظیمی و همکاران، نرخ تورم سالانه را برابر ۲۱/۵ درصد در نظر گرفتند (Azimi et al., 2013, Tabesh and Karimi, 2006).

در علم اقتصاد، متداول‌ترین و در عین حال صحیح‌ترین راه محاسبه نرخ تورم متوسط ۱۲ ماه سال است (Parsa et al., 2018).

در این پژوهش نیز اختلاف درصد مجموع تغییرات قیمت آب مصرفی خانوار در ۱۲ ماهه سال مبنا (۱۳۹۷) نسبت به سال قبل (۱۳۹۶) برحسب درصد محاسبه و در نهایت با میانگین وزنی سال ۱۳۹۷ با توجه به سال ما قبل در منطقه موردنظر، میانگین نرخ تورم سالانه ۲۵ درصد محاسبه شد.

زمان جایگزینی لوله‌های شبکه آب شرب در سال‌های آینده در واقع در سال t_r اتفاق می‌افتد، با توجه به این مسئله، اگر اختلاف NPV هزینه کلی تعمیرات با زمان فعلی (t_r-t_p) در نظر گرفته شود،

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

می‌توان نوشت

$$PV[\sum UC_{Rr}(t)] = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{UC_{Rr}(t)}{(1+R)^{(t-t_p)}} = \sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{UC_{Rr}(t) * N(t_0) * e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{(t-t_p)}} \quad (۵)$$

که در آن

t زمان جایگزینی لوله‌های شبکه آب شرب است. همچنین ارزش فعلی هزینه‌های مربوط به جایگزینی لوله‌ها، مطابق با معادله ۶ است

$$PV[C_{Rm}(t_r)] = \frac{UC_{Rm}}{(1+R)^{(t_r-t_p)}} \quad (۶)$$

که در آن

UC_{Rm} هزینه واحد جایگزینی برحسب ریال در کیلومتر است. با توجه به معادلات بیان شده، NPV معادل مجموع ارزش فعلی کلیه هزینه‌های مرتبط است. بنابراین می‌توان نوشت

$$PV[\sum C_{tot}(t_r)] = PV[\sum UC_{Rr}(t_r)] + PV[\sum UC_{Rm}(t_m)] = \left[\sum_{t=t_p}^{t_r} \frac{UC_{Rr}(t) * N(t_0) * e^{A(t-t_0)}}{(1+R)^{(t-t_p)}}\right] + \frac{UC_{Rm}}{(1+R)^{(t_r-t_p)}} \quad (۷)$$

به منظور بهینه‌سازی زمان جایگزینی، می‌توان از عبارت فوق برحسب t_r با فرض مثبت بودن معادله $(1+R)^{(t_r-t_p)}$ مشتق‌گیری کرد و معادله مذکور را برابر صفر قرار داد (معادله ۸)

$$((A * UC_{Rr} * N(t_0) * e^{A(t_r-t_0)}) - (Ln(1+R) * UC_{Rr} * N(t_0) * e^{A(t_r-t_0)})) - (UC_{Rm} * Ln(1+R)) = 0 \quad (۸)$$

پس از ساده‌سازی معادله ۸ می‌توان زمان جایگزینی بهینه را به‌صورت زیر محاسبه کرد

$$t_r = t_0 + (\frac{1}{A}) * Ln(\frac{UC_{Rm} * Ln(1+R)}{A * |(A - Ln(1+R))| * UC_{Rr} * N(t_0)}) \quad (۹)$$

به‌منظور محاسبه چرخه زمان جایگزینی بهینه t_c، می‌توان نوشت

$$t_c = t_r - t_0 \quad (۱۰)$$

۲-۲-۴- الگوریتم بهینه‌سازی پاول

روش پاول گسترده‌ترین روش بهینه‌سازی عددی نامقید برای مسائل گسسته است و بر پایه مطالعات نسبتاً عمیق و جدی روی توابع کوادراتیک (مجذوری) بنا شده است. این روش منجر به یک کلاس بسیار مهم و رایج در روش‌های بهینه‌سازی موسوم به برنامه‌ریزی مجذوری شده است (Rao, 2009).

روش پاول از یک نقطه (حدس اولیه) شروع می‌کند و در هر مرحله تکرار، در راستای جهت‌های مزدوج جستجو کرده تا به نقطه بعدی برسد. آن‌قدر این کار ادامه پیدا کرده تا به کمینه تابع هدف برسد. می‌توان این روش را به‌عنوان یک روش شبه‌نیوتون و همچنین گرادیان مزدوج نیز در نظر گرفت (Powell, 1962).

ایده اصلی روش پاول به این‌صورت است که در ابتدای تکرار، ماتریس تبدیل مختصات به‌صورت ماتریس واحد در نظر گرفته می‌شود ولی در تکرارهای بعدی، ماتریس مربوطه به روز شده تا در نهایت به معکوس هسین[1] تبدیل شود. نظری و چهکندی‌نژاد در سال ۲۰۱۶، گام‌های مربوط به این روش را به‌صورت زیر بیان داشتند: مرحله اول: X_i نقطه آغازین است. به‌طوری که اگر ماتریس H_i در نقطه شروع i=0 باشد، $I = H_0$ (I ماتریس واحد است) به‌صورت ماتریس n×n مثبت معین متقارن بوده است (Nazari and Chekhandi Nejad, 2016). مرحله دوم: گرادیان تابع، ∇f_i در نقطه X_i محاسبه و جهت جستجو به صورت زیر انتخاب می‌شود

$$S_i = -S_i \times \nabla f_i \quad (۱۱)$$

مرحله سوم: با توجه به گام بهینه از نقطه X_i شروع شده و در جهت S_i، تابع (با λ بهینه) کمینه می‌شود. این کمینه میانی در نقطه X_{i+1} اتفاق می‌افتد به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$X_{i+1} = X_i + (\lambda_{i+1} \times H_i \times (\nabla f(X_i))) \quad (۱۲)$$

مرحله چهارم: نقطه جدید X_{i+1} برای بهینگی آزمایش می‌شود. اگر X_{i+1} بهینه باشد، فرایند تکراری متوقف می‌شود، در غیر این صورت مرحله پنجم انجام می‌شود. مرحله پنجم: ماتریس H_i به‌صورت زیر به روز می‌شود

[1] Hessian

$$H_i = H_{i-1} + M_i + N_i \quad (۱۳)$$

ماتریس M_i و N_i در معادله ۱۳ توسط معادلات زیر ارائه می‌شوند

$$M_i = \left(\frac{(X_i - X_{i-1})}{(X_i - X_{i-1})^T}\right) \times \frac{(X_i - X_{i-1})^T}{(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1}))} \quad (۱۴)$$

$$N_i = -\frac{(H_{i-1} \times (\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})))}{(\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1}))^T} \times \frac{(H_{i-1} \times (\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})))^T}{(H_{i-1} \times (\nabla f(X_i) - \nabla f(X_{i-1})))} \quad (۱۵)$$

به‌طور دقیق‌تر ماتریس‌های M_i و N_i دارای خواص زیر هستند

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = H_{i-1} \qquad \sum_{i=1}^{n} N_i = -H_i \quad (۱۶)$$

دو ماتریس فوق طوری نرمالیزه شده و مشابه مشتق اول و دوم پیشنهاد داده شدند که نهایتا ماتریس H_i همواره مثبت معین باقی می‌ماند و یک تقریب برای معکوس ماتریس مشتق‌های جزئی مرتبه دوم تابع هدف f خواهد بود. آنگاه الگوریتم مزبور بعد از n تکرار علاوه بر رسیدن به نقطه بهینه *X، H_i به ماتریس هسین i^{*-1} همگرا می‌شود (Nazari and Chekhandi Nejad, 2016).

۲-۲-۵- شاخص منفعت به هزینه

این شاخص نسبت درآمدها به هزینه‌ها بوده و روشی برای ارزیابی عملکرد اقتصادی است (Kibum et al., 2019)

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=1}^{n} B_t}{\sum_{t=1}^{n} C_t} \quad (۱۷)$$

که در آن

B کل درآمدها برحسب ریال، C کل هزینه‌ها برحسب ریال، B_t درآمدها در زمان t برحسب ریال و C_t هزینه‌ها در زمان t برحسب ریال است.

بر اساس صورت‌های مالی شرکت آب و فاضلاب شهر همدان، درآمدها شامل : درآمدهای متفرقه (تغییر مکان و وسایل اندازه‌گیری، خدمات قطع و وصل، تغییر نام پرونده، صدور نام و کارشناسی)، درآمدهای سرمایه‌ای و درآمدهای فروش آب هستند. همچنین، هزینه‌های شرکت عبارت‌اند از: هزینه‌های جایگزینی، هزینه‌های تعمیرات، هزینه تلفات آب، هزینه خرید آب و سایر هزینه‌ها (استهلاک وحقوق کارمندان و برق مصرفی) است.

۲-۲-۵-۱- توابع هدف

توابع هدف موردنظر در این پژوهش عبارت‌اند از: ۱) افزایش سود شرکت آب و فاضلاب در فرایند توزیع (معادله ۱۸) و ۲) افزایش قابلیت اعتماد شبکه آب شرب است (معادله ۱۹)

$$\text{Min } (1 - \frac{B}{C})^2 \quad (۱۸)$$

$$\text{Min } N(t) \quad (۱۹)$$

۲-۲-۵-۲- قیود

قیدها محدودیت‌هایی هستند که با توجه به شرایط، به مسئله بهینه‌سازی تحمیل می‌شوند. قیود موجود در این پژوهش به صورت زیر تعریف شده است

$$0 \le \text{Wup} \le 100000 \quad (۲۰)$$

$$0 \le \text{Fl} \le 1 \quad (۲۱)$$

که در آنها

WUP [1] پارامتر قیمت واحد آب است که بین صفر تا ۱۰۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. همچنین FL [2] ضریب نوسازی است، در بازه بین صفر تا ۱ قابل‌تغییر است. در این پژوهش سعی می‌شود

[1] Water Unit Praice (WUP)
[2] Fraction Length (FL)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

با توجه به سناریوهای بیان شده اقدام به بهینه‌سازی شود.

۲-۲-۶- شاخص‌های آماری

به منظور ارزیابی و اعتباریابی نتایج مدل، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا [1]، خطای استاندارد [2] و ضریب همبستگی [3] (R^2) استفاده شد

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_m - Y_p)^2}{n}} \quad (۲۲)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\frac{1}{n}\sum (Y_m - Y_p)^2}{\overline{Y}_m}} \quad (۲۳)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Y_m - \overline{Y}_m)(Y_p - \overline{Y}_p)\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_m - \overline{Y}_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_p - \overline{Y}_p)^2} \quad (۲۴)$$

که در آنها

n تعداد روزهای دوره مورد بررسی، Y_m مقدار اندازه‌گیری شده در هر روز، Y_p مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل، $\overline{Y}_m$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و $\overline{Y}_p$ میانگین داده‌های پیش‌بینی شده است.

۲-۲-۷- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت روشی است که درآن با استفاده از مدل‌سازی یک سیستم، روابط بین پارامترهای ورودی تعیین شده و سپس تأثیر هریک از این پارامترها بر نتیجه و خروجی مدل سنجیده می‌شود تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را بر نتیجه دارند، به‌عنوان حساس‌ترین و مهم‌ترین متغیرهای ورودی شناسایی شوند. بنابراین در این پژوهش، پس از اطمینان از عملکرد صحیح مدل در شبیه‌سازی شاخص منفعت به هزینه شبکه آب شرب، آنالیز حساسیت در دوره ۵ ساله ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ برای پارامترهای مؤثر بر شاخص منفعت بر هزینه با استفاده از معادله ۲۵ محاسبه شد (Guo et al., 2011)

$$SQ_i = \left| \frac{\left[\frac{\Delta Q(t)}{Q(t)}\right]}{\left[\frac{\Delta X(t)}{X(t)}\right]} \right| \quad (۲۵)$$

که در آن

$Q(t)$ نشانگر حالت سیستم در زمان t، $X(t)$ نمایانگر پارامترهایی از سیستم که بر حالت سیستم در زمان t تأثیر می‌گذارند، SQ_i درجه حساسیت حالت Q به پارامتر X است. $\Delta Q(t)$ و $\Delta X(t)$ به‌ترتیب افزایش حالت Q و پارامتر X در زمان t را نشان می‌دهد.

همچنین برای n متغیر حالت $Q_1,Q_2,\ldots,Q_n$ درجه حساسیت عمومی سیستم در زمان t به‌صورت معادله زیر است (Guo et al., 2011).

$$S = (1/n)\sum_{i=1}^{n} SQ_i \quad (۲۶)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- یافته‌های روش مدل‌سازی SD-NPV

شکل ۱ مدل مفهومی وضعیت شبکه آب شرب شهر همدان را نشان می‌دهد. به‌عنوان نمونه، در حلقه شماره ۱، با افزایش نرخ رشد شکست لوله‌ها میزان شکست در لوله‌ها افزایش می‌یابد و باعث افزایش نرخ رشد شکست لوله‌ها شده و این حلقه به‌صورت یک حلقه مثبت تعریف می‌شود. حلقه شماره ۲ با افزایش شکست لوله‌های شبکه، میزان تلفات آب افزایش یافته و این امر باعث افزایش نوسازی خواهد شد. بنابراین سن لوله‌ها کاهش یافته و سبب کاهش شکست لوله‌ها می‌شود این حلقه به صورت حلقه منفی است. از سوی دیگر افزایش نوسازی لوله‌های شبکه باعث افزایش هزینه‌های واحد نوسازی و به تبع آن افزایش هزینه‌های عملیاتی (تعمیرات و تعویض) می‌شود و در نهایت باعث تشکیل حلقه مثبت می‌شود (حلقه شماره ۳). همچنین با افزایش سن لوله‌های شبکه، عملکرد خدمات شبکه کاهش یافته و نارضایتی مردم افزایش می‌یابد و فشار به مدیر شرکت آب و فاضلاب برای بالا بردن کیفیت خدمات رسانی افزایش می‌یابد و با افزایش میزان نوسازی لوله‌های شبکه، سن لوله‌ها کاهش می‌یابد و حلقه منفی را تشکیل

[1] Root Mean Square Error (RMSE)
[2] Standard Error (SE)
[3] Correlation Coefficient

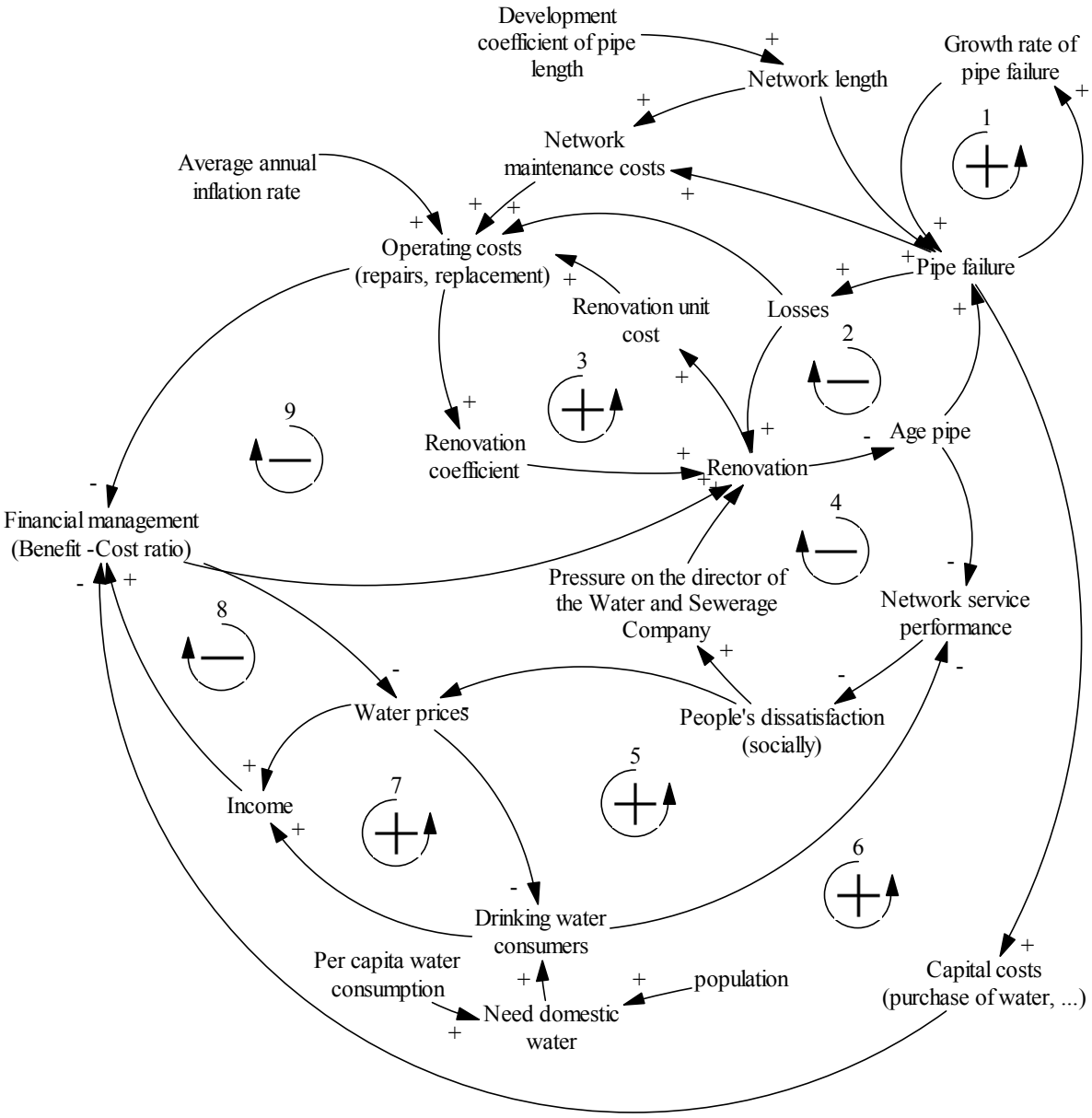

Fig. 1. Causal diagram for the dynamics model of drinking water distribution network in Hamadan

شکل ۱- نمودار علت و معلولی مدل پویایی شبکه توزیع آب شرب شهر همدان

می‌دهد (حلقه شماره ۴). در حلقه شماره ۵ با کاهش عملکرد خدمات شبکه، نارضایتی مردم افزایش یافته و باید قیمت آب کاهش یابد و همین امر باعث افزایش میزان مصرف آب شرب مصرف‌کنندگان و در نهایت باعث کاهش عملکرد خدمات شبکه آب شرب می‌شود. در حلقه ۶ با کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای، شاخص منفعت به هزینه کاهش می‌یابد و باعث کاهش نوسازی می‌شود و بنابراین سن لوله‌ها افزایش یافته و سبب افزایش شکست لوله‌ها و در نهایت باعث افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای می‌شود. همچنین در حلقه شماره ۷، قیمت آب با میزان مصرف آب شرب از سمت مصرف‌کنندگان نسبت عکس داشته و میزان مصرف آب با درآمد نسبت مستقیم دارد. از سوی دیگر افزایش درآمد باعث افزایش شاخص منفعت به هزینه می‌شود. در صورتی که شاخص منفعت به هزینه افزایش یابد می‌توان قیمت آب را کاهش داد. در حلقه شماره ۸، افزایش درآمد باعث افزایش شاخص منفعت به هزینه می‌شود و

dx.doi.org/10.22093/wwj.2020.241842.3053

با افزایش شاخص منفعت به هزینه، می‌توان قیمت آب را کاهش داد که حلقه منفی را تشکیل می‌دهد. همچنین در حلقه شماره ۹ با افزایش نوسازی لوله‌های شبکه، میزان هزینه واحد نوسازی افزایش می‌یابد و باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود و میزان مدیریت مالی (شاخص منفعت به هزینه) کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه شاخص منفعت به هزینه ارتباط مستقیم با میزان نوسازی لوله‌های شبکه دارد، حلقه منفی را تشکیل می‌دهد.

شکل ۲ ساختار حالت و جریان را در این پژوهش نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که طول شبکه، سن شبکه و مجموع هزینه‌های تعمیرات به‌صورت متغیر حالت و نوسازی، طول توسعه یافته و هزینه‌های تعمیرات نسبت به زمان فعلی به‌صورت نرخ‌های جریان تعریف شده است. سایر متغیرها نیز به‌عنوان متغیر کمکی هستند.

۳-۲- نتایج اعتبارسنجی از نظر رویکرد اقتصادی (شاخص منفعت به هزینه)

پس از شبیه‌سازی مدل، یکی از موارد مورد توجه این است که آیا مدل طراحی شده رفتاری مشابه با داده‌های مشاهده‌ای دارد یا خیر. با توجه به اینکه تابع هدف مورد ارزیابی در این پژوهش شاخص منفعت به هزینه بوده و هدف از این پژوهش نیز بررسی رویکرد اقتصادی شرکت آب است، این پارامتر به‌عنوان یک پارامتر مرجع برای مقایسه با شرایط واقعی در نظر گرفته شد. شکل ۳ نتایج مربوط به شاخص منفعت به هزینه مشاهداتی را با مقدار شبیه‌سازی مقایسه می‌کند. شاخص‌های آماری RMSE، SE و R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۶، ۰/۰۱ و ۰/۹۹۱ (بدون بعد) است، با توجه به این نتایج می‌توان گفت، مدل توسعه داده شده در این پژوهش دقت زیادی دارد.

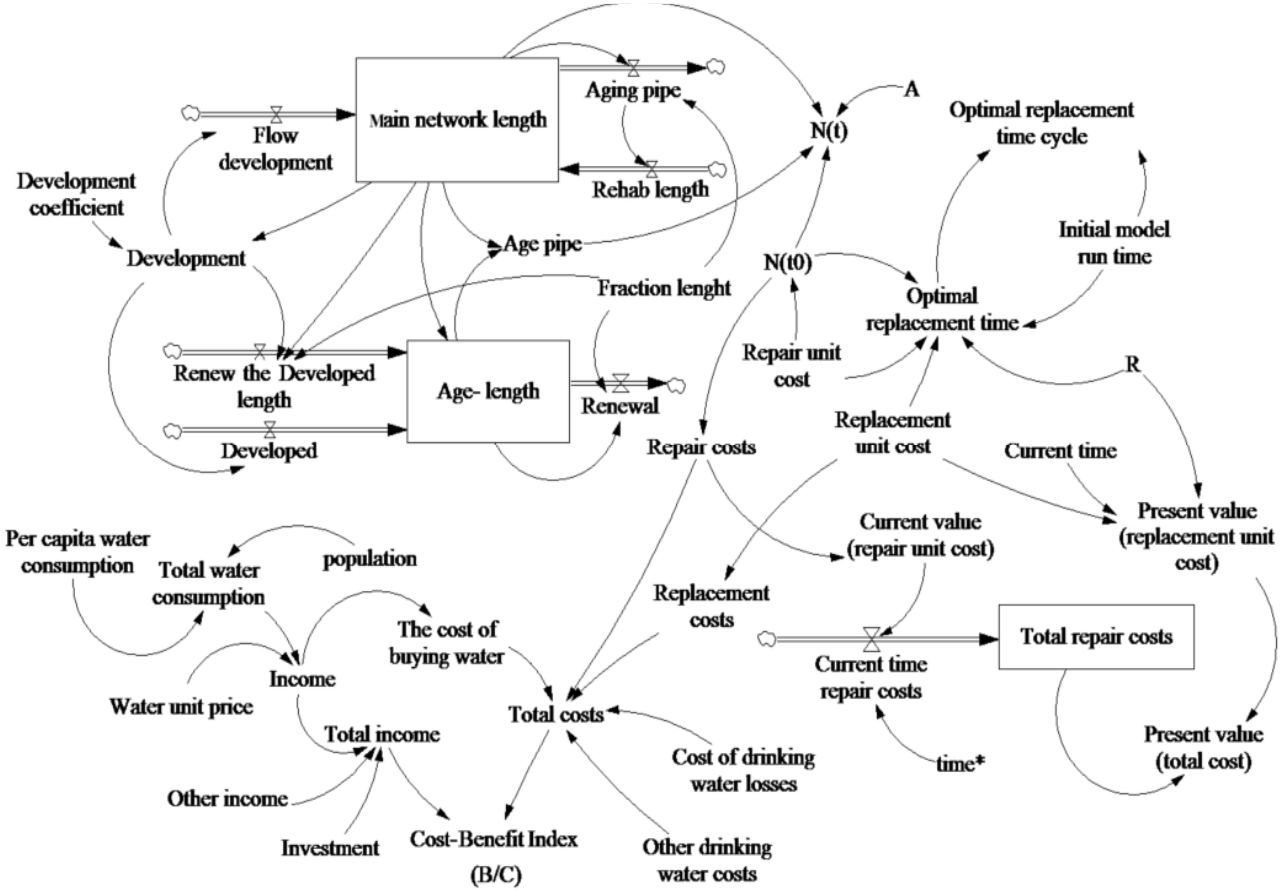

Fig. 2. The main variables of stock and flow of the dynamic model of drinking water distribution network in Hamadan

شکل ۲- متغیرهای اصلی ذخیره و جریان مدل پویایی شبکه توزیع آب شرب شهر همدان

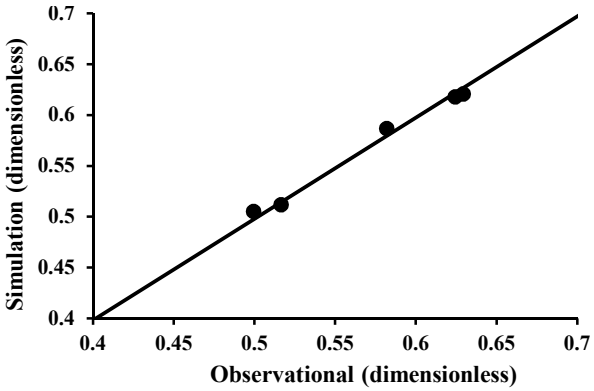

Fig. 3. Compare Benefit -Cost index observation with simulated in VENSIM environment

شکل۳- مقایسه شاخص منفعت به هزینه مشاهده‌ای با شبیه‌سازی شده در محیط VENSIM

۳-۳- نتایج آنالیز حساسیت

معیارآنالیز حساسیت در واقع بررسی حساسیت مدل نسبت به هر کدام از پارامترهای مربوط است. در این پژوهش پس از اطمینان از عملکرد صحیح مدل در شبیه‌سازی شاخص منفعت به هزینه شبکه آب شرب، با تغییر پارامترهای عمر لوله، ضریب توسعه طول شبکه، ضریب نوسازی و نرخ رشد شکست، شاخص منفعت به هزینه در بازه‌های مشخص شده جدول ۱ بررسی شد.

در جدول ۲ نتایج آنالیز حساسیت عمومی مدل را در برابر تغییرات پارامترهای جدول ۱ برای پارامتر شاخص منفعت به هزینه در دوره ۵ ساله (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷) نشان داده شده است. این نتایج، حساس‌ترین پارامتر نسبت به شاخص منفعت به هزینه، تغییرات پارامتر نرخ رشد شکست لوله‌ها است و پس از آن به‌ترتیب تغییرات عمر لوله‌ها، ضریب نوسازی و ضریب توسعه طول شبکه تأثیر بیشتری بر شاخص منفعت به هزینه داشته است، اما ضریب توسعه طول لوله در شبکه آب شرب تأثیر چندانی بر شاخص منفعت به هزینه نداشته است.

جدول۱- پارامترهای استفاده شده در آنالیز حساسیت

Table 1. Parameters used in sensitivity analysis

Parameters	Initial value	Sensitivity analysis efficiency	Unit
Age pipe	25	20 to 40	Year
Network length development coefficient	0.02	0.02 to 0.09	Percentage
Renovation coefficient	0.04	0.03 to 0.09	Percentage
Failure growth rate (A)	0.150	0.025 to 0.150	1/Year

جدول ۲- آنالیز حساسیت عمومی مدل (S) در دوره آماری (۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷) برای پارامتر مؤثر بر شاخص منفعت به هزینه

Table 2. General sensitivity analysis of model (S) in the statistical period (2014-2018) for the parameter affecting the benefit-cost index

Parameters	Sensitivity analysis efficiency				Average
Age pipe (year)	20	25	30	40	-
General sensitivity analysis	0.5684	0.5682	0.5680	0.5676	0.5681
Failure growth rate (1/year)	0.025	0.05	0.10	0.150	-
General sensitivity analysis	0.5691	0.5689	0.5686	0.5682	0.5688
Renovation coefficient pipe (percentage)	3	4	6	9	-
General sensitivity analysis	0.5691	0.5682	0.5663	0.5635	0.5682
Network length development coefficient(percentage)	2	5	6	9	-
General sensitivity analysis	0.5682	0.5661	0.5654	0.5632	0.5658

جدول۳- نتایج زمان جایگزینی بهینه با روش t_r

Table 3. Results of optimal replacement time by t_r method

Parameters	Results of optimal replacement time according to the formula t_r	Unit
t_0	1392	Year
Nt_0	1.32	Dimensionless
A	0.152	1/Year
R	25	Percentage
UC_{Rr}	10,408,160	Rials
UC_{Rm}	43,965,115	Rials
tr	1420	Year
tc	28	Year

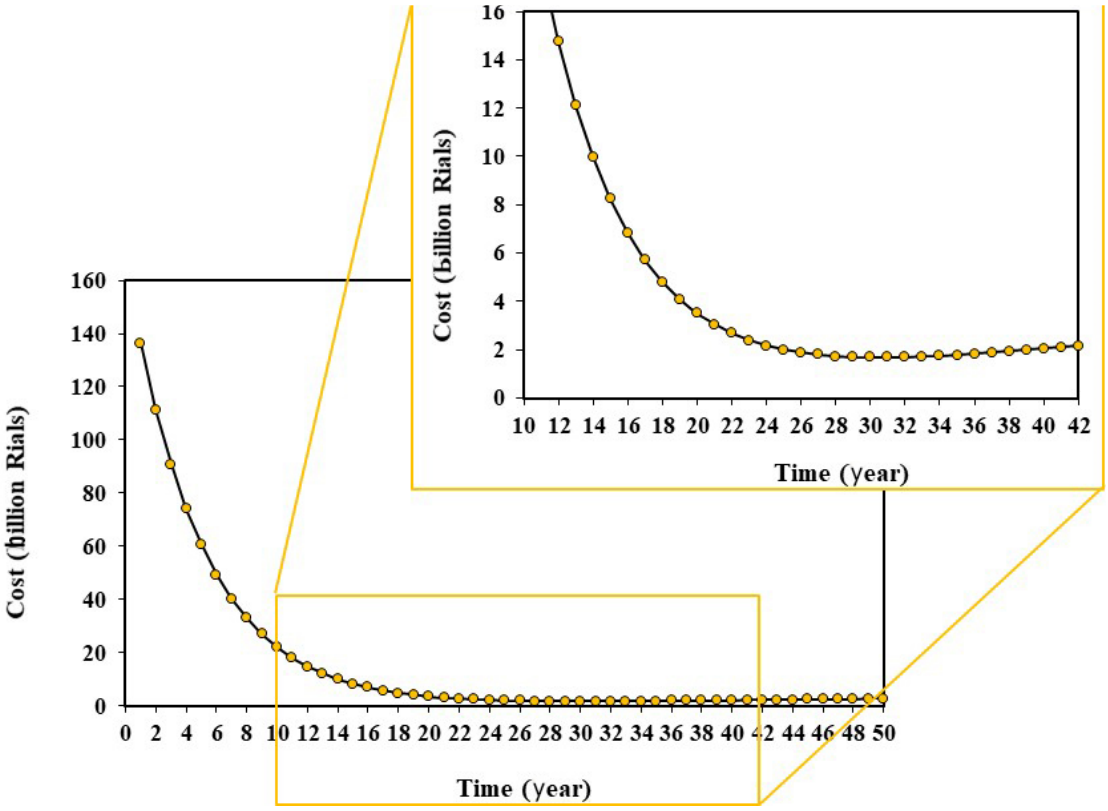

Fig. 4. Cost of replacing network pipes in relation to network life from base year (2013), using SD-NPV method in VENSIM environment

شکل۴- هزینه جایگزینی لوله‌های شبکه نسبت به عمر شبکه از سال مبنا (۱۳۹۲)، با استفاده از روش SD-NPV در محیط VENSIM

۳-۴- نتایج بهینه‌سازی

۳-۴-۱- تحلیل برآورد زمان جایگزینی بهینه

در این قسمت با توجه به هزینه تعمیرات و جایگزینی انواع لوله‌های موجود در شهر همدان و با استفاده از حل تحلیلی معادله ارزش فعلی خالص (معادله ۸)، زمان جایگزینی بهینه لوله‌های شبکه t_r محاسبه شد. جدول ۳ مقدار اولیه پارامترهای مدل به همراه زمان جایگزینی بهینه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که زمان جایگزینی بهینه لوله‌های شبکه آب شرب با روش حل تحلیلی معادله NPV، سال ۱۴۲۰ است.

همچنین شکل ۴ نتایج مربوط به حل معادله NPV با استفاده از از روش پویایی سیستم در محیط برنامه‌نویسی VENSIM را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هزینه‌های کلی شرکت برای جایگزینی لوله‌های شبکه ۲۸ سال پس از اجرای مدل از سال ۱۳۹۲ یا به‌عبارتی سال ۱۴۲۰ است. لازم به ذکر است اصلی‌ترین عامل

مؤثر بر NPV، کاهش یا افزایش درآمد یا تغییرات هزینه‌ها است (Mohammadi and Safaei., 2015). با توجه به شکل ۴ در سال ۲۸ ارزش فعلی هزینه‌های کلی برابر ۱،۷۳۳،۷۱۶ میلیارد ریال است، این هزینه کم‌ترین مقدار را در ۵۰ سال زمان اجرای برنامه داشته است. با توجه به اینکه پروژه‌ای اقتصادی‌تر است که ارزش فعلی هزینه‌هایش کمتر باشد (Sconezhad, 1996)، می‌توان گفت، بهترین زمان جایگزینی لوله‌های شبکه آب شرب شهر همدان ۲۸ سال بعد و یا به‌عبارتی سال ۱۴۲۰ است. ملاحظه می‌شود که نتایج مربوط به هر دو روش حل تحلیلی رابطه NPV و روش SD-NPV، یکسان است. بنابراین می‌توان گفت پویایی سیستم توانسته است با دقت قابل‌قبولی معادله NPV را تحلیل کند.

۳-۴-۲- تجزیه‌وتحلیل سناریوها برای بهبود شاخص منفعت به هزینه

در این قسمت به منظور بهبود توازن مالی شرکت آب و فاضلاب، دو سناریوی اقتصادی در نظر گرفته شد:

الف- سناریو۱: کمینه کردن ضرر و زیان شرکت آب و فاضلاب با توجه به قیمت تمام شده آب شرب. در این سناریو تابع هدف و قید به‌ترتیب مطابق معادلات ۱۸ و ۲۰ در نظر گرفته شد و بهینه‌سازی سناریو، توسط روش الگوریتم پاول در محیط VENSIM انجام شد. در جدول ۴ مقدار بهینه شاخص منفعت به هزینه ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که شاخص منفعت به هزینه در شبیه‌سازی شرایط واقعی، کمتر از ۱ است که نشان‌دهنده این واقعیت است که هزینه‌های شرکت، از درآمد حاصله بیشتر بوده و شرکت هر ساله ضرر می‌دهد، اما با در نظر گرفتن سناریوی ۱ مبنی بر آنکه قیمت تمام شده آب طوری تعیین شود که بیلان مالی شرکت افزایش یافته و ضرردهی آن به حداقل برسد، شاخص منفعت به هزینه در بهینه‌سازی به عدد یک رسیده است. این مطلب نشان‌دهنده این واقعیت است که درآمد و هزینه‌های شرکت به نقطه سر به سر رسیده و شرکت از حالت ضرردهی خارج شده است. بنابراین با توجه به آن، قیمت تمام شده آب پس از بهینه‌سازی در جدول ۵ نشان داده شده است.

ب- سناریو۲: کمینه کردن ضرر و زیان شرکت آب و فاضلاب و حداقل کردن شکست لوله‌های آب شرب نسبت به قیمت تمام شده آب شرب و ضریب نوسازی، با در نظر گرفتن رفاه اجتماعی.

در این سناریو توابع هدف ۱۸ و ۱۹ و قیود ۲۰ و ۲۱ به‌صورت هم‌زمان استفاده شده است. بهینه‌سازی این سناریو هم توسط روش الگوریتم پاول در محیط VENSIM انجام شد. نتایج نهایی این سناریو و عوامل مؤثر در بهبود شاخص منفعت به هزینه از نظر

جدول۴- نتایج سناریو۱ در بهبود شاخص منفعت به هزینه

Table 4. Scenario 1 results in improving benefit-cost index

Scenario 1 Time (years)	Benefit-cost index (simulation)	Benefit-cost index (optimization)
1	0.50448	1
2	0.51150	1
3	0.62060	1
4	0.61761	1
5	0.58660	1

جدول۵- نتایج تأثیر بهینه‌سازی پارامتر قیمت آب در بهبود شاخص منفعت به هزینه

Table 5. Results the effect of optimizing the water price parameter on improving benefit-cost index

Scenario 1 Time (years)	Unit price of water in Rials (real conditions)	Unit price of water in Rials (optimization)
1	2700	32853
2	2500	45428
3	2590	33068
4	2810	36874
5	3500	44188

اقتصادی در جدول‌های ۶ تا ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶، مشاهده می‌شود همانند نتایج سناریو اول، شاخص منفعت به هزینه در بهینه‌سازی به عدد یک رسیده است، اما با توجه به اینکه میزان تغییرات قیمت بر اساس کمینه کردن ضرر و زیان شرکت آب و فاضلاب و حداکثرسازی رفاه اجتماعی (حداقل رساندن تعداد شکست لوله) در نظر گرفته شده است، میزان قیمت تمام شده آب پس از بهینه‌سازی نسبت به سناریوی اول افزایش داشته است. جدول ۸ نتایج تأثیر بهینه‌سازی پارامتر شکست لوله‌ها در بهبود شاخص منفعت به هزینه و جدول ۹ میزان هزینه حاصل از اجرای سناریوی مذکور را نشان می‌دهد. می‌توان گفت در اثر اجرای این سناریو، از یک سو میزان منفعت به هزینه برای شرکت برابر ۱ شده و شرکت ضرر نمی‌کند و از سوی دیگر تعداد شکست لوله‌های شبکه کمتر شده و به تبع افزایش رفاه اجتماعی را به همراه داشته است.

لازم به ذکر است، نتایج نشان داد که در صورت اجرای این سناریو، می‌توان ضریب نوسازی را از میزان ۰/۰۴ به ۱ درصد افزایش و میزان شکست لوله‌های شبکه را کاهش داد. در پژوهشی نقش نشت و شکست را در شبکه‌های آب و راه‌حل‌های اقتصادی

جدول۶- نتایج سناریو ۲ در بهبود شاخص منفعت به هزینه

Table 6. Scenario 2 results in improving benefit-cost index

Scenario 2 Time (years)	Benefit-cost index (simulation)	Benefit-cost index (optimization)
1	0.50448	1
2	0.51150	1
3	0.62060	1
4	0.61761	1
5	0.58660	1

جدول۷- نتایج تأثیر بهینه‌سازی پارامتر قیمت آب در بهبود شاخص منفعت به هزینه

Table 7. Results the effect of optimizing the water price parameter on improving benefit-cost index

Scenario 2 Time (years)	Unit price of water in Rials (real conditions)	Unit price of water in Rials (optimization)
1	2700	43877
2	2500	60257
3	2590	46694
4	2810	51150
5	3500	57860

جدول۸- نتایج تأثیر بهینه‌سازی پارامتر شکست لوله‌ها در بهبود شاخص منفعت به هزینه

Table 8. Results the effect of optimizing the pipe failure parameter on improving the benefit-cost index

Scenario 2 Time (years)	Number of failures per kilometer of pipe per year (simulation)	Number of failures per kilometer of pipe per year (optimization)
1	1395	1394
2	1422	1374
3	1450	1401
4	1478	1429
5	1506	1458

جدول۹- نتایج تأثیر پارامتر هزینه‌های شبکه آب شرب در بهبود شاخص منفعت به هزینه

Table 9. Results the effect of drinking water network cost parameter on improving the benefit-cost index

Scenario 2 Time (years)	Cost in terms billion Rials (simulation)	Cost in terms billion Rials (optimization)
1	237,239,353	280,172,986
2	256,587,104	299,886,740
3	260,465,476	304,640,426
4	281,289,720	326,357,090
5	331,107,794	377,058,100

بررسی کردند. آنها نشان دادند که افزایش ۳ تا ۵ برابری بودجه تعمیرات و جایگزینی لوله‌ها، افزایش رضایت مردم جامعه را به‌همراه خواهد داشت (Kanakoudis and Tolikas, 2001).

۴- نتیجه‌گیری

مدفون بودن شبکه‌های توزیع آب در زیر خاک باعث شده است که پایش از لحاظ بصری امکان‌پذیر نباشد. بنابراین علاوه بر مشکلات حفظ سلامت و نگهداری لوله‌ها، منجر به مشکلات فنی پیچیده در شبکه توزیع آب شرب می‌شود. بنابراین در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش پویای سیستم، شبکه آب‌رسانی شهری شبیه‌سازی شد و سپس برای محاسبه زمان جایگزینی بهینه دو روش‌های، حل تحلیلی معادله NPV و SD-NPV در محیط VENSIM ارائه شد. پس از شبیه‌سازی شبکه آب شرب توسط روش پویایی سیستم، میزان برازش میان مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای پارامتر منفعت به هزینه محاسبه و شاخص‌های آماری RMSE، SE و R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۰۰۶، ۰/۰۱ و ۰/۹۹۱ (بدون بعد) محاسبه شد. نتایج نشان داد اختلاف کم بین مقدار شبیه‌سازی شده توسط مدل پویایی سیستم با مقدار مشاهده‌ای وجود دارد که بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، حساس‌ترین پارامتر نسبت به پارامتر شاخص منفعت به هزینه، پارامتر نرخ رشد شکست لوله‌ها است و پس از آن به‌ترتیب تغییرات عمر لوله‌ها، ضریب نوسازی و ضریب توسعه طول شبکه تأثیر بیشتری بر شاخص منفعت به هزینه دارد. بر اساس روش‌های حل تحلیلی معادله NPV و SD-NPV، بهترین زمان جایگزینی لوله‌ها در شبکه آب شرب شهر همدان سال ۱۴۲۰ است. در نهایت به‌منظور بهبود توازن مالی شرکت آب و فاضلاب دو سناریوی اقتصادی مشخص شد. با توجه به نتایج این پژوهش باید قیمت تمام شده آب طوری تعیین شود که بیلان مالی شرکت افزایش یافته و ضردهی آن به حداقل برسد. نتایج نشان داد با افزایش ضریب نوسازی از میزان ۰/۰۴ به ۱ درصد میزان شکست لوله‌های شبکه کاهش می‌یابد و در نتیجه افزایش هزینه‌های کلی برای نوسازی لوله‌های شبکه باعث افزایش رفاه اجتماعی خواهد شد. نتایج نشان داد می‌توان از روش پویایی سیستم و الگوریتم پاول برای بهینه‌سازی حداقل قیمت آب شرب، برای کاهش زیان وارده به شرکت‌های آب و فاضلاب و کاهش تعداد شکست لوله‌های آب‌رسانی، استفاده کرد و این روش امکان ایجاد یک مدل کاربردی و برنامه‌ریزی نوسازی را با دقت قابل‌قبولی، فراهم می‌سازد. به‌طور کلی از توانایی‌های روش پویایی سیستم می‌توان به انجام محاسبات با سرعت زیاد در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، نمایش تغییرات پارامترها در سیستم نسبت به زمان و قابلیت شناسایی الگوهای مختلف بین متغیرهای ورودی و خروجی به‌منظور تعیین زمان جایگزینی بهینه لوله‌های شبکه توزیع آب شرب اشاره کرد.

۵- قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند، مراتب قدردانی خود را از آقای مهندس حسینی بیدار مدیرعامل، آقای مهندس میرزایی معاون بهره‌برداری و آقای موسوی کارشناس امور مالی شرکت آب و فاضلاب شهر همدان که علاوه بر ارائه اطلاعات پایه و داده‌های موردنیاز، در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش نویسندگان را یاری کردند، اعلام کنند.

References

Andreou, S., Marks, D. & Clark, R. 1987. A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: theory. *Journal of Advanced Water Resources*, 10**,** 2-10.

Azimi, S., R., Miriatameh, A., S., Taghizadeh, Kh. & Samadi, R. 2013. Investigation of the trend and causes of inflation in Iran in the years (2010-2012) and measures taken to curb it. *Quarterly Journal of Fiscal and Economic Policies*, 1**,** 25-58. (In Persian)

Beigi, F. 1999. Pathology of urban water distribution networks. *Water and Environment Quarterly*, 37**,** 10-16. (In Persian)

Brown, C. & Abraham, F. 2012. Sum of Perpetuities method for valuing stock prices. *Journal of Economics*, 38(1)**,** 59-72.

Fermani Eantzam, H., Movahedi Sobhani, F., Vaez Tehrani, M. & Najafi, S. A. 2019. Extraction of sustainable urban drinking water policies with a system dynamics approach (case study: Qom city). *Journal of Water and Wastewater*, 30**,** 33-49. (In Persian)

Guo, H. C., Liu, L., Huang, G. H., Fuller, G. A., Zou, R. & Yin, Y. Y. 2001. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the Lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management,* 61**,** 93-111.

Hosseini, S. A. 2009. Using system dynamics approach in the extraction of water resources sustainable development strategies case study: development of water resources Mashhad. Master's Thesis. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)

Jalili Ghazizadeh, M., Hanifizi, S. H. & Rasti Ardakani, R. 2008. Presenting accident prediction relationships in urban water distribution networks. *The 2nd National Conference on Water and Wastewater Exploitation*, Tehran. (In Persian)

Kabir, G., Tesfamariam, S., Francisque, A. & Sadiq, R. 2015. Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model. *European Journal of Operational Resources*, 240(1)**,** 220-234.

Kanakoudis, V. K. & Tolikas, D. K. 2001. The role of leaks and breaks in water networks-technical and economical solutions. *Journal of Water Supply Research and Technology _AQUA*, 50(5)**,** 301-311.

Kibum, K., Jeewon, S., Jinseok, H., Taehyeon, K., Jaehak, K. & Jayong, K. 2019. Economic-based approach for predicting optimal water pipe renewal period based on risk and failure rate. *Journal of Environmental Engineers Research*, 24(1)**,** 63-73.

Kleiner, Y., Nafi, A. & Rajani, B. 2010. Planning renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastructure. *Water Science and Technology Water Supply*, 10**,** 897-906.

Kropp, I., Gat, Y. L. & Poulton, M. 2009. The application of the leyp failure forecast model at the strategic asset management planning level. *Proceedings of LESAM 2009*, Miami, USA.

Luong, H, T. & Nagarur, N. N. 2001. Optimal replacement policy for single pipes in water distribution networks. *Journal of Water Resources Research*, 37(12)**,** 3285-3293.

Majidian, d. 1997. *Evaluation of industrial designs (technical-economic-financial studies)*, Tehran: Industrial Management Organization. (In Persian)

Mark, J. P. A., Frank, J. Fabozzi, & Frank, J. J. 2010. *The handbook of traditional and alternative investment vehicles: investment characteristics and strategies*. New York, United States, John Wiley & Sons Inc.

Mohammadi, S. A. & Safaei, H. 2015. Investigating the factors affecting the internal rate of return (IRR) and net

present value (NPV) of investment plans using COMFAR software. *International Conference on Management, Economics and Industrial Engineering*, Tehran, Iran. (In Persian)

Nazari, R. & Chekhandi Nejad, E. 2016. Distribution of economic load in power systems by Powell numerical method and comparison with other optimization methods. *International Conference on Recent Innovations in Electrical and Computer Engineering*, University of Tehran, Iran. (In Persian)

Nozari, H., Azadi, S. & Mazoji, N. 2018. Simulation of quality trend of Shaban creek irrigation canal using system dynamics analysis method. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 35**,** 211-222. (In Persian)

Parsa, A. A., Hosseinzadeh, J., Yazdankhah, M., Rezaei, A. A. & Farrokhfal, M. 2018. Why is the general perception of "rising cost of living and prices" different from the official inflation rate? *Journal of Statistics*, 29**,** 8-29. (In Persian)

Powell, M. J. 1962. An iterative method for finding stationary values of a function of several variables. *The Computer Journal*, 5**,** 147-151.

Qasemnezhad, S. & Moteie, H. 2017. Application and development of regression methods to predict the failure rate of pipes of urban water distribution network - a case study of district one of district one of Tehran. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 48**,** 2-58. (In Persian)

Qi, C. & Chang, N. B. 2011. System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts. *Journal of Environmental Management*, 92**,** 28-41.

Rao, S. S. 2009. *Engineering Optimization: Theory and Practice*, Fourth Edition, by John Wiley & Sons, Inc.

Salehi, S., Tabesh, M. & Jalili Ghazizadeh, M. 2018. HRDM method for rehabilitation of pipes in water distribution networks with inaccurate operational-failure data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(9)**,** 04018053.

Salehi, S., Tabesh, M. & Jalili Ghazizadeh, M. 2019. Development of a prioritization model for rehabilitation of pipes in water distribution systems with minimum structural data. *Journal of Water and Wastewater* 29(6)**,** 40-55. (In Persian)

Sconezhad, M. M. 1996. *Engineering economics or economic evaluation of industrial projects*. Tehran: Amirkabir University of Technology Publishing Center, 7th, 455. (In Persian)

Shamir, U. & Howard, C. D. D. 1979. An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Journal of Water Works Assoc*, 71**,** 248-258.

Sterman, J. D. 2000. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. McGraw- Hill Education. New York.

Tabesh, M. & Karimi, K. 2006. Determining the time of leak detection and modernization of urban water distribution networks using accident information analysis. *University College of Engineering Journal*, Tehran, Iran, 40**,** 597-610. (In Persian)

Tianhonga, L., Songnana, Y. & Mingxin, T. 2019. Simulation and optimization of water supply and demand balance in Shenzhen: a system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 207**,** 882-893.

Walski, T. M. 1987. Replacement rules for water mains. *Journal of Water Works Assoc*, 79**,** 33-37.

Walter, J. 1956. Dividend policies and common stock prices. *Journal of Finance*, 11(1)**,** 29-41.

Wei, T., Lou, I., Yang, Z. & Li, Y. 2016. A system dynamics urban water management model for Macau, China. *Journal of Environmental Sciences*, 50**,** 117-126.