Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 5, pp: 44-65

Simulating the Integrated Management of Assets of Water Distribution Networks and Urban Wastewater Collection Systems Using Dynamic Modeling of Vensim Software (Case Study of Tabriz City)

S. Fakhimi Hosseinzad[1], Y. Alavi Matin[2*], S. Iranzadeh[3]

1. PhD. Student of Industrial Management, Strategy Orientation, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Management, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran
(Corresponding Author) alavimatin@iaut.ac.ir
3. Assoc. Prof., Dept. of Management, Islamic Azad University, Tabriz Branch, Tabriz, Iran

(Received Oct. 13, 2023 Accepted Nov. 18, 2023)

To cite this article:
Fakhimi Hosseinzad, S., Alavi Matin, Y., Iranzadeh, S., 2024. "Simulating the integrated management of assets of water distribution networks and urban wastewater collection systems using dynamic modeling of Vensim software (case study of Tabriz City)" *Journal of Water and Wastewater,* 34(5)**,** 44-65.
https://doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378.

Abstract

Improving the management of water resources on a global scale is critical at this time. The risks that water bodies are currently exposed to, whether due to climate change or human conditions, affect the availability and quality of water in watersheds around the world. However, water management has emerged as a complex problem. In this light, one of the most promising methods is the construction of dynamic simulation models that may include the largest possible number of variables, not just hydrological. This paper presents a decision support system for the integrated management of water distribution and wastewater collection networks. The proposed method uses system dynamics (simulation with Vensim software) to integrate water and sewage networks with financial and socio-political sectors, which allows the rate adjustment and planning of integrated operational and capital infrastructure of water and sewage in three provinces of the Tabriz region during their life cycle (50 years). The results show that the integrated framework enables the company to accelerate financing for capital and operational works and improve the level of integrated services due to the integration of financial resources of water and sewage. In practice, the proposed integrated framework empowers water and wastewater utilities to manage and plan their assets in an integrated approach to improve the infrastructural, financial, and socio-political performance of their water and wastewater assets compared to separate management. Physical asset management is the only way for water and sewage companies to solve financial, social and infrastructural problems. The sewerage network studied here needs a little more capital work to meet the deficit policy lever of very damaged pipes compared to the water distribution network, which is in a relatively better condition. Implementing a borrowing management strategy for the sewer network to accelerate capital work, a proactive management strategy for the water distribution network should be implemented with the necessary cash reserves for any future setbacks.

Keywords: Integrated Asset Management, System Dynamics, Wastewater Collection, Water Distribution, Vensim.

Extended Abstract

1. Introduction

When implementing integrated water management, one of the main problems identified is the transition from disciplinary approaches to systemic approaches. Until now, the most common method of analysis has been the reductionist approach, which basically involves evaluating the problem from a disciplinary approach. Their subsequent analysis is determined by each scientific discipline. For example, a natural phenomenon such as water management may be evaluated by several branches of science such as hydrology, hydraulics, physics, chemistry, economics, and sociology. However, even when each of these disciplines provides more knowledge in some aspects, none of them can explain the total behavior. This scientific approach has been very successful in understanding and modeling isolated phenomena, but it has also proven to be completely inadequate when dealing with complex phenomena, where the system's behavior cannot be fully explained in terms of its isolated elements (Johnson, 2009).

1.1. Application of system dynamics in water distribution and wastewater collection networks

System dynamics[1] is a feedback-based object-oriented modeling paradigm developed by (Forrester, 1958) for modeling complex systems. Several researchers have used SD modeling in water resources management, planning and management, construction management, economics, urban policy, etc. A detailed discussion of SD applications can be found in (Coyle, 1997; Ford, 1999; Sterman, 2000; Richmond, 2001).

A summary of SD applications in water distribution and wastewater collection systems is presented in this section. (Rehan et al., 2013) proposed an interconnected urban water and wastewater asset management framework using an SD model to illustrate the complex connections and feedback loops among physical, financial infrastructure, and socio-political sectors. Their work is the first known application of SD to water and wastewater infrastructure asset management.

Gandoost et al. developed three categories of infrastructure, socio-political and financial performance indicators for water distribution and wastewater collection networks. They used SD to demonstrate how water companies can use the proposed normalized and time-integrated performance indicators to benchmark and compare the short- and long-term performance of their networks against each other and their strategic goals (Ganjidoost et al., 2022a).

1.2. The importance of managing physical assets in water and sewage companies

Due to wear and tear of water and sewage facilities, economic sanctions and the impossibility of supplying high-quality foreign parts and equipment, as well as the lack of unified management that covers all aspects of water and sewage services from all aspects, not only hydrological and technical, but also political and financial, social, environmental and sustainable development, etc., the Ministry of Energy and the country's Water and Sewerage Engineering Company have suggested that by following the standard of management of physical assets in water and sewage facilities, and the necessary added value of the equipment, a documented plan in accordance with environmental changes for ABFA companies be designed.

2. Integrated asset management of water distribution and wastewater collection networks

The purpose of this study is to develop the first known integrated asset management model for water distribution and wastewater collection networks using SD in water and wastewater companies. This goal was achieved using the following objectives: First, a Causal Loop Diagram[2] was drawn to map the connection points and identify the mutual feedback loops that exist among infrastructure, finance, and socio-political sectors. Second, SD was used to understand the complex behavior of water and wastewater infrastructure systems in an integrated approach and to demonstrate the impact of complex connections and feedback loops on management decisions. Finally, the integrated model was validated and implemented using data from three regions of Tabriz to investigate the effect of connections and feedback.

Loops in an integrated approach in SD, qualitative relationships between different parameters affecting a system are represented through a CLD or influence diagram. The positive or negative effect of a variable is indicated by the polarity of the loop through a positive (+) or negative (-) sign, respectively (Sterman, 2000). A positive correlation indicates that an increase (or decrease) in one parameter causes an increase (or decrease) in other parameters. Similarly, a negative association means that the dependent variable is inversely related to the cause, so an increase (or decrease) in one variable will lead to a decrease (or increase) in the dependent variable (s).

The total volume of treated wastewater depends on the total wastewater produced and the infiltration of sewage pipes (Fig. 1). Damage in water networks can increase the amount of breakage and, as a result,

[1] System Dynamics (SD)

[2] Causal Loop Diagram (CLD)

Table 1. Optimal policy levers for asset management of integrated/ aggregated-separate system dynamics models

NO	Optimal policy lever	Network	Value
1	Allowable fee-hike rate (% per annum)	Water distribution	8.3
		Wastewater collection	6.8
2	Desired cash reserve (% of annual network value)	Water distribution	4
3	Allowable debt service (% of annual revenue)	Wastewater collection	12
4	Maximum fraction of highly deteriorated pipes (% of network)	Water distribution	4.8
		Wastewater collection	10.5
5	Desired elimination period for highly deteriorated pipes (year)	Water distribution	5
		Wastewater collection	10.5
6	Preferred rehab rate (% of network per year)	Water & wastewater	1.4

increase leakage in water networks. Main water leaks can be a significant source of infiltration into adjacent sewers. In addition to infiltration, water seepage may cause soil particles to move around the sewer, causing loss of support and resulting in damage to sewer pipes. Sewage discharge can contaminate groundwater, which may be the source of supply for the water distribution system. Therefore, the increase in water leakage increases the infiltration of sewage.

3. SD model development

SD has been used to develop an integrated asset management system for water distribution and wastewater collection networks. The SD representation model has been used to understand the complex behavior of water and wastewater infrastructure systems and to show the impact of complex connections and feedback loops on management. SD solutions are used to model the complexity of integrated water and wastewater systems. If the system is of the fourth order or higher (i.e., variable), it can be called as a high order system (or variable). For example, we can refer to reserves representing water and sewage pipes with remaining useful life, water demand, user fees, fund balance, etc. Therefore, this study addresses a complex problem that can be modeled using SD. The main building blocks of SD modeling are stocks, flows, converters and connectors, as shown in Fig. 1.

3.1. Show integrated asset management method

Three regions of the city of Tabriz in East Azerbaijan with 361 km of water mains and 341 km of sewer pipes serving a population of more than 100,000 people were

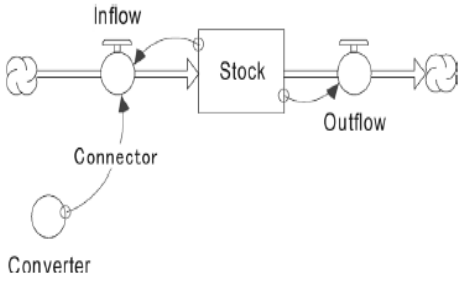

Fig. 1. Building blocks of system dynamics model

used to demonstrate the application of integrated assets. The management model of water distribution and wastewater collection networks aims to discover the effect of mutual connections and feedback loops that exist among integrated infrastructure, financial and socio-political sectors. For this purpose, under the same policy levers (see Table 1), the simulation results of integrated water and wastewater and accumulated-separated water and wastewater models are compared over a 50-year life cycle. It should be noted that the combined-separate model means that each water and sewage network is simulated separately without any interaction.

Then the results were aggregated for comparison with the integrated model of water and sewage. Two models were compared using a borrowing management strategy for the wastewater collection network and a capital reserve management strategy for the water distribution network. As presented in Table 1, six policy levers control system behavior for optimal management

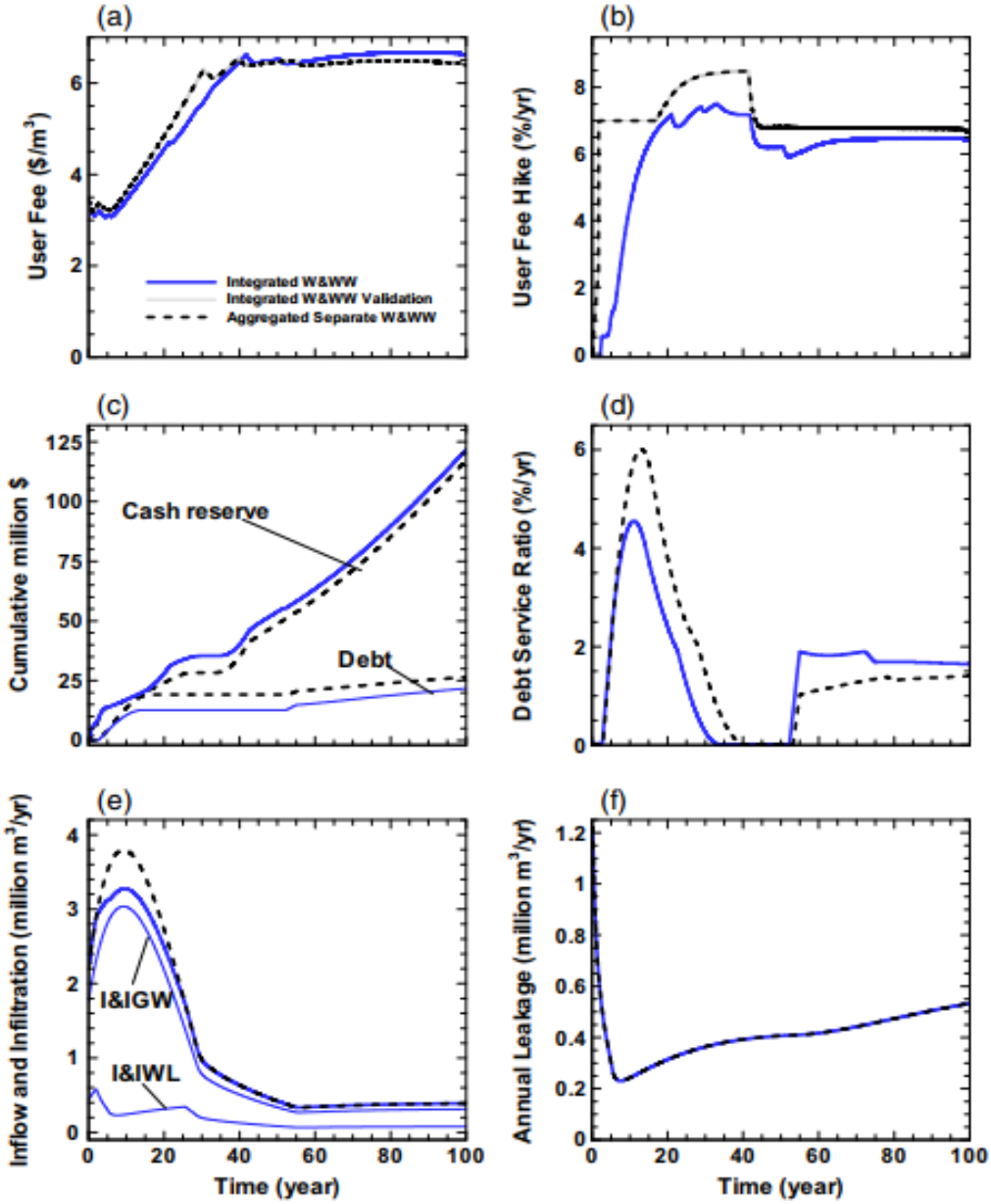

Fig. 2. Results over a 50-year simulation period (water and wastewater)

of water and wastewater infrastructure throughout its life cycle. These policy levers were set to ensure that the company has sufficient funds to sustainably manage its networks. The base I&IGW ratio, as expressed in Equation 2, was taken to be 0.8, the average ratio of I&IGW to total I&I for all three utilities.

4. Results and Discussion

The results in Fig. 2 indicate that, when utilizing integrated asset management in modeling, costs for users and pipe leakage decrease compared to not using it. Additionally, the cash reserve for the reconstruction of worn parts in the water and sewage sectors increases, and the lifespan of the pipes is extended.

5. Conclusions

This method has been carried out for the first time among water and sewage companies in the country regarding the management of physical assets, and due to the new approach of the country's water and sewage engineering company to implement physical asset management in the entire water and sewage facilities.

Whether in the purification, distribution and collection sector, or in supply, it provides a new solution to predict the status of facilities in the case of integrated management for all water and sewage companies that are in a crisis of equipment wear, water shortage, financial, etc.

The sewer lines studied here require slightly more capital work to meet the policy leverage of severely deteriorated pipes compared to the water distribution network, which is in relatively better condition. A borrowing management strategy for the sewer network to accelerate capital work is implemented. A proactive management strategy for the water distribution network by reserving the required cash for any future setbacks is also implemented. This cash reserve is accumulated in the consolidated fund balance. Therefore, the financial capacity of the integrated model is increased, which enables the tool to accelerate operational, maintenance and capital works to improve the integrated service level of the assets. In practice, the integrated model allows the company to switch borrowing due to access to a single source of finance.

A CLD for integrated asset management of water distribution and wastewater collection networks should be established to determine the connection points and identify the mutual feedback loops existing in the infrastructural, financial and socio-political sectors. The developed SD model is the first known integrated approach to water and wastewater infrastructure system asset management.

The integrated SD model has been validated and implemented using the data of an instrument in three regions of Tabriz.

The simulation results in a 50-year planning horizon show that the integrated SD model allows the company to estimate the infrastructural, financial and socio-political performance of water and sewage assets. In practice, the developed SD model can enable water company stakeholders to evaluate different decision-making policies and financing strategies for long-term integrated asset management of water distribution and wastewater collection networks.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۵، صفحه: ۶۵-۴۴

شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه دارایی‌های سیستم‌های شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب شهری با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی نرم‌افزار ونسیم (مطالعه موردی شهر تبریز)

سمیه فخیمی حسین‌زاد[۱]، یعقوب علوی متین[۲*]، سلیمان ایرانزاده[۳]

۱- دانشجوی دکترای مدیریت صنعتی، گرایش استراتژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران
۲- استادیار، گروه مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران
(نویسنده مسئول) alavimatin@iaut.ac.ir
۳- دانشیار، گروه مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تبریز، تبریز، ایران

(دریافت ۱۴۰۲/۷/۲۱ پذیرش ۱۴۰۲/۸/۲۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
فخیمی حسین‌زاد، س.، علوی متین، ی.، ایرانزاده، س.، ۱۴۰۲، "شبیه‌سازی مدیریت یکپارچه دارایی‌های سیستم‌های شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب شهری با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی نرم‌افزار ونسیم (مطالعه موردی شهر تبریز)" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۵)، ۶۵-۴۴.
https://doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378.

چکیده

بهبود مدیریت منابع آب در مقیاس جهانی در این زمان حیاتی است. خطراتی که در حال حاضر بدنه‌های آبی در معرض آن قرار دارند، چه به‌دلیل تغییرات آب و هوایی یا شرایط انسانی، بر دسترسی و کیفیت آب در حوضه‌های سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. با این وجود، مدیریت آب به‌عنوان یک مشکل پیچیده آشکار شده است. در این پرتو، یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها، ساخت مدل‌های شبیه‌سازی پویا است که ممکن است فقط هیدرولوژیکی نباشد و شامل بیشترین تعداد ممکن از متغیرها باشد. این پژوهش، یک سیستم پشتیبانی تصمیم را برای مدیریت یکپارچه شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب ارائه داد. روش پیشنهادی از پویایی سیستم (شبیه‌سازی با نرم‌افزار ونسیم) برای ادغام شبکه‌های آب و فاضلاب با بخش‌های مالی و اجتماعی-سیاسی استفاده می‌کند که امکان تنظیم نرخ و برنامه‌ریزی زیرساخت‌های عملیاتی و سرمایه‌ای یکپارچه آب و فاضلاب در سه منطقه تبریز را در طول چرخه عمر آنها (۵۰ سال) فراهم کند. نتایج نشان داد که چارچوب یکپارچه، شرکت را قادر می‌سازد تا به‌دلیل یکپارچه‌سازی منابع مالی آب و فاضلاب، تأمین مالی برای کارهای سرمایه‌ای و عملیاتی را تسریع بخشد و سطح خدمات یکپارچه را بهبود بخشد. در عمل، چارچوب یکپارچه پیشنهادی، شرکت‌های آب و فاضلاب را برای مدیریت و برنامه‌ریزی دارایی‌های خود در یک رویکرد یکپارچه برای ارتقای عملکرد زیرساختی، مالی و اجتماعی-سیاسی دارایی‌های آب و فاضلاب خود در مقایسه با مدیریت مجزا، توانمند می‌کند. مدیریت دارایی فیزیکی تنها راه‌حل شرکت‌های آب و فاضلاب برای حل مشکلات مالی، اجتماعی و زیر ساختی است. شبکه فاضلاب مورد مطالعه در این پژوهش، سرمایه کمی بیشتری نیاز دارد تا اهرم خط مشی کسری لوله‌های بسیار خراب در مقایسه با شبکه توزیع آب که وضعیت نسبتاً بهتری دارد، برآورده شود. یک استراتژی مدیریت استقراض برای شبکه فاضلاب اجرا شود تا کار سرمایه را تسریع بخشد. یک استراتژی مدیریت فعال برای شبکه توزیع آب با ذخیره وجوه نقد موردنیاز برای هر گونه عقب‌ماندگی آینده باید اجرا شود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت یکپارچه دارایی، دینامیک سیستم، جمع‌آوری فاضلاب، توزیع آب، ونسیم

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

۱- مقدمه

هنگام اجرای مدیریت یکپارچه آب، یکی از مشکلات اصلی شناسایی شده، گذار از رویکردهای انضباطی به رویکرد سیستمی است. تا به حال، رایج‌ترین روش تحلیل، رویکرد تقلیل‌گرایی بوده که اساساً شامل ارزیابی مشکل از رویکرد انضباطی است. رویکرد تقلیل‌گرایانه، که هنوز در علم تا به امروز غالب است، با تجزیه پدیده‌های طبیعی به اجزای سازنده آنها برای تجزیه‌وتحلیل بعدی آنها توسط هر رشته علمی مشخص می‌شود. به‌عنوان مثال، یک پدیده طبیعی مانند مدیریت آب ممکن است توسط چندین شاخه از علم مانند هیدرولوژی، هیدرولیک، فیزیک، شیمی، اقتصاد و جامعه‌شناسی ارزیابی شود. با این حال، حتی زمانی که هر یک از این رشته‌ها دانش بیشتری در برخی از جنبه‌ها ارائه می‌دهند، هیچ یک از آنها نمی‌توانند رفتار کل را توضیح دهند. این رویکرد علمی در درک و مدل‌سازی پدیده‌های مجزا بسیار موفق بوده است، اما همچنین ثابت شده که در مواجهه با پدیده‌های پیچیده که در آن رفتار سیستم را نمی‌توان به‌طور کامل برحسب عناصر جدا شده آن توضیح داد، کاملاً ناکافی است (Johnson, 2009).

در یک سیستم آب شهری، شبکه توزیع آب، آب شیرین را برای آشامیدن تأمین می‌کند و شبکه جمع‌آوری فاضلاب، آب مصرف شده را جمع‌آوری می‌کند، که برای تصفیه فرستاده می‌شود و سپس به نهرها تخلیه می‌شود (Grigg, 2009).

سیستم‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، بنابراین زوال یکی می‌تواند بر جنبه‌های زیرساختی، اجتماعی- سیاسی و مالی سیستم دیگر تأثیر بگذارد. به‌عنوان مثال، مقدار فاضلاب تولید شده به آب مصرفی بستگی دارد. جریان طراحی برای سیستم‌های فاضلاب به‌عنوان تابعی از تقاضای آب تخمین زده می‌شود و نشت اصلی آب می‌تواند منبع قابل‌توجهی برای نفوذ به فاضلاب مجاور باشد. علاوه بر نفوذ، آب نشتی می‌تواند منجر به حرکت ذرات خاک در اطراف فاضلاب شود که باعث از بین رفتن پشتیبانی و آسیب‌های متعاقب آن می‌شود. خروج فاضلاب از لوله می‌تواند آبهای زیرزمینی را آلوده کند که این آب زیرزمینی ممکن است منبع تأمین سیستم توزیع آب باشد.

رهان و همکاران، استدلال کردند که وزارت محیط‌زیست آنتاریو رابطه متقابل بین سیستم‌های زیرساختی آب و فاضلاب را شناسایی کرده و شهرداری‌ها را تشویق می‌کند تا این سیستم‌ها را در یک رویکرد یکپارچه برنامه‌ریزی کنند (Rehan et al., 2013).

طبق گفته گریگ مفهوم یکپارچه‌سازی سیستم های مدیریت زیرساخت آب و فاضلاب از سال ۱۹۱۷ در دست توسعه بوده است (Grigg, 2009).

کانکو و همکاران، پیشنهاد کردند که مفهوم یکپارچه‌سازی مدیریت سیستم‌های زیرساختی آب و فاضلاب آشنا است، اما این ایده به‌طور کامل پذیرفته نشده است (Katko et al., 2019).

بسیاری از پژوهش‌ها از جمله (Mohammadifardi et al., 2019, Rehan et al., 2014, Ganjidoost et al., 2021, Hawari et al., 2017, Duchesne et al., 2013, Elsawah et al., 2016, Mazumder et al., 2021, Mashford et al., 2011, Roshani and Filion, 2014, Park et al., 2016, Tran et al., 2010, Syachrani et al., 2011, Scholten et al., 2014, Kleiner et al., 1998, Scheidegger et al., 2011) مدل‌های جداگانه‌ای برای زیرساخت‌های آب و فاضلاب ارائه داده‌اند. ارزیابی این مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل‌ها و ابزارهای مدیریت کنونی برای سیستم‌های توزیع آب یا جمع‌آوری فاضلاب اعمال می‌شوند. شرکت آب به یک الگوی مدل‌سازی پیوسته و پویا برای درک بهتر متغیرهای کلیدی که مدیریت یکپارچه بلندمدت سیستم‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب را هدایت می‌کنند، نیاز دارد.

۱-۱- کاربرد دینامیک سیستم در شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب

دینامیک سیستم[1]، یک الگوی مدل‌سازی شی‌گرا مبتنی بر بازخورد است که توسط فارستر برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده، توسعه یافته است (Forrester, 1958). چندین پژوهشگر از مدل‌سازی SD در مدیریت، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، مدیریت ساخت‌وساز، اقتصاد و سیاست شهری استفاده کرده‌اند. بحث مفصلی از کاربردهای SD را می‌توان در پژوهش‌های (Coyle, 1997, Ford, 1999, Sterman, 2001, Richmond, 2001) یافت. خلاصه ای از کاربرد SD در سیستم‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب در این بخش ارائه شده است.

رهان و همکاران، یک چارچوب مدیریت دارایی آب و فاضلاب شهری به هم پیوسته را با استفاده از یک مدل SD برای

[1] System Dynamics (SD)

نشـان دادن اتصـالات پیچیـده و حلقـه‌هـای بـازخورد در میـان زیرساخت‌های فیزیکی، مالی و بخش‌های اجتماعی-سیاسی پیشنهاد کردند. کـار آنهـا اولـین کـاربرد شـناخته شـده SD بـرای مـدیریت دارایی‌های زیرساخت آب و فاضلاب بود (Rehan et al., 2013).

در پژوهش دیگـری، رهـان و همکـاران، یـک مـدل اسـتراتژی مدیریت پایدار مالی بـرای زیرسـاخت‌هـای توزیـع آب شـهری بـا اسـتفاده از SD ایجـاد کردنـد (Rehan et al., 2015). آنهـا تـأثیر روابط متقابـل و حلقـه‌هـای بـازخورد را در میـان زیرسـاخت‌هـای فیزیکی شبکه توزیع آب، بخش‌های مالی و اجتماعی- سیاسی نشان دادند.

کی و چانگ، یک مدل SD برای برآورد تقاضای آب شهری در یک منطقه شهری تحت تأثیرات اقتصادی نامشخص پیشنهاد کردند. آنها یک مـدل SD جدیـد بـرای مـنعکس کـردن رابطـه ذاتـی بـین تقاضای آب و محیط اقتصاد کلان برای پیش‌بینـی‌هـای بلندمـدت تقاضای آب شهری در یک منطقه شهری با رشد سریع ایجاد کردند (Qi and Chang, 2011).

رهان و همکاران، یک مدل SD برای زیرساخت‌های جمع‌آوری فاضـلاب شـهری بـرای شناسـایی تعـاملات پیچیـده و حلقـه‌هـای بازخورد بین بخش‌های فیزیکی، مالی و اجتمـاعی شـبکه فاضـلاب شـهری ایجـاد کردنـد. ایـن مـدل شـامل مجموعـه‌ای از اهـرم‌هـای خـط‌مشـی اسـت کـه بـه مـدیران شـرکت اجـازه مـی‌دهـد تـا تـأثیر استراتژی‌های تأمین مالی و توان‌بخشی را بر عملکرد سیستم از نظر معیارهـای سـطح مـالی و خـدمات نظـارت کننـد (Rehan et al., 2014).

در پژوهش دیگری رهان و همکاران، کاربرد مـدل SD خـود را برای سیستم‌های جمـع‌آوری فاضـلاب شـهری نشـان دادنـد. آنهـا تأثیرات استراتژی‌های مدیریت پایـدار مـالی جـایگزین را بررسـی کردند: (۱) «تراز صـندوق صـفر» بـدون اسـتقراض در مقابـل، (۲) صدور بدهی برای تسریع در کار سرمایه. نتایج شـبیه‌سـازی نشـان می‌دهد که یک استراتژی تأمین مالی با استقراض می‌تواند هزینه کل چرخه عمر را به حداقل برساند و در عین حال سطح خدمات شـبکه را به حداکثر برساند (Rehan et al., 2015).

گنجی‌دوسـت و همکـاران سـه دسـته زیرسـاخت، شـاخص‌هـای عملکرد اجتماعی سیاسی و مالی را بـرای شـبکه‌هـای توزیـع آب و جمع‌آوری فاضلاب توسـعه دادنـد. آنهـا از SD بـرای نشـان دادن اینکه چگونه شرکت‌هـای آب مـی‌تواننـد از شـاخص‌هـای عملکـرد نرمال شده و یکپارچه زمانی پیشنهادی برای محک زدن و مقایسـه عملکرد کوتاه‌مدت و بلندمـدت شـبکه‌هایشـان در برابـر یکـدیگر و اهداف استراتژیک خود استفاده کنند، بهره بردند (Ganjidoost et al., 2022a).

۱-۲- اهمیت موضوع مدیریت دارایی‌های فیزیکی در شرکت‌هـای آب و فاضلاب

به‌علت فرسودگی تأسیسات آب و فاضلاب، تحریم‌های اقتصادی و عدم امکان تأمین قطعات و تجهیزات مرغـوب خـارجی و همچنـین نبود یک مدیریت یکپاچه که همه ابعاد خدمات‌رسانی شـرکت‌هـای آب و فاضلاب را از همه جنبه‌ها و نـه فقـط هیـدرولوژیکی و فنـی بلکه سیاسی، مالی، اجتماعی، محیط‌زیستی و توسعه پایدار بررسـی کند، وزارت نیرو و شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور را بر آن داشته که با پیروی از اسـتاندارد مـدیریت دارایـی‌هـای فیزیکـی در تأسیسـات آب و فاضـلاب، ارزش افـزوده لازم از تجهیـزات را دریافـت و برنامـه مـدون و مطـابق بـا تغییـرات محیطـی‌ای بـرای شرکت‌های آبفا طـرح‌ریـزی کننـد کـه ایـن موضـوع مـی‌توانـد بـا شبیه‌سازی رفتـار سیسـتم‌هـای پیچیـده‌ای ماننـد تأسیسـات آب و فاضلاب در ارتباط با سایر متغیرها، راهگشا باشد.

۲- مدیریت یکپارچـه دارایـی شـبکه‌هـای توزیـع آب و جمع‌آوری فاضلاب

هدف از این پژوهش، توسعه اولین مدل مدیریت یکپارچـه دارایـی شناخته شده برای شبکه‌های توزیـع آب و جمـع‌آوری فاضـلاب بـا استفاده از SD در شرکت‌های آب و فاضـلاب بـود. ایـن هـدف بـا استفاده از اهداف زیر محقق شد: ابتدا یک نمودار حلقه علّی[1] بـرای طرح‌بندی نقاط اتصال و شناسایی حلقه‌های بازخورد متقابلی که در میان زیرساخت‌ها، امور مالی و بخش‌های اجتماعی- سیاسی وجـود دارد، ترسیم شد. دوم، SD بـرای درک رفتـار پیچیـده سیسـتم‌هـای زیرساختی آب و فاضلاب در یک رویکرد یکپارچـه و نشـان دادن تأثیر اتصالات پیچیده و حلقه‌های بازخورد بر تصمیمات مـدیریتی استفاده شد. در نهایت، مدل یکپارچه با استفاده از داده‌های سه منطقه

[1] Causal Loop Diagram (CLD)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

تبریز، اعتبارسنجی و پیاده‌سازی شد تا تأثیر اتصالات و بازخورد را بررسی کند.

حلقه‌ها در یک رویکرد یکپارچه در SD، روابط کیفی بین پارامترهای مختلف مؤثر بر یک سیستم از طریق یک CLD یا نمودار تأثیر را نشان می‌دهند. تأثیر مثبت یا منفی یک متغیر توسط قطبیت حلقه به ترتیب از طریق علامت مثبت (+) یا منفی (-) نشان داده می‌شود (Sterman, 2000). یک پیوند مثبت نشان می‌دهد که افزایش (یا کاهش) در یک پارامتر باعث افزایش (یا کاهش) در سایر پارامترها می‌شود. به‌طور مشابه، پیوند منفی به این معنی است که متغیر وابسته با علت نسبت معکوس دارد، بنابراین افزایش (یا کاهش) در یک متغیر منجر به کاهش (یا افزایش) متغیر وابسته (ها) خواهد شد. حجم کل فاضلاب تصفیه شده به کل فاضلاب تولید شده و نفوذ لوله‌های فاضلاب بستگی دارد (شکل ۱).

خرابی در شبکه‌های آب می‌تواند میزان شکستگی و در نتیجه افزایش نشت در شبکه‌های آب را افزایش دهد. نشت اصلی آب می‌تواند منبع قابل‌توجهی برای نفوذ به فاضلاب مجاور باشد. علاوه بر نفوذ، نشت آب ممکن است باعث حرکت ذرات خاک در اطراف فاضلاب شود و در نتیجه باعث از بین رفتن تکیه‌گاه و در نتیجه آسیب به لوله‌های فاضلاب شود. خروج از لوله فاضلاب می‌تواند آبهای زیرزمینی را آلوده کند، که ممکن است منبع تأمین برای سیستم توزیع آب باشد. بنابراین افزایش نشت آب باعث افزایش نفوذ فاضلاب می‌شود.

افزایش نشت آب، شرکت آب را مجبور به تأمین آب بیشتر به مشترکان می‌کند. افزایش نفوذ فاضلاب به معنای تولید فاضلاب بیشتر است که منجر به افزایش حجم فاضلاب تصفیه شده می‌شود (شکل ۱). سطح خدمات یکپارچه، سطح خدمات یک شرکت آب به مشتریان خود را اندازه‌گیری می‌کند. سطح خدمات یکپارچه، بستگی به شرایط شبکه‌های آب و فاضلاب دارد. شرایط شبکه به صورت کمّی اندازه‌گیری می‌شود، که در آن افزایش در شرایط شبکه به معنای خراب شدن لوله و کاهش به معنای حرکت لوله به سمت بهترین شرایط است. بنابراین، با افزایش وضعیت شبکه اصلی آب، نشت افزایش می‌یابد. افزایش نشتی باعث نفوذ بیشتر فاضلاب می‌شود و با افزایش نرخ نفوذ، فاضلاب سریع‌تر خراب می‌شود (یا وضعیت شبکه افزایش می‌یابد).

حلقه تقویتی R1 نشان می‌دهد که افزایش (یا کاهش) در شرایط شبکه آب منجر به افزایش (یا کاهش) در سطح خدمات یکپارچه می‌شود (شکل R-1-1). به‌طور مشابه، حلقه تقویتی R2 نشان می‌دهد که افزایش (یا کاهش) در شرایط شبکه فاضلاب منجر به افزایش (یا کاهش) در سطح خدمات یکپارچه می‌شود (شکل R2-1). تقویت حلقه R3 نشان می‌دهد که افزایش در سطح خدمات یکپارچه، تمایل مشتریان (قبول افزایش هزینه) برای پرداخت هزینه بیشتر کاربر را افزایش می‌دهد. با افزایش هزینه کاربر، درآمد افزایش می‌یابد و سطح خدمات یکپارچه افزایش می‌یابد (شکل R3-1).

حلقه تعادل B1 نشان می‌دهد که با افزایش هزینه کاربر، ارزش ریالی که مشتریان می‌پردازند (قبض کاربر) نیز افزایش می‌یابد. این افزایش منجر به کاهش سطح رضایت مشتری می‌شود. رضایت مشتری به صورت کمّی برای تعیین سطح رضایت بخش خدمات ارائه شده (در مقیاس صفر تا ۱۰۰) اندازه‌گیری می‌شود. با کاهش سطح رضایت مشتری، تمایل به پرداخت کاهش می‌یابد و در نهایت، هزینه کاربر کاهش می‌یابد (شکل B1-1). حلقه متعادل‌کننده B2نشان می‌دهد که افزایش کل هزینه‌های تأمین آب، نقدینگی موجود برای نوسازی شبکه توزیع آب را کاهش می‌دهد. کمبود نقدینگی موجود برای کار سرمایه، وضعیت شبکه آب را افزایش می‌دهد که باعث افزایش سطح خدمات یکپارچه می‌شود (شکل B2-1).

حلقه متعادل‌کننده B3 نشان می‌دهد که افزایش کل هزینه‌های فاضلاب باعث کاهش نقدینگی موجود برای بازسازی شبکه جمع‌آوری فاضلاب می‌شود. کمبود نقدینگی موجود برای کارهای سرمایه‌ای باعث افزایش سطح خدمات یکپارچه می‌شود (شکل B3-1).

۳- توسعه مدل SD

SD برای توسعه یک سیستم مدیریت دارایی یکپارچه برای شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب استفاده شده است. مدل نمایش SD برای درک رفتار پیچیده سیستم‌های زیرساختی آب و فاضلاب و نشان دادن تأثیر اتصالات پیچیده و حلقه‌های بازخورد بر مدیریت استفاده شده است. تصمیمات SD برای مدل‌سازی پیچیدگی سیستم‌های یکپارچه آب و فاضلاب استفاده می‌شود. اگر

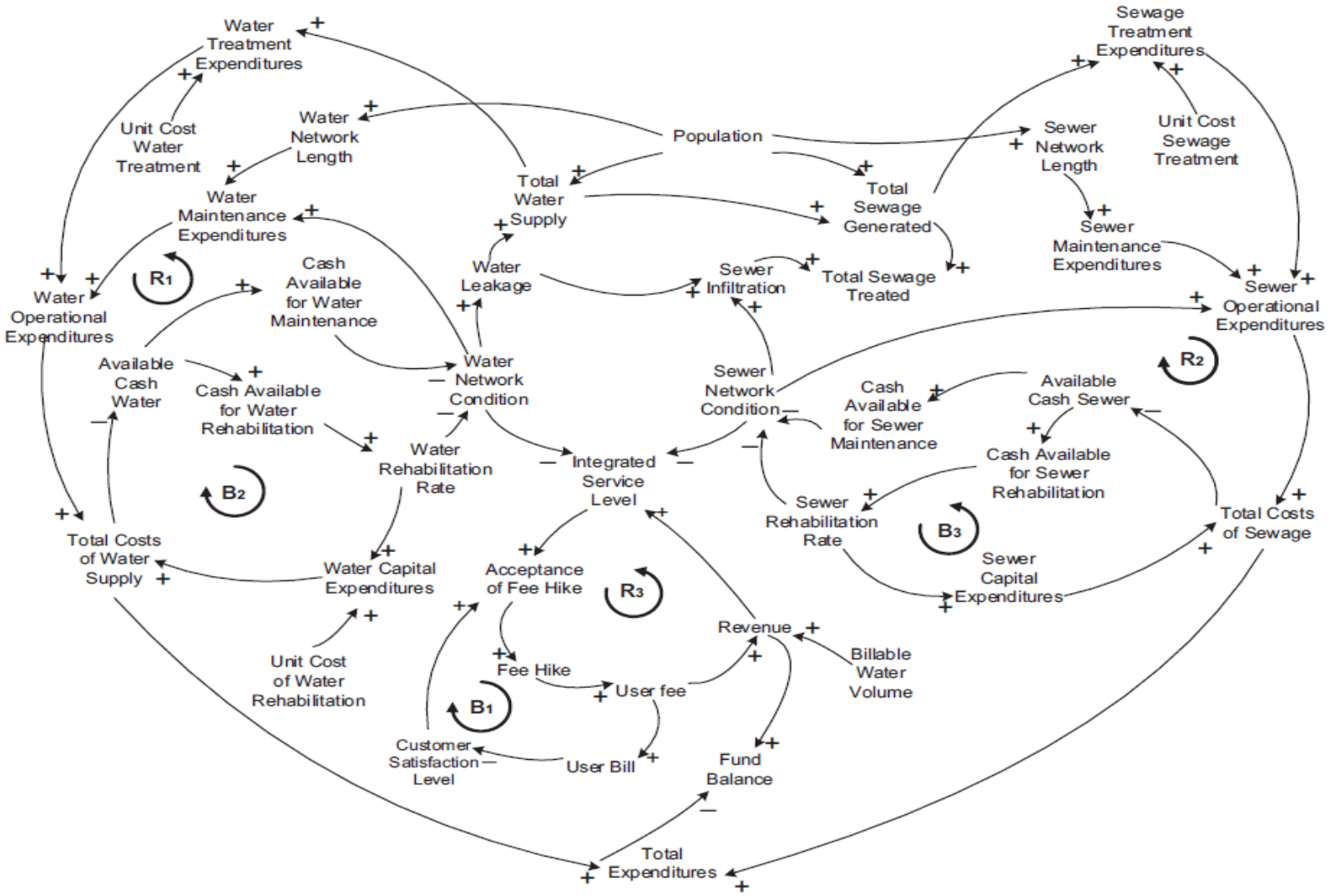

Fig. 1. A causal loop diagram for the integrated asset management of water distribution and wastewater collection networks

شکل ۱- نمودار حلقه علّی برای مدیریت یکپارچه دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع آوری فاضلاب

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

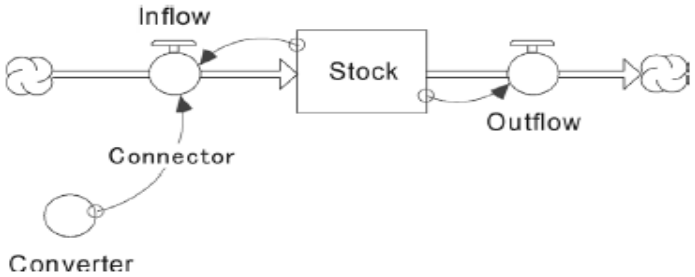

Fig. 2. Building blocks of system dynamics model

شکل ۲- بلوک‌های ساختمان مدل دینامیک سیستم

سیستم از مرتبه چهارم یا بالاتر باشد (یعنی متغیر)، می‌توان آن را به‌عنوان یک سیستم مرتبه بالا (یا متغیر) نامید (Forrester, 1958). در مدل پیشنهادی، بیش از چهار متغیر (یعنی سهام) در محدوده این مدل بررسی شد. به‌عنوان مثال می‌توان به ذخایر نشان‌دهنده لوله‌های آب و فاضلاب با عمر مفید باقیمانده، تقاضای آب، هزینه کاربر و مانده صندوق اشاره کرد. بنابراین، این پژوهش به یک مشکل پیچیده پرداخت که می‌تواند با استفاده از SD به یک مدل تبدیل شود. بلوک‌های ساختمانی اصلی مدل‌سازی SD، ذخایر، جریان‌ها، مبدل‌ها و اتصال‌دهنده‌ها هستند که در شکل ۲ نشان داده شده است.

سهام، نشان‌دهنده انباشته‌ها، چه فیزیکی و چه غیرفیزیکی هستند، مانند موجودی لوله‌های آب و فاضلاب و سطح رضایت مشتری. سهام، نشان‌دهنده آثار باقیمانده از فعالیت‌ها یا اقدامات (یعنی جریان‌ها) است. جریان‌ها، فعالیت‌ها یا اعمال را نشان می‌دهند، مقدار را انتقال می‌دهند و می‌توانند فوراً تغییر کنند. رابطه بین سهام و جریان به صورت زیر بیان می‌شود

$$STOCK(t) = \int [Inflow(s) - Outflow(s)]ds + Stock(t0) \quad (۱)$$

اتصال‌دهنده‌ها اطلاعاتی را حمل می‌کنند تا به‌عنوان ورودی برای تصمیم‌گیری‌ها یا اقدامات عمل کنند. مبدل‌ها ظرف‌هایی برای انجام جبر هستند. آنها توابع گرافیکی و داخلی را در خود جای می‌دهند. مدل SD برای مدیریت یکپارچه دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب شامل سه بخش است: ۱) زیرساخت‌های یکپارچه آب و فاضلاب، ۲) مالی یکپارچه و ۳) یکپارچه اجتماعی- سیاسی. این بخش‌ها به شرح زیر ارائه شده است:

۳-۱- بخش زیرساخت یکپارچه

این بخش نشان‌دهنده موجودی دارایی فاضلاب و شبکه‌های آب است. با این فرض که با افزایش سن لوله‌ها، میزان تخریب به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد، وضعیت فیزیکی آب اصلی به پنج بخش طبقه‌بندی می‌شود (Ganjidoost et al., 2022b) و این فرض بر اساس داده‌های موجود جمع‌آوری شده از شرکت آب مورد مطالعه برای نشان دادن کاربرد مدل ساخته شده است. مدل را می‌توان بر اساس وضعیت سلامت ساختاری واقعی شبکه آب پیکربندی مجدد کرد. وضعیت فیزیکی لوله‌های فاضلاب بر اساس داخلی به پنج استوک طبقه‌بندی می‌شود وضعیت لوله‌ها با استفاده از سیستم رتبه‌بندی مرکز تحقیقات آب بریتانیا که در ویرایش چهارم رتبه‌بندی راهنمای احیای فاضلاب (WRc, 2001) پیشنهاد شده است.

رهان و همکاران، حجم جریان خارجی ورودی و نفوذ (I&I) را بر اساس درجه شرایط داخلی[1] لوله‌ها اندازه‌گیری کردند. این بدان معنی است که با حرکت لوله‌ها به بدترین شرایط، میزان نفوذ افزایش می‌یابد. یک حلقه بازخورد بین وضعیت فیزیکی شبکه‌های آب و فاضلاب وجود دارد. خرابی شبکه آب باعث افزایش میزان نشت می‌شود که می‌تواند منبع قابل‌توجهی برای نفوذ به لوله فاضلاب مجاور باشد (Rehan et al., 2015). این پژوهش حجم کل I&I را از دو منبع محاسبه می‌کند: ۱) آب زیرزمینی(GW) و ۲) نشت آب.

مبدل نسبت پایه I&IGW حاوی یک مقدار مشخص شده توسط کاربر (صفر به ۱) برای تعیین نسبت I&IGW به Total I&I است که در شکل ۳ نشان داده شده است. متعاقباً، مدل نسبت

[1] Internal Condition Grades (ICG)

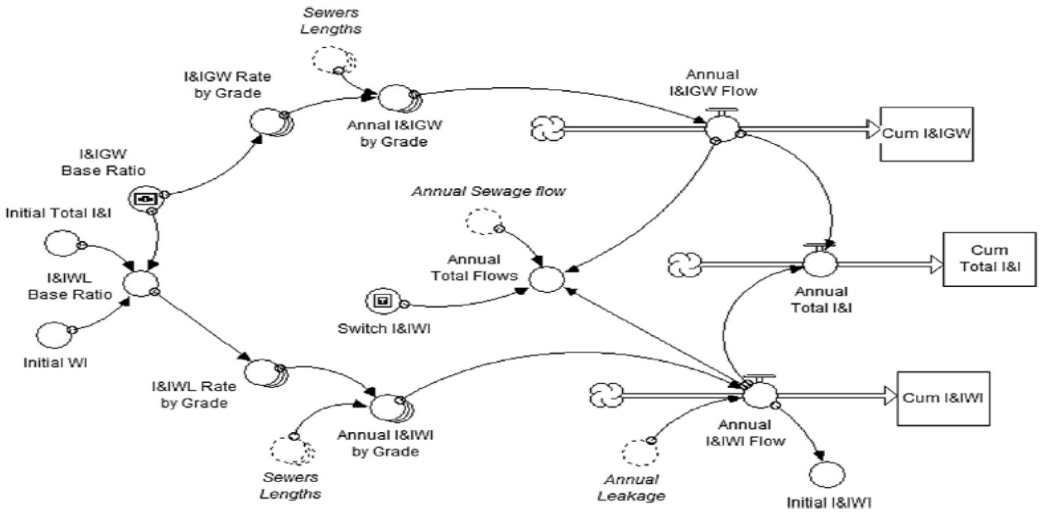

Fig. 3. I&I calculations for the integrated infrastructure sector

شکل ۳- محاسبات I&I برای بخش زیرساخت یکپارچه

I&IWl به Total I&I را محاسبه می‌کند. مبدل نسبت پایه I&Iwl با استفاده از معادله ۲ اندازه‌گیری می‌شود

$$\text{I\&IWI Base Ratio} = (1 - \text{I\&IGW Base Ratio}) \times \left(\frac{\text{Initial Total I\&I}}{\text{Intitial WI}}\right) \quad (۲)$$

که در آن

Wl نشت آب، GW آب زیرزمینی، Initial Total I&I حجم اولیه ورودی و نفوذ کل مشخص شده توسط کاربر، Initial Wl حجم اولیه نشت آب سالانه است که توسط کاربر مشخص می‌شود. برای هر ICG، مبدل I&IGW Rate by Grade حاوی مقدار مشخص شده توسط کاربر برای حجم نفوذ سالانه آب زیرزمینی در واحد طول لوله است (شکل ۳). به‌طور مشابه، برای هر ICG، نرخ I&IWl مبدل بر اساس درجه حاوی مقدار مشخص شده توسط کاربر برای حجم نفوذ سالانه نشت آب در واحد طول لوله است (شکل ۳). حجم Total I&I با استفاده از معادله ۳ تعیین می‌شود

$$\text{Total I\&I} = \text{I\&IGW} + \text{I\&IWL} \quad (۳)$$

که در آن

GW نشان‌دهنده آب زیرزمینی و Wl نشان‌دهنده نشت آب است.

جریان فاضلاب با حجم TotalI&I ترکیب می‌شود تا کل حجم جریان سالانه را تعیین کند (معادله ۴)

$$\text{Annul Total Flow} = \text{Annual Sewage Flow} + \text{Annual Total I\&I Flow} \quad (۴)$$

اگر وضعیت شبکه آب بهبود یابد، در نتیجه حجم Wl سالانه کاهش می‌یابد. با این حال، اگر درجه شرایط داخلی (ICG 1-5) لوله‌های فاضلاب افزایش یابد (یعنی انتقال به ICG 5)، حتی حجم Wlسالانه کاهش می‌یابد، اما همچنان حجم I&IWl سالانه افزایش می‌یابد، که در عمل نمی‌تواند اتفاق بیفتد. این مدل حجم Wl سالانه تولید شده را بر اساس شرایط آب اصلی و نفوذ ناشی از نشت آب به حجم کل I&I را کنترل و متعادل می‌کند که به درجه شرایط داخلی خطوط فاضلاب بستگی دارد (معادله ۵)

$$\text{IF } \sum_{i=1}^{5} \text{Annual I\&IWI}_I > \text{Annual WI THEN Annual WI ELSE } \sum_{i=1}^{5} \text{Annual I\&IWI}_i \quad (۵)$$

که در آن

i نشان‌دهنده نمرات شرایط داخلی از ۱ تا ۵ است.

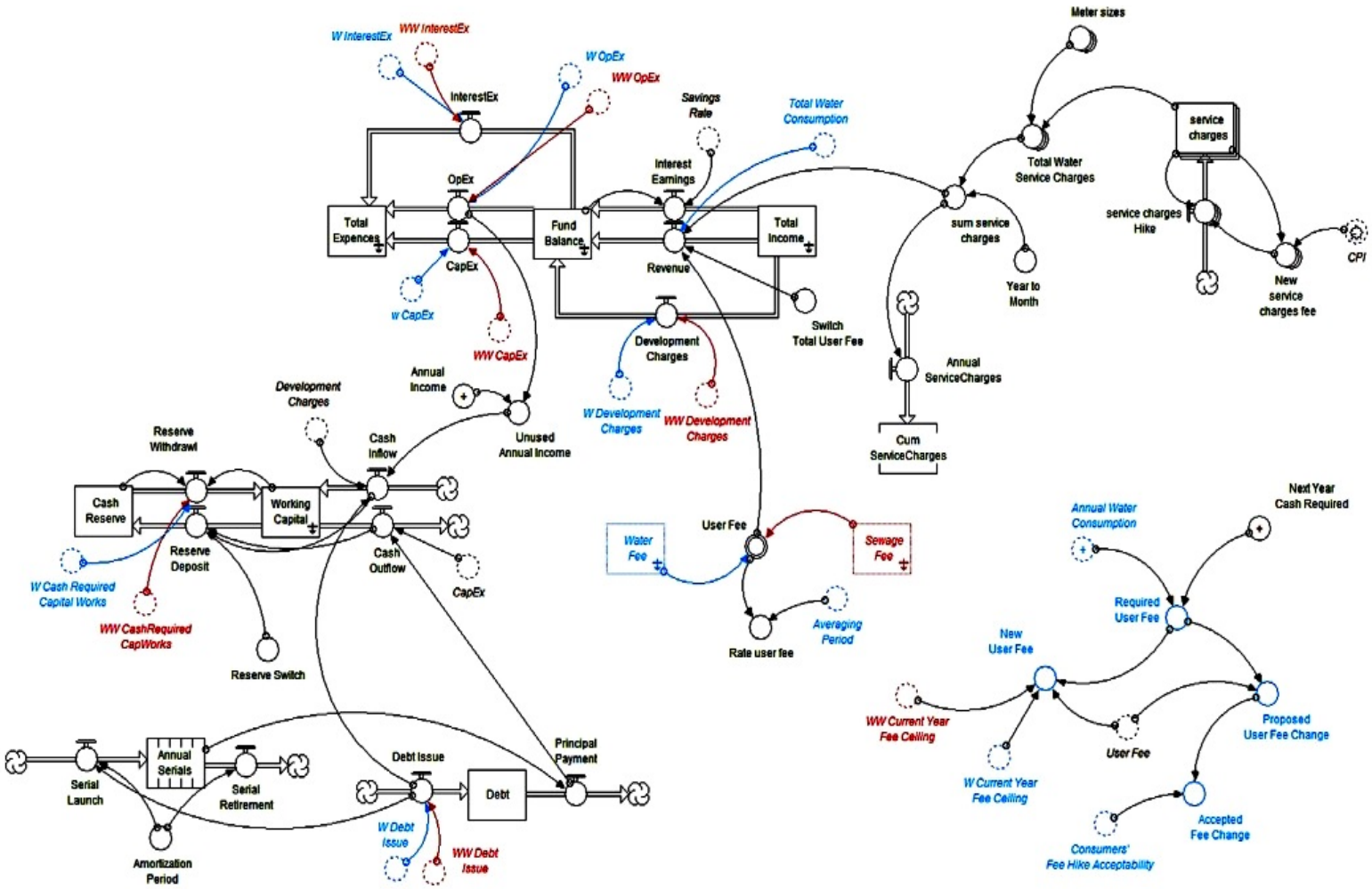

Fig. 4. Integrated finance sector

شکل ۴- بخش مالی یکپارچه

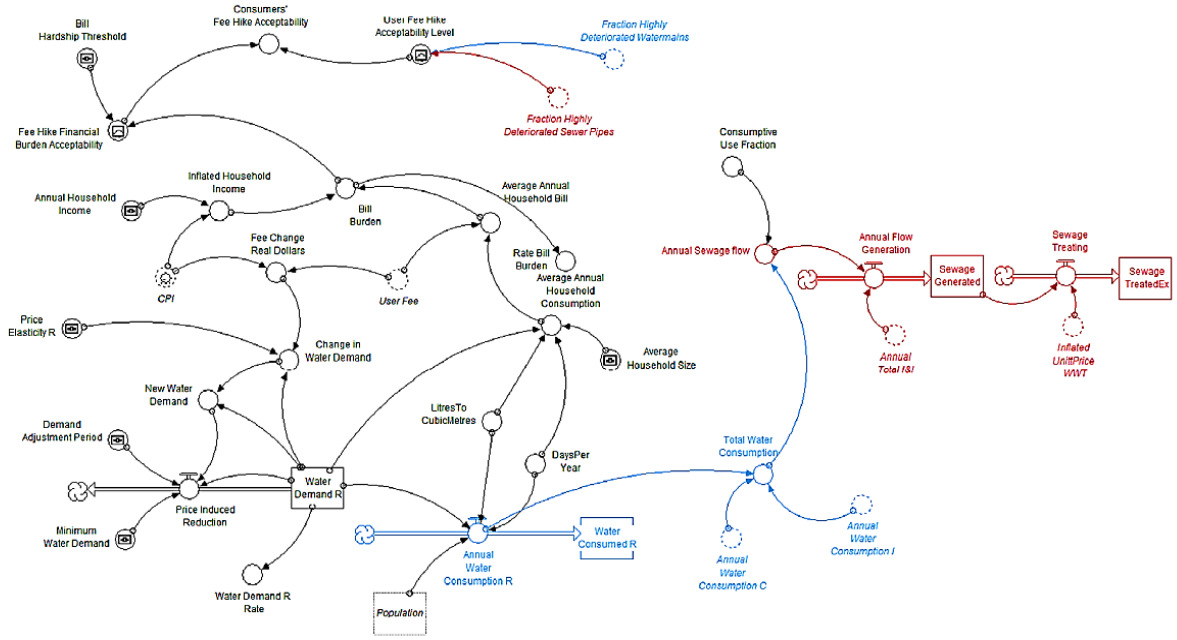

Fig. 5. Integrated sociopolitical sector

شکل ۵- بخش یکپارچه اجتماعی- سیاسی

۳-۲- بخش مالی یکپارچه

بخش مالی یکپارچه، وضعیت مالی شبکه‌های آب و فاضلاب یکپارچه را با توجه به کل درآمد شرکت (یعنی درآمد، درآمد سود و هزینه‌های توسعه)، کل هزینه‌ها (یعنی هزینه‌های عملیاتی، سرمایه و بهره)، مانده صندوق توضیح می‌دهد. بدهی، ذخیره نقدی و هزینه کاربر در شکل ۴ نشان داده شده است. درآمد، درآمد شرکت آب است که بر اساس هزینه کاربر، کل مصرف آب و کل فاضلاب تولیدی محاسبه می‌شود. موجودی صندوق تفاوت بین درآمد کل و کل مخارج شبکه یکپارچه برحسب ریال است و حق‌الزحمه کاربر شامل هزینه واحد آب و فاضلاب (ریال/M^3) است که شرکت آب برای پوشش هزینه‌های خدمات آب و فاضلاب از مشتریان خود هزینه می‌کند.

بخش مالی یکپارچه، درآمدهای حاصل از خدمات آب و فاضلاب را در یک حساب به‌عنوان درآمد کل جمع می‌کند. بنابراین، ظرفیت مالی شرکت برای پرداخت هزینه‌های سرمایه، عملیاتی و بهره به دلیل یکپارچه شدن منابع مالی شرکت افزایش می‌یابد.

۳-۳- بخش یکپارچه اجتماعی- سیاسی

این بخش رفتار مشتریان را در پاسخ به نوسانات هزینه کاربر در تقاضای آب و سطح خدمات یکپارچه ارائه می‌کند که در شکل ۵ نشان داده شده است. به عنوان تابعی از کسری از لوله‌های یکپارچه آب و فاضلاب با وضعیتِ نابسامان (رو به خرابی)، هستند.

حجم فاضلاب تولید شده[1] توسط مشتریان مختلف، کسر کل آب مصرفی از کسر مصرف، در بخش مشتری یکپارچه است. کسری مصرف مبدل، نشان‌دهنده درصدی از آب دریافتی مشترکین است که به‌عنوان فاضلاب به فاضلاب بازگردانده نمی‌شود. به عنوان مثال، آبی که در آبیاری چمن‌ها استفاده می‌شود و از استخرها تبخیر می‌شود. مبدل کل مصرف آب، حاصل‌ضرب متوسط تقاضای سرانه آب و جمعیت خدمت شده توسط شرکت (مصرف مسکونی) و میانگین تقاضای آب در هر سرویس و تعداد خدمات ارائه شده توسط شرکت است. جدول ۱ اهرم‌های سیاستی را برای مدیریت یکپارچه دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب شرح می‌دهد.

[1] Converter Sewage Flow

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

جدول ۱- اهرم‌های سیاست برای مدیریت یکپارچه دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب

Table 1. Policy levers for integrated asset management of water distribution and wastewater collection networks

No.	Policy lever	Description	Unit
1	Preferred network rehabilitation rate	Percentage of total network length to be rehabilitated/replaced each year	%YEAR
2	Debt capacity	Maximum allowable debt as a percentage of total revenue	%
3	Maximum acceptable fraction of highly deteriorated pipes	Percentage of pipes in ICG 5 for sewer lines or highly deteriorated water mains (as percentage) of total network length	%
4	The desired elimination period for highly deteriorated pipes	The elimination period for pipes in ICG 5 or highly deteriorated water mains	YEAR
5	Allowable fee-hike rate	The maximum allowable increase in water or sewer fee per year	%YEAR
6	Desired cash reserve	Percentage of total network asset value	%

۳-۴- الزامات داده برای مدل

SD یکپارچه بسیار مهم است که طبقه‌بندی و سطح جزئیات مناسب باشد، زیرا جمع‌آوری داده‌ها می‌تواند پرهزینه و زمان‌بر باشد. داده‌های قابل‌توجهی باید در مورد اجزای حیاتی جمع‌آوری شود.

پارامترهای ایجاد یک مدل SD جدید برای مدیریت یکپارچه دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب داده‌های موردنیاز برای مدل‌های SD یکپارچه آب و فاضلاب در جدول ۲ فهرست شده است.

۳-۵- اعتبارسنجی مدل SD یکپارچه

سه روش آزمون اتخاذ شده از استرمن، برای اعتبارسنجی مدل SD یکپارچه استفاده شد (Sterman, 2000) :

۱- آزمون ارزیابی ساختار برای بررسی سطح تجمیع برای سازگاری با دانش سیستم واقعی مرتبط با هدف انجام شد. آزمون‌های مدل جزئی برای بررسی عقلانیت قوانین تصمیم‌گیری فردی انجام شد. برای این منظور، سطح تجمع برای مدل‌های یکپارچه آب و فاضلاب با مقایسه رفتار مدل‌های آب و فاضلاب به‌صورت جداگانه در مقایسه با مدل یکپارچه، آزمایش شد.

۲- یک آزمایش شرایط شدید برای بررسی رفتار نامحتمل سیستم در مواجهه با شرایط شدید انجام شد. برای این منظور مقدار حداقل و حداکثر به پارامترهای مختلف اختصاص داده شد.

۳- یک آزمون خطای یکپارچه‌سازی برای اطمینان از عدم حساسیت نتایج مدل به انتخاب مرحله زمانی انجام شد. بنابراین، شبیه‌سازی‌ها با کاهش مقدار گام زمانی به ۲۵ و ۱۲/۵ سال انجام و تغییرات ارزیابی شد. این موضوع نشان داد که هیچ تغییر قابل‌توجهی در نتایج مدل‌سازی SD یکپارچه وجود ندارد.

۴- نمایش روش مدیریت یکپارچه دارایی

سه منطقه شهر تبریز در آذربایجان شرقی با ۳۶۱کیلومتر شبکه اصلی آب و ۳۴۱کیلومتر لوله‌های فاضلاب که به جمعیتی بیش از ۱۰۰۰۰۰ نفر خدمات‌رسانی می‌کند، برای نشان دادن کاربرد دارایی یکپارچه استفاده شد. مدل مدیریت شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب، هدف کشف تأثیر ارتباطات متقابل و حلقه‌های بازخوردی است که در میان زیرساخت‌های یکپارچه، مالی و بخش‌های اجتماعی- سیاسی وجود دارد. برای این منظور، تحت همان اهرم‌های سیاست (جدول ۳)، نتایج شبیه‌سازی آب و فاضلاب یکپارچه و مدل‌های آب و فاضلاب انباشته-جدا شده در طول یک چرخه عمر ۵۰ ساله مقایسه شدند. لازم به ذکر است که مدل تجمیعی- مجزا به این معنی است که هر شبکه آب و فاضلاب

جدول ۲- الزامات داده برای مدل دینامیک سیستم یکپارچه آب و فاضلاب (واحدهای مثال به صورت متریک آمده است)

Table 2. Data requirements for the integrated water and wastewater system dynamics model (example units are given in metric)

Sector	Data	Unit
Integrated water and wastewater infrastructure	The initial total length of a given pipe material	Kilometer[km] or meter [m]
	Network condition (condition assessment history)	Year
	Inflow and infiltration (I&I) and water leakage volumes (for the deterioration model)	[m^3], [L] or [ML]
	Inventory of water meters as specified by the diameter in millimeter	mm
	Current and preferred rehabilitation rate (percentage of the network per year)	%/Year
	The maximum acceptable fraction of deteriorated pipes over design life for water mains and ICG 5 for wastewater pipes	%
	The desired elimination period for deteriorated water and wastewater pipes	Year
Integrated finance	The unit cost of water, water treatment, wastewater, and wastewater treatments Ccurrent fund balance	Rial/M^3
	Current fund balance	Rial
	Current and history of capital and operational expenditures	Rial/Year
	Unit charge of potable water services and wastewater services per service connection	Rial/Year
	Approved fee hike rate	%/Year
	Development charges	Rial/Year
	Unit costs of rehabilitation/replacement, operation and maintenance	Rial/M
	Inflation, borrowing and saving rates	%
	Maximum debt capacity per year as a percentage of annual revenue	%
	Desired reserve fraction as a percentage of total network value	%
Integrated sociopolitical	Population (number of different classes of customers. such as residential, commercial and institutional)	-
	Population growth	%/Year
	Usage history (i.e., water demand) Liter (L) per (p) capita (C) per day (D)	LPCD
	Minimum water demand	LPCD
	Price elasticity of water demand	-
	Annual supplied water	M^3
	Annually treated wastewater	M^3
	Annual average household income	Rial/Year
	Average household size	-
	Service coverage area	M^2

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

جدول ۳- اهرم‌های سیاست بهینه برای مدیریت دارایی مدل‌های دینامیک سیستم یکپارچه/تجمیع- جدا شده

Table 3. Optimal policy levers for asset management of integrated/aggregated-separate system dynamics models

NO	Optimal policy lever	Network	Value
1	Allowable fee-hike rate (% per annum)	Water distribution	8.3
		Wastewater collection	6.8
2	Desired cash reserve (% of annual network value)	Water distribution	4
3	Allowable debt service (% of annual revenue)	Wastewater collection	12
4	Maximum fraction of highly deteriorated pipes (% of network)	Water distribution	4.8
		Wastewater collection	10.5
5	Desired elimination period for highly deteriorated pipes (year)	Water distribution	5
		Wastewater collection	10.5
6	Preferred rehab rate (% of network per year)	Water & wastewater	1.4

به‌صورت مجزا و بدون هیچ‌گونه تعامل شبیه‌سازی شده است. سپس نتایج برای مقایسه با مدل تلفیقی آب و فاضلاب تجمیع شد. دو مدل با استفاده از یک استراتژی مدیریت استقراض برای شبکه جمع‌آوری فاضلاب و یک استراتژی مدیریت ذخیره سرمایه برای شبکه توزیع آب مقایسه شدند. همان طور که در جدول ۳ ارائه شده است، شش اهرم، خط مشی رفتار سیستم را برای مدیریت بهینه زیرساخت‌های آب و فاضلاب در طول چرخه زندگی خود کنترل می‌کنند. این اهرم‌های خط‌مشی برای اطمینان از اینکه شرکت دارای بودجه کافی برای مدیریت پایدار شبکه‌های خود است، تنظیم شد. همان طور که در معادله ۲ بیان شده، نسبت پایه I&IGW، ۰/۸ در نظر گرفته شد. میانگین نسبت I&IGW به کل I&I برای هر سه ابزار مؤثر است.

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی و بحث

اعتبارسنجی آب و فاضلاب یکپارچه (شکل ۶-a و ۶-b) برای تأیید مدل SD نشان داده شد. برای این منظور، هر بخش توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب مدل یکپارچه آب و فاضلاب به صورت مجزا و بدون داشتن هیچ‌گونه تعامل یا حلقه بازخورد شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی رفتار مشابهی را با آب و فاضلاب یکپارچه و جداسازی شده نشان داد که در شکل ۶-a و ۶-b آمده است.

شش متغیر در یک افق برنامه‌ریزی ۵۰ ساله، شامل ۱) هزینه کاربر، ۲) افزایش هزینه کاربر، ۳) ذخیره نقدی تجمعی و بدهی تجمعی، ۴) نسبت خدمات بدهی، ۵) ورودی و نفوذ سالانه (I&I) و ۶) نشت آب سالانه مقایسه شدند. شکل ۶-a هزینه کاربر مدل‌های W&WW یکپارچه و W&WW جمع‌آوری شده را جدا نشان می‌دهد. هزینه کاربر که برای هر دو مدل در ۵ سال اول با مقداری نوسان دنبال می‌شود، به ۲۰ سال افزایش می‌یابد، به‌صورت خطی تا پایان شبیه‌سازی ادامه می‌یابد (شکل ۶-a). نوسانات در هزینه کاربر برحسب افزایش هزینه کاربر ارائه شده که میزان تغییر در هزینه کاربر در سال را نشان می‌دهد (شکل ۶-b).

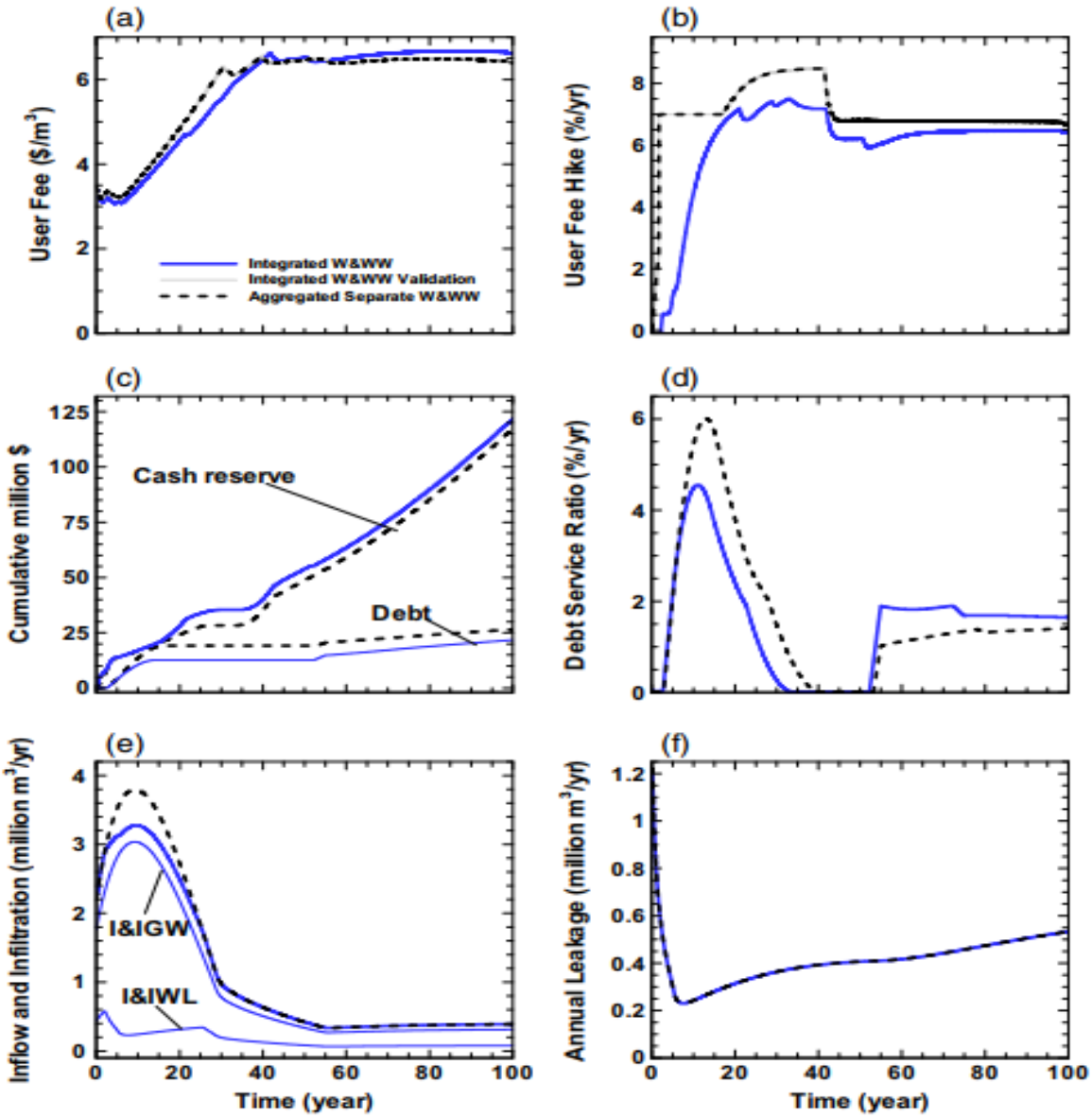

Fig. 6. Results over a 50-year simulation period (water and wastewater)

شکل ۶- نتایج در یک دوره شبیه‌سازی ۵۰ ساله (آب و فاضلاب)

نتایج نشان داد که حداکثر نرخ افزایش کارمزد ۷/۵ و ۸/۵ درصد توسط مدل‌های W&WW یکپارچه و مجزای W&WW به‌دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در ۲۶ سال اول، هزینه کاربر برای مدل SD یکپارچه ارزان‌تر از مدل SD جمع‌آوری شده که این به‌دلیل افزایش ظرفیت مالی مدل یکپارچه است (شکل ۶-a).

ذخیره نقدی انباشته و بدهی در یک افق برنامه‌ریزی ۵۰ ساله در شکل ۶-c برای مدل‌های W&WW یکپارچه و W&WW مجزا ارائه شده است. به طور کلی نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی برای هر دو مدل است. ذخیره نقدی با ارزش صفر ریال برای هر دو مدل شروع می‌شود و پس از آن در ۱۵ سال اول انحناهایی ایجاد می‌شود که تا پایان دوره شبیه‌سازی به صورت خطی افزایش می‌یابد. شکل

dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.420464.3378

d-۶ نسبت خدمات بدهی را به‌عنوان درصدی از درآمد سالانه برای سناریوی استقراض نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نسبت خدمات بدهی روند مشابهی را برای هر دو مدل نشان می‌دهد. برای مدل W&WW یکپارچه که با مقدار صفر شروع می‌شود، افزایش می‌یابد تا به حداکثر مقدار خود یعنی ۴/۵ درصد در ۶ سال برسد و بعد به صفر درصد در ۲۰ سال کاهش می‌یابد و ثابت می‌ماند و به دنبال آن یک افزایش سریع دارد و به افزایش ادامه می‌دهد. برای رسیدن به مقدار ۱/۶۵ درصد در ۵۰ سال برای مجموع W&WW، با صفر شروع می شود، رشد می‌کند تا به حداکثر مقدار خود یعنی ۶ درصد در ۱۳ سال برسد، سپس به صفر درصد در ۴۰ سال کاهش می‌یابد و برای ۱۳ سال ثابت می‌ماند، به دنبال آن افزایش سریعی پیدا می‌کند و به افزایش ادامه می‌دهد تا به مقدار ۱/۴ درصد در ۵۰ سال برسد (شکل d-۶).

۵- نتیجه‌گیری

این روش برای اولین بار در بین شرکت‌های آب و فاضلاب داخل کشور در مورد مدیریت دارایی‌های فیزیکی انجام شده است و به علت رویکرد جدید شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور مبنی بر اجرای مدیریت دارایی فیزیکی در کل تأسیسات آب و فاضلاب چه در بخش تأمین و چه در بخش تصفیه و توزیع و جمع‌آوری، یک راه‌حل نوین برای پیش‌بینی وضعیت تأسیسات در صورت مدیریت یکپارچه برای کل شرکت‌های آب و فاضلاب که در بحران فرسودگی تجهیزات، کم‌آبی و مالی هستند، ارائه می‌دهد.

خطوط فاضلاب مورد مطالعه در این پژوهش، سرمایه بیشتری نیاز دارد تا اهرم خط مشی کسری لوله‌های بسیار خراب در مقایسه با شبکه توزیع آب (که وضعیت نسبتاً بهتری دارد) را برآورده سازد. یک استراتژی مدیریت استقراض برای شبکه فاضلاب باید اجرا شود تا کار سرمایه را تسریع بخشد. یک استراتژی مدیریت فعال برای شبکه توزیع آب با ذخیره وجوه نقد موردنیاز برای هر گونه عقب‌ماندگی آینده باید اجرا شود. این ذخیره نقدی در مانده صندوق یکپارچه، انباشته می‌شود. بنابراین، ظرفیت مالی مدل یکپارچه افزایش می‌یابد، که این شرکت را قادر می‌سازد تا کارهای عملیاتی، نگهداری و سرمایه‌ای را برای ارتقای سطح خدمات یکپارچه دارایی‌ها سرعت بخشد. در عمل، مدل یکپارچه به شرکت اجازه می‌دهد تا به دلیل دسترسی به یک منبع مالی یکپارچه، استقراض را تغییر دهد.

یک CLD، برای مدیریت یکپارچه دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب برای تعیین نقاط اتصال و شناسایی حلقه‌های بازخورد متقابل موجود در بخش‌های زیرساختی، مالی و اجتماعی-سیاسی باید ایجاد شود. مدل توسعه‌یافته SD، اولین رویکرد یکپارچه شناخته شده برای مدیریت دارایی سیستم زیرساخت آب و فاضلاب است. مدل SD یکپارچه، با استفاده از داده‌های یک ابزار در سه منطقه تبریز اعتبارسنجی و پیاده‌سازی شده که نتایج شبیه‌سازی در یک افق برنامه‌ریزی ۵۰ ساله نشان می‌دهد مدل SD یکپارچه به شرکت اجازه می‌دهد تا عملکرد زیرساختی، مالی و اجتماعی- سیاسی دارایی‌های آب و فاضلاب خود را نسبت به مدیریت این دارایی‌ها به صورت مجزا، افزایش دهد. در عمل، مدل توسعه‌یافته SD می‌تواند ذی‌نفعان شرکت آب را قادر سازد تا سیاست‌های مختلف تصمیم‌گیری و استراتژی‌های تأمین مالی را برای مدیریت یکپارچه بلندمدت دارایی شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب ارزیابی کنند.

این پژوهش چارچوبی نوآورانه ارائه کرد که برنامه‌ریزی جامع را برای شرکت‌های آب و فاضلاب برای اجرای اهرم‌های سیاست در سطح استراتژیک تسهیل کند و آنها را قادر سازد تا زیرساخت‌های پایدار، اجتماعی- سیاسی و عملکرد مالی را در طول چرخه حیات شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب به دست آورند.

۶- پیشنهادها

پژوهش‌های بیشتر برای توسعه یک مدل مدیریت استراتژیک کل‌نگر با معرفی زیرساخت‌ها و بخش‌های مالی برای تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب و ترکیب این بخش‌ها در مدل مدیریت دارایی یکپارچه برای شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب موردنیاز است. این مورد می‌تواند تصمیم‌گیرندگان شرکت‌های آب را قادر سازد تا پیچیدگی و تعاملات میان زیرساخت‌ها، بخش‌های مالی و اجتماعی- سیاسی کل سیستم‌های زیرساخت آب، از جمله توزیع آب، جمع‌آوری فاضلاب و تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب را بهتر درک کنند.

این نوع مدل‌سازی در داخل کشور برای شبکه‌های آب و فاضلاب به دلیل جدید بودن مدیریت دارایی فیزیکی و نیز به دلیل کمبود داده‌ها و عدم توجه به مسایل سیاسی و اجتماعی در شرکت‌های خدمات‌رسان دولتی مانند آب و فاضلاب در نوع خود بدیع و جدید است. پس لازم است برای توسعه چنین مدل‌هایی برای سایر تأسیسات مثل ایستگاه‌های پمپاژ، تصفیه‌خانه‌های آب و فاضلاب که هزینه‌های هنگفت تجهیزات آنها، شرکت را از خرید و جایگزینی تجهیزات آن عاجز کرده است، برای تعیین زمان دقیق سرمایه‌گذاری و زمان جایگزینی تجهیزات، اقداماتی انجام شود. این تأسیسات حیاتی و بحرانی بوده و تبعات خرابی و عدم برنامه‌ریزی برای جایگزینی به موقع تجهیزات گران‌قیمت آنها می‌تواند تبعات مالی، اجتماعی و محیط‌زیستی به بار آورد که در مدیریت دارایی فیزیکی توجه به سطوح خدمت از بخش‌های اصلی به شمار می‌رود.

۷- قدردانی

نویسندگان این پژوهش، از پرسنل و مدیریت محترم شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان شرقی به علت قراردادن اطلاعات اولیه در اختیار پژوهشگران، قدردانی می‌کنند.

References

Coyle, R. G. 1997. System dynamics modelling: a practical approach. *Journal of the Operational Research Society*, 48**,** 544-544. https://doi.org/10.1111/j.1467 8667.2012.00773.x.

Duchesne, S., Beardsell, G., Villeneuve, J. P., Toumbou, B. & Bouchard, K. 2013. A survival analysis model for sewer pipe structural deterioration. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28**,** 146-160. https://doi.org/10.1111/j.1467 8667.2012.00773.x.

Elsawah, H., Bakry, I. & Moselhi, O. 2016. Decision support model for integrated risk assessment and prioritization of intervention plans of municipal infrastructure. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7**,** 04016010. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000245.

Ford, F. A. 1999. Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems, *International Journal of Sustainability in Higher Education,* 1(1)**,** https://doi.org/10.1108/ijshe.2000.24901aae.002.

Forrester, J. W. 1958. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 36**,** 37-66.

Ganjidoost, A., Knight, M. A., Unger, A. J. & Haas, C. T. 2021. Performance modeling and simulation for water distribution networks. *Frontiers in Water*, 3**,** 718215. https://doi.org/10.3389/frwa.2021.718215.

Ganjidoost, A., Knight, M. A., Unger, A. J. & Haas, C. T. 2022a. Performance modeling and simulation for wastewater collection networks. *Frontiers in Water*, 4**,** 723639. https://doi.org/10.1002/aws2.1283.

Ganjidoost, A., Vladeanu, G. & Daly, C. M. 2022b. Leveraging risk and data analytics for sustainable management of buried water infrastructure. *AWWA Water Science*, 4**,** e1283.

Grigg, N. S. 2009. *Total Water Management: Leadership Practices for a Sustainable Future*: Published by American Water Works Association, Denver, Colorado, USA. https://doi.org/10.1080/02508060902937512.

Hawari, A., Alkadour, F., Elmasry, M. & Zayed, T. 2017. Simulation-based condition assessment model for sewer pipelines. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31**,** 04016066. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000914.

Johnson, N. 2009. *Simply Complexity: a Clear Guide to Complexity Theory*, Simon and Schuster.

Katko, T. S., Kurki, V. O., Juuti, P. S., Rajala, R. P. & Seppälä, O. T. 2019. Integration of water and wastewater utilities. *Water Services Management and Governance*, 29. https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2010.tb10187.x.

Kleiner, Y., Adams, B. J. & Rogers, J. S. 1998. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, 34**,** 2039-2051. https://doi.org/10.1029/98WR00377.

Mashford, J., Marlow, D., Tran, D. & May, R. 2011. Prediction of sewer condition grade using support vector machines. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25**,** 283-290. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000089.

Mazumder, R. K., Salman, A. M., Li, Y. & Yu, X. 2021. Asset management decision support model for water distribution systems: impact of water pipe failure on road and water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147**,** 04021022. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001365MOE.

Mohammadifardi, H., Knight, M. A. & Unger, A. A. 2019. Sustainability assessment of asset management decisions for wastewater infrastructure systems-implementation of a system dynamics model. *Systems*, 7**,** 34. https://doi.org/10.3390/systems7030034.

Park, H., Ting, S. H. & Jeong, H. D. 2016. Procedural framework for modeling the likelihood of failure of underground pipeline assets. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 7**,** 04015023. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000222.

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**,** 1628-1641. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.020.

Rehan, R., Knight, M. A., Unger, A. J. & Haas, C. T. 2013. Development of a system dynamics model for financially sustainable management of municipal watermain networks. *Water Research*, 47**,** 7184-7205. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.061.

Rehan, R., Knight, M. A., Unger, A. J. & Haas, C. T. 2014. Financially sustainable management strategies for urban wastewater collection infrastructure–development of a system dynamics model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39**,** 116-129. https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.12.003.

Rehan, R., Unger, A., Knight, M. A. & Haas, C. 2015. Strategic water utility management and financial planning using a new system dynamics tool. *Journal-American Water Works Association*, 107**,** E22-E36. https://doi.org/10.5942/jawwa.2015.107.0006.

Richmond, B. 2001. Systems Thinking and the STELLA Software: Thinking, Communicating, Learning and Acting More Effectively in the New Millennium. In Richmond, B. 2001. *Stella: An Introduction to Systems Thinking*, I See Systems Pub., New Hampshire, USA.

Roshani, E. & Filion, Y. 2014. Event-based approach to optimize the timing of water main rehabilitation with asset management strategies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140**,** 04014004. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000392.

Scheidegger, A., Hug, T., Rieckermann, J. & Maurer, M. 2011. Network condition simulator for benchmarking sewer deterioration models. *Water Research*, 45**,** 4983-4994. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.07.008.

Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M. & Lienert, J. 2014. Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*, 49**,** 124-143. https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.017.

Sterman, J. 2000. *Instructor's Manual to Accompany Business Dyanmics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, USA.

Sterman, J. D. 2001. System dynamics modeling: tools for learning in a complex world. *California Management Review*, 43**,** 8-25. https://doi.org/10.2307/41166098.

Syachrani, S., Jeong, H. S. & Chung, C. S. 2011. Dynamic deterioration models for sewer pipe network. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2, 123-131. https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000085.

Tran, H. D., Marlow, D. & May, R. 2010. *A*pplication of Decision Support Models in Asset Management of Sewer Networks: Framework and Case Study. In: Ruchti, G. & Roode, P. E. T. 2010. *Pipelines 2010: Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability: Renew, Rehab, and Reinvest*. Keystone, Colorado, USA. 846-856.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License