dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

Case Study

Journal of Water and Wastewater, Vol. 34, No. 1, pp: 1-24

Development of a System Dynamics Model for Improving Sustainable Urban Water Management (Case Study: Isfahan City)

N. Nezami[1], M. Tizghadam[2*], M. Zarghami[3], M. Abbasi[4]

1. PhD. Candidate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
(Corresponding Author) m_tizghadam@sbu.ac.ir
3. Prof., Institute of Water and Energy, Sharif University of Technology, Tehran, Iran; Prof., Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran
4. Assist. Prof., Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received Apr. 20, 2022 Accepted Sep. 18, 2022)

To cite this article:
Nezami, N., Tizghadam, M., Zarghami, M., Abbasi, M. 2023. "Development of a system dynamics model for improving sustainable urban water management (case study: Isfahan City)" Journal of Water and Wastewater, 34(1), 1-24. Doi: 10.22093/wwj.2022.338545.3252. (In Persian)

Abstract

The use of a systematic view has increased to deal with social and environmental problems in recent years. Recently, various models have been developed to address urban water issues. Most of them are focused on runoff and storm water management and few have addressed the problems of the Drinking water system. However, the lack of an effective model that supports complex and multi-objective urban water system in terms of management and decision-making is felt. This article focuses on the importance of a sustainable approach to the conventional approach in urban water management and the need to change attitudes due to the current state of water resources. In this paper a novel system dynamics model has been developed, taking into account the technical, economic, social, environmental and government subsystems that simulate and predict the results of urban water management measures. The results of the implementation of the proposed model on the city of Isfahan showed that the model has a high precision in simulating system condition. The model error rate in simulation of different parameters is less than 5%. Therefore, the model can be used as a tool for analyzing different management strategies before implementing and spending time and cost to assist decision makers.

Keywords: Urban Water Management, Dynamic Modeling, Decision Supporting System, Vensim, Isfahan.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۴، شماره ۱، صفحه: ۲۴-۱

توسعه یک مدل پویایی‌های سیستم به‌منظور ارتقای مدیریت پایدار آب شهری (مطالعه موردی شهر اصفهان)

نیما نظامی[۱]، مصطفی تیزقدم[۲*]، مهدی ضرغامی[۳]، مریم عباسی[۴]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(نویسنده مسئول) m_tizghadam@sbu.ac.ir
۳- استاد، مدعو پژوهشکده انرژی، آب و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شریف و استاد، دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۴- استادیار، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(دریافت ۱۴۰۱/۱/۳۱ پذیرش ۱۴۰۱/۶/۲۷)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:
نظامی، ن.، تیزقدم، م.، ضرغامی، م.، عباسی، م.، ۱۴۰۲، "توسعه یک مدل پویایی‌های سیستم به‌منظور ارتقای مدیریت پایدار آب شهری (مطالعه موردی شهر اصفهان)" مجله آب و فاضلاب، ۳۴(۱)، ۲۴-۱. **Doi: 10.22093/wwj.2022.338545.3252**

چکیده

استفاده از دیدگاه سیستماتیک برای مقابله با مشکلات اجتماعی و محیط‌زیستی در سال‌های اخیر افزایش یافته است. اخیراً مدل‌های زیادی برای رسیدگی به مسائل آب شهری توسعه داده شده است. بیشتر آنها بر روی رواناب‌ها و مدیریت آبهای سطحی متمرکز هستند و تعداد کمی به مشکلات سیستم آب‌رسانی پرداخته‌اند. با این وجود، کمبود یک مدل مؤثر که به‌دلیل پیچیدگی و اهداف متعدد سیستم آب شهری در بعد مدیریتی و تصمیم‌سازی از آن پشتیبانی کند، احساس می‌شود. در این پژوهش، ابتدا مشکلات رویکرد متداول مدیریت آب شهری بررسی شد و سپس ویژگی‌های رویکرد مدیریت پایدار آب شهری برای پاسخ‌گویی به نیازهای موجود بررسی شد که نتایج آن لزوم تغییر نگرش با توجه به وضعیت فعلی منابع آب را پررنگ‌تر می‌کند. به‌این منظور مدلی بر پایه پویایی‌های سیستم با در نظر گرفتن زیرسیستم‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی، محیط‌زیستی و حاکمیتی توسعه داده شد که نتایج اقدامات مدیریت آب شهری را شبیه‌سازی و پیش‌بینی می‌کند. مدل پویایی‌های سیستم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار Vensim توسعه داده شده و در بازه زمانی بین سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ برای شهر اصفهان اجرا شد. مدل پایه توسعه داده شده قابلیت دریافت و پیاده‌سازی سناریوهای مدیریتی را دارد و می‌تواند آنها را پیش‌بینی و مدل‌سازی کند. همچنین در نهایت، شاخص UWSI برای ارزیابی پایداری سناریوها در مدل در نظر گرفته شد. نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی شهر اصفهان نشان داد که مدل دقت زیادی در شبیه‌سازی وضعیت سیستم دارد و درصد خطای آن در شبیه‌سازی حجم آب مصرفی، هزینه تولید آب، قیمت آب و درآمد سالانه حاصل از فروش آب به‌ترتیب حدود ۳/۲، ۲، ۳/۳ و ۴/۵ درصد بود. همچنین میزان شبیه‌سازی شده آب بدون درآمد و هزینه سالانه کارکنان این بخش‌ها نیز به‌ترتیب ۳/۶ و ۱/۴ از مقدار واقعی انحراف داشت. به‌این‌ترتیب مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای تحلیل و بررسی استراتژی‌های مدیریتی مختلف به کمک تصمیم‌گیران آمده و قبل از اجرای تصمیمات مختلف و صرف زمان و هزینه اثرات آن را بررسی و مناسب‌ترین استراتژی را انتخاب کنند.

واژه‌های کلیدی: مدیریت آب شهری، مدل‌سازی پویا، سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری، Vensim، اصفهان

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

۱- مقدمه

امروزه مدیریت آب شهری، به یکی از چالش‌های بزرگ مدیریت شهری در بسیاری از کشورهای دنیا تبدیل شده است. همان طور که در اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد[1] اشاره شده است مدیریت آب شهری یکی از عوامل مهم شکل‌گیری یک جامعه پایدار است (Sørup et al., 2020). مدیریت نامناسب آب می‌تواند بر سلامت جامعه، اقتصاد و محیط‌زیست اثرات منفی داشته باشد. به علاوه پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۷۰ درصد از جمعیت جهان شهرنشین باشند (Un-Desa, 2009)، در حالی که بیشتر شهرها در حال حاضر تحت تنش آبی هستند و منابع آب پایداری برای رفع نیازهای خود ندارند (Ramôa et al., 2015).

در سال‌های اخیر شیوه زندگی انسان‌ها نیز برای تأمین شرایط راحت‌تر و بهبود استانداردهای زندگی تغییر کرده و استفاده از مواد و منابع و خدمات غیرضروری به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این تغییرات همچنین بر الگوی نیاز آبی نیز اثر گذاشته و مصرف آب شهری را مخصوصاً برای مصارف بهداشتی افزایش داده است (UNESCO, 2009, Ramôa et al., 2015).

عوامل گوناگونی سبب فشار و تهدید سیستم آب شهری هستند که می‌توانند در آینده باعث بروز تنش و مشکلات شوند. این فشارها را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (۱) فشارهای محیط‌زیستی مانند تنش آبی (کیفی و کمّی) و تغییر اقلیم، (۲) فشارهای اجتماعی مانند رشد جمعیت، رشد شهرنشینی و تغییر سبک زندگی و (۳) فشارهای اقتصادی مانند افزایش هزینه‌ها، ساختار نامناسب تعرفه خدمات آب، اثر رقابت‌ها و درگیری‌های سیاسی بر مشکلات اقتصادی و مشکلات مالی و تأمین سرمایه (Un-Desa, 2009, UNESCO, 2009, Novotny et al., 2010, Ramôa et al., 2015, Polonenko et al., 2020, Segrave et al., 2007, Howe et al., 2011, Marlow et al., 2013).

با توجه به این فشارها، سیستم‌های آب شهری متداول که بیشتر توسط مهندسان طراحی شده‌اند و با مشکلات جدید مدیریت آب سازگار نیستند، در آینده نمی‌توانند کارکرد خوبی از خود نشان دهند (Nguyen et al., 2020).

توجه اصلی سیستم‌های متداول مدیریت آب شهری بر تأمین آب بیشتر با توجه به نیاز مصرف‌کننده و توسعه متمرکز زیرساخت‌ها با سرمایه‌گذاری‌های محدود و طولانی‌مدت است که دیگر امکان‌پذیر نیست و از اجرای رویکردهای جدید برای مدیریت پایدار آب شهری جلوگیری می‌کند (Nguyen et al., 2020, Willuweit and O'Sullivan, 2013, Philip et al., 2015, Brown et al., 2009).

به‌منظور شناسایی استراتژی‌ها بر اساس پژوهش‌های گذشته این سیستم‌ها معمولاً با مشکلات زیر روبه‌رو هستند که تخریب محیط‌زیست، خدمات‌دهی نامطلوب و بهره‌برداری نامناسب را در پی دارد (Howe et al., 2011):

- استفاده غیرپایدار از منابع محلی که باعث استحصال بیش از اندازه از منابع برای تأمین نیاز فزاینده به آب می‌شود. این امر امنیت آبی نسل‌های آینده و محیط‌زیست را با کاهش حجم آبهای سطحی و زیرزمینی به خطر می‌اندازد.
- استفاده غیربهینه از انرژی، زیرا آب ارتباط نزدیکی با انرژی دارد. تأمین آب به انرژی نیاز دارد و تولید انرژی نیز در برخی شرایط نیازمند آب است. به‌دلیل همین وابستگی قیمت سوخت و الکتریسیته و تأمین آب بر یکدیگر اثرات متقابل دارند.
- آلودگی آب، هر چه آب آلوده‌تر باشد هزینه بیشتری برای تصفیه نیاز دارد. حتی بعضی از منابع آب نیز ممکن است به خاطر آلودگی زیاد برای استفاده مناسب نباشند.
- آب بدون درآمد، مقدار زیادی از آب تصفیه شده (حتی تا ۵۰ درصد) از راه‌های گوناگونی مانند نشت از شبکه یا انشعابات غیرمجاز هدر می‌رود. این اتفاق باعث ضررهای اقتصادی و لطمه به منابع آب می‌شود.
- هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات و زیرساخت‌های آب‌رسانی زیاد است و در بیشتر اوقات بازگشت سرمایه این هزینه‌ها اتفاق نمی‌افتد.
- سیستم‌های غیرانعطاف‌پذیر، زیرساخت‌ها و تأسیسات آب بر اساس پیش‌بینی نیاز آبی طراحی و ساخته شده‌اند و در صورت تغییر شرایط به راحتی با شرایط جدید سازگاری پیدا نمی‌کنند.
- مصارف بی‌رویه و ناکارآمد آب، استفاده از آب شرب که یارانه زیادی برای آن پرداخت می‌شود. برای مصارف غیرشرب مانند فلاش تانک‌ها سبب می‌شود تا هزینه هنگفتی برای تصفیه غیرضروری آب صرف شود. مصرف‌کنندگان انگیزه مالی کمی برای

[1] United Nations-Sustainable Development Goals (UN-SDG)

کاهش مصارف خود دارند که این امر منجر به استفاده ناکارآمد و مصرف زیاد آب می‌شود.

در طرف مقابل، مدیریت پایدار آب شهری[1] به‌عنوان رویکردی برای تحقق زیرساخت‌های یکپارچه با در نظر گرفتن زمینه‌های اجتماعی، اقتصادی، محیط زیستی و سیاسی، در یک چشم‌انداز بلندمدت که تأمین آب برای مصارف انسانی و محیط‌زیستی را دنبال می‌کند، تعریف شده است (Van De Meene et al., 2011). بر اساس پژوهش‌های بررسی شده تصفیه کارآمدتر، صرفه‌جویی اقتصادی، حفاظت از محیط‌زیست، بهبود خدمات، کاهش حجم فاضلاب و تاب‌آوری بیشتر از جمله مواردی است که معمولاً با رویکرد مدیریت پایدار آب‌رسانی شهری همراه است (Willuweit and O'Sullivan, 2013).

مدیریت پایدار آب شهری به تصمیم‌گیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا راهبردهای بهتری را برای استفاده کارآمدتر از منابع محدود مالی و طبیعی اتخاذ کنند. اجزای سیستم آب‌رسانی شهری تحت مدیریت رویکردهای متداول و پایدار مشابه هستند، ولی نگرش مدیریتی متفاوت به گزینه‌های انتخاب شده برای بهره‌برداری از سیستم به شیوه کارآمدتر، حفظ تعادل عرضه و تقاضای آب و دیدگاه سیستماتیک به موضوعات، سبب ایجاد تفاوت بین آنها می‌شود (Howe et al., 2011, Xu et al., 2020).

با توجه به هدف مدیریت آب شهری، پایداری این سیستم در قالب تأمین آب مطمئن، کافی و مقرون‌به‌صرفه برای همه مصرف‌کنندگان تعریف می‌شود تا نیازهای خود را بدون تأثیر بر زندگی نسل‌های آینده تحت یک حاکمیت کارآمد و با زیرساخت‌های کارا برآورده سازند (Novotny et al., 2010, Howe et al., 2011, Ramôa et al., 2015). در نتیجه با توجه به مشکلات فزاینده آب ناشی از محرک‌های اجتماعی، محیط‌زیستی و اقتصادی، تصمیم‌گیران مجبور شدند برای حل مشکلات پیش‌رو ازجمله تنش آبی، تغییر اقلیم و افزایش جمعیت، راهبردهای مدیریت آب شهری را اصلاح کنند و به سمت رویکردهای پایدار حرکت کنند (Hashempour Bakhtiari et al., 2020).

مفهوم مدیریت پایدار آب شهری سعی می‌کند با در نظر گرفتن عدالت اجتماعی، دوام اقتصادی، استفاده مناسب از منابع و پایداری محیط‌زیست، شهرها را به مکانی سالم‌تر یا به اصطلاح سبزتر برای شهروندان تبدیل کند (Marlow et al., 2013, Mitchell, 2006).

مدل‌سازی و شبیه‌سازی آب شهری به‌عنوان ابزارهای عملیاتی برای پرداختن به چالش‌های آب شهری پیشرفت کرده‌اند (Bach et al., 2014). مدل‌ها به تصمیم‌گیران کمک می‌کنند تا در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری برای مشکلات آب شهری به اهداف خود برسند (Willuweit and O'Sullivan, 2013, Pingale et al., 2014).

مدل‌ها برای بررسی چگونگی اتصال و ارتباط اجزای سیستم مدیریت آب شهری و نحوه تغییر آنها به‌منظور تشخیص فرصت‌ها و محدودیت‌های آینده این سیستم‌ها موردنیاز هستند (Makropoulos et al., 2008). انتقال از دیدگاه سنتی به مدیریت پایدار و یکپارچه سیستم آب شهری نیز در مدل‌ها منعکس شده است (Schmitt and Huber, 2006). با این حال، ادغام مؤلفه‌های مختلف در یک بسته مدل‌سازی واحد، چالش‌های خاص خود را دارد. این امر نیازمند داشتن دانش کافی از هر مؤلفه است، زیرا خروجی قابل‌قبول مدل صرفاً جمع هر مؤلفه نیست. سیستم‌های مدیریت پایدار آب شهری پیچیده هستند و فقط از یک پیوند ساده بین زیرسیستم‌ها تشکیل نمی‌شوند (Schmitt and Huber, 2006, Bach et al., 2014, Mitchell et al., 2007).

به این خاطر، وجود سیستم‌های مدل‌سازی آب شهری برای درک کامل چرخه آب ضروری به نظر می‌رسد. در طول دو دهه گذشته پیشرفت عمده‌ای در ابزارهایی که به مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهای محیطی شهری کمک می‌کنند ایجاد شده است (Elliott and Trowsdale, 2007, Bach et al., 2013, Mitchell et al., 2007, Peña-Guzmán et al., 2017).

این مدل‌ها اطلاعات مفیدی را برای کمک به تصمیم‌گیری مدیران در مدیریت آب شهری فراهم می‌کنند. از مدل‌ها می‌توان برای نشان دادن اثربخشی راهبردهای مختلف مدیریتی، راهبردهای طراحی و عملیاتی استفاده کرد (Peña-Guzmán et al., 2017, Bach et al., 2013).

به‌منظور شناسایی استراتژی‌های موردنظر در مدیریت آب شهری، تعدادی از ابزارهای مفید در بسیاری از پژوهش‌های قبلی ارائه شده است. در دهه‌های گذشته، پویایی‌های سیستم که توسط فورستر توسعه داده شد، به روشی پرکاربرد و یک چارچوب تئوری

[1] Sustainable Urban Water Management

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

برای مدل‌سازی پویای تقاضای آب تبدیل شده است (Sahin et al., 2016, Forrester, 1961).

پیچیدگی پویایی موجود در سیستم‌های آب شهری، مشکلات بزرگی را برای مدیریت آب شهری ایجاد می‌کند و این به‌دلیل عدم توانایی ما در برقراری ارتباط بین علت‌ها و اثرات از بین رفته در زمان یا فاصله است. برای حل این نوع مشکلات، به ویژه در سیستم‌های شهری، رویکرد پویایی‌های سیستم امکان تجزیه‌وتحلیل‌های چند منظوره و چند متغیره را فراهم می‌کند که می‌تواند منجر به مقایسه نسبی بسیاری از استراتژی‌های مدیریتی جایگزین در طول زمان شود (Ahmadi and Zarghami, 2019).

در بیشتر مدل‌های توسعه داده شده مدیریت آب شهری، عوامل مهمی مانند اثرات تغییر اقلیم در مصرف آب و نتایج توسعه اجتماعی و اقتصادی بر آب شهری به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفتند (Mosleh and Negahban-Azar, 2021). به‌طور معمول در مدل‌های موجود مدیریت آب شهری، عدم‌قطعیت‌های منابع آب، گزینه‌های بهینه تخصیص آب و تأمین نیازهای آبی نادیده گرفته شده است (Pérez-Uresti et al., 2019, Vakilifard et al., 2019).

در حالی که برخی پژوهش‌ها اشاره می‌کنند که تغییرات در نیازهای آبی نباید مورد غفلت واقع شود (Stavenhagen et al., 2018, Hashempour Bakhtiari et al., 2020)، تقریباً اغلب مدل‌های توسعه داده شده، پویایی فرایندهای شهری را نادیده گرفتند (Mosleh and Negahban-Azar, 2021). در حالی که تغییرات شهری مانند تغییرات اقلیم، جمعیت و رشد اقتصادی که محرک‌های مهمی در ارتباط با آب شهری هستند رفتاری پویا دارند. به همین خاطر پژوهشگران متعددی با توجه به وجود زنجیره‌های علت و معلولی در سیستم‌های آب، رویکرد پویایی‌های سیستم را رویکردی مناسب برای تحلیل مدیریت آب دانستند (Ahmad and Simonovic, 2004, Mirchi et al., 2012, Zomorodian et al., 2018, Phan et al., 2021).

تاکنون چند پژوهش به بررسی فرایندهای آب شهری با استفاده از پویایی‌های سیستم پرداخته است. استاو در سال ۲۰۰۳، مدلی برای حل مشکل کم‌آبی شهر لاس وگاس نوادا توسعه داد. در این مدل اثرات اقدامات مختلف مدیریت تقاضا بر کم‌آبی در یک محیط مشارکتی بررسی شد (Stave, 2003).

رهان و همکاران در سال ۲۰۱۱، برای اولین بار برهم‌کنش‌های بین مؤلفه‌های اجتماعی، اقتصادی و فیزیکی شبکه‌های آب و فاضلاب شهری را با استفاده از یک نمودار حلقه علّی[1] ساده شده و یک مدل پویایی‌های سیستم نشان دادند تا از نظر کمّی اهمیت تعامل بین اجزای این سیستم را برجسته‌تر کنند (Rehan et al., 2011).

در سال ۲۰۱۲ ضرغامی و اکبریه، با استفاده از پویایی‌های سیستم مدلی برای سیستم آب شهری تبریز توسعه دادند. در این مدل منابع تأمین و مصرف‌کنندگان احتمالی شناسایی شده و سناریوهای مدیریتی مانند انتقال آب و Reuse بر روی آنها بررسی شد (Zarghami and Akbariyeh, 2012).

رهان و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک مدل پویایی‌های سیستم را برای مدیریت پایدار اقتصادی شبکه آب شهری توسعه دادند. این مدل از سه بخش شبکه آب‌رسانی، مصرف‌کنندگان و اقتصاد تشکیل شده بود ولی پارامترهای استفاده شده و روابط تعریف شده در مدل محدود و ساده شده بودند (Rehan et al., 2013).

در پژوهش‌های دیگری سهین و همکاران در سال ۲۰۱۵، با استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم چند مدل مدیریت آب شهری برای تنظیم قیمت به منظور سوددهی سرمایه‌گذاری در آب شیرین‌کن‌ها توسعه دادند (Sahin et al., 2015).

احمدی و ضرغامی در سال ۲۰۱۹، پژوهشی بر روی مصرف آب فضای سبز شهر شیراز انجام دادند. آنها یک مدل پویایی‌های سیستم برای ارزیابی و مقایسه راهکارهای مختلف تأمین آب از منابع خارجی (سد) و داخلی (تصفیه فاضلاب) را تا سال ۲۰۲۵ توسعه دادند (Ahmadi and Zarghami, 2019).

کوریا و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک مدل پویایی‌های سیستم برای پشتیبانی از فرایندهای مدیریت آب طراحی کردند که تمرکز آن بر روی مدیریت تقاضا و بحران آب در مناطق نیمه خشک بود. این مدل شامل زیربخش‌های جمعیت، تأمین آب، تقاضای آب، تعرفه آب و آب بازگشتی بود (Correia De Araujo et al., 2019).

ژو و همکاران در سال ۲۰۲۰، یک مدل دو هدفه برای تعادل بین هزینه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی در شبکه توزیع آب شهری

[1] Causal Loop Diagram

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

ایجاد کردند. در این پژوهش، تقاضای آب خانگی و صنعتی در نظر گرفته شده و از یک مدل پویایی‌های سیستم برای بررسی عملکرد سیستم آب‌رسانی تحت سناریوهای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت استفاده شده بود. البته در این مدل تعداد زیادی از روابط و اجزای مهم سیستم آب شهری مورد غفلت قرار گرفته و تنها به جنبه‌های فنی و مصرف آب پرداخته شده بود (Xu et al., 2020).

پلوچینوتا و همکاران در سال ۲۰۲۱، مدیریت پایدار آب شهری را در Ebbs fleet انگلستان بررسی کردند. آنها یک مدل مشارکتی پویایی‌های سیستم را توسعه دادند که هدف آن بررسی روش‌های کاهش مصرف آب شرب از طریق مشوق‌های اجتماعی-محیط‌زیستی و اقتصادی بود (Pluchinotta et al., 2021).

با توجه به مطالب بیان شده، مشاهد شد که مدل‌های توسعه‌یافته فعلی هر کدام بخشی از زیرسیستم‌های مدیریت پایدار آب شهری را هدف گرفته و با رویکردی بخشی، از منظر فنی، اقتصادی یا اجتماعی مسئله مدیریت آب شهری را بررسی کردند. استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم و تعریف روابط بازخوردی بین اجزای سیستم آب شهری، کمک بزرگی به درک و شناخت رفتار سیستم کرده است. هر چه زیرسیستم‌های بیشتری در نظر گرفته شود و روابط بین اجزا کامل‌تر و با جزئیات بیشتری تعریف شود، نتیجه‌ای دقیق‌تر و صحیح‌تر از مدل‌سازی سیستم مشاهده خواهد شد. در اغلب مدل‌ها جنبه فنی و هیدرولیکی سیستم آب شهری پررنگ‌تر است و کمتر به جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی پرداخته شده است.

این پژوهش به ارائه یک مدل جدید به‌منظور ارتقای وضعیت مدیریت آب شهری پرداخت. این مدل با استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم به تجزیه‌وتحلیل و شبیه‌سازی پویای تمام ابعاد سیستم آب شهری شامل ابعاد اجتماعی، اقتصادی، فنی، محیط‌زیستی و حاکمیتی پرداخت. در مدل پیشنهادی، زیرسیستم‌ها با جزئیات بیشتری در نظر گرفته شدند، به‌خصوص در زیرسیستم اقتصادی پارامترهای تعریف شده با دقت و جزئیات بیشتر به دنبال بهینه‌سازی هزینه و درآمدهای شرکت‌های آب و افزایش بهره‌وری سیستم هستند. مدل پیشنهادی به دنبال توسعه سطح شناخت تصمیم‌گیران از فرایندهای پویای سیستم آب شهری است تا به نتیجه تصمیمات خود حساس‌تر بوده و تمام جوانب آن را بسنجند.

با توجه به منابع محدود مالی و فشارهای مختلف وارد بر سیستم آب شهری مدل پیشنهادی به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا قبل از اجرای تصمیمات مختلف و صرف زمان و هزینه اثرات آن را بررسی و مناسب‌ترین استراتژی را انتخاب کنند. رویکرد پیشنهادی قابلیت توسعه و کاربرد در تمام بخش‌های آب شهری از جمله شبکه آب‌رسانی، شبکه جمع‌آوری فاضلاب و سیستم جمع‌آوری آب سطحی را دارد، ولی در این پژوهش مخاطب اصلی، شرکت‌های آب و فاضلاب شهری بودند و بیشتر به اجزای تحت مدیریت این شرکت‌ها در بخش آب شهری پرداخته شد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- محدوده مطالعاتی پیاده‌سازی مدل

شهر اصفهان به‌عنوان محدوده مورد مطالعه در این پژوهش انتخاب شد. این شهر بعد از تهران و مشهد سومین شهر بزرگ ایران است. اصفهان، آب و هوای خشک و نیمه‌خشک دارد و بارش متوسط آن فقط ۱۳۰ میلی‌متر در سال است که بیشتر آن در طی فصل زمستان و اوایل بهار می‌بارد (Murray-Rust et al., 2000).

رودخانه زاینده‌رود از کوه‌های زردکوه بختیاری در رشته کوه زاگرس سرچشمه می‌گیرد و به سمت مرکز فلات ایران جریان می‌یابد. شهر اصفهان به‌خاطر وجود این رودخانه در دو طرف زاینده‌رود شکل گرفته و گسترش یافته است. بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ شهر اصفهان ۱،۹۶۱،۲۶۰ نفر جمعیت و در مجموع ۶۱۹،۰۹۱ خانوار دارد (Statistical Centre of Iran, 2016).

این شهر در چند دهه گذشته به‌دلیل رشد اقتصادی و توسعه صنعتی، گردشگری، رفاهی و فرهنگی شاهد افزایش سریع جمعیت بوده است. همچنین تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی و افزایش مصارف، سبب ایجاد عدم توازن بین منابع و مصارف آب در این منطقه شده است، به گونه‌ای که تقریباً در اغلب سال‌های اخیر تأمین مطمئن آب شرب و صنعت با فشار به بخش‌های کشاورزی و محیط‌زیست همراه بوده است (Etaat and Salehian, 2020, Safavi et al., 2015).

رودخانه زاینده‌رود مهم‌ترین رودخانه مرکزی ایران و منطقه اصفهان و منبع اصلی تأمین آب شهر اصفهان است. آب در حوضه زاینده‌رود در سه بخش عمده کشاورزی، صنعت و شهری به مصرف می‌رسد و علاوه بر آن، نیاز محیط‌زیستی رودخانه و تالاب گاوخونی را تأمین می‌کند (Ahmadi et al., 2020).

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

تقریباً ۹۳ درصد آب شرب شهر از منبع سد زاینده‌رود و مابقی از چاه‌ها تأمین می‌شود (Isfahan Municipality, 2018). بنابراین تمرکز بر حوزه آبریز زاینده‌رود به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب اصفهان حائز اهمیت است. منابع آب سطحی در این حوضه شامل آورد طبیعی رودخانه زاینده‌رود، آب انتقالی تونل‌های اول، دوم و سوم کوهرنگ و تونل چشمه لنگان است (Etaat and Salehian, 2020).

اولویت تخصیص آب به‌ترتیب متعلق به مصارف شرب و صنعت و سپس مصارف کشاورزی و محیط‌زیست است. منابع آب کشاورزی حوضه زاینده‌رود در سال‌های اخیر، نوسان شدیدی داشته و روند کلی کاهشی بوده تا حدی که در برخی از سال‌های خشک هیچ تخصیص آبی از سد زاینده‌رود برای این مصارف انجام نشده است. تداوم شرایط خشک‌سالی در سال‌های گذشته وضعیت این منطقه را به قدری بحرانی کرده که باعث بروز اعتراضات و تنش‌های اجتماعی در پاییز سال ۲۰۲۱ در شهر اصفهان شده است. در نتیجه توجه به وضعیت منابع آب و مدیریت آب شهری باید از اولویت‌های اصلی متولیان و تصمیم‌گیران مدیریت شهری اصفهان باشد.

۲-۲- معرفی مدل

۲-۲-۱- پیاده‌سازی مدل

فرایندهای پیاده‌سازی مدل مدیریت پایدار آب شهری شامل هفت گام می‌شود:

گام اول: شناسایی منطقه و جمع‌آوری اطلاعاتی محلی مانند وضعیت اقلیمی، منابع آب، جمعیت و زیرساخت‌های آب‌رسانی

گام دوم: بارگذاری اطلاعات در مدل پویایی‌های سیستم

گام سوم: کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل

گام چهارم: ساخت مدل پایه آب شهری منطقه موردنظر

گام پنجم: توسعه سناریوهای راهبری پایدار

گام ششم: ارزیابی سناریوهای تعریف شده با توجه به معیارهای پایداری مدل

گام هفتم: برنامه‌ریزی برای پیاده‌سازی راهبرد منتخب

۲-۲-۲- ساختار مدل

الگوی مدیریت پایدار آب شهری پیشنهادی مدلی متشکل از عوامل اثرگذار در مدیریت آب شهری است که با نگاه سیستماتیک و با استفاده از روش پویایی‌های سیستم توسعه داده شده است و اهداف سیستم را در راستای دستیابی به بهینه‌ترین حالت پایدار بررسی می‌کند. برای برقراری پایداری در یک مدل مدیریت آب شهری، باید اجزای آن به‌صورت به هم پیوسته و سیستماتیک مدیریت شوند. چرخه آب شهری یک سیستم پویا متشکل از زیرسیستم‌های گوناگون و عوامل درونی و بیرونی بسیاری است، در نتیجه روابط پویای کل سیستم ناشی از تعاملات اجزای کوچکتر آن است. پایداری در سیستم آب شهری در پنج حوزه اجتماعی، اقتصادی، محیط زیستی، فنی (زیرساختی) و حاکمیتی قابل‌تقسیم است که هر کدام، متغیرها و ویژگی‌های خاص خود را دارند و همراه یکدیگر سیستم کلی را تشکیل می دهند که هدف آنها پایداری سیستم آب شهری است.

بر اساس پژوهش‌های گذشته پایداری در چرخه آب شهری زمانی اتفاق می افتد که کیفیت حکمرانی و تجهیزات فنی و دارایی ها در شرایط مناسبی قرار داشته و فعالانه نیازهای بخش آب را به‌صورت مطمئن در سطح پایداری اجتماعی، محیط‌زیستی و اقتصادی در تمام مجموعه شهر تأمین کند (Venkatesh et al., 2017).

به‌عبارت دیگر حاکمیت، نقش تنظیم‌گری بین سایر زیرسیستم‌ها بر عهده دارد و روابط را با توجه به زیرساخت‌های چرخه آب شهری به گونه‌ای میان منابع و مصرف‌کنندگان برقرار می‌کند که پایداری اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی، فنی و حاکمیتی ایجاد شود. الگوی پیشنهادی با تدقیق روابط بین اجزای سیستم آب شهری و مدل‌سازی نرم‌افزاری آنها با رویکرد پویایی‌های سیستم در بستر نرم‌افزار Vensim به دنبال معرفی ساختاری هماهنگ و گسترده‌تر است که می‌تواند به صورت پویا عملکرد اجزای سیستم آب شهری را کنترل و اثر تصمیمات و تغییرات در هر بخش را قبل از اجرا بر سیستم شبیه‌سازی و سنجش کند تا تصمیم‌گیران بتوانند بهینه‌ترین تصمیم را اتخاذ کنند.

مدل پیشنهادی پنج لایه دارد:

لایه اول: اطلاعات ورودی است که در هر بعد مدل (محیط زیستی، اقتصادی، اجتماعی، فنی و حاکمیتی) جمع‌آوری می‌شود. این اطلاعات شامل داده های اقلیمی (بارش و تبخیر)، داده های منابع آب (داده‌های کمّی مانند حجم آبهای سطحی و زیرزمینی، آبهای برگشتی و آبهای انتقالی)، جمعیت، تعداد خانوار، سرانه مصرف آب، نیاز آب

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

شهری ، زیرساخت‌های شبکه آب، تصفیه‌خانه‌ها و درآمدها و هزینه‌های آب شهری است.

لایه دوم: مدل پویایی‌های سیستم چرخه آب شهری است که پنج زیرسیستم اقتصادی، اجتماعی، فنی، محیط زیستی و حاکمیتی دارد. در این لایه عوامل مؤثر در عملکرد چرخه آب شهری در نظر گرفته شده، روابط بین آنها به‌صورت یک سیستم کلی یکپارچه و به‌هم پیوسته، تعریف و شبیه‌سازی می‌شود. این لایه در واقع قلب مدل است.

لایه سوم: سیاست‌ها و سناریوهای مدیریتی است که بر روی لایه دوم پیاده‌سازی می‌شود. این سیاست‌ها در راستای دست‌یابی به بهینه‌ترین حالت و پایداری سیستم طراحی و شبیه‌سازی می‌شوند.

لایه چهارم: خروجی‌های شبیه‌سازی است. هدف این لایه بررسی چرخه آب شهری تحت سناریوهای پیشنهادی است.

لایه پنجم: معیارهای ارزیابی پایداری چرخه آب شهری است. این لایه شامل معیارهای گوناگونی برای سنجش و انتخاب مناسب ترین راهبرد برای پیاده سازی شرایط پایدار و بهینه در مدیریت چرخه آب شهری است. در شکل ۱ ساختار مدل نشان داده شده است.

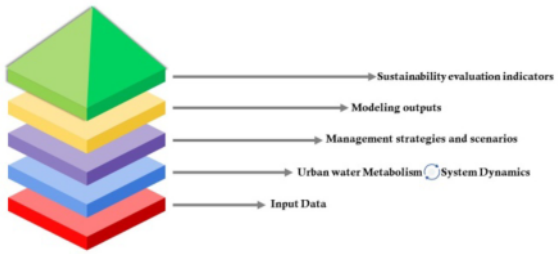

Fig. 1. Model structure

شکل ۱- ساختار مدل

۲-۲-۳- زیرسیستم‌های مدل

۲-۲-۳-۱- زیرسیستم محیط‌زیست

این زیرسیستم به وضعیت منابع آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای[1] می‌پردازد. منابع آب شامل آبهای سطحی (سدها و رودخانه‌ها)، آب زیرزمینی (چاه‌ها)، آبهای انتقالی و سایر منابع مانند آبهای برگشتی و پساب تصفیه شده است. حجم آب موجود و آب قابل برنامه‌ریزی پارامترهای مهمی هستند که در طول زمان معیارهای تأثیرگذاری برای تصمیم‌گیری در زمینه‌های مدیریت شهری و مدیریت شبکه آب‌رسانی است. اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، با در نظر گرفتن تغییرات بارش و تبخیر در مدل لحاظ شده است. با کاهش منابع آب موجود، اهمیت و ارزش آب به‌طور طبیعی افزایش می‌یابد و باید سیاست‌های قوی‌تری برای مدیریت آن اعمال شود. این راهکارها می‌توانند در زمینه‌های مختلف اجتماعی (آگاهی‌رسانی عمومی برای استفاده صحیح از آب) و اقتصادی (قیمت‌گذاری آب با توجه به شرایط خشک‌سالی و ترسالی) باشد. معادله ۱ پویایی آب شهری را در مدل نشان می‌دهد

$$W_{t+1}=W_t+SW_t+GW_t+IW_t+Re_t-P_t-Urb_t-NRW_t-E_t-D_t-G_t \quad (۱)$$

که در آن

W_{t+1} و W_t به‌ترتیب منابع آب موجود در سال‌های t+1 و t، SW_t آب سطحی برداشت شده برای مصارف شهری در سال t، GW_t آب تأمین شده از چاه‌های آب موجود در منطقه برای مصارف شهری در سال t، IW_t جریان آبهای انتقالی ورودی به منطقه در سال t، Re_t جریان آبهای برگشتی از مصارف شهری در سال t و P_t میزان بارش باران در محدوده شهری در سال t، Urb_t آب مصرفی شهری در سال t، NRW_t مجموع آب بدون درآمد در سیستم آب‌رسانی در محدوده شهری در سال t، E_t تبخیر و تعرق از سطح محدوده شهری در سال t، D_t آب تخلیه شده و جریان خروجی از محدوده شهری در سال t و G_t مقدار نفوذ به آب زیرزمینی در سال t است. تمام پارامترها برحسب میلیون مترمکعب (MCM) هستند.

در بخش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز میزان مصرف انرژی در زیرسیستم فنی معیار محاسبه حجم انتشار گازهای گلخانه‌ای معادل CO_2 در نظر گرفته شده است. تاکنون پژوهش‌های مختلفی برای تعیین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از فعالیت‌های تأمین، تصفیه و انتقال آب در شبکه انجام شده است. در بخش ۳-۵ به رابطه استفاده شده در این مدل با توجه به شرایط کشور ایران اشاره شده است.

تعیین میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در خدمات آب شهری دشوار است، زیرا منابع انتشار آن پیچیده است. در خدمات آب‌رسانی، بیشتر انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف برق است. در این پژوهش، میزان مصرف برق در فرایندهای تصفیه و توزیع

[1] Greenhouse Gas (GHG)

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

آب در نظر گرفته شد. معادله انتشار پویای GHG در معادله ۲ نشان داده شده است (Wakeel et al., 2016, Zhang et al., 2021)

$$GHG_t = Urb_t \times En_t \times 0.3855 \quad (۲)$$

که در آن

GHG_t میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای برحسب معادل کیلوگرم CO_2 در سال t، Urb_t حجم آب تخصیص داده شده به مصارف شهری در سال t، En_t انرژی مصرفی برای تولید و توزیع یک مترمکعب آب در سال t، برابر با حاصل تقسیم کل انرژی مصرفی بر کل آب تولیدی در سال t است. در شکل ۲ زیر سیستم محیط‌زیست نشان داده شده است.

۲-۲-۳-۲- زیرسیستم فنی

زیرسیستم فنی از دو بخش کلی شبکه آب‌رسانی و تأمین و تصفیه آب تشکیل شده است. ابتدا لازم است که حجم آب خام ورودی، ظرفیت تصفیه و حجم آب تصفیه شده مشخص شود. ظرفیت فعلی و ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه نیز در مدل، در نظر گرفته شد تا در صورتی که ظرفیت فعلی تولید به نزدیکی ظرفیت اسمی تصفیه‌خانه رسید و با توجه به وضعیت منطقه نیاز به افزایش ظرفیت و ساخت تصفیه‌خانه جدید احساس شد، این احساس نیاز توسط مدل نمایش داده شود. از نظر فنی، کارایی تصفیه‌خانه با توجه به میزان آب تصفیه شده به ظرفیت و آب خام اندازه‌گیری شود. تفاوت بین مقدار آب عرضه شده و تقاضا، پارامتر مهمی است که به ثبات سیستم آسیب می‌رساند و باید سعی شود که به حداقل برسد. شاخص قابلیت اطمینان تأمین آب[1] نیز میزان آب تأمین شده از آب موردنیاز را نشان می‌دهد یا به عبارتی بیانگر کمبود آب است. این شاخص بر اساس معادله ۳ محاسبه می‌شود

$$WSRI_t = \frac{Rw_t}{Dw_t} = \frac{Urb_t - NRW_t}{Dw_t} \quad (۳)$$

که در آن

Rw_t حجم آب با درآمد و فروش رفته در سال t، Dw_t نیاز آبی در سال t، Urb_t حجم آب تخصیص داده شده به مصارف شهری در سال t، NRW_t مقدار آب بدون درآمد در سال t است.

زیرساخت‌های فیزیکی شبکه شامل خطوط لوله‌ای است که بر اساس سن آنها به پنج دسته تقسیم می‌شوند: صفر تا ۱۴ سال، ۱۵ تا ۲۴ سال، ۲۵ تا ۳۴ سال، ۳۵ تا ۴۵ سال و بیشتر از ۴۵ سال. به منظور تعیین وضعیت تأسیسات آب‌رسانی، خرابی لوله‌ها و حادثه به‌عنوان شاخص در نظر گرفته شد. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، خرابی لوله‌ها به‌عوامل مختلفی بستگی دارد و انواع مختلفی از توابع خرابی توسعه داده شده است که می‌تواند حادثه و تغییر شرایط لوله از یک وضعیت به وضعیت دیگر را بیان کند. رابطه تعریف شده در این مدل تابعی از سن لوله است. میزان نوسازی سالانه بر اساس بودجه و سیاست‌های شرکت‌های آب و فاضلاب تعیین می‌شود. فروش آب و آب بدون درآمد نیز از شاخص‌های مهم مدیریت چرخه آب شهری است که در این مدل در نظر گرفته شد. میزان مصرف انرژی نیز بر اساس پژوهش‌های گذشته و با توجه به میزان آب تولیدی که در شبکه توزیع می‌شود در نظر گرفته شد.

معادله ۴ و ۵ نمونه‌ای از رفتار پویای موجود در تأسیسات آب را برای دو گروه از لوله‌های با سن صفر تا ۱۴ سال و لوله‌های با سن ۱۵ تا ۲۴ سال نشان می‌دهد

$$P_{(0-14)_{t+1}} = P_{(0-14)_t} + EP_t + RP_{(25-34)_t} + RP_{(35-45)_t} + RP_{(above45)_t} - \frac{P_{(0-14)_t}}{15} \quad (۴)$$

$$P_{(15-24)_{t+1}} = P_{(15-24)_t} + \frac{P_{(0-14)_t}}{15} - \frac{P_{(15-24)_t}}{10} \quad (۵)$$

که در آن

$P(0-14)_t$ طول لوله‌های با عمر بین صفر تا ۱۴ سال در سال t برحسب کیلومتر، $P_{(0-14)_{t+1}}$ طول لوله‌های با عمر بین صفر تا ۱۴ سال در سال t+1 برحسب کیلومتر، EP_t طول لوله‌های گسترش‌یافته و اضافه شده جدید در سال t، $RP_{(25-34)}$ طول لوله‌های بازسازی شده از گروه لوله‌های با سن ۲۵ تا ۳۴ سال در سال t، $RP_{(35-45)}$ طول لوله‌های بازسازی شده از گروه لوله‌های با سن ۳۵ تا ۴۵ سال در سال t، $RP_{(above\ 45)}$ طول لوله‌های بازسازی‌شده از گروه لوله‌های با سن بیش از ۴۵ سال در سال t، $P_{(15-24)_t}$ طول لوله‌های با عمر بین ۱۵ تا ۲۴ سال در سال t برحسب کیلومتر، $P_{(15-24)_{t+1}}$ طول لوله‌های با عمر بین ۱۵ تا ۲۴ سال در سال t+۱

[1] Water Supply Reliability Index (WSRI)

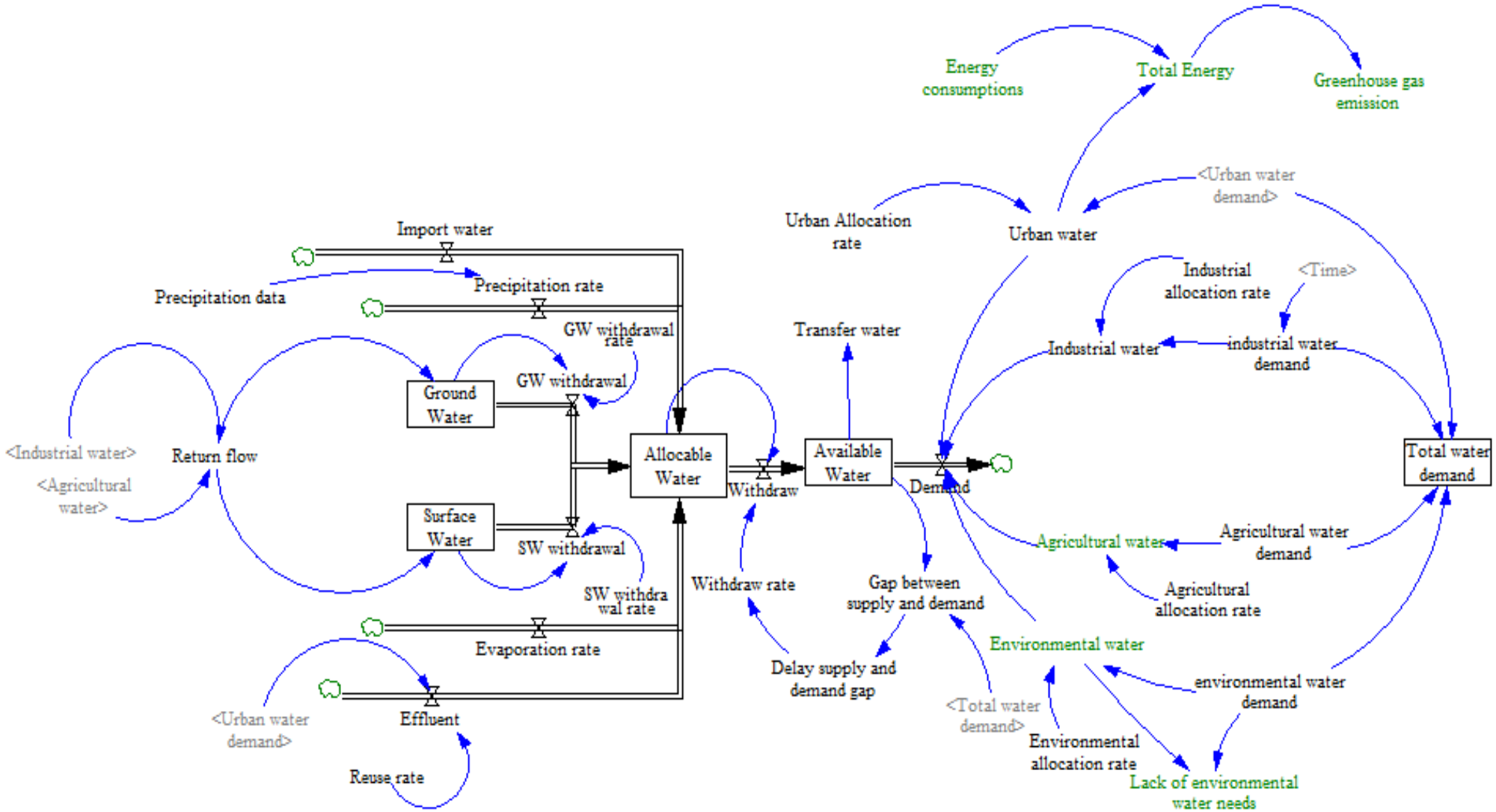

Fig. 2. Environment subsystem

شکل ۲- زیرسیستم محیط‌زیست

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

برحسب کیلومتر است.

همان طور که در معادله ۴ مشخص است طول لوله‌های صفر تا ۱۴ سال در سال t+1 با طول لوله‌های صفر تا ۱۴ سال در سال t برابر است. به‌علاوه طول لوله‌های ناشی از توسعه و گسترش شبکه در سال t و طول لوله‌های بازسازی شده در سال t منهای لوله‌هایی است که با افزایش عمر در سال t از گروه صفر تا ۱۴ ساله‌ها خارج و به گروه لوله‌های ۱۵ تا ۲۴ ساله وارد می‌شوند. سن شبکه بر وضعیت شبکه و خرابی‌ها اثرگذار است که برنامه نوسازی و بهسازی شبکه بر اساس آن تنظیم می‌شود و هزینه‌های تعمیرات و نگهداری شبکه آب را در پی دارد. در شکل ۳ زیر سیستم فنی نشان داده شده است.

۲-۲-۳-۳- زیرسیستم اجتماعی

زیرسیستم اجتماعی جمعیت و رفتار اجتماعی را در نظر می‌گیرد. در برآورد جمعیت عوامل مؤثری مانند نرخ تولد، میزان مرگ‌ومیر و میزان مهاجرت خالص و عوامل غیرمستقیم مانند مطلوبیت منطقه لحاظ شده و پیش‌بینی جمعیت بر اساس روند تغییرات جمعیتی طی سالیان گذشته با استفاده از روش آماری تابع لجستیک انجام شده است. سرانه مصرف آب و عوامل جانبی مانند تمایل به پرداخت، کشش قیمتی آب و اثرات کم‌آبی با توجه به اطلاعات موجود و پژوهش‌های گذشته در مدل وارد شده است (Rezaee and Shojaa, 2020, Tahami Pour et al., 2017).

گام زمانی داده‌ها سالانه بوده و این متغیرها سالانه جمع‌آوری و به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل داده می‌شوند. جمعیت، عامل مؤثری در تقاضا و مصرف آب در بخش شهری است. تمایل به پرداخت تابعی از مسائل اجتماعی (درآمد خانوار و آگاهی اجتماعی)، فنی (عملکرد خدمات‌رسانی) و مسائل اقتصادی (هزینه آب) است. افزایش آگاهی عمومی نسبت به وضعیت منابع آب و مدیریت آب شهری بر همکاری و همراهی جامعه با سیاست‌های مدیریت مصرف آب، مانند استفاده از تجهیزات کاهنده مصرف آب یا مقاوم‌سازی و تعمیر لوله‌کشی ساختمان مؤثر است. این اقدامات بر مصرف آب و درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب تأثیر می‌گذارد و در این زیرسیستم در نظر گرفته شده اند. رابطه پویای پیش‌بینی رشد جمعیت بر اساس روش لجستیک مطابق است. شکل ۴ زیرسیستم اجتماعی را نشان می‌دهد

$$P_t = \frac{P_{sat}}{1+e^{a+bt}} \qquad (۶)$$

$$P_{sat} = \frac{2P_0P_1P_2 - P_1^2(P_0+P_2)}{P_0P_2 - P_1^2} \qquad (۷)$$

$$a = \frac{P_{sat} - P_0}{P_0} \qquad (۸)$$

$$b = \frac{1}{n} Ln \frac{P_0(P_{sat} - P_1)}{P_1(P_{sat} - P_0)} \qquad (۹)$$

که در آن

P_{sat} جمعیت اشباع، a و b مقدار ثابت، P_0، P_1 و P_2 به‌ترتیب جمعیت در زمان‌های t، t_1 و t_2 است. n فاصله بین t، t_1 و t_2 است.

معادله پویای تغییرات نیاز آبی سالانه در معادله ۱۰ نشان داده شده است

$$Dw_t = P_t \times q_t \times 365 \qquad (۱۰)$$

که در آن

Dw_t تقاضای آب در سال t، Pt جمعیت شهر در سال t و qt سرانه مصرف آب به‌ازای هر نفر برحسب مترمکعب در روز در سال t است. تقاضای آب بر تخصیص آب شهری و به‌تبع آب بر میزان تولید آب و هزینه‌های تأمین و تصفیه اثرگذار است.

۲-۲-۳-۴- زیرسیستم اقتصادی

زیرسیستم اقتصادی، بخش مهمی از مدیریت آب شهری است. هدف اصلی این زیرسیستم در مدل، دستیابی به پایداری اقتصادی در شرکت‌های آب و فاضلاب با برقراری تعادل بین درآمدها و هزینه‌ها است. قیمت آب به‌عنوان یک عامل کلیدی، نقش مهمی در این موضوع ایفا می‌کند. ساختار تعرفه آب در کشورهای مختلف با یکدیگر متفاوت است. در سال‌های اخیر نیز در ایران با طرح موضوع هدفمندی یارانه‌ها ساختار تعرفه و قیمت گذاری آب تغییر کرده و به‌صورت پلکانی و بلوکی افزایشی است، به این معنی که با مصرف بیشتر و قرار گرفتن در طبقه مصرفی بالاتر، قیمت آب گران‌تر می‌شود. یارانه‌ها، مالیات‌ها و مشوق‌ها نیز ابزارهای اقتصادی دیگری هستند که می‌توانند در این مدل بررسی شوند. درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب از فروش آب و بودجه دولتی ایجاد می‌شود. درآمد حاصل از فروش آب به قیمت آب، کشش قیمتی، یارانه‌های بخش آب و میزان وصول مطالبات و پرداخت قبوض بستگی دارد. تغییر در قیمت آب و کشش قیمتی آب تا حد زیادی به تغییر در

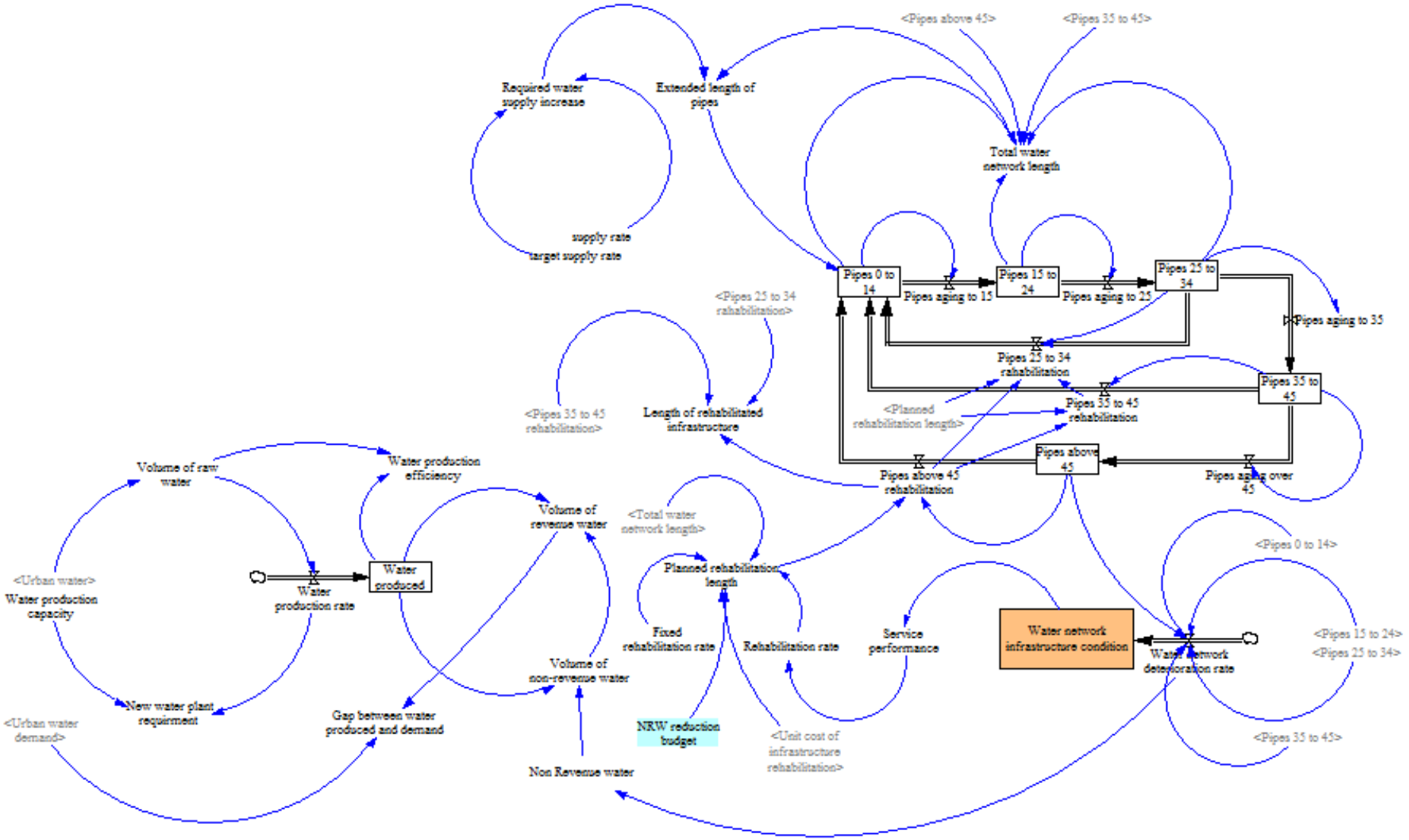

Fig. 3. Technical subsystem

شکل ۳- زیرسیستم فنی

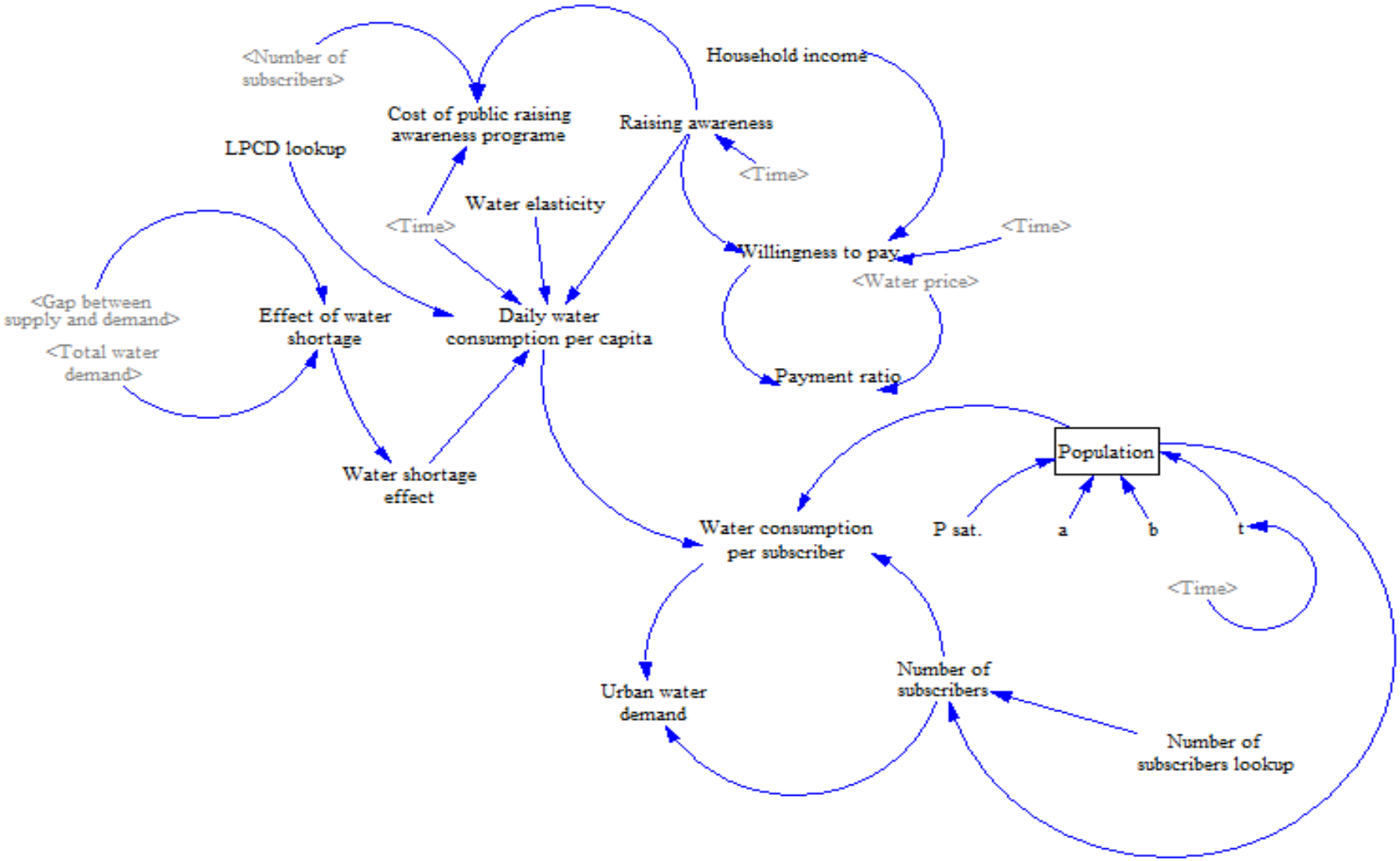

Fig. 4. Social subsystem

شکل ۴-زیر سیستم اجتماعی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

مصرف آب و زیرسیستم اجتماعی مرتبط است. در حقیقت تغییر در مصرف آب تابعی از تغییر قیمت و کشش قیمت آب است. هزینه‌های شرکت‌های آب در مدل شامل هزینه نیروی انسانی، هزینه تعمیرات و نگهداری، هزینه تولید آب، هزینه‌های مالی و استهلاک، هزینه‌های سرمایه‌ای و هزینه اقدامات مدیریت مصرف آب است. هزینه تولید آب شامل هزینه‌های آب خام، انرژی، مواد شیمیایی و گندزدا و هزینه‌های سرمایه‌ای نیز شامل هزینه احداث و توسعه ظرفیت تصفیه‌خانه و گسترش و احداث شبکه آب می‌شود. اطلاعات هزینه‌های مدل بر اساس اقدامات جاری و اسناد حسابداری شرکت آب و فاضلاب اصفهان وارد مدل شده است. شاخص نرخ پوشش هزینه‌ها پارامتر کنترلی زیرسیستم اقتصادی است که توسط آن وضعیت درآمد و هزینه شرکت‌های آب و فاضلاب سنجش می‌شود.

شاخص پوشش هزینه‌ها[1] میزان جبران هزینه‌ها از طریق درآمد را نشان می‌دهد. اگر مقدار این شاخص بزرگتر یا مساوی یک باشد نشان‌دهنده وضعیت مطلوب درآمد و پایداری اقتصادی شرکت آب و فاضلاب است. همان طور که در معادله ۱۱ نشان داده شده است، مقدار CCI در سال t برابر است با حاصل تقسیم درآمدهای سالانه در سال t بر هزینه‌های سال t شرکت آب و فاضلاب در بخش آب

(۱۱)

$$CCI_t = \frac{R_t}{C_t} = \frac{Pr_t \times Rw_t + Bud_t}{CC_t + OC_t + SC_t + WP_t + GC_t + WC_t}$$

که در آن

R_t درآمدهای بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، Pr_t متوسط درآمد حاصل از یک مترمکعب آب شامل قیمت آب و آبونمان در سال t، Rw_t حجم آب با درآمد و فروش رفته در سال t، Bud_t بودجه بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، C_t هزینه کل بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، CC_t هزینه‌های سرمایه‌ای بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، OC_t هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، SC_t هزینه نیروی انسانی بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، WP_t هزینه تولید آب در سال t، GC_t هزینه‌های عمومی شامل هزینه استهلاک و امور اداری بخش آب شرکت آب و فاضلاب اصفهان در سال t، WC_t هزینه‌های طرح‌های حفاظت و مدیریت مصرف آب در سال t است. در شکل ۵ زیرسیستم اقتصادی نشان داده شده است.

۲-۲-۳-۵- زیرسیستم حاکمیتی

زیرسیستم حاکمیت در واقع نقش تنظیم‌گری روابط بین سایر اجزای مدل را بر عهده دارد. تعریف و پیاده‌سازی حکمرانی صحیح آب از چالش‌های مهم بخش آب کشور است که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این زیرسیستم با تعریف راهبردها و ابزارهای مدیریتی مانند مالیات‌ها و مشوق‌ها، یارانه‌ها، قوانین محدودکننده، الزام‌آور یا تشویقی و تنظیم سیاست‌های بهره‌برداری به سمت راهبری پایدار سیستم آب‌رسانی حرکت می‌کند. در شکل ۶ زیرسیستم حاکمیتی نشان داده شده است.

مدل پویایی‌های سیستم آب شهری با زیرسیستم‌های اجتماعی، محیط زیستی، حاکمیتی، اقتصادی و فنی طراحی شده است. شکل ۷ روابط بین این زیرسیستم‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۲-۳-۶- جمع‌بندی زیرسیستم‌ها

زیرسیستم‌های تعریف شده هر کدام با یکدیگر در ارتباط بوده و در قالب یک سیستم واحد بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. زیرسیستم محیط‌زیست شامل منابع تأمین آب می‌شود که از طریق تخصیص آب با زیرسیستم فنی در ارتباط است و آب موردنیاز برای مصارف شهری با توجه به منابع موجود از این طریق تقسیم و وارد شبکه آب شهری می‌شود. در مقابل پس از مصرف آب در شهر پساب و جریان‌های برگشتی دوباره به سیستم بازگشته و قابل‌استفاده مجدد هستند. این جریان‌ها معمولاً وارد آبهای سطحی و زیرزمینی شده و بر زیرسیستم محیط‌زیست اثرگذارند. مصرف انرژی در تأسیسات آب‌رسانی و تولید گازهای گلخانه‌ای جنبه دیگر اثرگذاری زیرسیستم فنی بر محیط‌زیست است. افزایش جمعیت و تغییر الگوی مصرف آب سبب افزایش مصرف آب و تغییرات اقلیمی و بروز خشکسالی سبب کاهش منابع آب خواهد شد. همچنین افزایش جمعیت میزان بهره‌برداری از محیط‌زیست و تولید آلودگی را تشدید می‌کند. تأمین آب و انرژی برای جوامع انسانی نیز وابسته به محیط‌زیست است.

[1] Cost Coverage Index (CCI)

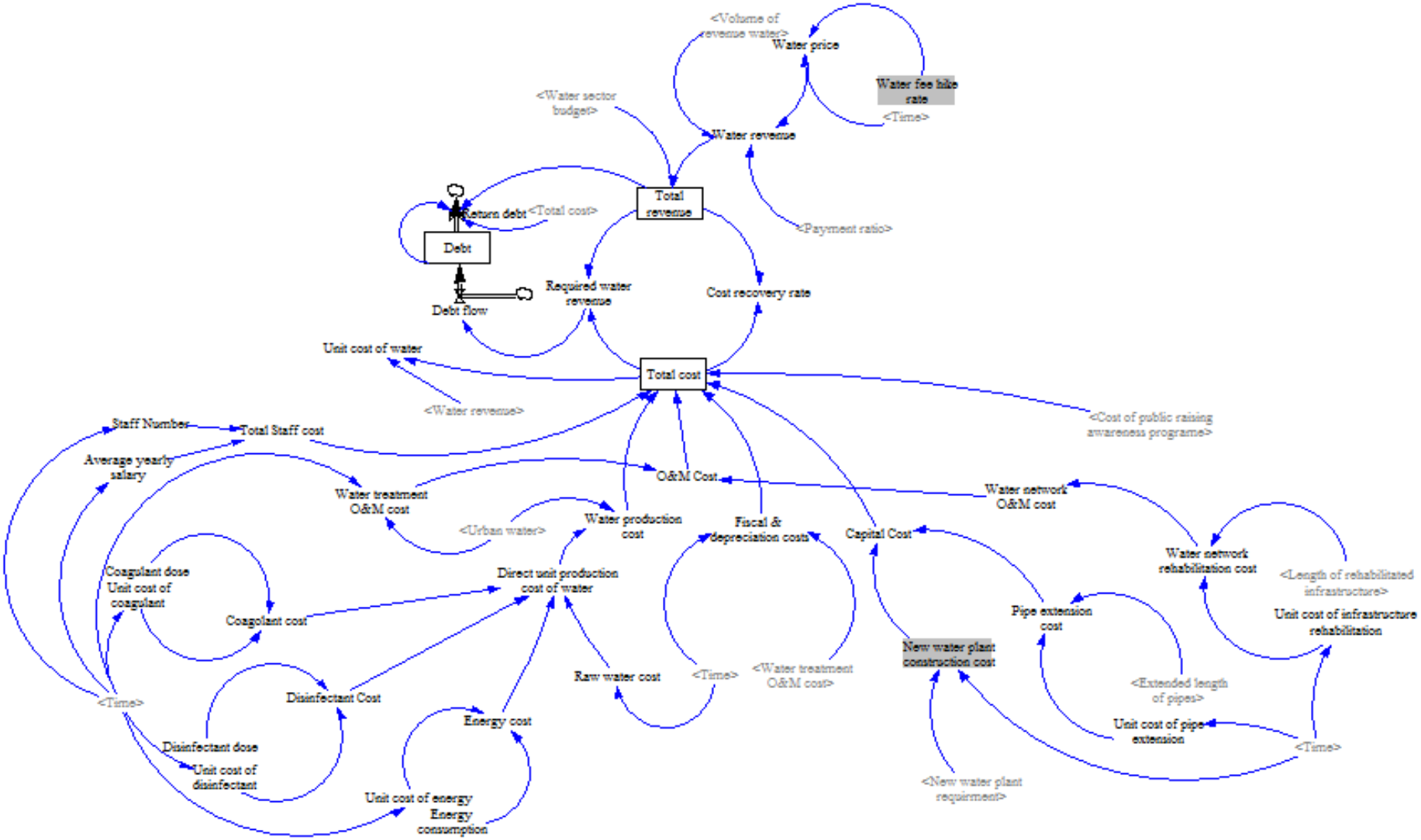

Fig. 5. Economic subsystem

شکل ۵- زیرسیستم اقتصادی

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

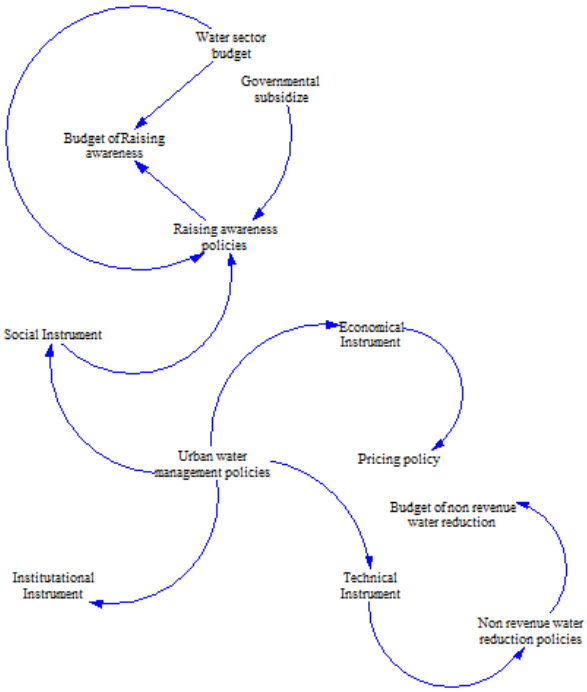

Fig. 6. Governance subsystem

شکل ۶- زیرسیستم حاکمیتی

موارد بیان شده بخشی از اثرات متقابل زیرسیستم اجتماعی و محیط‌زیست بر همدیگر است. مواد خام و منابع اولیه موردنیاز زیرسیستم اقتصادی اغلب از منابع طبیعی و محیط‌زیست تأمین می‌شود. فعالیت‌های اقتصادی نیز در قالب پرداخت مالیات و عوارض، هزینه‌هایی به‌منظور حفاظت از محیط‌زیست پرداخت می‌کنند. تعامل زیرسیستم‌های اقتصادی و اجتماعی این‌گونه تعریف می‌شود که زیرسیستم اجتماعی منابع انسانی و نیروی کار را برای زیرسیستم اقتصادی تأمین می‌کند. درآمد شرکت‌های آب هم از مصرف مردم و هزینه پرداختی از طرف آنان ایجاد می‌شود.

از طرفی قیمت آب و وضعیت اقتصادی جامعه نیز بر مصرف آب اثرگذار است و این ارتباطات تشکیل یک حلقه بازخوردی را می‌دهد که در مدل در نظر گرفته شده است. زیرسیستم‌های اقتصادی و فنی ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند و ایجاد و تأمین هزینه‌های احداث، بهره‌برداری، توسعه و بازسازی تأسیسات آب تعامل بین این دو زیرسیستم را شکل می‌دهد. در ارتباط بین زیرسیستم فنی و اجتماعی سطح رضایت مردم از خدمات آب مهمترین فاکتور بررسی شده است و در مقابل میزان مصرف آب از طرف جامعه داده ورودی به زیرسیستم فنی است که تخصیص آب بر اساس آن شکل می‌گیرد.

زیرسیستم حاکمیت نقش تنظیم‌گری را بین زیرسیستم ها بر عهده دارد و روابط چهار زیرسیستم دیگر بر محور حاکمیت با یکدیگر هماهنگ می‌شود. این زیرسیستم در تعامل با زیرسیستم محیط‌زیست قوانین و مقررات و استانداردهای لازم برای حفاظت و بهره‌برداری پایدار از محیط‌زیست را تنظیم می‌کند. در برابر زیرسیستم فنی، سیاست‌های مدیریت آب را ایجاد می‌کند و در برابر زیرسیستم اقتصادی نقش تخصیص بودجه و تعریف مشوق‌های مالی مانند یارانه را بر عهده دارد. تعامل زیرسیستم حاکمیت در مواجهه با زیرسیستم اجتماعی به صورت نقش مهم فرهنگ‌سازی و آگاهی‌رسانی تعریف می‌شود که اجرای صحیح این فرایند تسهیلگر پیاده‌سازی سیاست‌های تعریف شده در سایر بخش‌ها خواهد بود.

۲-۲-۴- صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل

مدیریت آب شهری با چالش‌هایی روبه‌رو است از جمله: عدم وجود یک مدل کارآمد که بتواند شرایط را بررسی و راهکارها و اقدامات مؤثری را ارزیابی کند و پیشنهاد دهد. بنابراین، تهیه مدلی برای کمک به مدیریت موفق آن بسیار حیاتی است. اولین قدم برای ساختن مدل مدیریت پایدار آب شهری، تهیه مدل مفهومی مبتنی بر سناریوهایی در مورد شیوه‌های مدیریت آب شهری، اقلیم و داده‌های توسعه شهری است. مدل مفهومی برای حل مشکلات بیان شده، از روش‌های ریاضی یا محاسباتی استفاده خواهد کرد. مرحله دوم، اجرای مدل شبیه‌سازی است. این مدل شبیه سازی امکان عملی بودن شیوه‌های مربوطه را از نظر پرداختن به مسائل آب شهری با توجه به سناریوهای مختلف بررسی و پیش‌بینی می‌کند. در اینجا روش‌های صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدل اهمیت پیدا می‌کنند و پیچیده‌ترین قسمت برای دستیابی به یک مدل صحیح هستند (Bach et al., 2014).

اعتبارسنجی مدل شامل سه بعد می‌شود، اعتبارسنجی مفهومی، اعتبارسنجی عملیاتی و اعتبارسنجی داده‌ها. اعتبارسنجی مفهومی به دنبال اطمینان از صحت نظریه‌ها و فرضیات در مدل مفهومی است. اعتبارسنجی عملیاتی با هدف تعیین اعتبار خروجی مدل انجام می‌شود و اعتبارسنجی داده‌ها با هدف اطمینان از داده‌های کمّی برای آزمایش مدل، کالیبراسیون مدل و شبیه‌سازی مدل است. دقت کم و ناقص بودن این اطلاعات، تأثیر مهمی بر عدم‌قطعیت و خطا در

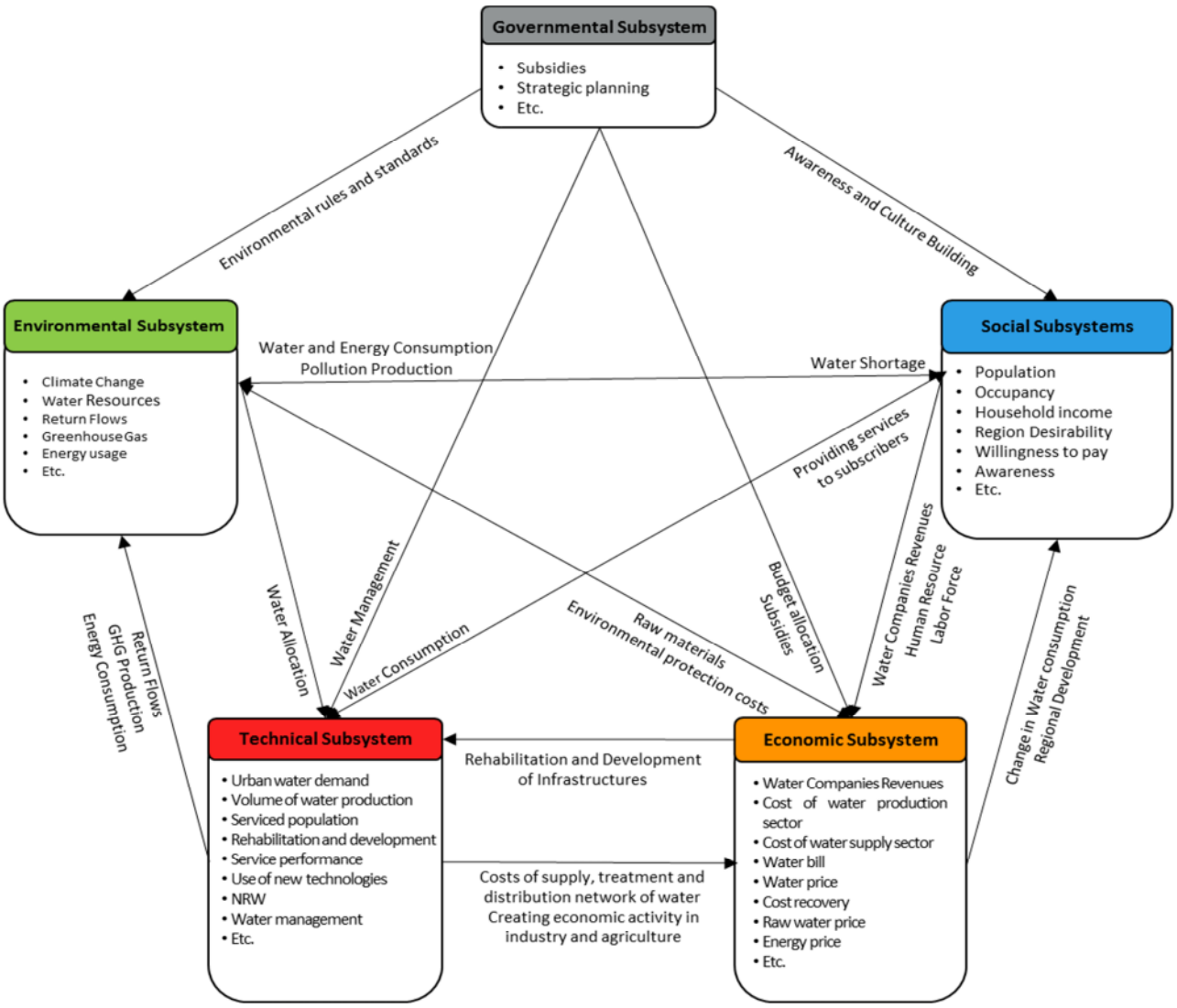

Fig. 7. Subsystems interactions

شکل ۷- روابط بین زیرسیستم‌ها

مدل دارد (Bach et al., 2018).

یک بانک داده دقیق و مطمئن برای هر نوع مدل مدیریت به‌هم پیوسته آب شهری بسیار مهم است. تعریف روابط در مدل، کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل نیازمند داده‌های دقیق، کامل و مطمئن است. البته جمع‌آوری بعضی از اطلاعات لازم، واقعاً دشوار است. همچنین نمی‌توان تضمین داد که تمام اطلاعات موجود مطمئن و دقیق باشد، بنابراین عدم‌قطعیت در داده‌ها یکی از بزرگترین مشکلات پیش روی مدل‌های یکپارچه است (Nguyen et al., 2020).

کالیبراسیون مدل به‌عنوان اطمینان از صحت خروجی‌های مدل با مقایسه خروجی‌های آن با داده‌های واقعی اندازه‌گیری، مشاهده و جمع‌آوری شده تعریف می‌شود. برای صحت‌سنجی و کالیبراسیون مدل سه روش ارائه شده است. اول، یک مدل یکپارچه کامل باید بلافاصله کالیبره و بهینه شود. با توجه به سطح بالای پیچیدگی ساختار این مدل‌ها کالیبراسیون و بهینه‌سازی آنها بسیار سخت است. دوم، ابتدا اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل بالادست انجام می‌شود و سپس این فرایند صحت سنجی برای مدل پایین‌دست نیز انجام می‌شود. در دسته سوم نیز هر مدل فرعی قبل از ادغام و یکپارچه‌سازی مدل

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

نهایی جداگانه کالیبره می‌شود. رویکرد سوم برای مدل‌های با سطح پیچیدگی و یکپارچگی پایین مناسب است (Jeppsson et al., 2007).

محدودیت صحت‌سنجی مدل‌های مدیریت پایدار آب شهری به خاطر پیچیدگی ایجاد مدل همراه با اهداف شبیه‌سازی بلندمدت مدل است، زیرا مدل به حجم زیادی از داده‌ها نیاز دارد. روش‌های بسیاری برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شده است ولی مدل‌سازان باید مناسب‌ترین روش را با توجه به سیستم خود انتخاب کنند (Dotto et al., 2012). در این مدل خروجی مدل طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ با داده‌های واقعی مقایسه شده و مقدار خطای آن از روش MAPE محاسبه شد. مقدار خطای زیر ۵ درصد قابل‌قبول بوده و نشان‌دهنده صحت و اعتبار مدل‌سازی است.

۴- نتایج و بحث

پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز با توجه به گام زمانی مدل‌سازی که به‌صورت سالانه است، اطلاعات وارد مدل شدند. به‌منظور ایجاد مدل پویایی‌های سیستم شهر اصفهان از نرم‌افزار Vensim استفاده شد. سپس مدل اولیه بر اساس داده‌های سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ (۲۰۱۱ تا ۲۰۱۹ میلادی) کالیبره و صحت‌سنجی شد. نتایج مدل‌سازی در شکل‌های ۸ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مدل، رفتار و روند متغیر حجم آب مصرفی را به‌خوبی تشخیص و شبیه‌سازی می‌کند و نقاط

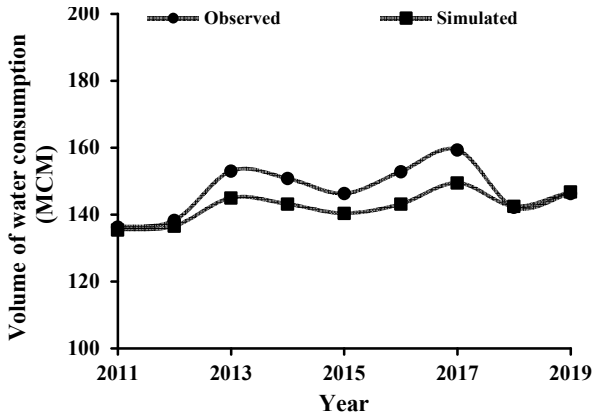

Fig. 8. Result of water consumption modeling in Isfahan City (2011-2019)

شکل ۸- مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی حجم آب مصرفی شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸

اپتیمم آن بدون تأخیر زمانی، از داده‌های مشاهده‌ای پیروی می‌کند. مقدار خطای داده‌های شبیه‌سازی شده ۳/۲۴ درصد است که در محدوده قابل‌قبول قرار دارد.

شکل ۹ وضعیت آب بدون درآمد در شهر اصفهان را طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. مشاهده شد که میزان آب بدون درآمد در این سال‌ها روند نزولی داشته است. این وضعیت را می‌توان نتیجه اقدامات گوناگونی مانند بهسازی خطوط شبکه، نشت‌یابی و کشف انشعابات غیرمجازی دانست که در سال‌های اخیر مورد توجه شرکت آب و فاضلاب اصفهان قرار گرفته است و به‌عنوان یک شرکت پیش‌رو در سطح کشور در این زمینه فعالیت دارد. مدل پیشنهادی نیز با خطای ۳/۶۳ درصد شبیه‌سازی قابل‌قبولی از شرایط واقعی انجام داده است.

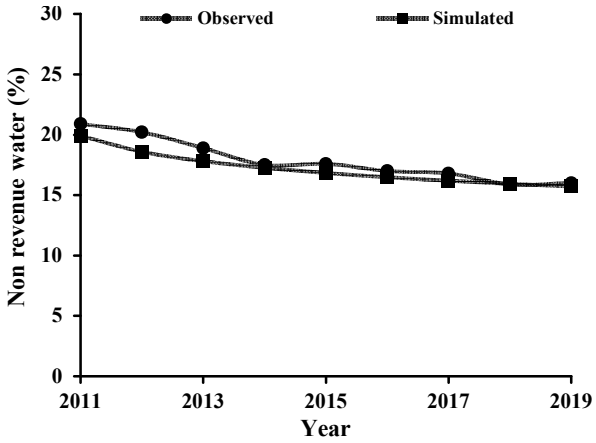

Fig. 9. Result of non revenue water modeling in Isfahan City (2011-2019)

شکل ۹- مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی آب بدون درآمد شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸

ساختار قیمت‌گذاری آب در سال‌های اخیر دچار تغییراتی شده و بر اساس میزان مصرف، طبقه‌بندی شده است. مصرف آب هر طبقه نیز تعرفه جداگانه‌ای دارد. قیمت فروش آب طی سال‌های گذشته افزایش یافته است و شکل ۱۰ روند این افزایش را بر اساس متوسط قیمت فروش آب در طبقات مختلف مصرف نشان می‌دهد. مدل پیشنهادی این روند تغییرات را به صورت خطی و با خطای ۳/۳۱ درصد پیش‌بینی و شبیه‌سازی کرده است.

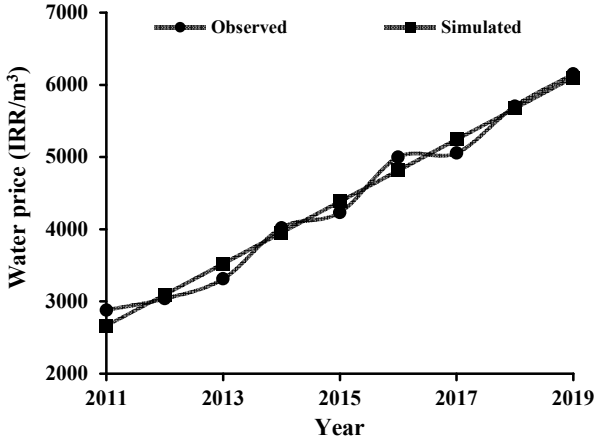

Fig. 10. Result of water price modeling in Isfahan City (2011-2019)

شکل ۱۰- مقایسه نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی متوسط قیمت فروش آب در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸

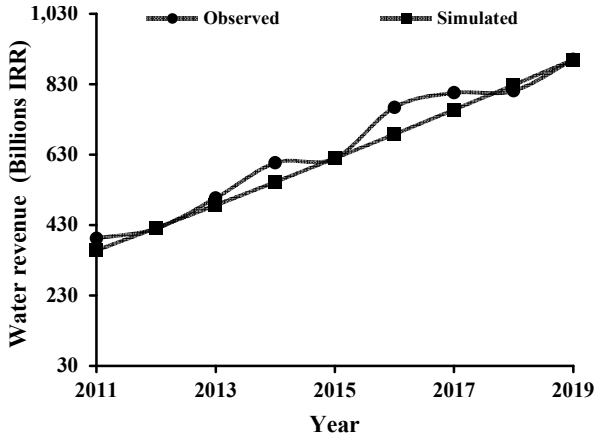

Fig. 11. Result of total water revenue modeling in Isfahan City (2011-2019)

شکل ۱۱- نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی درآمد حاصل از فروش آب در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸

در شکل ۱۱ درآمد حاصل از فروش آب شامل آب‌بها و آبونمان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸ نمایش داده شده است که درآمد حاصل از آب‌بها بر اساس میزان آب مصرفی و آبونمان وابسته به تعداد مشترکان است. با توجه به تغییرات این متغیر، مدل روند را با خطای ۴/۴۷ درصد شبیه‌سازی کرده است که در محدوده قابل قبول واقع شده است.

هزینه تولید آب تحت تأثیر متغیرهای هزینه آب خام، هزینه انرژی، هزینه مواد شیمیایی و هزینه مواد گندزدا قرار دارد و تغییرات تمام این متغیرها در آن لحاظ شده است. بر اساس شکل

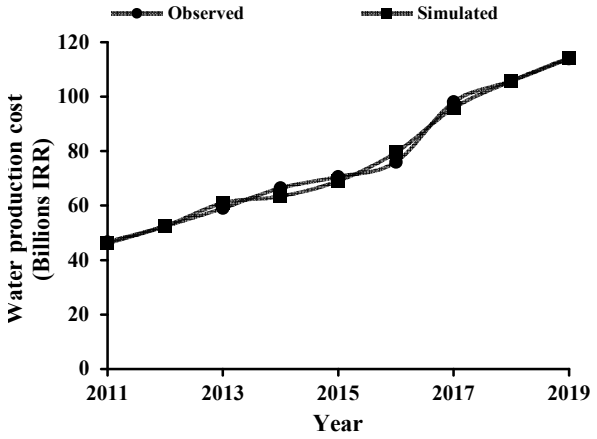

Fig. 12. Result of water production cost modeling in Isfahan City (2011-2019)

شکل ۱۲- نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی هزینه تولید آب در شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸

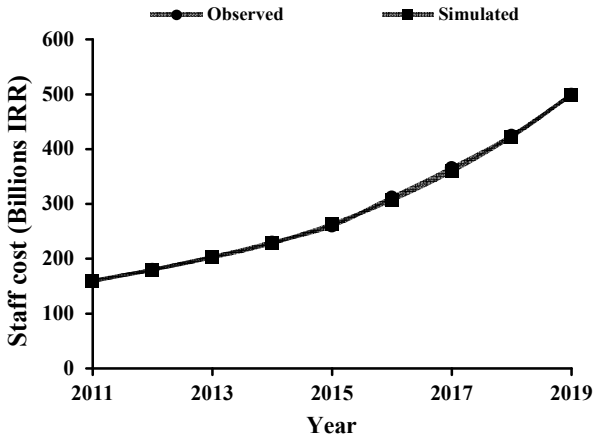

Fig. 13. Result of total staff cost modeling in Isfahan City (2011-2019)

شکل ۱۳- نتایج مشاهده‌ای و شبیه‌سازی هزینه سالانه کارکنان بخش آب شرکت آب و فاضلاب شهر اصفهان طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۸

۱۲ روند این متغیر غیرخطی بوده و مدل با دقت زیاد و خطای تقریباً ۲ درصدی رفتار آن را پیش‌بینی و شبیه‌سازی کرده است.

هزینه سالانه کارکنان بخش آب تحت تأثیر دو پارامتر تعداد کارکنان و متوسط حقوق آنان قرار دارند. شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مدل تقریب دقیقی از روند تغییرات این پارامتر را شناسایی کرده و با خطای ناچیز ۱/۳۹ درصد این پارامتر را شبیه‌سازی و مدل‌سازی می‌کند. در جدول ۱ وضعیت عملکرد فرایند شبیه‌سازی مدل پویایی‌های سیستم نشان داده شده است.

dx.doi.org/10.22093/wwj.2022.338545.3252

جدول ۱- وضعیت عملکرد فرایند شبیه‌سازی مدل پویایی‌های سیستم

Table 1. System dynamics model performance evaluation

Variable	MAPE (%)
Water consumption	3.24
Non revenue water	3.63
Water price	3.31
Total water revenue	4.47
Water production cost	2.05
Total staff cost	1.39

۵- تعریف شاخص ارزیابی پایداری

در این پژوهش، برای ارزیابی پایداری سیستم تحت سناریوهای مختلف، شاخص پایداری آب شهری[1] به‌منظور ارزیابی عملکرد آنها از منظر پایداری استفاده شد. براساس اصول توسعه پایدار این شاخص وضعیت عملکرد سیستم تحت هر سناریو را از سه جنبه اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی بررسی و کمّی‌سازی می‌کند. با توجه به پارامترهای بررسی شده در مدل شاخص UWSI شامل سه پارامتر CCI، WSRI و GGI[2] است که به‌ترتیب وضعیت اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی را نشان می‌دهند. مطابق شاخص CCI نسبت میزان درآمد حاصل از فعالیت‌های بخش آب به هزینه‌های بخش آب در شرکت آب و فاضلاب است. این شاخص وضعیت پایداری اقتصادی و خودکفایی مالی شرکت‌های آب را نشان می‌دهد.

شاخص WSRI نیز مطابق حاصل تقسیم مقدار آب تأمین شده برای مشترکان (آب فروخته شده) به تقاضای آب است و بیانگر پایداری آب‌رسانی و تأمین نیاز آبی جامعه است. شاخص GGI نیز میزان گازهای گلخانه‌ای منتشر شده ناشی از فعالیت‌های راهبری تأسیسات و آب‌رسانی را نشان می‌دهد که به‌عنوان یک شاخص محیط‌زیستی، سناریوهای موجود بر اساس آن بررسی می‌شوند.

برای امکان‌پذیر بودن مقایسه شاخص‌های فوق ابتدا لازم است که مقدار آنها نرمال شده و گستره آنها در یک بازه یکسان تنظیم شود. به این منظور ابتدا مقدار آنها با استفاده از روش Z-score normalization نرمال‌سازی شده و سپس با روش Max-Min داده‌ها در بازه صفر تا ۱ تنظیم می‌شوند تا مقایسه‌پذیر باشند. در پایان با استفاده از روش میانگین هندسی بین سه شاخص فوق مقدار UWSI برای هر سناریو محاسبه می‌شود.

[1] Urban Water Sustainability Index (UWSI)
[2] Greenhouse Gas Index (GGI)

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از ابزار مدل راهکاری مناسب برای شناخت بهتر و تصمیم‌گیری مطمئن‌تر است. در این پژوهش، یک مدل مبتنی بر پویایی‌های سیستم به منظور شبیه‌سازی تعاملات و روابط درونی یک سیستم آب شهری ارائه شده است. در مدل پیشنهادی ابعاد اجتماعی، اقتصادی، محیط‌زیستی، فنی و حاکمیتی سیستم آب شهری مورد توجه قرار گرفته و پارامترهای مؤثر در هر بخش در مدل وارد شده اند. فرایند مدل‌سازی بر اساس روابط بازخوردی پویا و حلقه‌های علّی و معلولی بین اجزای سیستم بوده است. این روابط متقابل مبتنی بر درک سیستمی است که از طریق بررسی ادبیات موضوع، تعامل و مصاحبه با تصمیم‌گیران و همکاری با متخصصان حاصل شده است. نمودارهای حلقه‌های علّی می‌توانند به راحتی برای پیگیری و بررسی اثر اختلال یک جز سیستم بر کل سیستم استفاده شوند. به خصوص این ویژگی می‌تواند برای کاهش اثرات تصمیمات مدیریتی و انتخاب بهترین راهبرد به منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه و دستیابی به نتیجه بهتر در پایداری آب شهری بسیار مفید باشد.

نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی بر روی شهر اصفهان نشان داد که مدل، دقت زیادی در شبیه‌سازی وضعیت سیستم دارد و درصد خطای آن در شبیه‌سازی پارامترهای مختلف کمتر از ۵ درصد است. متغیرهای بررسی شده، خود تحت تأثیر پارامترهای دیگری بودند مانند هزینه تولید آب که متأثر از هزینه انرژی و مواد مصرفی است و با بررسی و صحت‌سنجی آن به نوعی اثر تجمیعی سایر پارامترها نیز بررسی می‌شود. یکی از نکات قابل‌توجه در مدل توسعه داده شده کمّی‌سازی دقیق پارامترها با توجه به ماهیت آنها و تعاملات پویای بین اجزا است که از بروز خطای تجمعی و انحراف نتایج مدل‌سازی جلوگیری شده است. به این‌ترتیب مدل پیشنهادی می‌تواند به عنوان ابزاری برای تحلیل و بررسی استراتژی‌های مدیریتی مختلف به کمک تصمیم‌گیران آمده و قبل از اجرای تصمیمات مختلف و صرف زمان و هزینه، اثرات آن را بررسی و مناسب‌ترین استراتژی را انتخاب کنند.

مدل این قابلیت را دارد که انواع مختلفی از راهبردها و سیاست‌های مدیریتی در آن پیاده‌سازی شود، مانند شرایط شبکه

آب‌رسانی و شکستگی‌ها، نرخ نوسازی، قیمت آب، اقدامات منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب، کاهش آب بدون درآمد، تغییر میزان و محل پرداخت یارانه‌های دولتی و آگاهی اجتماعی، این مدل می‌تواند از طرف ذی‌نفعان مختلفی در موقعیت‌های گوناگون از جمله دولت و نهادهای نظارتی، سیاست‌گذاران، شرکت‌های آب و فاضلاب و پژوهشگران با توجه به نیازهای خود استفاده شود تا تصمیمات مناسبی را برای چرخه پایدار آب شهری ارائه دهند.

مخاطب اصلی این مدل شرکت‌های آب و فاضلاب به‌عنوان متولیان اصلی تأمین آب شهری هستند. این شرکت‌ها معمولاً برنامه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدتی ارائه می‌دهند. این برنامه‌ها شامل اقدامات بهره‌برداری، فنی و راهبردی است.

با توجه به تغییرات و پیچیدگی‌های موجود برنامه‌های استراتژیک به ندرت برای افق‌های زمانی بیش از ۱۰ تا ۱۵ سال تدوین می‌شوند. در تهیه این برنامه‌ها کمتر به ارتباطات پیچیده و تأثیرات بازخورد بخش‌های مختلف توجه می‌شود. بنابراین پویایی‌های سیستم می‌تواند به دقیق‌تر شدن و برنامه‌ریزی بلندمدت‌تر آنها کمک کند. با رویکرد سیستماتیک، این مدل می‌تواند تأثیر سیاست‌ها بر بخش‌های مختلف سیستم آب شهری و کارایی این اقدامات را ارزیابی کند. در این روش اقدامات پیشنهادی اولویت‌بندی شده و با توجه به بودجه مالی و نتایج مدل‌سازی می‌توان بهترین تصمیم را اتخاذ کرد. این مدل به عنوان بستری برای مدل‌سازی سناریوهای گوناگون مدیریتی است. با گسترش پارامترهای بررسی شده و افزایش جزئیات آن مانند اضافه کردن رواناب‌های شهری یا تفکیک مصرف‌کنندگان آب به مسکونی، تجاری و اماکن دولتی می‌توان درک جامع‌تری از شرایط سیستم آب شهری ایجاد کرد و برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای مدیریت بهتر سیستم داشت. این الگو با توجه به نتیجه موفق در شهر اصفهان برای شهرهای دیگر نیز قابل‌پیاده‌سازی است.

۷- قدردانی

نویسندگان پژوهش اعلام می‌کنند که در انجام این پژوهش از کمک‌های مالی یا پشتیبانی‌های سازمانی یا فردی خاصی که بر پژوهش اثرگذار باشد استفاده نکردند.

References

Ahmad, S. & Simonovic, S. P. 2004. Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. *Journal of Computing in Civil Engineering,* 18**,** 331-340.

Ahmadi, M. H. & Zarghami, M. 2019. Should water supply for megacities depend on outside resources? a Monte-Carlo system dynamics simulation for Shiraz, Iran. *Sustainable Cities and Society,* 44**,** 163-170.

Ahmadi, Z., Safavi, H. R. & Kerachian, R. 2020. Assessment of water resources policies under incomplete information using Signaling Game, case study: ZayandehRud River Basin. *Iran-Water Resources Research,* 16**,** 253-274. (In Persian)

Bach, P. M., Deletic, A., Urich, C. & Mccarthy, D. T. 2018. Modelling characteristics of the urban form to support water systems planning. *Environmental Modelling and Software,* 104**,** 249-269.

Bach, P. M., Deletic, A., Urich, C., Sitzenfrei, R., Kleidorfer, M., Rauch, W., et al. 2013. Modelling interactions between lot-scale decentralised water infrastructure and urban form–a case study on infiltration systems. *Water Resources Management,* 27**,** 4845-4863.

Bach, P. M., Rauch, W., Mikkelsen, P. S., Mccarthy, D. T. & Deletic, A. 2014. A critical review of integrated urban water modelling–Urban drainage and beyond. *Environmental Modelling and Software,* 54**,** 88-107.

Brown, R. R., Keath, N. & Wong, T. H. 2009. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science and Technology,* 59**,** 847-855.

Correia De Araujo, W., Oliveira Esquerre, K. P. & Sahin, O. 2019. Building a system dynamics model to support water management: a case study of the semiarid region in the Brazilian Northeast. *Water,* 11**,** 2513.

Dotto, C. B. S., Mannina, G., Kleidorfer, M., Vezzaro, L., Henrichs, M., Mccarthy, D. T., et al. 2012. Comparison of different uncertainty techniques in urban stormwater quantity and quality modelling. *Water Research,* 46**,** 2545-2558.

Elliott, A. & Trowsdale, S. A. 2007. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling and Software,* 22**,** 394-405.

Etaat, J. & Salehian, S. 2020. Evaluation of "Supply and consumption", and instability of water resources in Zayandeh-Rud River Basin. *Irrigation and Water Engineering,* 10**,** 142-158.

Forrester, J. W. 1961. *Industry Dynamics*. MIT Press, Massachusetts, USA.

Hashempour Bakhtiari, P., Nikoo, M. R., Izady, A. & Talebbeydokhti, N. 2020. A coupled agent-based risk-based optimization model for integrated urban water management. *Sustainable Cities and Society,* 53**,** 101922.

Howe, C., Butterworth, J., Smout, I., Duffy, A. & Vairavamoorhty, K. 2011. *Sustainable Water Management in the City of the Future*: findings from the SWITCH Project. UNESCO-IHE, The Netherlands.

Isfahan Municipality 2018. *Statistical Yearbook of Isfahan*. Isfahan, Iran. (In Persian)

Jeppsson, U., Pons, M. N., Nopens, I., Alex, J., Copp, J., Gernaey, K., et al. 2007. Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. *Water Science and Technology,* 56**,** 67-78.

Makropoulos, C. K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K. & Butler, D. 2008. Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environmental Modelling and Software,* 23**,** 1448-1460.

Marlow, D. R., Moglia, M., Cook, S. & Beale, D. J. 2013. Towards sustainable urban water management: a critical reassessment. *Water Research,* 47**,** 7150-7161.

Mirchi, A., Madani, K., Watkins, D. & Ahmad, S. 2012. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resources Management,* 26**,** 2421-2442.

Mitchell, V. G. 2006. Applying integrated urban water management concepts: a review of Australian experience. *Environmental Management,* 37**,** 589-605.

Mitchell, V. G., Duncan, H., Inman, M., Rahilly, M., Stewart, J., Vieritz, A., et al. 2007. State of the art review of integrated urban water models. *6th International Conference* on *Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management* -Novatech 2007, Villeurbanne France.

Mosleh, L. & Negahban-Azar, M. 2021. Role of models in the decision-making process in integrated urban water management: a review. *Water,* 13**,** 1252.

Murray-Rust, H., Sally, H., Salemi, H. & Mamanpoush, A. 2000. An overview of the hydrology of the Zayandeh Rud Basin. *IAERI-IWMI Research Reports,* 3**,** 52-54.

Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Guo, W. & Wang, X. C. 2020. A new model framework for sponge city implementation: emerging challenges and future developments. *Journal of Environmental Management,* 253**,** 109689.

Novotny, V., Ahern, J. & Brown, P. 2010. *Water Centric Sustainable Communities: Planning, Retrofitting, and Building the Next Urban Environment,* Hoboken, John Wiley & Sons. New Jersey, USA.

Peña-Guzmán, C. A., Melgarejo, J., Prats, D., Torres, A. & Martínez, S. 2017. Urban water cycle simulation/management models: a review. *Water,* 9**,** 285.

Pérez-Uresti, S. I., Ponce-Ortega, J. M. & Jiménez-Gutiérrez, A. 2019. A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. *Computers and Chemical Engineering,* 121**,** 158-173.

Phan, T. D., Bertone, E. & Stewart, R. A. 2021. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems,* 2**,** 100031.

Philip, R., Anton, B. & Van Der Steen, P. 2015. Strategic planning–preparing for the future. SWITCH training kit module 1. *Integrated Urban Water Management in the City of the Future.* ICLE I European Secretariat GmbH, Freiborg, Germany.

Pingale, S. M., Jat, M. K. & Khare, D. 2014. Integrated urban water management modelling under climate change scenarios. *Resources, Conservation and Recycling,* 83**,** 176-189.

Pluchinotta, I., Pagano, A., Vilcan, T., Ahilan, S., Kapetas, L., Maskrey, S., et al. 2021. A participatory system dynamics model to investigate sustainable urban water management in Ebbsfleet Garden City. *Sustainable Cities and Society*, 67**,** 102709.

Polonenko, L. M., Hamouda, M. A. & Mohamed, M. M. 2020. Essential components of institutional and social indicators in assessing the sustainability and resilience of urban water systems: challenges and opportunities. *Science of The Total Environment,* 708**,** 135-159.

Ramôa, A. R., Toth, E., Proença De Oliveira, R., Di Frederico, V., Montanari, A., et al. 2015. *Review of Global Change Pressures on Urban Water Cycle Systems*. Assessment of TRUST Pilots-D12.1a. Transitions to the urban water services of tomorrow, European Union.

Rehan, R., Knight, M. A., Haas, C. T. & Unger, A. J. 2011. Application of system dynamics for developing financially self-sustaining management policies for water and wastewater systems. *Water Research,* 45**,** 4737-4750.

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.

Rezaee, H. & Shojaa, S. 2020. Estimation of price and Iincome elasticity of kermanshah drinking water demand. *Journal of Water and Sustainable Development,* 7**,** 12. (In Persian)

Safavi, H. R., Golmohammadi, M. H. & Sandoval-Solis, S. 2015. Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. *Journal of Hydrology,* 528**,** 773-789.

Sahin, O., Siems, R. S., Stewart, R. A. & Porter, M. G. 2016. Paradigm shift to enhanced water supply planning through augmented grids, scarcity pricing and adaptive factory water: a system dynamics approach. *Environmental Modelling and Software,* 75**,** 348-36.

Sahin, O., Stewart, R. A. & Porter, M. G. 2015. Water security through scarcity pricing and reverse osmosis: a system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production,* 88**,** 160-171.

Schmitt, T. & Huber, W. 2006. The scope of integrated modelling: system boundaries, sub-systems, scales and disciplines. *Water Science and Technology,* 54**,** 405-413.

Segrave, A., Pronk, W., Ramaker, T. & Zuleeg, S. 2007. Global trends affecting the water cycle. *Winds of change in the world of water. Techneau Project,* 1(7).

Sørup, H. J., Brudler, S., Godskesen, B., Dong, Y., Lerer, S. M., Rygaard, M., et al. 2020. Urban water management: can Un SDG 6 be met within the planetary boundaries? *Environmental Science and Policy,* 106**,** 36-39.

Statistical Centre of Iran, 2016. *Census Report*. Statistical Centre of Iran. (In Persian)

Stave, K. A. 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management,* 67**,** 303-313.

Stavenhagen, M., Buurman, J. & Tortajada, C. 2018. Saving water in cities: assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. *Cities,* 79**,** 187-195.

Tahami Pour, M., Molaei, F. & Moshrefi, R. 2017. Determination of optimal price of domestic water in Tehran city using ramsey model. *Iran-Water Resources Research,* 17**,** 16. (In Persian)

Un-Desa, 2009. *World Population Prospects: the 2008 Revision,* Department of Economic and Social Affairs. Population Division. New York, United Nations.

UNESCO, 2009. *World Water Assessment Programme, United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World,* Paris: UNESCO, and London: Earthscan, UNESCO - The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Vakilifard, N., Bahri, P. A., Anda, M. & HO, G. 2019. An interactive planning model for sustainable urban water and energy supply. *Applied Energy,* 235**,** 332-345.

Van De Meene, S., Brown, R. R. & Farrelly, M. A. 2011. Towards understanding governance for sustainable urban water management. *Global Environmental Change,* 21**,** 1117-1127.

Venkatesh, G., Brattebø, H., Sægrov, S., Behzadian, K. & Kapelan, Z. 2017. Metabolism-modelling approaches to long-term sustainability assessment of urban water services. *Urban Water Journal*, 14(1)**,** 11-22.

Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A. & Ahmad, B. 2016. Energy consumption for water use cycles in different countries: a review. *Applied Energy,* 178**,** 868-885.

Willuweit, L. & O'sullivan, J. J. 2013. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: presenting the dynamic urban water simulation model. *Water Research,* 47**,** 7206-7220.

Xu, Z., Yao, L. & Chen, X. 2020. Urban water supply system optimization and planning: bi-objective optimization and system dynamics methods. *Computers and Industrial Engineering,* 142**,** 106373.

Zarghami, M. & Akbariyeh, S. 2012. System dynamics modeling for complex urban water systems: application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling,* 60**,** 99-106.

Zhang, Q., Smith, K., Zhao, X., Jin, X., Wang, S., Shen, J., et al. 2021. Greenhouse gas emissions associated with urban water infrastructure: what we have learnt from China's practice. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water,* 8**,** e1529.

Zomorodian, M., Lai, S. H., Homayounfar, M., Ibrahim, S., Fatemi, S. E. & El-Shafie, A. 2018. The state-of-the-art system dynamics application in integrated water resources modeling. *Journal of Environmental Management,* 227**,** 294-304.

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