Systems Thinking in Practice
3rd International Conference on
سومین کنفرانس بین‌المللی
تفکر سیستمی در عمل

تبیین پارامترهای مؤثر مدل‌های پویایی سیستم جهت مدیریت سیستم‌های توزیع آب شهری

محسن کدخدایی[۱]
دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
علی عباسی[۲*]
استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

عملکرد سیستم‌های توزیع آب شهری به عوامل مختلفی بستگی دارد. ارتباطات پویای موجود میان این عوامل، مدیریت سیستم‌های توزیع آب شهری و برنامه‌ریزی آنها را بسیار پیچیده می‌کند. بنابراین ضرورت دارد در برنامه‌ریزی و مدیریت استراتژیک این سیستم‌ها، تغییرات پویای بخش‌های مختلف آن و روابط حاکم بر بخش‌های مختلف سیستم نیز در نظر گرفته شوند. پویایی‌شناسی سیستم‌ها شیوه‌ای کارآمد جهت در نظر گرفتن تغییرات پویای سیستم‌هایی نظیر سیستم‌های توزیع آب شهری می‌باشد. هدف این پژوهش، بررسی کاربرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در مدیریت سیستم‌های توزیع آب شهری است. بدین منظور، با استفاده از روش کتابخانه‌ای، مطالعات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای حلقه علّی مربوط به هر یک از بخش‌های سیستم توزیع آب شهری شامل بخش پارامترهای فیزیکی، بخش پارامترهای اقتصادی و بخش پارامترهای مربوط به مصرف‌کننده استخراج شدند. مطابق نتایج بدست آمده، مهمترین بلوک‌های بخش پارامترهای فیزیکی، نشتی لوله‌ها، میزان نوسازی، میزان تعمیر و نگهداری شبکه و تجهیزات کاهنده مصرف می‌باشند. مهمترین بلوک‌های بخش پارامترهای اقتصادی، هزینه آب، درآمد، نقدینگی، بدهی، سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی، درآمد خانوار و نسبت سود به هزینه می‌باشند. مهمترین بلوک‌های بخش پارامترهای مربوط به مصرف‌کننده نیز رشد جمعیت، رفتارهای مصرفی آب، مقبولیت افزایش هزینه آب، نارضایتی مشترکین، مدیریت تقاضای مصرف آب، کنترل هدررفت آب و بازچرخانی فاضلاب می‌باشند.

واژگان کلیدی: مهندسی سیستم‌ها، پویایی‌شناسی سیستم‌ها، سیستم‌های توزیع آب شهری.

[۱] kadkhodaei.mohsen@mail.um.ac.ir
[۲*] aabbasi@um.ac.ir

۱- مقدمه

تأمین آب آشامیدنی سالم برای حفظ کیفیت بالای زندگی و ارتقای فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی در شهرها و کلان‌شهرها بسیار لازم و ضروری است. ارائه مطمئن این خدمات مستلزم نصب، بهره‌برداری و نگهداری زیرساخت‌های گران‌قیمت از جمله تأسیسات برداشت و تصفیه آب، مخازن ذخیره، شبکه‌های توزیع آب و ایستگاه‌های پمپاژ است (رهان[1]، ۲۰۱۱). در یک شبکه آب و فاضلاب شهری، سیستم توزیع آب، آب شیرین را برای آشامیدن فراهم می‌کند و سیستم جمع‌آوری فاضلاب، آب مصرف شده را جمع‌آوری می‌کند و به تصفیه‌خانه می‌فرستد تا پس از تصفیه به نهرها تخلیه شود (گریگ[2]، ۲۰۱۲). با توجه به این که سیستم‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند، خرابی در یکی می‌تواند جنبه‌های فیزیکی، مالی و اجتماعی سیستم دیگر را نیز تحت تأثیر قرار دهد (گنجی‌دوست[3] و همکاران، ۲۰۱۵).

سیستم‌های آب و فاضلاب شهری شامل ارتباط متقابل بین زیرساخت‌های فیزیکی و عوامل اقتصادی، اجتماعی و سیاسی است. وجود روابط پویا بین این عوامل، مدیریت سیستم‌های توزیع آب شهری را به یک مشکل پیچیده و پویا تبدیل می‌کند (رهان، ۲۰۱۱). بنابراین ضرورت دارد در برنامه‌ریزی‌های بلند مدت و مدل‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری، روابط پویا و متقابل عوامل دخیل در این سیستم‌ها و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آنها نیز در نظر گرفته شوند. عدم توجه به این روابط پویا می‌تواند مدیریت سیستم‌های توزیع آب شهری را در طول زمان با مشکلات قابل توجهی روبرو سازد. به عنوان نمونه می‌توان به مدیریت سیستم‌های آب و فاضلاب استان آنتاریو[4] در کشور کانادا در دهه ۹۰ میلادی اشاره کرد.

اولین سیستم‌های آب و فاضلاب در استان آنتاریو در اواسط قرن نوزدهم ساخته شدند. با این حال، گسترش این خدمات در سراسر استان پس از جنگ جهانی دوم سرعت گرفت و تا سال ۱۹۸۳، ۹۸٪ از جمعیت شهری آنتاریو تحت پوشش قرار گرفتند. این گسترش سریع با کمک‌های بلاعوض که شهرداری‌ها از دولت‌های فدرال و استانی دریافت می‌کردند، امکان‌پذیر شد. این کمک‌های سخاوتمندانه، دولت‌های شهری را تشویق به نصب سیستم‌های زیرساختی بزرگ با ظرفیت‌های غیرضروری کرد (سوئین[5] و همکاران، ۲۰۰۵). علاوه بر این، هزینه‌های پرداختی مشترکان برای خدمات توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب به گونه‌ای تعیین شد که فقط هزینه‌های عملیاتی انجام شده در این خدمات را تأمین کند (رنزتی[6]، ۱۹۹۹). به طور کلی، هیچ اقدام پیشگیرانه‌ای برای تأمین هزینه‌های سرمایه‌گذاری انجام نشد تا منابع کافی برای تأمین مالی جایگزینی یا نوسازی قریب‌الوقوع زیرساخت‌های قدیمی در دسترس باشد. این رویکرد تا حدی ناشی از انتظار تداوم جریان کمک‌های مالی از سطوح ارشد دولتی بود. در طول دهه ۱۹۹۰در میان تقاضاهای مصرف منابع مالی شهرداری‌ها، زیرساخت‌های آب و فاضلاب اغلب به دلیل ماهیت کمتر قابل مشاهده بودن این دارایی‌ها مورد توجه کافی تصمیم‌گیرندگان قرار نگرفتند (بروبیکر[7]، ۲۰۱۱). در آغاز قرن بیست و یکم، پیامدهای این غفلت در بسیاری از جوامع به شکل ترکیدگی مکرر لوله‌های آب، بالازدگی فاضلاب و سیلاب‌ها و اتفاقات منجر به تغییر رنگ آب

[1] Rehan
[2] Grigg
[3] Ganjidoost
[4] Ontario
[5] Swain
[6] Renzetti
[7] Brubaker

آشکار شد. محققان توجه سیاست‌گذاران را به مورد غفلت قرار گرفتن تعمیر و نگهداری زیرساخت‌های آب و فاضلاب و هزینه‌های مربوطه جلب کردند (میرزا[1] و هایدر[2]، ۲۰۰۳). با این حال، همانطور که برخی از اولین سیستم‌های آبی تنها پس از وقوع بلایای طبیعی ساخته شدند، در سال ۲۰۰۰، در نتیجه یک منبع آب آلوده در شهر والکرتون[3] استان آنتاریو، هفت نفر جان خود را از دست دادند و بیش از ۲۳۰۰ نفر به شدت بیمار شدند. علاوه بر تلفات غم‌انگیز انسانی، خسارات اقتصادی این حادثه نیز بیش از ۶۴ میلیون دلار برآورد شد (لیورنویز[4]، ۲۰۰۲). بنابراین ضرورت دارد همواره تمامی عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم‌های توزیع آب شهری و روابط پویای میان آنها در مدیریت و برنامه‌ریزی و مدل‌سازی این سیستم‌ها مورد توجه قرار گیرند.

۲- مبانی نظری تحقیق

پویایی‌شناسی سیستم‌ها[5] (SD) شاخه‌ای از تفکر سیستمی بوده و شامل مجموعه‌ای از ابزارهای مفهومی می‌شود که درک ساختار و پویایی سیستم‌های پیچیده را تسهیل می‌سازند. در نتیجه، می‌توانیم با مدل‌سازی دقیق و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، سیاست‌گذاری‌های مؤثرتری داشته باشیم (خسروی و صمصامی، ۱۳۹۵). پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای ساماندهی و حل مسائل مدیریتی پویا و بلندمدت طراحی شده است. تمرکز این شیوه بر فرایندها و تعاملات میان اجزای سیستم است. ساختار سیستم متشکل از اجزای سیستم بوده و روابط میان این اجزا در طول زمان عملکرد پویای سیستم را تولید می‌کند (زرین‌دست و همکاران، ۱۳۹۵).

به باور دانشمندان حوزه پویایی سیستم، تحولات هر سیستم در طول زمان تابع قوانینی است که با شناخت آنها می‌توان مسیر تغییر و تحولات سیستم را به جهت مطلوب سوق داد. رویکرد پویایی سیستم ابزارهای لازم برای شناسایی این قانونمندی‌ها را به تحلیل‌گران و محققین این حوزه ارائه می‌دهد (فرتوک‌زاده، ۱۳۷۱). بدین ترتیب، با استفاده از شبیه‌سازی امکان ساخت مدلی از سیستم که تا حد زیادی مطابق سیستم واقعی بوده و از قانونمندی‌های آن تبعیت می‌کند فراهم می‌گردد. مدل‌های پویایی سیستم مدل‌هایی هستند که با در نظر گرفتن روابط پویا میان اجزای سیستم، به منظور مطالعه رفتار سیستم تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌سازی پویایی سیستم یک الگوی مدل‌سازی شیءگرای مبتنی بر بازخورد است که توسط فارستر[6] برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده توسعه داده شده است (رهان، ۲۰۱۱). هر سیستم پویا از یک ساختار سلسله مراتبی چهارگانه تشکیل می‌شود که برای هر نوع تحول و پویایی در پدیده‌های گوناگون قابل تعریف و استفاده است. مراتب این ساختار سلسله مراتبی به ترتیب عبارتند از:

۱- مرز بسته[7]

۲- حلقه‌های بازخورد[8]

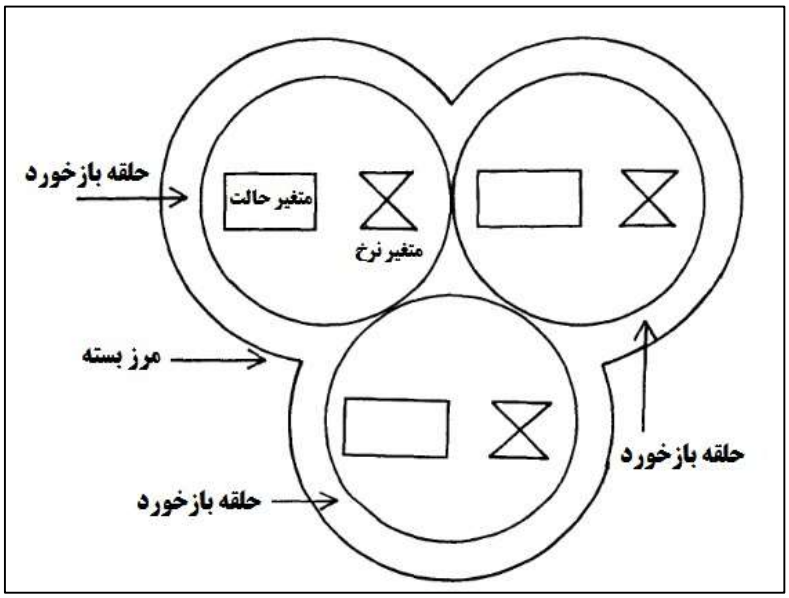
۳- متغیرهای سطح یا حالت[9]

---

[1] Mirza
[2] Haider
[3] Walkerton
[4] Livernois
[5] System Dynamics
[6] Forrester
[7] Closed Boundary
[8] Feedback Loops
[9] State or Level Variables

۴- متغیرهای نرخ[1]

مرز بسته محدوده عوامل مؤثر و دخیل در عملکرد سیستم را مشخص می‌کند. بنابراین مرز سیستم تنها شامل اجزای سیستم نبوده و تمامی پارامترهای مؤثر در پویایی سیستم را در بر می‌گیرد. حلقه‌های بازخورد نشان‌دهنده پارامترهایی هستند که تأثیراتی متقابل بر یکدیگر دارند و روابط میان آنها یک حلقه را تشکیل می‌دهد. متغیرهای سطح (حالت) بیان‌گر سطح یا حالت سیستم بوده و متغیرهای نرخ نیز بیان‌گر هر نوع افزایش یا کاهش در سطح یا حالت می‌باشند (فرتوک‌زاده، ۱۳۷۱). به نمودارهایی که روابط میان پارامترهای مدل را نشان می‌دهند، نمودارهای حلقه علّی گفته می‌شود. حلقه‌هایی که مسیرهای آنها در یک جهت باشد، حلقه‌های متعادل‌کننده و حلقه‌هایی که مسیرهای آنها در خلاف جهت یکدیگر باشد و موجب تقویت یک عامل شوند، حلقه‌های تقویت‌کننده نامیده می‌شوند (استرمن[2]، ۲۰۰۰).



شکل ۱. اجزای سلسله مراتبی مدل‌های پویایی سیستم (فرتوک‌زاده، ۱۳۷۱)

پس از تعیین معادلات ریاضی مربوط به روابط میان عوامل مختلف، می‌توان مدل‌سازی پویایی سیستم مربوطه را انجام داد. بلوک‌های مورد استفاده در مدل‌های پویایی سیستم عبارتند از: موجودی‌ها، جریان‌ها، مبدل‌ها و رابط‌ها. موجودی‌ها برای نمایش متغیرهای سطح یا حالت مورد استفاده قرار گرفته و می‌توانند مقادیر فیزیکی و غیرفیزیکی را نشان دهند. از جمله موجودی‌های فیزیکی می‌توان به ذخایر آب موجود در لوله‌ها یا مقدار آب موجود در یک مخزن اشاره کرد. جریان‌ها نیز فعالیت‌ها یا اقدامات انجام شونده روی موجودی‌ها را نشان می‌دهند. مصرف روزانه آب، تغییر سرعت آب در لوله‌ها و درآمدها یا هزینه‌های ماهانه یک شرکت آب نمونه‌هایی از جریان‌ها می‌باشند. رابط‌ها روابط میان پارامترهای مختلف رو نشان داده و مبدل‌ها بیان‌گر توابع مربوط به این روابط هستند.

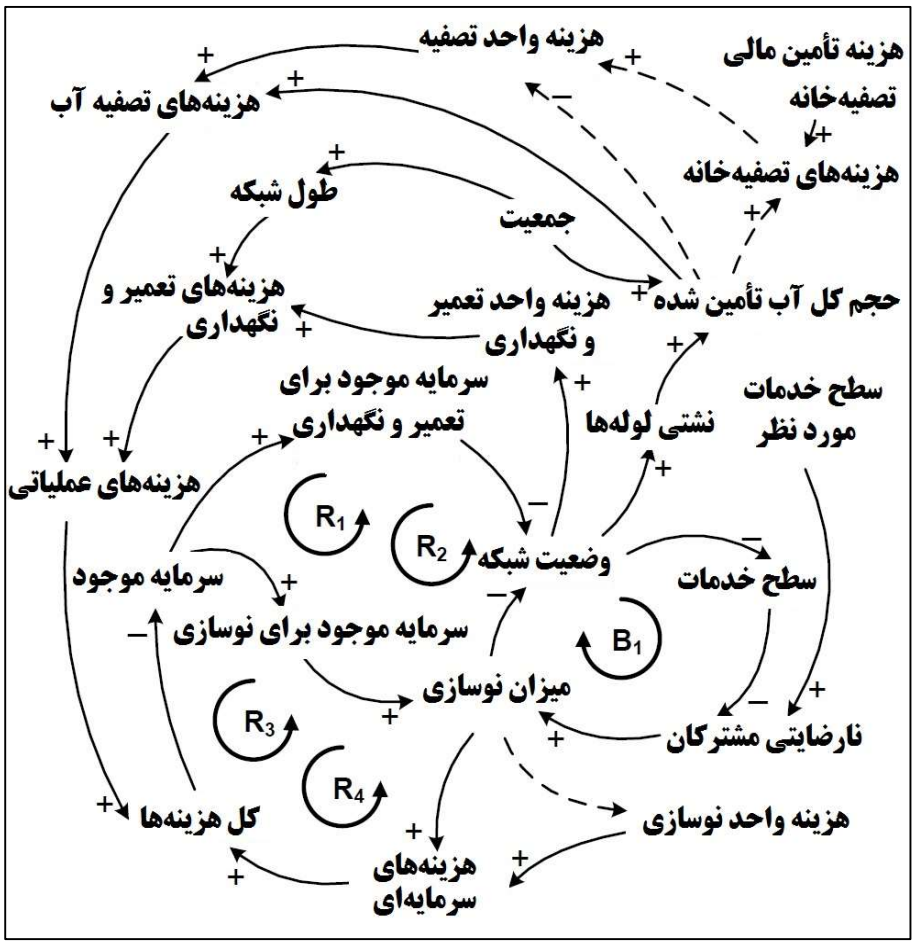
[1] Rate Variables
[2] Sterman

۳- روش‌شناسی تحقیق

روش انتخاب شده برای انجام این پژوهش روش کتابخانه‌ای می‌باشد. بر همین اساس، حلقه‌های علّی مربوط به بخش‌های مختلف مدل پویایی سیستم در مدل‌سازی سیستم‌های توزیع آب شهری مورد مطالعه قرار گرفته و بلوک‌های مورد استفاده در آنها و روابط میان آنها نظیر حلقه‌های بازخورد تقویت‌کننده و متعادل‌کننده شناسایی شدند. به منظور فراهم شدن امکان مقایسه مدل‌های پویایی سیستم مربوط به سیستم‌های توزیع آب شهری در شهرهای ایران و سایر شهرهای جهان، دو مطالعه مربوط به سیستم‌های توزیع آب شهری در کشورهای کانادا و برزیل و دو مطالعه مربوط به سیستم توزیع آب شهری شهرهای تهران و تبریز جهت بررسی پارامترها در این پژوهش انتخاب شدند.

۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

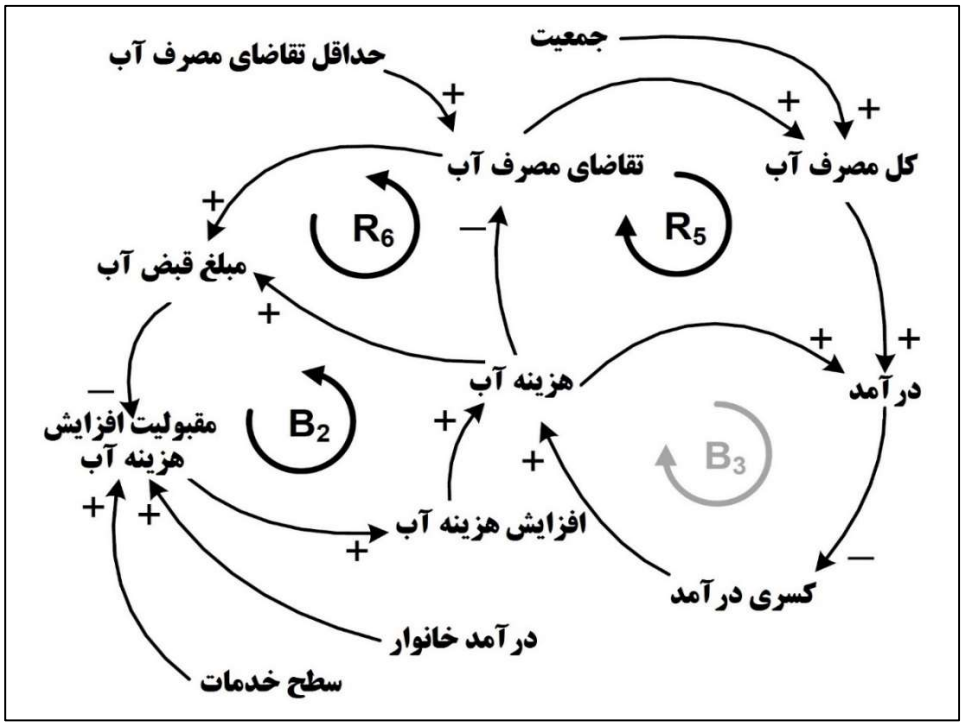
رهان و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل پویایی سیستم را برای مدیریت استراتژیک شبکه‌های توزیع آب شهری توسعه داد. این مدل از سه بخش شامل بخش لوله‌های انتقال آب، بخش رفتار مصرف‌کننده و بخش مالی تشکیل گردید. نمودار حلقه علّی مربوط به لوله‌های انتقال آب در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار حلقه علّی بخش لوله‌های انتقال آب در سیستم توزیع آب شهری (رهان، ۲۰۱۳)

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، وضعیت شبکه از طریق اثرگذاری بر هزینه‌های تصفیه و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه‌های عملیاتی یک شرکت آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هزینه‌های عملیاتی نیز با اثرگذاری بر سرمایه موجود برای تعمیر و نگهداری و سرمایه موجود برای بازسازی، وضعیت شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بدین ترتیب، این تأثیرات متقابل چهار حلقه بازخورد تقویت‌کننده را تشکیل می‌دهند (حلقه‌های R_1، R_2، R_3 و R_4). اثرگذاری متوالی بلوک‌های وضعیت شبکه، سطح خدمات، نارضایتی مشترکان و میزان نوسازی نیز یک حلقه بازخورد متعادل‌کننده را در نمودار حلقه علّی مربوطه تشکیل داده‌اند (حلقه B_1). مطابق این حلقه، با رشد وضعیت شبکه و اندازه آن منجر به کاهش سطح خدمات برای مشترکان خواهد شد. زیرا با افزایش وسعت شبکه، مشکلات ناشی از فرسودگی و شکستگی لوله‌ها و افت کیفیت آب بیشتر خواهد شد. بنابراین، به دلیل کاهش سطح خدمات، نارضایتی مشترکان افزایش خواهد یافت. در نتیجه، فشار مشترکان، شرکت را مجبور به افزایش میزان نوسازی شبکه می‌کند (مشروط بر این که بودجه کافی برای نوسازی در اختیار شرکت باشد).

نمودار حلقه علّی مربوط به بخش رفتار مصرف‌کننده شامل ۴ حلقه بازخورد (حلقه‌های R_5، R_6، B_2 و B_3) در شکل ۳ نشان داده شده است.

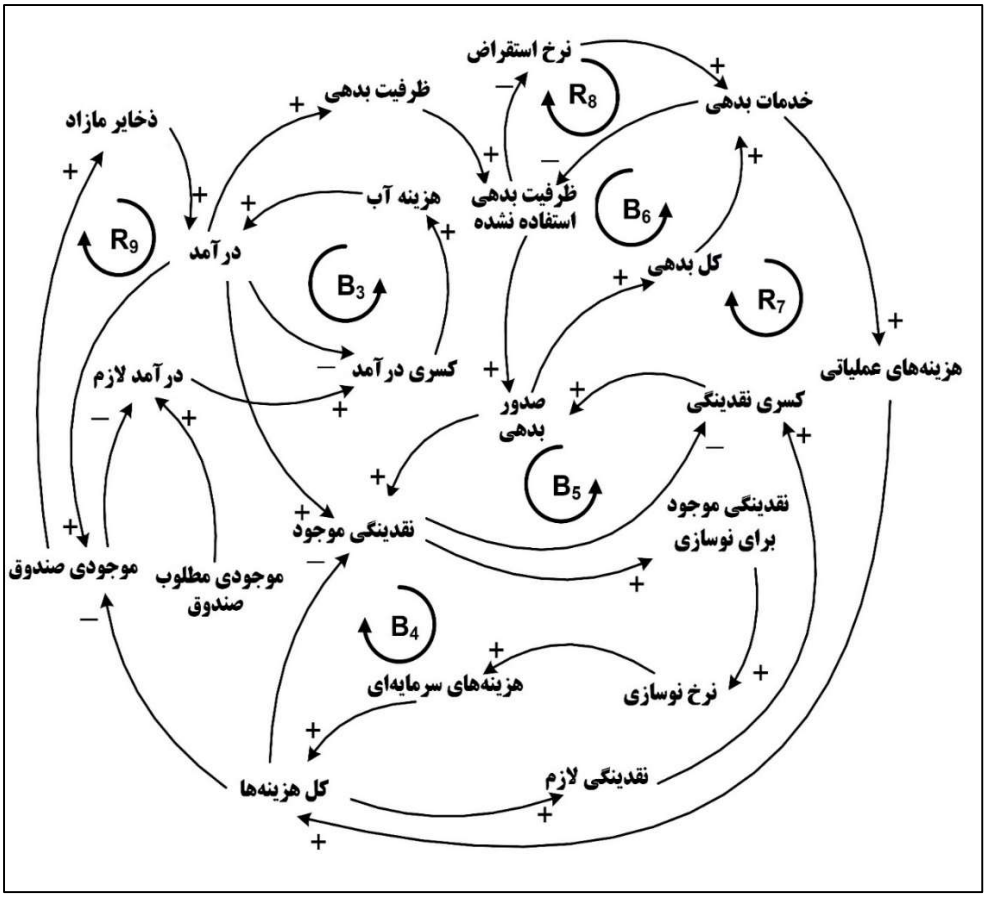


شکل ۳. نمودار حلقه علّی بخش رفتار مصرف‌کننده در سیستم توزیع آب شهری (رهان، ۲۰۱۳)

حلقه‌های R_5 و R_6، حلقه‌های بازخورد تقویت‌کننده و حلقه‌های B_2 و B_3 حلقه‌های بازخورد متعادل‌کننده هستند. مطابق حلقه بازخورد R_5، وقتی مخارج شرکت از درآمدهایش بیشتر شود، کسری درآمد افزایش یافته و برای رفع آن شرکت مجبور است هزینه آب را افزایش دهد. مشترکان نیز می‌توانند با کاهش مصرف آب به افزایش هزینه آب پاسخ دهند. از طرفی، کاهش مصرف آب می‌تواند باعث کاهش درآمدها شود. لازم به ذکر است که عملکرد تقویت‌کننده این

حلقه ممکن است با محدودیت‌هایی نیز مواجه باشد. به عنوان نمونه، کاهش مصرف آب حداکثر تا مقدار حداقل مصرف آب می‌تواند ادامه یابد.

نمودار حلقه علّی مربوط به بخش مالی شامل ۷ حلقه بازخورد (حلقه‌های R_7، R_8، R_9، B_3، B_4، B_5 و B_6) در شکل ۴ نشان داده شده است. حلقه‌های R_7، R_8 و R_9، حلقه‌های بازخورد تقویت‌کننده و حلقه‌های B_3، B_4، B_5 و B_6 حلقه‌های بازخورد متعادل‌کننده هستند.

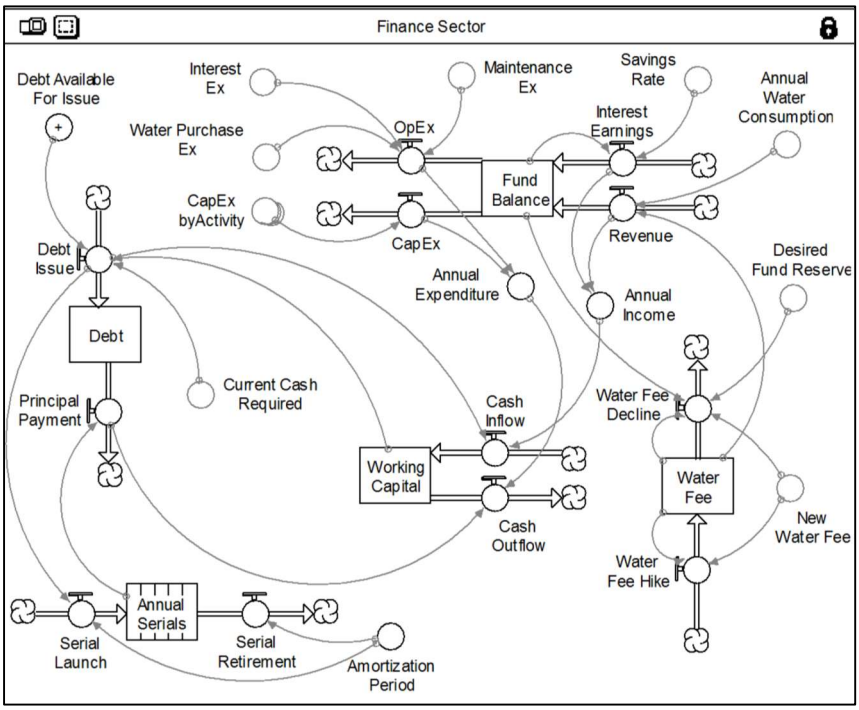


شکل ۴. نمودار حلقه علّی بخش مالی در سیستم توزیع آب شهری (رهان، ۲۰۱۳)

مطابق حلقه بازخورد B_3، با افزایش کسری درآمد، هزینه آب افزایش می‌یابد. افزایش هزینه آب نیز به معنی افزایش درآمد است که منجر به کاهش کسری درآمد می‌شود. هزینه‌های سرمایه‌ای زمانی افزایش می‌یابد که شرکت نرخ نوسازی شبکه را افزایش دهد. مطابق حلقه بازخورد B_4، افزایش هزینه‌های سرمایه‌ای در نهایت منجر به کاهش نرخ نوسازی می‌شود. مطابق حلقه بازخورد B_5، هنگامی که کسری نقدینگی شرکت افزایش یابد، شرکت می‌تواند با صدور بدهی، نقدینگی موجود را افزایش داده تا در نتیجه، کسری نقدینگی کاهش یابد. مطابق حلقه بازخورد B_6، افزایش صدور بدهی باعث افزایش کل بدهی شده که به معنای مخارج سالانه بالاتر برای خدمات بدهی است. در نتیجه، توانایی شرکت برای صدور بدهی بیشتر، یعنی ظرفیت بدهی استفاده نشده کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت بدهی استفاده نشده نیز منجر به کاهش صدور بدهی می‌گردد.

از طرفی، صدور بدهی بخشی از حلقه بازخورد R_7 می‌باشد که مطابق آن، صدور بدهی بیشتر منجر به افزایش خدمات بدهی می‌شود. بدین ترتیب، هزینه‌های عملیاتی و در نتیجه، کل هزینه‌ها بیشتر می‌شوند. بنابراین، نقدینگی لازم افزایش یافته و کسری نقدینگی شرکت بیشتر می‌شود. مطابق حلقه بازخورد R_8، نرخ استقراض یک شرکت تابعی از بدهی موجود آن است. بالا بودن بدهی شرکت به معنی افزایش تعهدات خدمات بدهی آن می‌باشد. خدمات بدهی بالاتر نیز به معنی کاهش ظرفیت بدهی استفاده نشده شرکت است. بدین ترتیب، با کاهش ظرفیت بدهی استفاده نشده، شرکت فقط با نرخ بهره بالاتر می‌تواند وام بیشتری بگیرد. بنابراین با افزایش نرخ استقراض، هزینه‌های بهره وام و در نتیجه هزینه‌های خدمات بدهی افزایش می‌یابند. مطابق حلقه بازخورد R_9، افزایش درآمد شرکت منجر به افزایش موجودی صندوق شده و در نتیجه، ذخایر مازاد شرکت افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، سود ناشی از سرمایه‌گذاری ذخایر مازاد، درآمدهای شرکت را افزایش می‌دهد.

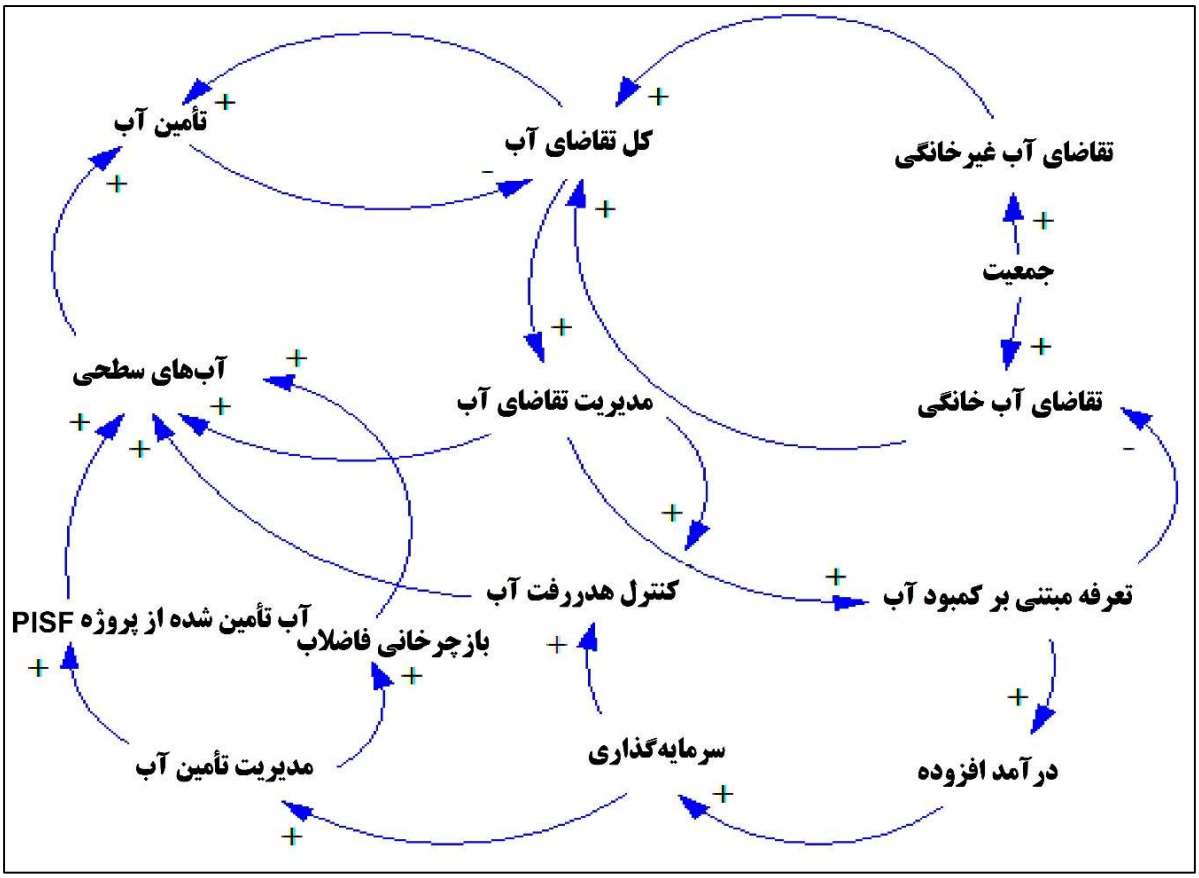
پس از ترسیم نمودارهای حلقه علّی مربوط به هر بخش از سیستم توزیع آب شهری و تعیین روابط میان عوامل مختلف تأثیرگذار در سیستم، با تعیین معادلات ریاضی مربوط به هر یک از روابط، می‌توان مدل‌سازی پویایی سیستم توزیع آب شهری را برای هر بخش از سیستم مربوطه انجام داد. برای مدل‌سازی پویایی سیستم از نرم‌افزارهای مختلفی نظیر نرم‌افزارهای ونسیم[1] و استلا[2] استفاده نمود. به عنوان نمونه، رهان در پژوهش خود، پس از ترسیم نمودارهای حلقه علّی بخش مالی سیستم‌های توزیع آب شهری و تعیین معادلات ریاضی روابط آن، مدل پویایی سیستم بخش مالی سیستم‌های توزیع آب شهری را مطابق شکل ۵ طراحی نمود. به کمک چنین مدل‌هایی می‌توان تأثیر استراتژی‌های مختلف بر عملکرد سیستم‌های مختلف را برآورد نمود.



شکل ۵. مدل پویایی سیستم بخش مالی سیستم توزیع آب شهری (رهان، ۲۰۱۳)

[1] Vensim
[2] STELLA

آرایو[1] و همکاران در سال ۲۰۱۹ یک مدل پویایی سیستم را جهت ارزیابی سیستم توزیع آب شهری در مناطق نیمه خشک توسعه دادند. آنها ایالت پارایبا[2] که منطقه‌ای نیمه خشک واقع در شمال شرقی بزریل است را به عنوان مطالعه موردی انتخاب نمودند. در منطقه مذکور سیستم‌های تأمین آب شهری تقریباً به طور کامل از منابع آب سطحی تغذیه می‌شوند. به این ترتیب، تامین آب تنها به تغییر موقعیت ذخایر آب از مخازن سطحی در طول فصل کوتاه بارندگی که بین دو تا چهار ماه از سال طول می‌کشد، بستگی دارد. پیامد این روند وقوع خشکسالی‌های شدید فزاینده خواهد بود (آرایو و همکاران، ۲۰۱۹). نمودار حلقه علّی طراحی شده در مدل پویایی سیستم مربوطه در شکل ۶ نشان داده شده است.



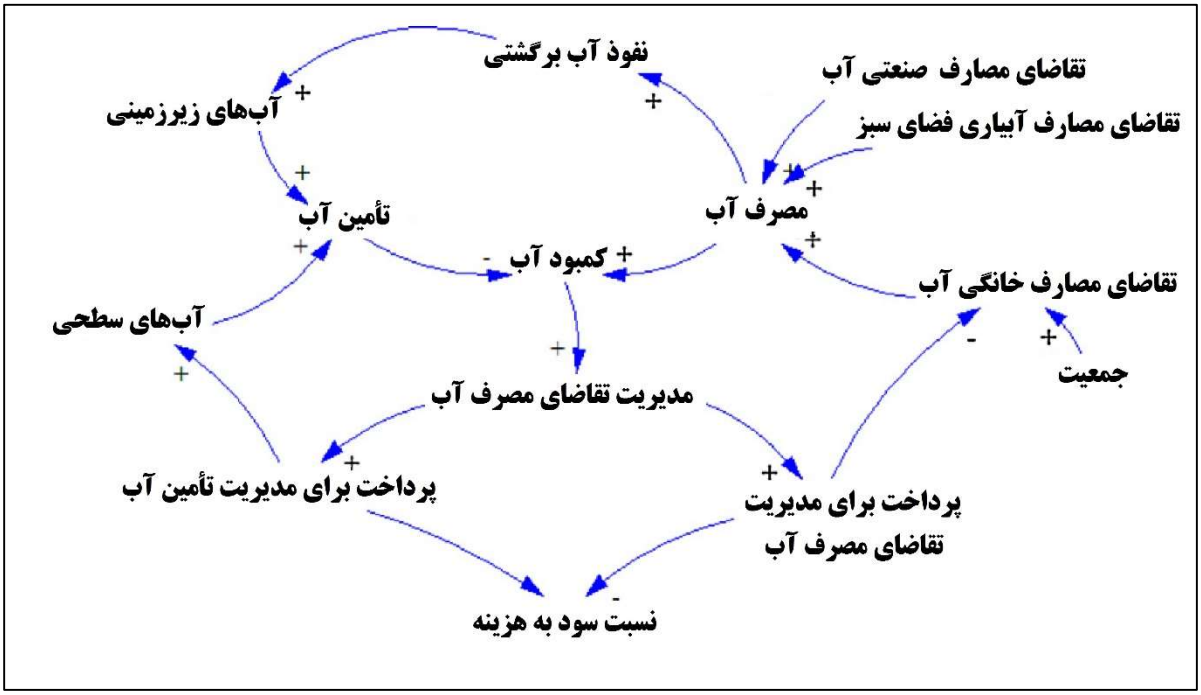
شکل ۶. نمودار حلقه علّی مدل پویایی سیستم توزیع آب شهری در مناطق نیمه خشک (آرایو و همکاران، ۲۰۱۹)

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در مدل‌های پویایی سیستم مربوط به سیستم‌های توزیع آب شهری در مناطق نیمه خشک، گزینه‌هایی مانند بازچرخانی فاضلاب و کنترل هدررفت آب نیز می‌توانند در نظر گرفته شوند. مدل پویایی سیستم توزیع آب شهری مورد اشاره با دو هدف ارزیابی اقدامات لازم در بحران کمبود آب سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ و ارزیابی وضعیت دسترسی به آب تا سال ۲۰۲۵ در منطقه مورد مطالعه طراحی گردید. لازم به ذکر است که

[1] Araujo
[2] Paraiba

گزینه PISF در شکل ۶ به تأمین آب از طریق پروژه یکپارچه‌سازی رودخانه سائوفرانسیسکو[1] اشاره دارد (آرایو و همکاران، ۲۰۱۹).

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در مدل پویایی سیستم طراحی شده توسط آرایو و همکاران، مصارف آب تنها به دو دسته مصارف خانگی و غیرخانگی تقسیم شدند (آرایو و همکاران، ۲۰۱۹). اما در مدل پویایی سیستم توزیع آب شهری شهر تبریز که توسط ضرغامی[2] و اکبریه[3] طراحی شده است، مصارف آب شهری به سه دسته شامل مصارف خانگی، مصارف صنعتی و مصارف آبیاری فضای سبز تقسیم‌بندی شده‌اند. نمودار حلقه علّی مدل پویایی سیستم توزیع آب شهری شهر تبریز در شکل ۷ نشان داده شده است (ضرغامی و اکبریه، ۲۰۱۲)..



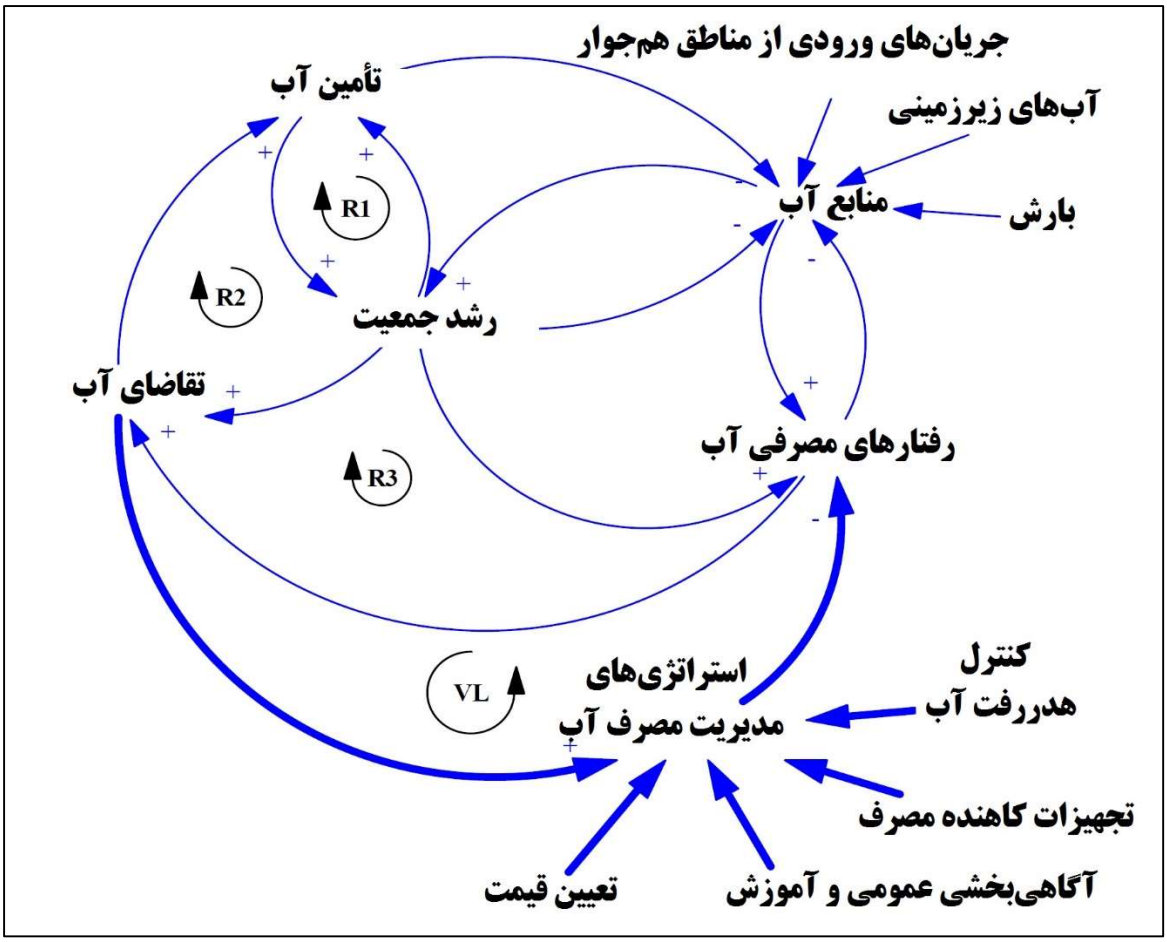
شکل ۷. نمودار حلقه علّی مدل پویایی سیستم توزیع آب شهری شهر تبریز (ضرغامی و اکبریه، ۲۰۱۲)

همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، کمبود آب به عنوان یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم توزیع آب شهری مستقیماً در نمودار حلقه علّی وارد شده است. همچنین، میزان پرداخت هزینه توسط مشترکان سیستم جهت مدیریت تقاضا و مدیریت تأمین آب نیز در مدل پویایی سیستم مربوطه لحاظ شده‌اند و اثرات متقابل میان آنها و سایر عوامل نیز در مدل پویا در نظر گرفته شده است (ضرغامی و اکبریه، ۲۰۱۲).

عبدی[4] در سال ۲۰۰۹ در پژوهشی به مدل‌سازی پویای سیستم توزیع آب شهری شهر تهران پرداخت. نمودار علّی مربوط به این پژوهش در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، رفتارهای مصرفی آب نیز به عنوان یکی از پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی پویای سیستم‌های توزیع آب شهری شناخته شده است. نمودار

[1] Sao Francisco
[2] Zarghami
[3] Akbariyeh
[4] Abdi

حلقه علّی تشکیل شده در پژوهش عبدی، مطابق شکل ۸ شامل چهار حلقه بازخورد (R_1، R_2، R_3 و VL) می‌باشد. سه حلقه بازخورد R_1، R_2 و VL، حلقه‌هایی متعادل کننده بوده و حلقه بازخورد R_3 یک حلقه تقویت کننده می‌باشند.



شکل ۸. نمودار حلقه علّی مدل پویایی سیستم توزیع آب شهری شهر تهران (عبدی، ۲۰۰۹)

با توجه به نمودارهای حلقه علّی مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفتند، می‌توان پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های پویایی سیستم این پژوهش‌ها را در قالب جدول ۱ با یکدیگر مقایسه نمود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پارامترهای فیزیکی شبکه نظیر میزان نوسازی و تعمیر و نگهداری لوله‌های شبکه توزیع آب و پارامتر مقبولیت افزایش هزینه آب تنها در پژوهش رهان مورد توجه قرار گرفته‌اند. از طرف دیگر، رفتارهای مصرفی آب تنها در مطالعه عبدی

در مدل‌سازی پویایی سیستم توزیع آب شهری لحاظ شده است. آریو و همکاران نیز در مطالعه خود، بازچرخانی فاضلاب را نیز به عنوان یکی از پارامترهای مربوط به مصرف‌کنندگان مد نظر قرار داده‌اند.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای مورد استفاده در مدل‌های پویایی سیستم‌های توزیع آب شهری در مطالعات مختلف

نویسندگان پژوهش	عبدی	ضرغامی و اکبریه	رهان	آرایو و همکاران
منطقه جغرافیایی مورد بررسی	تهران، ایران	تبریز، ایران	آنتاریو، کانادا	ایالت پارایبا، برزیل
سال انجام پژوهش	۲۰۰۹	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۹
پارامترهای فیزیکی شبکه	- تجهیزات کاهنده مصرف	-	- نشتی لوله‌ها - میزان نوسازی - تعمیر و نگهداری شبکه	-
پارامترهای اقتصادی	- تعیین قیمت آب	- پرداخت برای مدیریت تقاضای مصرف آب - پرداخت برای مدیریت تأمین آب - نسبت سود به هزینه	- هزینه آب - درآمد - نقدینگی - بدهی - هزینه‌های عملیاتی	- تعرفه مبتنی بر کمبود آب - درآمد افزوده - سرمایه‌گذاری
پارامترهای مربوط به مصرف‌کنندگان	- رفتارهای مصرفی آب - رشد جمعیت	- مدیریت تقاضای مصرف آب - جمعیت	- مقبولیت افزایش هزینه آب - نارضایتی مشترکان - جمعیت	- مدیریت تقاضای آب - کنترل هدررفت آب - بازچرخانی فاضلاب - جمعیت

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم‌های توزیع آب شهری به دو صورت تفکیک شده (در سه بخش شامل بخش پارامترهای فیزیکی، بخش پارامترهای اقتصادی و بخش پارامترهای مربوط به مصرف‌کننده) و یکپارچه مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای حلقه علّی مربوط به هر بخش ترسیم گردید. بدین ترتیب، عوامل مؤثر بر عملکرد هر بخش از سیستم‌های توزیع آب شهری در مدل‌سازی پویایی سیستم مشخص شده و حلقه‌های بازخورد تقویت‌کننده و متعادل‌کننده در هر نمودار نیز تعیین شدند. بر اساس نتایج بدست آمده، مهمترین بلوک‌های مدل پویایی سیستم در بخش پارامترهای فیزیکی سیستم‌های توزیع آب شهری، نشتی لوله‌ها، میزان نوسازی، میزان تعمیر و نگهداری شبکه و تجهیزات کاهنده

مصرف می‌باشند. مهمترین بلوک‌های مدل پویایی سیستم در بخش پارامترهای اقتصادی سیستم‌های توزیع آب شهری هزینه آب، درآمد، نقدینگی، بدهی، سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی، درآمد خانوار و نسبت سود به هزینه می‌باشند. مهمترین بلوک‌های مدل پویایی سیستم در بخش رفتار مصرف‌کننده در سیستم‌های توزیع آب شهری نیز، رشد جمعیت، رفتارهای مصرفی آب، مقبولیت افزایش هزینه آب، نارضایتی مشترکین، مدیریت تقاضای مصرف آب، کنترل هدررفت آب و بازچرخانی فاضلاب می‌باشند.

علاوه بر این، چنانچه مدل‌سازی پویایی سیستم مربوط به سیستم‌های توزیع آب شهری واقع در مناطق خشک و نیمه خشک باشد، ضرورت دارد اثر عواملی نظیر بازچرخانی فاضلاب تصفیه شده، میزان کمبود آب و میزان پرداخت مشترکان برای مدیریت عرضه و تقاضا نیز در نمودارهای حلقه علّی در نظر گرفته شوند. بدیهی است در نظر نگرفتن هر یک از موارد مذکور، منجر به خطای مدل‌سازی و اختلاف نتایج مدل پویایی سیستم مربوطه با مقادیر واقعی خواهد گردید. لذا بسیار ضرورت دارد که تمامی روابط به درستی تعیین شده و در مدل پویایی سیستم در نظر گرفته شوند.

پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی عدم قطعیت موجود در روابط میان بلوک‌های مدل‌های پویایی سیستم هر یک از بخش‌های سیستم‌های توزیع آب شهری (بخش لوله‌های انتقال، بخش رفتار مصرف‌کننده و بخش مالی) نیز در نظر گرفته شوند. همچنین پیشنهاد می‌گردد بخش‌های دیگری که می‌توانند بر عملکرد سیستم و تغییرات پویای بلوک‌های مختلف آن تأثیرگذار باشند، نظیر شرایط اجتماعی و اقتصادی نیز در مدل‌های پویایی سیستم مربوط به سیستم‌های توزیع آب شهری مورد توجه قرار گیرند.

منابع

خسروی، علیرضا، صمصامی، سجاد، ارائه یک مدل پویایی سیستم در مدیریت پروژه (همراه با مطالعه موردی)، سیزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع، بابلسر، اسفند ۱۳۹۵

زرین دست، آتوسا، مجیدی، ستاره، پیشوایی، میرسامان، رویکرد پویاشناسی سیستم برای بررسی سیاست‌های برنامه‌ریزی ظرفیت در زنجیرهٔ تأمین حلقهٔ بستهٔ سبز: مطالعه موردی صنعت باتری اسیدی، مجله مدیریت تولید و عملیات، دوره ۸، پیاپی ۱۵، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۶، ۱۹۱-۱۷۵

Abdi, M. Reza., (2009). System dynamics for monitoring urban water consumption management: a case study. 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Barcelona-Terrassa

Araujo, Wanderbeg Correia., Esquerre, Karla Patricia Oliveira. and Sahin, Oz. (2019). Building a System Dynamics Model to Support Water Management: A Case Study of the Semiarid Region in the Brazilian Northeast. Water. 11. 2513

Brubaker, Elizabeth. (2011). A bridge over troubled waters: alternative financing and delivery of water and wastewater Services. C. D. Howe Institute Commentary. No. 330

Ganjidoost, Amin., Haas, Carl T., Knight, Mark A. and Unger, Andr J. A. (2015). A System Dynamics Model for Integrated Water Infrastructure Asset Management. The Proceedings of the 33rd International Conference of the System Dynamics Society. Cambridge

Grigg, Neil S. (2012). Water, Wastewater and Stormwater Infrastructure Management, IWA Publishers, Boca Raton, Florida

Mirza, S., and Haider, M. (2003). The state of infrastructure in Canada: Implications for planning and policy. Report prepared for Infrastructure Canada. Montreal, McGill University

Rehan, Rashid. (2011). Sustainable Municipal Water and Wastewater Management Using System Dynamics, Ph.D. thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada

Rehan, Rashid, Knight, Mark A., Unger, Andr J. A. and Haas, Carl T. (2013). Development of a system dynamics model for financially sustainable management of municipal watermain networks. Water Research. Vol. 47. 7184-7205

Swain, Harry., Lazar, Fred. and Pine, Jim. (2005). Watertight: The case for change in Ontario's water and wastewater sector. Report of the Water Strategy Expert Panel, Ministry of Public Infrastructure Renewal Ontario.

Renzetti, Steven. (1999). Municipal water supply and sewage treatment: Costs, prices and distortions, The Canadian Journal of Economics, Vol. 32, No. 3. 688-704

Sterman, John D. (2001). System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. California Management Review. Vol. 43. No. 4. 8-25

Zarghami, Mahdi. and Akbariyeh, Simin. (2012). System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. Resources, Conservation and Recycling. Vol. 60. 99-106

Systems Thinking in Practice
3rd International Conference on
سومین کنفرانس بین‌المللی
تفکر سیستمی در عمل

Explanation of the effective parameters of system dynamics models for urban water distribution systems management

Mohsen Kadkhodaei[1]
PhD student of Water Engineering and Hydraulic Structures, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Ali Abbasi[2*]
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

The performance of urban water distribution systems depends on various factors. The dynamic relationships between these factors make the management of urban water distribution systems and their planning very complicated. Therefore, it is necessary to consider the dynamic changes of its different parts and the relationships governing the different parts of the system in the strategic planning and management of these systems. System dynamics is an efficient way to consider the dynamic changes of systems such as urban water distribution systems. The aim of this research is to investigate the application of system dynamics in the management of urban water distribution systems. For this purpose, using the library method, the studies conducted in this field have been examined and the causal loop diagrams related to each of the parts of the urban water distribution system, including the physical parameters part, the economic parameters part and the consumer parameters part, were extracted. According to the obtained results, the most important blocks of the physical parameters section are pipe leakage, the amount of renovation, the amount of network maintenance and consumption reducing equipment. The most important blocks of the economic parameters section are water cost, income, liquidity, debt, investment, operating costs, household income and benefit-cost ratio. The most important blocks of consumer parameters part are population growth, water consumption behaviors, acceptability of water cost increase, customer dissatisfaction, water consumption demand management, water wastage control and wastewater recycling.

Keywords: Systems engineering, System dynamics, Urban water distribution systems.

[1] Kadkhodaei.mohsen@mail.um.ac.ir
[2*] Corresponding author: aabbasi@um.ac.ir