



انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران

بررسی اثر سناریوهای تامین آب شرب بر رفاه شهروندان در دراز مدت با استفاده از مدل سازی پویا (مطالعه موردی: کلان شهر تهران)

حامد مازندرانی زاده^{۱*}، رحیم صادقی فر^۲، مجید خلقی^۳

۱- نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

۲- دانشجو دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

۳- استاد، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

* نویسنده مسئول

چکیده

اگرچه مطالعات متعددی به بحران آب کلان شهر تهران پرداخته اند، اغلب این پژوهش ها یا بر تحلیل های عرضه محور منابع آب تمرکز داشته اند یا پیامدهای اجتماعی-اقتصادی را به صورت ایستا بررسی کرده اند. خلأ اصلی، فقدان یک چارچوب پویا برای تحلیل هم زمان تعامل میان مصرف آب، حکمرانی منابع آب، پایداری منابع زیرزمینی و رفاه شهری در افق بلندمدت است. در این پژوهش، یک مدل پویایی سیستم یکپارچه برای کلان شهر تهران توسعه داده شده است که زیرسیستم های تأمین آب سطحی و زیرزمینی، مصرف آب شرب و تقاضای آب کشاورزی، جمعیت و شاخص رفاه شهری را در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۱۰۰ شبیه سازی می کند. نوآوری اصلی مطالعه، تعریف یک شاخص رفاه ترکیبی پویا و اتصال آن به حلقه های بازخوردی تعریف شده و متصل به آن است که امکان تحلیل حلقه های بازخوردی و تعاملات دینامیک بین متغیرها را میسر می سازد. مدل بر پایه معادلات جریان-تداوم کالیبره شده و برای ۹ سناریوی ترکیبی شامل سه سطح مصرف سرانه آب هر نفر (سرانه ملی، کاهش تدریجی مصرف و وضعیت فعلی) و سه سناریوی فرضی تغییر اقلیم اجرا شده است. نتایج نشان می دهد که در سال ۲۰۷۱، در سناریوی نامطلوب S3 و در سناریو مطلوب S7، درصد تغییرات مطلق شاخص بدون بعد رفاه نسبت به شروع مدل سازی به ترتیب ۴۷۶٪ و ۳۵۲٪ کاهش می یابد و در سال ۲۱۰۰، این مقدار برای سناریوهای مذکور به ترتیب ۵۰۵٪ و ۴۴۳٪ خواهد بود. بیشترین واگرایی رفاهی میان سناریوها در بازه میانی شبیه سازی رخ داده و نشان دهنده نقش تعیین کننده مدیریت تقاضای آب در کاهش شدت ناپایداری رفاه شهری است.

کلمات کلیدی: حکمرانی منابع آب، مدیریت تقاضای آب، پویایی سیستم ها، رفاه شهری، کلان شهر تهران، تغییر اقلیم.

۱- مقدمه

کمبود آب شیرین، به عنوان یکی از چالش های برجسته قرن بیست و یکم، امنیت آبی و پایداری اجتماعی-زیست محیطی را به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک با تهدید جدی مواجه ساخته است (UNESCO, 2022). بر اساس شاخص های جهانی، ایران در رتبه چهارم کشورهای دارای ریسک بالای تنش آبی قرار دارد (WRI, 2019). کلان شهر تهران، با جمعیتی بالغ بر ۱۵ میلیون نفر، نمونه ای بارز از این بحران است؛ کاهش حدود ۴۰ درصدی ذخایر سدهای اصلی (امیرکبیر، لتیان و ماملو) و نرخ بالای فرونشست زمین—که بنا بر گزارش ها بسته به منطقه بین ۱۹ تا ۳۷ سانتی متر در سال متغیر است و بیشینه آن در دشت شهریار (۳۱ سانتی متر) و حاشیه بزرگراه آزادگان (۲۲-۲۵ سانتی متر) گزارش شده—این شهر را در میان مناطق با بیشترین نرخ فرونشست جهان قرار داده است (Motagh et al., 2018; National Cartographic Center of Iran, 2024; Haghghi et al., 2024; Strategic Studies Research Institute, 2019; Geological Survey of Iran, 2021). برداشت بیش از حد از آبخوان ها—که حدود ۶۰ درصد آب شرب تهران را تأمین می کنند—موجب کسری شدید



مخزن و افت کیفیت آب شده است (Ashraf et al., 2021) و در کنار مصرف سرانه بالا و ضعف سیاست‌های مدیریت تقاضا، فشار مضاعفی بر زیرساخت‌های شهری وارد کرده و رفاه اجتماعی-اقتصادی را تهدید می‌نماید (Madani, 2021).

تجربیات جهانی نشان داده است که به‌کارگیری سیاست‌های مدیریت تقاضا، از جمله کاهش مصرف سرانه و توسعه بازچرخانی پساب، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای پایداری منابع ایفا کند (Gleick, 2018). در این میان، مدل‌سازی پویایی سیستم (System Dynamics, SD) به‌عنوان رویکردی تحلیلی-شبیه‌سازی، به‌طور گسترده در مدیریت منابع آب به‌کار رفته و قابلیت بالایی در تحلیل روابط بازخوردی، سناریونویسی و ارزیابی پیامدهای سیاست‌های مختلف دارد (Winz et al., 2009). به‌عنوان مثال، (Winz et al., 2015) این رویکرد را برای تحلیل سیستم آب شهری در نیویورک به‌کار گرفتند و اهمیت حلقه‌های بازخورد در طراحی سیاست‌ها را برجسته ساختند.

در ایران، مطالعات متعددی با این روش انجام شده است؛ از جمله، (Bagheri et al., 2005) که با مدل‌سازی تعاملات عرضه و تقاضای آب در تهران بر ضرورت مدیریت یکپارچه تأکید کردند، و (Salvitabar et al., 2006) که با توسعه یک مدل SD جامع، اثر سناریوهای مدیریتی نظیر انتقال بین‌حوضه‌ای، تصفیه و بازچرخانی، و مدیریت تقاضا را بر توازن آبی شبیه‌سازی نمودند. همچنین، (Mehrshad et al., 2016) بر ضرورت همکاری ذی‌نفعان در کاهش بحران آب تأکید کردند و (Yousefi et al., 2022) توانایی این رویکرد را در بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی نشان دادند. در مقیاس‌های منطقه‌ای نزدیک به تهران، (Soltani & Alizadeh, 2017) مدل IWMsim را برای دشت ورامین توسعه دادند و نشان دادند که مدیریت یکپارچه موجب بهبود سطح آب زیرزمینی و بهره‌وری کشاورزی می‌شود، و (Nozari & Mostafa, 2017) با ترکیب SD و برنامه‌ریزی غیرخطی، مدیریت رهاسازی آب سد امیرکبیر را در شرایط خشکسالی بهینه کردند.

مطالعات متعدد بین‌المللی نشان داده‌اند که مدل‌سازی پویایی سیستم ابزاری کارآمد برای تحلیل سیاست‌های مدیریت منابع آب در مقیاس‌های مختلف است. (Phan et al., 2021) با مرور ۱۶۹ مطالعه SD در مدیریت آب گزارش کردند که ۸۲٪ از این مطالعات از رویکرد سناریویی استفاده کرده‌اند، اما تنها ۱/۸٪ به بهینه‌سازی پرداخته و ۱۲٪ فاقد اعتبارسنجی مدل بوده‌اند، که کمبود روش‌شناختی قابل توجهی در مطالعات پیشین را نشان می‌دهد. این نکته اهمیت توسعه مدل‌های یکپارچه با تحلیل سناریویی و اعتبارسنجی دقیق، مانند رویکرد این مطالعه، را برجسته می‌کند. این مطالعات، چه در سیستم‌های شهری و چه در حوضه‌های کشاورزی، عمدتاً بر توازن عرضه و تقاضا و پایداری منابع تمرکز داشته‌اند، اما در اغلب موارد شاخص‌های رفاه اجتماعی-اقتصادی به‌صورت صریح و پویا در ساختار مدل‌ها درون‌سازی نشده و پیامدهای بلندمدت سیاست‌ها بر رفاه شهری به‌طور مستقیم ارزیابی نشده است (Zarghami et al., 2012; Wang et al., 2021; Guemouria et al., 2021; Sušnik et al., 2021).

(Mirchi et al., 2012) با معرفی روش‌های SD و (Hashemi et al., 2020) با ترکیب SD و نظریه بازی‌ها نشان داده‌اند که ادغام متغیرهای اجتماعی-اقتصادی در تحلیل سیاست‌ها و حذف محصولات غیراستراتژیک با نیاز آبی بالا می‌تواند منابع آب را حفظ کرده و معیشت کشاورزان را تضمین کند، و چارچوب‌های پویای یکپارچه برای مدیریت آب شهری با توجه به عدم قطعیت‌های اقلیمی و اجتماعی اهمیت دارند.

(Jamali et al., 2025) و (Gil-García et al., 2024) با مدل‌سازی پویایی سیستم و چارچوب‌های انسانی-آب اهمیت تحلیل بلندمدت و درون‌سازی عدم قطعیت‌های رفتاری را برجسته کرده‌اند. در حوزه مدیریت تقاضا، (Liu et al., 2024) نشان داده‌اند که اصلاح



الگوی مصرف همراه با حکمرانی مشارکتی تاب‌آوری آب شهری را افزایش می‌دهد و مرور (Chen et al. (2025) محدودیت مدل‌های تک‌بخشی را تأکید کرده است.

با وجود این پیشرفت‌ها، تلفیق شاخص‌های رفاه اجتماعی-اقتصادی با مدل‌های پویای حکمرانی آب شهری، به‌ویژه در کلان‌شهرهای خشک، محدود مانده است. مطالعاتی مانند (Wang et al. (2021)، (Naderi et al. (2021) و (Soltani & Alizadeh (2017) هر یک به جنبه‌ای از مدیریت منابع آب پرداخته‌اند، اما تعامل جامع بین عرضه، تقاضا، رفاه شهری و عدم قطعیت‌های اجتماعی و رفتاری را مدل‌سازی نکرده‌اند. مرور نظام‌مند (Naeem et al. (2023) در مجله Sustainability تأکید کرد که مطالعات موفق معمولاً متغیرهای رفاهی و اقتصادی را در مدل لحاظ کرده و از مشارکت ذی‌نفعان و اعتبارسنجی سناریویی بهره می‌گیرند، که چارچوب پیشنهادی این پژوهش با تأکید بر شاخص رفاه ترکیبی و شبیه‌سازی سناریوها با این رویکرد همخوانی دارد.

این پژوهش با مدل‌سازی پویای سیستم تعامل میان مصرف آب، پایداری منابع و رفاه شهری در تهران را به‌صورت یکپارچه شبیه‌سازی کرده و سیاست‌هایی برای تقویت تاب‌آوری سیستم آب و ارتقای کیفیت زندگی ارائه می‌دهد، و به‌عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای کلان‌شهرهای مشابه عمل می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، برای تحلیل یکپارچه تعاملات میان منابع آب، مصرف و رفاه شهری، از رویکرد مدل‌سازی پویای سیستم (SD) استفاده شد که امکان شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی و ارزیابی پیامدهای بلندمدت سیاست‌ها را فراهم می‌کند. روند کلی تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است.



Fig1- Research process diagram

شکل ۱- دیاگرام روند پژوهش

منطقه مورد مطالعه

تهران، پایتخت ایران با وسعت ۷۳۰ کیلومتر مربع، در حوضه آبریز دریاچه نمک و زیرحوضه‌های کرج و جاجرود واقع است (Hassani & Mousavi, 2022). کاهش ۳۵ تا ۹۱ درصدی بارش در سال ۱۴۰۲ نسبت به میانگین بلندمدت و افزایش دمای حداقل و حداکثر تا سال

۲۰۵۰ در سه ایستگاه سینوپتیک شمیرانات و مهرآباد، بر اساس سناریوهای (RCP (Yousefi et al., 2024، چالش‌های جدی برای

تأمین آب شرب از سدهای امیرکبیر، لتیان، لار، طالقان، ماملو و منابع زیرزمینی ایجاد کرده است (Tehran Regional Water

Authority, 2021).

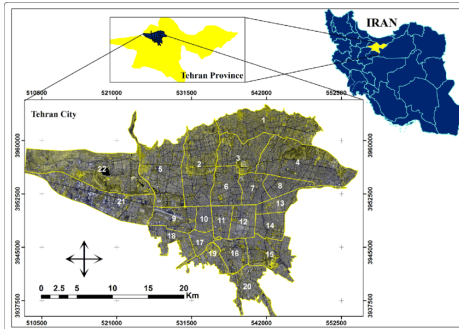


Fig2- Study area

شکل ۲- منطقه مورد مطالعه

سازوکار تامین آب شرب کلان شهر تهران

آب شرب تهران از سدهای لار، لتیان، ماملو، امیرکبیر و طالقان و بخشی از چاه‌های زیرزمینی تامین می‌شود. در شکل شماره ۳ سیر تاریخی سیاست‌های اتخاذ شده برای تامین آب که عمدتاً از منابع آب سطحی خارج از کلان شهر تهران است را نشان می‌دهد. روند تامین آب شرب تهران از منابع آب سطحی و زیرزمینی در شکل ۴ طی سنوات گذشته آمده است و نمایانگر روند کلی افزایشی حجم تامین طی دو دهه گذشته است.

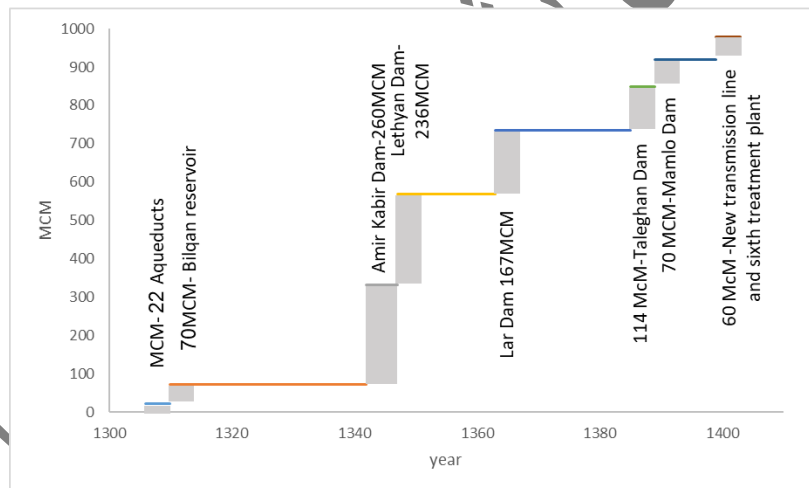


Fig3: Historical course of Tehran's water supply from surface water sources

شکل ۳: سیر تاریخی تامین آب تهران از منابع آب سطحی

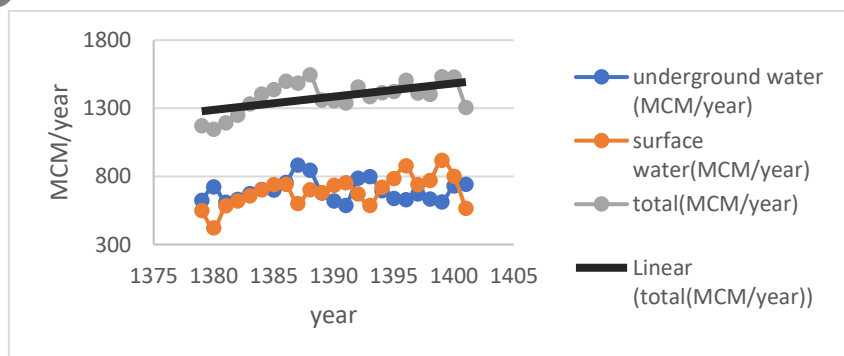


Fig4: Trend in the volume of drinking water supply in Tehran

شکل ۴: روند حجم تامین آب شرب تهران (سالنامه‌های آماری، مرکز آمار ایران)

رویکرد مدل سازی

در این مطالعه از رویکرد پویایی سیستم (SD^1) برای مدل سازی تعاملات پیچیده بین زیرسیستم های منابع تامین آب، رفاه اقتصادی-اجتماعی، و عوامل زیست محیطی در کلان شهر تهران، استفاده شده است. مدل با استفاده از نرم افزار Vensim PLE 7.3.5 توسعه یافته است، نرم افزاری که به دلیل قابلیت های قوی در شبیه سازی سیستم های پیچیده، سهولت استفاده برای تعریف ساختارهای بازخورد و انعطاف پذیری در مدیریت داده های بزرگ انتخاب شد. این نرم افزار امکان نمایش متغیرهای انباشت (Stocks)، جریان ها (Flows) و متغیرهای کمکی را فراهم می کند، که برای مدل سازی متغیرهای به هم پیوسته در این مطالعه ضروری هستند. هدف اصلی مدل، بررسی تعاملات بین کفایت تامین آب، رفاه اقتصادی و اجتماعی، و اثرات زیست محیطی نظیر فرورانشست زمین و آلودگی هوا در بازه زمانی شبیه سازی از سال ۲۰۱۶ تا سال ۲۱۰۰ میلادی در کلان شهر تهران است. این مدل با یکپارچه سازی داده های جمعیتی، هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی، به ارزیابی پایداری مدیریت منابع آب و پیامدهای آن بر رفاه شهروندان در تهران تحت سناریوهای مختلف می پردازد. همچنین این مدل تأثیر سیاست های مدیریت منابع آب را بر رفاه اجتماعی و اقتصادی و پایداری منابع آب در بلندمدت بررسی می کند.

ساختار مدل و زیرسیستم ها

مدل شامل سه زیرسیستم اصلی است:

۱. **تامین آب:** شامل منابع سطحی (سدها) و زیرزمینی، با متغیرهای انباشت و جریان های ورودی/خروجی تعریف شده است. ورودی ها تحت تأثیر بارش، تبخیر و سناریوهای تغییر اقلیم هستند. نمودار جریان-انباشت در شکل ۵ نشان داده شده است. این زیرسیستم تعامل بین ذخیره آب زیرزمینی، بازشارژ و برداشت کل را نمایش داده و حلقه های بازخوردی توازن مرتب با منابع آب را منعکس می کند. این شکل ساختار جریان-انباشت تامین آب شرب و کشاورزی از منابع سطحی و زیرزمینی را نشان می دهد. این زیرسیستم بخشی از ساختار توسعه یافته در این مطالعه است.

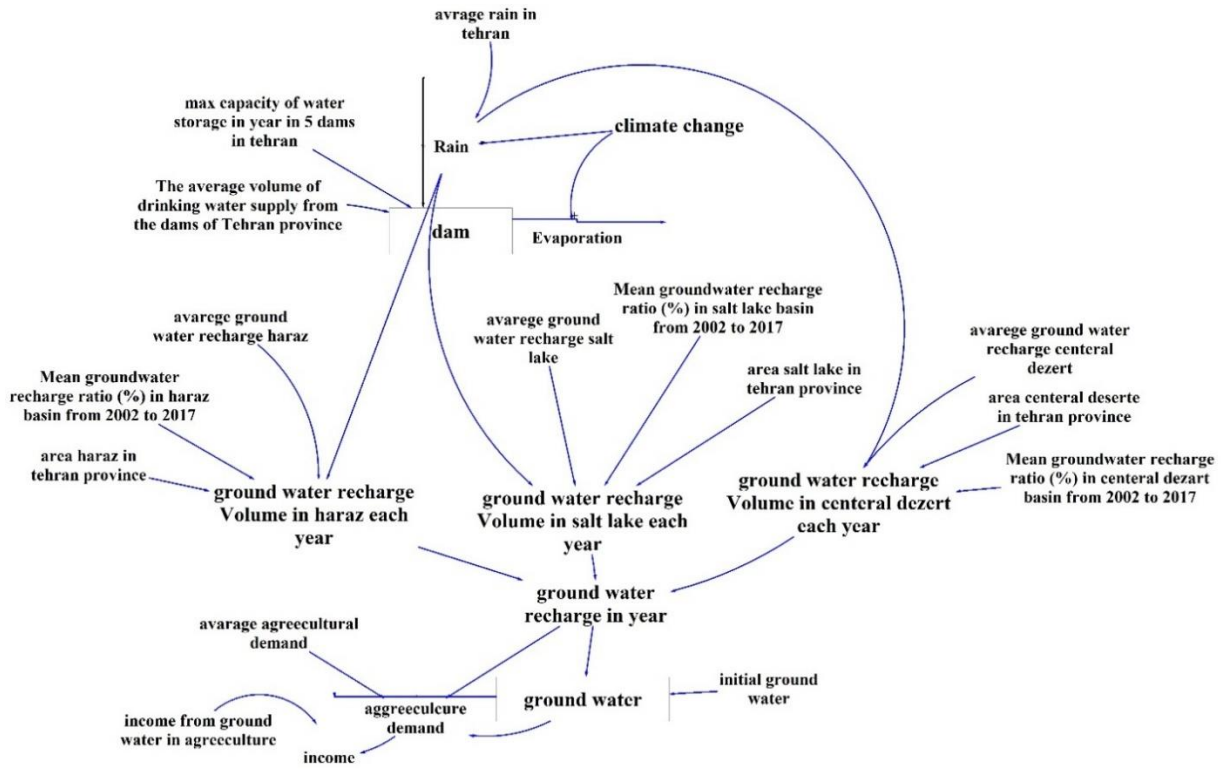


Fig5: Water supply subsystem (This subsystem is part of the structure developed in this study.)

شکل ۵: زیرسیستم تامین آب (این زیرسیستم بخشی از ساختار توسعه یافته در این مطالعه است)

۲. مصرف آب: تقاضای آب شرب و کشاورزی به جمعیت و منابع موجود وابسته است. دیاگرام زیرسیستم مصرف در شکل ۶ ارائه شده است. زیرسیستم مصرف آب شامل تقاضای آب شرب و کشاورزی و ارتباط آن با جمعیت، الگوهای مصرف و شاخص کفایت تأمین سرانه است. این دیاگرام تعامل بین تأمین و تقاضای آب و حلقه‌های بازخوردی مرتبط با تنش آبی را نشان می‌دهد.

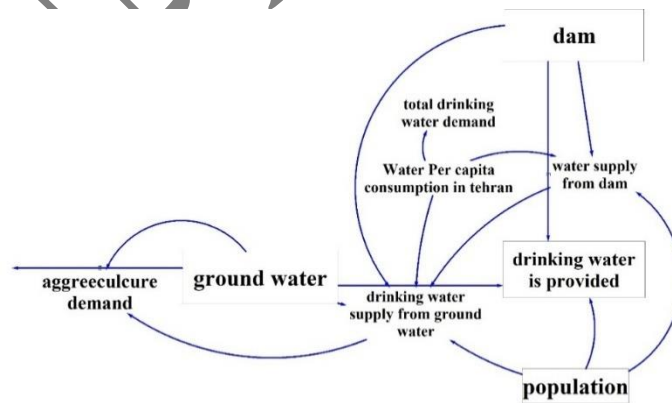


Fig6: Water consumption subsystem (This subsystem is part of the structure developed in this study.)

شکل ۶: زیرسیستم مصرف آب (این زیرسیستم بخشی از ساختار توسعه یافته در این مطالعه است)

۳. رفاه و پایداری اجتماعی-اقتصادی: شامل متغیرهای جمعیت، رفاه اقتصادی و اجتماعی، سرمایه‌گذاری، امنیت، آموزش، بهداشت و اثرات زیست‌محیطی (فرونشست، ترافیک، آلودگی) است. چرخه‌های بازخورد تقویتی و توازی در شکل ۷ نمایش داده



شده است. زیرسیستم رفاه و پایداری اجتماعی-اقتصادی که پویایی‌های جمعیت، رفاه اقتصادی و اجتماعی، سرمایه‌گذاری و پیامدهای زیست‌محیطی را در قالب دیاگرام جریان نمایش می‌دهد.

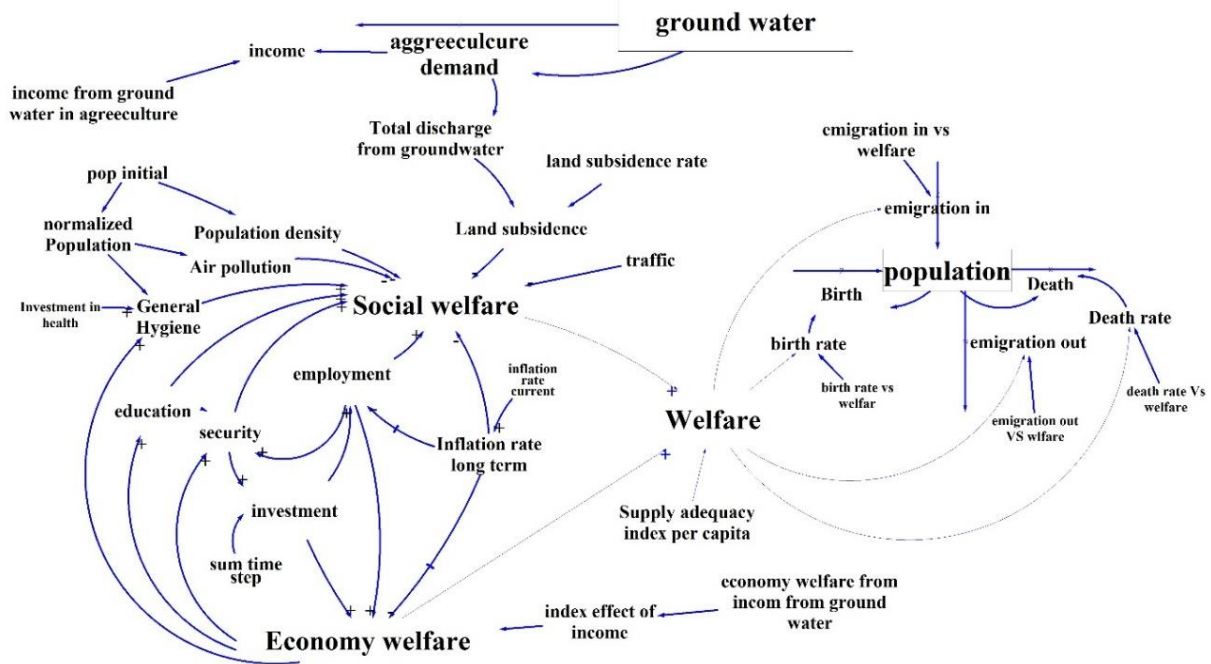


Fig7: Socio-economic welfare and sustainability subsystem (This subsystem is part of the structure developed in this study.)

شکل 7: زیرسیستم رفاه و پایداری اجتماعی-اقتصادی (این زیرسیستم بخشی از ساختار توسعه یافته در این مطالعه است)

در این تحقیق، مدل پویایی سیستم با هدف تحلیل تعاملات میان جمعیت، مصرف آب، منابع زیرزمینی و سطحی و شاخص‌های رفاه شهری توسعه یافته است. جدول متغیرها شامل سطح‌ها (Stocks) مانند جمعیت و ذخیره آب زیرزمینی، جریان‌ها (Flows) مانند تولد، مرگ، تغذیه و برداشت از منابع زیرزمینی، و متغیرهای کمکی (Auxiliary) نظیر رفاه اجتماعی-اقتصادی، کیفیت هوا، بهداشت عمومی و امنیت و ... می‌باشد. روابط بین متغیرها با استفاده از توابع خطی ریاضی و Lookup تعریف شده است تا بازخوردهای پیچیده بین منابع آب، سیاست‌های مدیریت تقاضا و شاخص‌های رفاه شهری بازتابی شود. این چارچوب امکان شبیه‌سازی اثرات سناریوهای مختلف مدیریتی، تحلیل پایداری بلندمدت و ارزیابی سیاست‌های کلان شهری را فراهم می‌آورد و قابلیت انعطاف‌پذیری در شرایط عدم قطعیت داده‌ها را نیز داراست. با استفاده از این مدل، می‌توان اثر تغییرات جمعیت، مصرف آب، سیاست‌های تقاضا و فشارهای زیست‌محیطی بر سطح رفاه شهری و پایداری منابع آب را به‌طور یکپارچه و کمی تحلیل کرد. در جدول شماره ۱ متغیرهای اصلی و کمکی مدل سیستم دینامیک شامل متغیرهای اثبات (Level)، جریان‌ها و متغیرهای کمکی (Auxiliary) به‌همراه واحد اندازه‌گیری، نوع متغیر و روابط ریاضی حاکم بر آن‌ها ارائه شده است. این جدول بیانگر نحوه ارتباط بین زیرسیستم‌های جمعیت، تأمین و مصرف آب، رفاه اقتصادی و اجتماعی، و پیامدهای زیست‌محیطی است؛ به‌گونه‌ای که تمامی روابط علی و توابع مورد استفاده در شبیه‌سازی، به‌طور دقیق و یکپارچه مشخص شده‌اند.

Table1: Table of equations and functions

جدول ۱: جدول معادلات و توابع

Variable	Equations and Functions	Unit	Type
----------	-------------------------	------	------



Population	$Population = INTEG(Birth + Emigration In - Death - Emigration Out, Pop\ initial)$	Person/year	Level
Birth	$Birth = Birth\ Rate(Welfare) \times Population$	Person/year	Auxiliary
Death	$Death = Death\ Rate(Welfare) \times Population$	Person/year	Auxiliary
Emigration In	$Emigration\ In = Emigration\ In(Welfare)$	Person/year	Auxiliary
Emigration Out	$Emigration\ Out = Emigration\ Out(Welfare)$	Person/year	Auxiliary
Normalized Population	$Normalized\ Population = (population - Pop\ initial) / Pop\ initial$	Dimensionless	Auxiliary
Drinking Water Provided	$Drinking\ Water\ Provided = Water\ Supply\ from\ Dam + Drinking\ Water\ Supply\ from\ Groundwater$	Cubic meters/Year	Auxiliary
Groundwater Stock	$Groundwater\ Stock = INTEG(Recharge - Discharge, initial)$ $Recharge = ground\ water\ recharge\ in\ year$ $Discharge = agriculture\ demand + drinking\ water\ supply\ from\ ground\ water$	Cubic meters	Level
Per capita supply adequacy index	$Supply\ Adequacy\ Index\ per\ Capita = Drinking\ Water\ Provided / Total\ Drinking\ Water\ Demand$	Dimensionless	Auxiliary/Endogenous
Total Drinking Water Demand	$Total\ Drinking\ Water\ Demand = Population \times Per\ Capita\ Consumption$	Cubic meters/Year	Auxiliary
Welfare	$Welfare = (0.6 * Economy\ Welfare + 0.4 * Social\ Welfare) / Supply\ Adequacy\ Index\ per\ Capita$	Dimensionless	Auxiliary
Economy Welfare	$Economy\ Welfare = (0.6 * Employment + 0.2 * Investment - 0.2 * Inflation\ Rate\ Long\ Term) * (1 - Index\ Effect\ of\ Income)$	Dimensionless	Auxiliary
Index Effect of Income	$Index\ Effect\ of\ Income = LOOKUP(Income)$ Effect of agricultural income on Economy Welfare, proportional to Income	Dimensionless	Auxiliary
Income	$Income = LOOKUP(Groundwater\ Supply\ Adequacy\ for\ Agriculture\ demand)$ Lookup function representing the relative availability of groundwater for ,agriculture bounded between 0 (no supply) and 1 (supply equal to historical average agricultural demand).	Dimensionless	Auxiliary
Social Welfare	$Social\ Welfare = (0.2 * Education + 0.15 * Employment + 0.1 * General\ Hygiene + 0.07 * Security - 0.2 * Inflation\ Rate\ Long\ Term - 0.03 * Land\ Subsidence - 0.1 * Traffic - 0.12 * Air\ Pollution - 0.03 * Population\ Density)$	Dimensionless	Auxiliary
Education	$Education = 0.7 * Economy\ Welfare - 0.3 * Normalized\ Population$	Dimensionless	Auxiliary
Employment	$Employment = (0.45 * Investment - 0.3 * Inflation\ Rate\ Long\ Term - 0.25 * Normalized\ Population)$	Dimensionless	Auxiliary



General Hygiene	$General\ Hygiene = 0.5 * Economy\ Welfare + 0.3 * Investment\ in\ Health - 0.2 * Normalized\ Population$	Dimensionless	Auxiliary
Security	$Security = (0.4 * Economy\ Welfare + 0.2 * Education + 0.2 * Employment - 0.2 * Normalized\ Population)$	Dimensionless	Auxiliary
Inflation Rate Long Term	$Inflation\ Rate\ Long\ Term = (Inflation\ Rate\ Current - 0.15) / Inflation\ Rate\ Current$	Percent	Auxiliary
Traffic	$Traffic = (1 + 0.08 * Normalized\ Population)$	Dimensionless	Auxiliary
Land Subsidence	$Land\ Subsidence = Land\ Subsidence\ Rate(Total\ Discharge\ from\ Groundwater) / Max\ Land\ Subsidence\ Rate$	Percent/Year	Auxiliary
Air Pollution	$Air\ Pollution = (1.4894 * Normalized\ Population + 1.0638) / 1.0638$	Dimensionless	Auxiliary
Investment	$Investment = (0.6 * Security + 0.4 * Welfare) / Sum\ Time\ Step$	Dimensionless	Level

چرخه علی-معلولی

چرخه علی-معلولی (Causal Loop Diagram) تعاملات بین زیرسیستم‌ها را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد و حلقه‌های بازخورد تقویت‌کننده، مانند افزایش جمعیت منجر به افزایش تقاضای آب و در ادامه افزایش تقاضای آب منجر به کاهش منابع آب و نهایتاً کاهش منابع آب منجر به کاهش رفاه می‌شود، و متعادل‌کننده، مانند کاهش رفاه منجر به کاهش مهاجرت ورودی می‌شود، را نشان می‌دهد. این چرخه در شکل ۸ ارائه شده است.

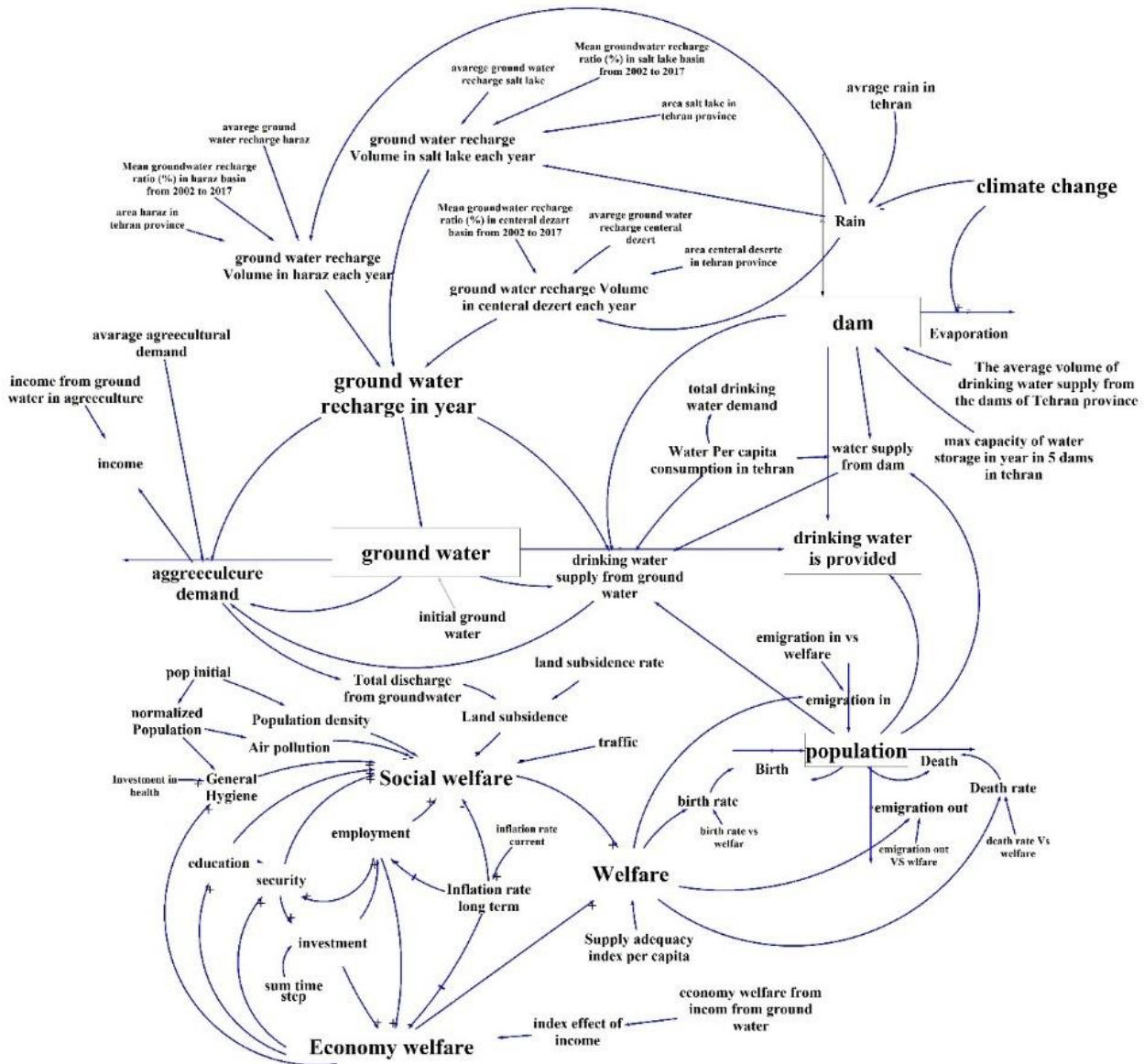


Fig8: Cause and effect cycle related to the subsystems under study

شکل ۸: چرخه علی و معلولی مربوط به زیرسیستم های مورد مطالعه

داده ها و منابع (Data and Sources)

منابع داده ها: داده های این مطالعه از سالنامه های آماری مرکز آمار ایران، گزارش های فنی شرکت آب منطقه ای تهران، گزارش های شرکت

مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران و مقالات معتبر علمی استخراج شده است.

مقادیر اولیه مدل

مدل طراحی شده برای سیستم تأمین آب شرب تهران بر اساس جمعیت اولیه ۸,۶۹۳,۷۰۶ نفر در آخرین سرشماری رسمی جمعیت (SCI², 2016)، ظرفیت کل سدهای تهران ۱.۹ میلیارد مترمکعب (TRWA³, 2023) و نرخ تورم سالیانه ۰.۴ در سال آغاز مدل سازی (CBI⁴, 2016) توسعه یافته است. تأمین آب شرب از سدها (۸۲۰ میلیون مترمکعب سالانه) بر اساس میانگین بلند مدت سالانه (TRWA, 2023) و منابع



زیرزمینی (حجم آب قابل استحصال از آبخوان ۲۰ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶) با اولویت استفاده از سدها فرض شده است. سناریوهای تغییر اقلیم با فرض کاهش بارش و افزایش تبخیر (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) در نظر گرفته شده‌اند. تغذیه سالیانه آبخوان‌ها ۲۶۹ میلیون مترمکعب، بر اساس میانگین ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ برای محدوده‌های مطالعاتی دریاچه نمک، کویر مرکزی و هراز در تهران، با فرض تداوم شرایط و تأثیر بارش به‌عنوان تنها عامل مؤثر محاسبه شده است (Nori et al., 2023). تقاضای آب کشاورزی ۱.۴۷ میلیارد مترمکعب متوسط سالانه فرض شده و اولویت تأمین آب شرب بر کشاورزی اعمال شده است؛ در صورت وجود آب مازاد در آبخوان پس از تأمین شرب، این مقدار برای کشاورزی تخصیص می‌یابد (IWRMC⁵, 2023).

فرضیات و ساده‌سازی‌های کلیدی مدل تأمین آب شرب تهران

ساده‌سازی‌های مدل: مدل‌سازی سیستم پیچیده مدیریت منابع آب تهران نیازمند ساده‌سازی‌هایی برای تحلیل بلندمدت است. این ساده‌سازی‌ها شامل نمایش روابط اجتماعی-اقتصادی با شاخص‌های کلی (رفاه اقتصادی و اجتماعی)، فرض رفتارهای عمومی مصرف آب بر اساس داده‌های موجود، و عدم استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی پیچیده برای منابع زیرزمینی به دلیل تمرکز بر پویایی مصرف و تأمین آب است. این رویکرد در پژوهش‌های معتبر رایج است (Meadows, 2008).

فرضیات و محدودیت‌های مدل

فرضیات کلیدی مدل:

۱. نرخ تبخیر سدها یک درصد نسبت به بارش کل در نظر گرفته شده است.
۲. سناریوهای تغییر اقلیم شامل کاهش بارش (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) درصد و افزایش تبخیر (۵، ۱۰، ۱۵) درصد هستند.
۳. سرانه مصرف آب شرب ثابت و تأمین ابتدا از سدها و سپس از منابع زیرزمینی انجام می‌شود.
۴. کاهش سطح آب زیرزمینی منجر به فرونشست زمین می‌شود (۱-۳ سانتی‌متر به ازای هر متر کاهش).
۵. افزایش جمعیت با آلودگی هوا و تراکم ترافیک خطی مرتبط فرض شده است.
۶. رفاه شهری به صورت چندبعدی تعریف شده و ترکیبی از رفاه اقتصادی (۶۰ درصد) و اجتماعی (۴۰ درصد) است.
۷. نرخ‌های جمعیتی (تولد، مرگ، مهاجرت) تابع رفاه و داده‌های ۲۰۱۶ کالیبره شده‌اند.

محدودیت‌ها:

- فناوری‌های جدید مدیریت آب مانند بازچرخانی پساب ثابت فرض شده‌اند.
 - سرانه مصرف ثابت بوده و تغییرات رفتاری یا سیاستی لحاظ نشده است.
 - روابط اقلیمی ساده‌سازی شده و عدم قطعیت داده‌ها نیاز به تحلیل‌های آتی دارد.
 - اثرات سیاست‌های سیاسی و اقتصادی در مدل لحاظ نشده است.
- این فرضیات و محدودیت‌ها برای تحلیل روندهای کلان اتخاذ شده‌اند و در تفسیر نتایج باید مدنظر قرار گیرند.

شبیه‌سازی و کالیبراسیون (Simulation and Calibration)



شبیه سازی: بازه شبیه سازی ۲۰۱۶-۲۱۰۰ (۸۴ سال) و گام زمانی یک سال در نظر گرفته شد. نقطه شروع مدل با داده های سرشماری

نفوس و مسکن ۲۰۱۶ همخوانی دارد. مدل برای تحلیل روندهای بلندمدت جمعیت، منابع آب و رفاه شهری طراحی شده است.

کالیبراسیون: بر اساس داده های تاریخی و بررسی رفتار مدل نسبت به تغییرات ورودی انجام شد.

اعتبارسنجی: شامل مقایسه روندهای مدل با مطالعات مشابه جهانی، تحلیل پایداری و بررسی همخوانی با رفتار مورد انتظار سیستم

(Scanlon et al., 2012; Perrone & Jasechko, 2019).

سناریوهای مورد بررسی در مدل

سناریوها در دو دسته اصلی تعریف شدند:

۱. **تغییرات اقلیمی:** کاهش بارش ۵، ۱۰ و ۱۵ درصدی همراه با افزایش تبخیر.

۲. **تغییرات سرانه مصرف آب شرب:** ۱۶۰، ۲۱۶ و ۲۴۰ لیتر در شبانه روز.

این ترکیب منجر به ۹ سناریوی ترکیبی شد که اثر سیاست های مدیریت مصرف و تغییرات اقلیمی بر پایداری منابع آب و رفاه اجتماعی-

اقتصادی را ارزیابی می کند. سناریوهای مطرح شده در جدول ۲ توصیف شده اند.

Table2: Table of Scenarios

جدول ۲: جدول سناریوها

Scenario	Water Consumption Per Capita (Liters/Day)	Climate Change	Key Description
S1	240 (Baseline Scenario)	5% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Current water consumption in Tehran with mild climate change impacts; limited reduction in surface and groundwater resources, relatively stable system sustainability, but initial risks of resource depletion emerge.
S2	240 (Baseline Scenario)	10% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Current consumption with moderate climate change; increased pressure on water resources, requiring adaptive measures to maintain sustainability and prevent socio-economic welfare decline.
S3	240 (Baseline Scenario)	15% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Current consumption with severe climate change; high risk of resource sustainability decline, serious threat to urban welfare, necessitating urgent and alternative water supply measures.
S4	216 (Adaptive Management)	5% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	10% reduction in consumption compared to current levels with mild climate impacts; improved resource sustainability, balanced consumption and welfare, suitable for medium-term management.
S5	216 (Adaptive Management)	10% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Reduced consumption with moderate climate change; moderate pressure on resources, requiring incentive-based policies and infrastructure improvements to maintain sustainability and mitigate welfare impacts.
S6	216 (Adaptive Management)	15% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Reduced consumption with severe climate change; significant sustainability challenges, requiring emergency planning to prevent resource crises and maintain welfare.
S7	160 (Stringent Management)	5% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Consumption equivalent to national average with mild climate impacts; significant improvement in resource sustainability, but short-term welfare may decline due to stringent restrictions.
S8	160 (Stringent Management)	10% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Low consumption with moderate climate change; improved resource sustainability, but strong demand management policies needed to balance socio-economic welfare.
S9	160 (Stringent Management)	15% Reduction in Precipitation and Increased Evaporation	Low consumption with severe climate change; highest level of resource sustainability, but risk of reduced socio-economic welfare due to stringent consumption limits and severe climate crisis.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

این پژوهش با هدف مدل سازی پویای سیستم تأمین آب شرب تهران و بررسی اثرات آن بر رفاه شهری انجام شده است. با استفاده از رویکرد پویایی سیستم ها و با استفاده از نرم افزار Vensim PLE 7.3.5 متغیرهای کلیدی شامل رفاه کل، رفاه اقتصادی، رفاه اجتماعی، شاخص کفایت تأمین آب سرانه مورد تحلیل قرار گرفتند.

خروجی های مدل

به علت حجم زیاد خروجی ها و متغیرها در مدل تعدادی از روندهای تولید شده متغیرها برای سناریوی S7 به ازای هر فرد به عنوان نمونه از خروجی های مدل اجرا شده در Vensim PLE به صورت (شکل ۹) گزارش گردید.

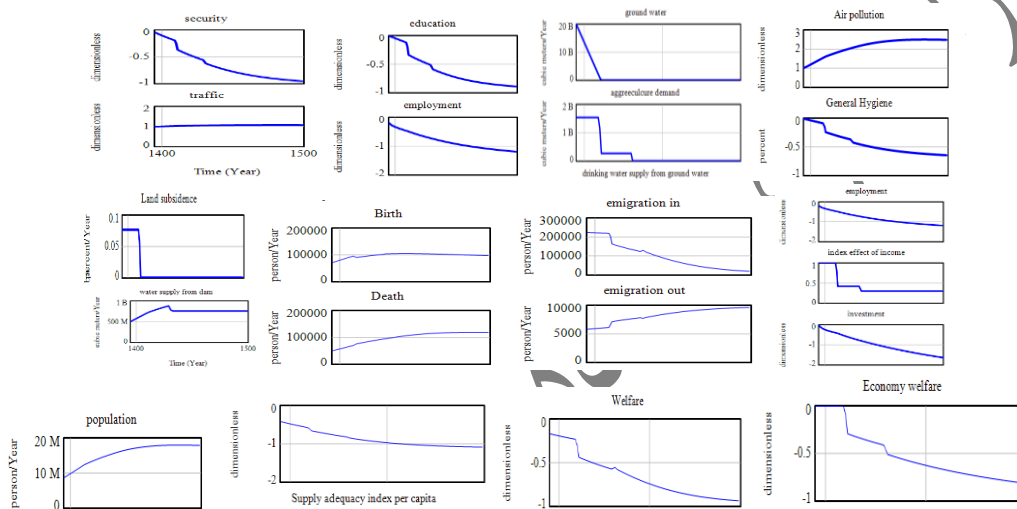


Fig9: Sample model output for the 5% - 160 scenario

شکل ۹: نمونه خروجی مدل برای سناریوی S7

نتایج مدل در سناریوهای مختلف

با توجه به شرایط سناریوهای مختلف تعریف شده نتایج به شرح نمودارهای ذیل گزارش می گردد. تغییرات متغیرهای مربوط به رفاه، رفاه اقتصادی، رفاه اجتماعی، آب زیرزمینی و جمعیت در شکل شماره ۱۰ آمده است.

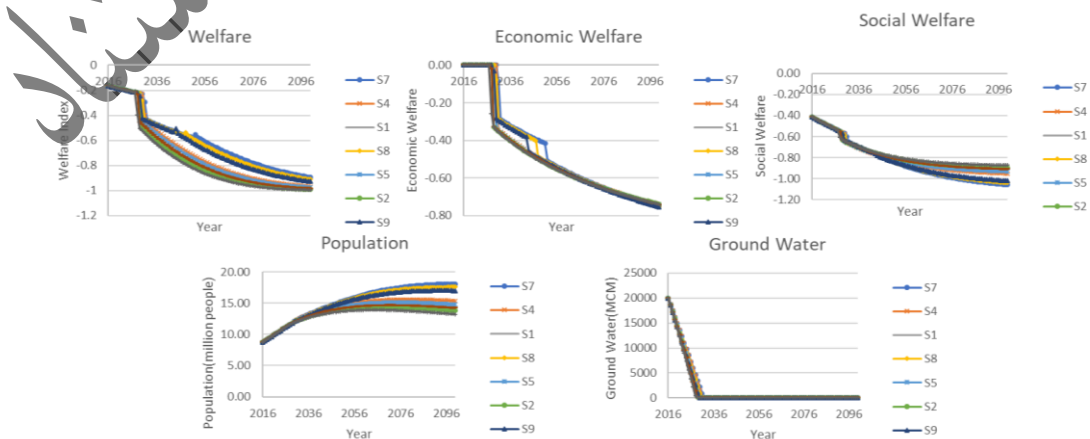


Fig10: Simulation of welfare, groundwater, and population scenarios for Tehran

شکل ۱۰: شبیه سازی سناریوهای رفاه، آب زیرزمینی و جمعیت تهران

نتایج مدل سازی

جدول ۴ نتایج خروجی مدل مربوط به شاخص رفاه را در ۹ سناریوی یادشده به صورت درصد تغییرات مطلق شاخص رفاه نسبت به شروع مدلسازی و همچنین قدر مطلق شاخص رفاه در سال مینا برای هر سناریو بر اساس دیگر زیرسیستمها را بیان می نماید. رابطه مورد استفاده برای محاسبه درصد تغییرات یاد شده در رابطه شماره ۱ آمده است. همچنین جدول ۵ خلاصه کیفی روند متغیرهای کلیدی در سه سناریو سرانه را بیان می نماید.

$$Y = \frac{|A| - |B|}{|B|} \times 100$$

رابطه (۱)

Y: Absolute Changes in Welfare Index Relative to the Model Start Year

A: Welfare Index in scenario

B: Welfare Index in scenario at the Model Start Year

Table4: Absolute Changes in Welfare Index Relative to the Model Start Year

جدول ۴: تغییرات مطلق شاخص رفاه نسبت به سال شروع مدل سازی*

Scenario	Absolute Welfare in the Model Start Year	Water per Capita	Welfare	2071 vs Base (%)	2100 vs Base (%)
S1	0.164487	240 L/day	Severe decline	455	497
S2	0.164531	240 L/day	Severe decline	465	501
S3	0.164575	240 L/day	Severe decline	476	505
S4	0.164487	216 L/day	Major decline	433	487
S5	0.164531	216 L/day	Major decline	444	492
S6	0.164575	216 L/day	Major decline	455	497
S7	0.164487	160 L/day	Minor decline	352	443
S8	0.164531	160 L/day	Minor decline	368	453
S9	0.164575	160 L/day	Minor decline	384	462

* مقادیر جدول ۴ نشان دهنده درصد تغییرات مطلق شاخص رفاه نسبت به سال شروع مدل سازی بوده و فاقد واحد اندازه گیری هستند.

نتایج شبیه سازی های مدل پویا نشان می دهد که کاهش سرانه مصرف آب به ۱۶۰ لیتر در روز منجر به حفظ نسبی شاخص کفایت تأمین آب و کاهش کمتر رفاه کل در بازه بلندمدت می شود. این اثر ناشی از کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی و بهبود پایداری تأمین آب شرب است که در تعامل با زیرسیستم های رفاه اقتصادی و اجتماعی، اثرات منفی توأمان بر رفاه شهری را به حداقل می رساند. در مقابل، سرانه های بالاتر (۲۱۶ و ۲۴۰ لیتر در روز) کاهش قابل توجهی در رفاه کل و سایر شاخص های کلیدی ایجاد می کنند که بیانگر افزایش فشار بر منابع آب و کاهش قابلیت پایداری اجتماعی-اقتصادی است. این نتایج بر اساس تعامل سه زیر سیستم تأمین، مصرف و پایداری اجتماعی-اقتصادی به دست آمده و نشان می دهد اثرات سیاست های مدیریت مصرف آب بر رفاه شهری فراتر از حدس منطقی ساده است. تحلیل روند زمانی نشان می دهد که بیشترین واگرایی رفاهی میان سناریوها در بازه میانی شبیه سازی رخ می دهد، که حاکی از اهمیت مدیریت تقاضای آب در جلوگیری از تشدید ناپایداری های رفاه شهری است. بنابراین، مدل ارائه شده قادر است اثرات بلندمدت و توأمان سناریوهای مختلف مصرف و تغییر اقلیم را کمی سازی کرده و برای برنامه ریزی و سیاست گذاری به صورت مستدل ارائه دهد. بطور مثال در سال ۲۰۷۱، در



سناریوی نامطلوب S3 و در سناریو مطلوب S7، درصد تغییرات مطلق شاخص بدون بعد رفاه نسبت به شروع مدلسازی به ترتیب ۴۷۶٪ و ۳۵۲٪ کاهش می‌یابد و در سال ۲۱۰۰، این مقدار برای سناریوهای مذکور به ترتیب ۵۰۵٪ و ۴۴۳٪ خواهد بود.

Table5: Summary of trends in key variables in three scenarios

جدول ۵: خلاصه کیفی روند متغیرهای کلیدی در سه سناریو

Variable	160 Liters/Day	216 Liters/Day	240 Liters/Day
Welfare	Least decline	Greater decline, still acceptable	Severe decline
Economic Welfare	Minor and stable decline	More noticeable decline	Severe pressure
Social Welfare	Minor changes	Increased decline	Significant decline
Water Supply Adequacy Index	Stable	Moderate decline	Severe decline
Population	Controlled growth	Growth decline after 2051	Growth decline after 2041

مقایسه با مطالعات مشابه

در مطالعه حاضر، در سناریوهای نامطلوب تر S1، S2 و S3 (سرانه ۲۴۰ لیتر در شبانه روز) افزایش مهاجرت داخلی به دلیل کاهش کفایت تامین سرانه آب در کلان شهر تهران نسبت به سناریوهای مطلوب تر مدیریت مصرف S7، S8 و S9 (۱۶۰ لیتر در شبانه روز) بیشتر است. یافته‌های این پژوهش با مطالعات جهانی در زمینه مدیریت منابع آب همخوانی دارد. به عنوان مثال، مطالعه‌ای در جنوب کالیفرنیا نشان داد که کاهش ۱۰٪ در منابع آب زیرزمینی، نرخ مهاجرت داخلی را تا ۲۰٪ افزایش می‌دهد (Gleick, 2011). تفاوت این پژوهش با مطالعات مشابه، استفاده از مدل سازی پویای سیستم برای تحلیل تعاملات پیچیده بین مصرف آب، تغییرات اقلیمی و رفاه شهری است، که رویکردی نوآورانه محسوب می‌شود.

پیامدهای سیاست گذاری

نتایج مدل سازی نشان می‌دهد که سیاست‌های مدیریت تقاضا، مانند کاهش مصرف به ۱۶۰ لیتر در روز، می‌تواند پایداری منابع آب و رفاه شهری را بهبود بخشد. سیاست‌های پیشنهادی ذیل می‌توانند فشار بر منابع آب زیرزمینی را کاهش داده و پایداری رفاه شهری را تضمین کنند.

- **تعرفه گذاری پلکانی تصاعدی:** اعمال تعرفه‌های بالاتر برای مصرف غیر ضروری، مشابه تجربه ملیورن که مصرف را تا ۴۰٪ کاهش داد (Kenney et al., 2016).
- **بازچرخانی آب:** توسعه زیرساخت‌های تصفیه پساب برای استفاده در کشاورزی و صنعت، مشابه برنامه NEWater سنگاپور (PUB Singapore, 2022).
- **بهینه سازی شبکه توزیع:** کاهش هدررفت ۳۰٪ در شبکه توزیع تهران از طریق نوسازی زیرساخت‌ها.
- **تمرکززدایی تأمین آب:** کاهش وابستگی به انتقال بین حوضه‌ای با توسعه منابع محلی و فناوری‌های شیرین سازی آب.

۴- خلاصه و جمع بندی

مدل سازی پویای سیستم تأمین آب شرب تهران نشان داد که مدیریت مصرف آب، به ویژه کاهش سرانه مصرف به ۱۶۰ لیتر در روز، تأثیر قابل توجهی بر پایداری منابع آب زیرزمینی و شاخص‌های رفاه شهری دارد. در سناریوهای مصرف بالا (S1-S3)؛ ۲۴۰ لیتر در روز (فشار بر منابع زیرزمینی بیشتر شده و کاهش شاخص رفاه کل در بازه میان مدت و بلندمدت شدیدتر است، در حالی که کاهش مصرف باعث حفظ نسبی منابع و کاهش کمتر رفاه کل می‌شود. بیشترین اختلاف رفاهی میان سناریوها در بازه میانی شبیه سازی مشاهده شد که اهمیت مدیریت تقاضای آب را در کاهش ناپایداری رفاه شهری برجسته می‌کند.



این پژوهش با ارائه یک مدل یکپارچه پویایی سیستم، تعاملات پیچیده میان زیرسیستم‌های تأمین آب سطحی و زیرزمینی، مصرف شرب، تقاضای کشاورزی، جمعیت و رفاه شهری را در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۱۰۰ شبیه‌سازی کرده است. نوآوری اصلی مطالعه، تعریف شاخص رفاه ترکیبی پویا و اتصال آن به حلقه‌های بازخوردی سیستم است که امکان تحلیل اثرات بلندمدت سناریوهای مختلف مصرف و تغییر اقلیم را فراهم می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که کاهش مصرف سرانه به ۱۶۰ لیتر در روز، علاوه بر کاهش فشار بر منابع زیرزمینی، زمان تخلیه کامل منابع را به تعویق انداخته و کیفیت آب را در سطح قابل قبول حفظ می‌کند. در مقابل، ادامه وضعیت فعلی مصرف (۲۴۰ لیتر در روز) نه تنها منجر به تخلیه سریع‌تر منابع می‌شود، بلکه کاهش شاخص رفاه کل و فشار بر کیفیت آب را تشدید می‌کند. مقایسه با مطالعات جهانی (Gleick, 2011)؛ (Perrone & Jasechko, 2019) نشان می‌دهد یافته‌ها با تجربیات جهانی در زمینه اثر کاهش منابع آب بر رفاه و کیفیت آب همخوانی دارد، با این تفاوت که این پژوهش تحلیل یکپارچه و دینامیک در مقیاس کلان‌شهری ارائه می‌دهد.

اصلی‌ترین سیاست‌های پیشنهادی برای بهبود پایداری منابع و رفاه شهری شامل موارد زیر است:

- کاهش مصرف سرانه به ۱۶۰ لیتر در روز و اجرای سیاست‌های تغذیه آبخوان‌ها.
- توسعه زیرساخت‌های بازچرخانی آب و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع برای کاهش هدررفت.
- تمرکززدایی تأمین آب و کاهش وابستگی به انتقال بین‌حوضه‌ای با توسعه منابع محلی.

محدودیت‌ها و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

- شبیه‌سازی محدود فرآیندهای هیدرولوژیکی و ثابت فرض کردن برخی روابط مانند نرخ مهاجرت.
 - توصیه به ترکیب مدل با ابزارهای هیدرولوژیکی پیشرفته (WEAP)، (MODFLOW) و داده‌های میدانی برای افزایش دقت پیش‌بینی‌ها.
 - تحلیل دقیق‌تر اثرات اقتصادی سیاست‌های قیمتی و سناریوهای تغییر اقلیم.
 - گسترش مدل به سایر کلان‌شهرهای ایران و تحلیل در مقیاس ملی برای تدوین سیاست‌های یکپارچه مدیریت پایدار منابع آب.
- این چارچوب، امکان ارائه راهکارهای سیاستی مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آب و تضمین رفاه شهری را فراهم می‌کند و می‌تواند پایه‌ای برای مطالعات آینده در مقیاس ملی و کلان‌شهری باشد.

۶- پی‌نوشت

¹ System Dynamic

² Statistical Centre of Iran

³ Tehran Regional Water Authority

⁴ Central Bank of Iran

⁵ Iran Water Resources Management Company

۷- مراجع

- Ashraf S, AghaKouchak A, Nazemi A, Mirchi A, Sadegh M (2021) Anthropogenic impacts on groundwater resources in Iran: *Journal of Hydrology* 598:126287
- Bagheri A, Abrishamchi A, Tajrishi M, Solimani A (2004) Tehran metropolis from the perspective of urban water sustainability: First National Civil Engineering Congress, Tehran (In Persian)
- Central Bank of Iran (2016) Annual economic report: Central Bank of Iran, Tehran (In Persian)
- Chen T, Zhao X, Liu Y (2025) Urban hydrometeorological modelling under complex policy environments: A systematic review and future research directions: *Hydrology and Earth System Sciences* 29:3447–3480
- Geological Survey of Iran (2021) Analysis of land subsidence in Tehran metropolis: Internal report (In Persian)
- Gleick PH (2011) *The world's water volume 7*: Island Press, Washington, DC, 375P
- Gleick PH (2018) Transitions to freshwater sustainability: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115:8863-8871
- Guemouria A, Chehbouni A, Belaqqiz S, Epule Epule T, Ait Brahim Y, El Khalki EM, Dhba D, Bouchaou L (2023) System Dynamics Approach for Water Resources Management: A Case Study from the Souss-Massa Basin: *Water* 15(8):1506 DOI:10.3390/w15081506
- Gil-García J, Pérez-Aragón L, Martínez-Lopez M (2024) Human–water systems under uncertainty: Integrating socio-economic and behavioural variables into water allocation policies: *Hydrology and Earth System Sciences* 28:4501–4520
- Haghighi M, Motagh M (2024) Sentinel-1 InSAR analysis of land subsidence in Tehran and surrounding plains. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (In Press)
- Hashemi M, Mazandarani Zadeh H, Daneshkare Arasteh P, Zarghami M (2020) Evaluation of management policies to simultaneously maintain groundwater resources and farmers' livelihoods using system dynamics and game theory: *Iran-Water Resources Research* 16(2):35-50 (In Persian)
- Hassani A, Mousavi SF (2022) Hydrological assessment of Tehran's water supply watersheds under climate change scenarios: *Iranian Journal of Soil and Water Research* 53:1123-1138 (In Persian)
- Iran Water Resources Management Company (2023) Annual water resources report: Iran Water Resources Management Company, Tehran, 150P (In Persian)
- Jamali A, Smith P, Lee D (2025) Long-term system dynamics modelling of urban water demand under policy and climate uncertainty: *Scientific Reports* 15:5946
- Kenney DS, Goemans C, Klein R, Lowrey J, Reidy K (2016) Residential water demand management: Lessons from Aurora, Colorado: *Journal of the American Water Resources Association* 44:192-207
- Liu Y, Zhang H, Wang J, Li X (2024) Demand-side management and participatory governance for enhancing urban water system resilience under climate change: *Journal of Hydrology* 630:130082
- Madani K (2021) Iran's water crisis: A systemic failure of governance: *Environmental Research Letters* 16:051001
- Meadows DH (2008) *Thinking in systems: A primer*: Chelsea Green Publishing, White River Junction, VT, 235P
- Mehrshad F, Esmacilian M, Rahimi D (2016) Application of system dynamics modeling approach in evaluation and comprehensive management of water resources: Sixth National Conference on Water Resources Management of Iran, 20 April 2016, Sanandaj (In Persian)
- 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(9):2421–2442 DOI:10.1007/s11269-012-0024-3

- Motagh M, et al. (2018) Land subsidence in Iran revealed by InSAR. *Nature* 554:69–72 DOI:10.1038/nature25547
- Naderi MM, Mirchi A, Bavani ARM, Goharian E, Madani K (2021) System dynamics simulation of regional water supply and demand using a food-energy-water nexus approach: Application to Qazvin Plain, Iran: *Journal of Environmental Management* 280:111843 DOI:10.1016/j.jenvman.2020.111843
- Naeem K, Zghibi A, Elomri A, Mazzoni A, Triki C (2023) A literature review on system dynamics modeling for sustainable management of water supply and demand: *Sustainability* 15(8):6826 DOI:10.3390/su15086826
- National Cartographic Center of Iran (2024) Annual geodetic report on land subsidence in Tehran province (In Persian)
- Niazi A, Prasher SO, Adamowski J, Gleeson T (2014) A system dynamics model to conserve arid region water resources through aquifer storage and recovery in conjunction with a dam: *Water* 6(8):2300-2321 DOI:10.3390/w6082300
- Nozari H, Mostafa M (2017) Management of Karaj Dam reservoir water release using system dynamics and non-linear programming model: *Iran Soil and Water Research (Iran Agricultural Sciences)* 48(2):335-347 (In Persian)
- Nori M, Mousavi SF, Hassani A (2023) Groundwater recharge assessment in Tehran province under climate variability: *Iran-Water Resources Research* 19:87-102 (In Persian)
- Perrone D, Jasechko S (2019) Dry groundwater wells in the western United States: *Environmental Research Letters* 14:104002
- Phan TD, Bertone E, Stewart RA (2021) Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management: *Cleaner Environmental Systems* 2:100031 DOI:10.1016/j.cesys.2021.100031
- PUB Singapore (2022) Singapore water story: Sustainable water management: Public Utilities Board, Singapore
- Salvitabar A, Zarghami M, Abrishamchi A (2006) System dynamic model in Tehran urban water management: *Water and Wastewater Journal* 17(3):12-28 (In Persian)
- Scanlon BR, Faunt CC, Longuevergne L, Reedy RC, Alley WM, McGuire VL, McMahon PB (2012) Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109:9320-9325
- Soltani M, Alizadeh HA (2017) Comprehensive agricultural water management at the watershed scale (IWMsim) with system dynamics approach: *Soil and Water Resources Protection* 7(2):69-90 (In Persian)
- Statistical Centre of Iran (2016) Population and housing census: Statistical Centre of Iran, Tehran (In Persian)
- Strategic Studies Research Institute (2019) Hazard assessment report on land subsidence in Tehran and Alborz plains (In Persian)
- Sušnik I, Masia S, Indriksone D, Brēmere I, Vamvakeridou-Lydroudia L (2021) System dynamics modelling to explore the impacts of policies on the water-energy-food-land-climate nexus in Latvia: *Science of the Total Environment* 775:145827 DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.145827
- Tehran Regional Water Authority (2021) Annual water resources report: Tehran Regional Water Authority, Tehran (In Persian)
- Tehran Regional Water Authority (2023) Annual water resources report: Tehran Regional Water Authority, Tehran (In Persian)
- UNESCO (2021) Groundwater: Making the invisible visible: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris

- UNESCO (2022) The United Nations world water development report 2022: Groundwater:United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris
- Wang Y, Ding X, Ma Y, Yan B (2021) System dynamics simulation for the coordinative development of socio-economy and environment in the Weihe River Basin, China: Water Policy 23(3):718–736 DOI:10.2166/wp.2021.218
- Winz I, Brierley G, Trowsdale S (2009) The use of system dynamics simulation in water resources management: Water Resources Management 23(7):1301–1323 DOI:10.1007/s11269-008-9328-7
- Winz I, Brierley G, Trowsdale S (2015) The use of system dynamics in urban water management: A case study in New Zealand: Environmental Modelling & Software 73:209–222 DOI:10.1016/j.envsoft.2015.08.007
- WRI (2019) Aqueduct water risk atlas:World Resources Institute, Washington, DC
- Yousefi MR, Khaledi Sh, Asadian F (2024) Forecasting and investigating the future of climate change in Tehran city:Journal of Future Cities Vision 5(1):10 (In Persian)
- Yousefi Sh, Mirdamadi SM, Farajollah Hosseini SJ, Lashgarara F (2022) Identifying appropriate strategies for managing surface water consumption in West Azerbaijan Province in the agricultural sector using system dynamics modeling: Soil and Water Resources Protection 11(4):75-87 (In Persian)
- Zarghami M et al (2012) System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran: Resources, Conservation and Recycling 60:99–106 DOI:10.1016/j.resconrec.2011.11.008

فایده‌های بلندمدت، غیر قابل استناد

Analysis of the Long-Term Impact of Drinking Water Supply Scenarios on Citizens' Welfare Using Dynamic Modeling (Case Study: Tehran Megacity)

Hamed Mazandarani-Zadeh ^{1*}, Rahim Sadeghifar ², Majid Kholghi³

1* - Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. (mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir)

2 - PhD Student in Water Resources Engineering, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3- Full Professor, Irrigation & Reclamation Engineering, Department, University of Tehran, Karaj, Iran.

*- Corresponding Author

Abstract

Although numerous studies have addressed the water crisis in Tehran metropolis, most have focused either on supply-driven analyses of water resources or on socio-economic impacts using static approaches. A key gap remains the lack of a dynamic framework capable of simultaneously analyzing the interactions among water consumption, resource governance, groundwater sustainability, and urban welfare over the long term. This study develops an integrated system dynamics model for Tehran, simulating surface and groundwater supply, drinking water and agricultural demand, population, and a composite urban welfare index over the period 2016–2100. The main novelty lies in the definition of a dynamic welfare index linked to feedback loops, enabling the analysis of dynamic interactions among variables. The model, calibrated using stock-and-flow equations, was run for nine combined scenarios, encompassing three levels of per-capita water consumption (national average, gradual reduction, and current status) and three hypothetical climate change scenarios. Results indicate that by 2071, the absolute percentage changes in the dimensionless welfare index relative to the model start year are 476% and 352% declines under the worst-case scenario (S3) and the optimal scenario (S7), respectively. By 2100, these values increase to 505% and 443%. The largest divergence in welfare among scenarios occurs in the mid-term of the simulation, highlighting the critical role of demand management in mitigating urban welfare instability.

Key words: Water Resources Management, System Dynamics Modeling, Water Security, Water Recycling, Climate Change

System Dynamic ¹
Statistical Centre of Iran ²
Tehran Regional Water Authority ³
Central Bank of Iran ⁴
Iran Water Resources Management Company ⁵