2024, Vol.11, No.3, Pages 99 to 114
Journal of Water and Sustainable Development

سال یازدهم، شماره ۳، ۱۴۰۳، صفحات ۹۹ تا ۱۱۴
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Dynamic Modeling of Urban Water Consumption and Management of Supply and Demand in Kerman Province

S. H. Moosavirad[1*], A. R. Torabi[2], S. M. Moosavirad[3]

1, 2 - Associate Professor and M.Sc. Graduate, Department of Industrial Engineering, Faculty of Technology and Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. 3 - Associate Professor, Environmental Research Department, Research Institute of Advanced Science and Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

*(Corresponding Author Email: s.h.moosavirad@uk.ac.ir)

Received: 13-05-2024 Revised: 22-08-2024
Accepted: 12-10-2024 Available Online: 20-09-2024

مدل‌سازی پویای مصرف آب شهری و مدیریت عرضه و تقاضا در استان کرمان

سید حامد موسوی‌راد[1*]، امیررضا ترابی[2]، سید مرتضی موسوی‌راد[3]

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. ۳- دانشیار گروه پژوهشی محیط‌زیست، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران.

*(رایانامه نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: s.h.moosavirad@uk.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

Abstract

Kerman Province is located in the arid region category. The volume of its groundwater aquifers has been declining in recent years, and the continuation of this situation will have unfortunate consequences. This study aims to model urban water consumption in Kerman Province using System Dynamics (SD) in the Vensim PLE+ software and investigate the impact of supply and demand management on water resource preservation. For SD modeling, the model variables, their types, and the relationships between them were first identified, and mathematical formulas for each were derived. The modeling results indicate that the difference between urban water supply and demand reached a maximum of 61 million m3 in the years 2011 to 2021. Subsequently, water consumption management policies were examined, including "artificial groundwater recharge," "separation of drinking water from non-potable water," "managing network losses," "controlling subsidized water prices," and "managing household consumption patterns." Simulation results reveal that "artificial groundwater recharge" as the most effective solution, can increase the water resources of Kerman to more than 100 million m3 per year. Additionally, this research demonstrates that modeling a complex system like urban water consumption using SD simplifies understanding of the model, identifies critical variables, tests solutions, and can serve as a useful management tool for decision-makers.

Keywords: Kerman Province, Water Crisis, System Dynamics, Urban Water Consumption, Vensim Software.

چکیده

استان کرمان در دسته مناطق خشک قرار دارد و حجم سفره‌های آب زیرزمینی آن در سال‌های گذشته، روند نزولی داشته و ادامه این وضعیت، پیامدهای ناگواری به دنبال خواهد داشت. هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی مصرف آب شهری در استان کرمان با روش پویایی سیستم در نرم‌افزار Vensim PLE+ و بررسی تأثیر مدیریت عرضه و تقاضا در حفظ منابع آبی است. برای مدل‌سازی با روش پویایی سیستم، ابتدا متغیرهای مدل، نوع آن‌ها و روابط بین آن‌ها مشخص شد و رابطه ریاضی هر یک به‌دست آمد. نتایج مدل‌سازی نشان داد اختلاف عرضه و تقاضای آب شهری، در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰، حداکثر ۶۱ میلیون مترمکعب بوده است. در ادامه، سیاست‌های مدیریت مصرف آب بررسی و شبیه‌سازی شد. سیاست‌ها شامل «تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها»، «جداسازی آب شرب از آب غیرشرب»، «مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی»، «کنترل قیمت یارانه‌ای آب» و «کنترل الگوی مصارف خانگی» بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد «تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به‌عنوان موثرترین راهکار، می‌تواند وضعیت منابع آبی استان را به بیش از ۱۰۰ میلیون مترمکعب در سال برساند. همچنین در این پژوهش نشان داده شد با مدل‌سازی یک سیستم پیچیده مانند مصرف آب شهری؛ درک مدل، شناسایی متغیرهای بحرانی و آزمایش راهکارها ساده‌تر می‌شود و پویایی سیستم به عنوان یک ابزار مدیریتی مفید برای تصمیم‌گیران عمل می‌کند.

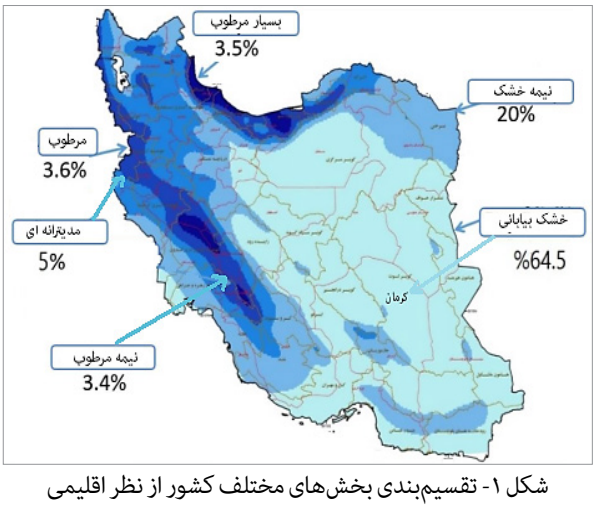
واژه‌های کلیدی: استان کرمان، بحران آب، پویایی سیستم، مصرف آب شهری، نرم‌افزار Vensim.

How to cite this article: Moosavirad, S. H., Torabi, A. R., & Moosavirad, S. M. (2024). Dynamic Modeling of Urban Water Consumption and Management of Supply and Demand in Kerman Province. Journal of Water and Sustainable Development, 11(3), 99-114. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v11i3.2405-1329

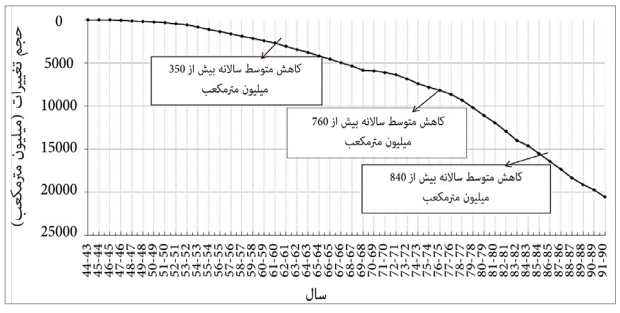
مقدمه

آب بزرگترین منبع طبیعی جهان است و تنها سه درصد از آن را آب شیرین تشکیل می‌دهد که از این مقدار، یک سوم برای استفاده در کشاورزی و شهرها قابل دسترسی است و بقیه، در یخچال‌های طبیعی منجمد شده یا در عمق‌های زیاد در زیرِ زمین پنهان است. با افزایش جمعیت و رشد صنایع و کشاورزی، منابع آب شیرین جهان تحت فشار قرار گرفته و در نتیجه، بیش از نیمی از بزرگترین سفره‌های آب زیرزمینی جهان تخلیه شده و این مشکل با رشد تقاضا بدتر خواهد شد. همچنین با گرم شدن زمین و تغییرات آب‌وهوا، زیست‌بوم و محیط‌هایی که از منابع حیاتی آب محافظت می‌کنند، در معرض تهدید است (The Global Environment Facility، ۲۰۱۵).

مشکل آب در کشور ایران و به‌خصوص در استان کرمان نیز قابل توجه است. استان کرمان با متوسط بارندگی ۱۲۹ میلی‌متر در سال، در دسته مناطق خشک قرار دارد (شکل ۱). کاهش نزولات جوی، تداوم خشکسالی، رشد جمعیت، افزایش سطح زیرِ کشت و برداشت از منابع آبی بیش از تغذیه آن‌ها از عوامل کاهش حجم سفره‌های آب زیرزمینی در استان بوده که در نتیجه، منجر به افت کمی و کیفی منابع آب و بحرانی‌شدن بسیاری از دشت‌ها شده است، به‌گونه‌ای که زمین در برخی مناطق، ۲۰ سانتی‌متر در سال نشست می‌کند. بر اساس آمارها، متوسط کاهش سالانه حجم مخازن آب زیرزمینی در استان کرمان از سال آبی ۶۰-۶۱ تا ۷۵-۷۶ بیش از ۳۵۰ میلیون مترمکعب، از سال آبی ۷۵-۷۶ تا ۸۴-۸۵ بیش از ۷۶۰ میلیون مترمکعب و از سال آبی ۸۴-۸۵ تا ۹۰-۹۱ بیش از ۸۴۰ میلیون مترمکعب بوده است و روند آن همچنان نزولی است (شکل ۲) (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۳). در حال حاضر، ۱۱ شهر از استان کرمان با جمعیتی در حدود ۶۰ درصد از جمعیت کل استان، با تنش آبی روبه‌رو هستند. بر اساس آمار شرکت آب و فاضلاب استان کرمان، نیاز آبی این استان ۹۹۴۱ لیتر در ثانیه و توان تولید آب توسط این شرکت ۹۱۰۹ لیتر در ثانیه است که ۸۳۲ لیتر در ثانیه کمبود آب وجود دارد (سلطانی، ۱۴۰۰).



شکل ۱- تقسیم‌بندی بخش‌های مختلف کشور از نظر اقلیمی



شکل ۲- افت حجم مخازن آب‌های زیرزمینی در استان کرمان

ادامه روند موجود، پیامدهایی مانند عدم امکان تأمین آب شرب، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، نشست زمین و عدم امکان استفاده از ظرفیت معادن و امکانات بالقوه استان را به دنبال خواهد داشت (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۹۳). همچنین این شرایط به‌تدریج آبخوان دشت کرمان را خشک می‌کند و تخلخل از دست رفته آبخوان غیرقابل برگشت می‌شود و در آینده بیشتر مصارف آب شهری، صنعتی و کشاورزی فاقد منابع آب زیرزمینی برای تأمین خواهد بود که این مسئله منجر به کوچ اهالی دشت کرمان و شهرها و روستاها به نقاط غربی و شمالی کشور خواهد شد. بنابراین پایداری آبخوان دشت کرمان در تأمین نیازهای آبی استان مسئله‌ای حیاتی است.

بحران آب در پژوهش‌های مختلف در جهان و ایران، به‌ویژه در استان کرمان مورد توجه بوده است. بهادر (۱۳۹۶) بحران آب در شهرستان رفسنجان را بررسی کرد. در این پژوهش، افزایش جمعیت، تنوع و تعدد نیازهای جمعیتی، کشاورزی سنتی و ... از عوامل مهم بحران آب معرفی شد و سیستم مدیریت منابع آب رفسنجان با روش پویایی سیستم[1] شبیه‌سازی و با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها[2]، متغیرهای اثرگذار بر کمبود آب آزمایش شد. نتایج این پژوهش نشان داد کاهش مصرف آب در هکتار سطح زیر کشت برترین سناریو است. غفاریان بهرمان و کرمی (۱۳۹۶) بحران آب در شهرستان رفسنجان و چالش‌های امنیتی آن را با روش آینده‌پژوهی[3] بررسی کردند و رشد جمعیت، ارتقای سطح زندگی و بهداشت، گسترش شهرنشینی، توسعه صنایع و کشاورزی و... را از دلایل بحران آب معرفی کردند. در این پژوهش، چالش‌های امنیتی بحران آب در سه بُعد اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی طبقه‌بندی شد. تغییر سیستم مدیریت آب از حالت مدیریت بحران و واکنشی به حالت مدیریت پیشگیری و فعال، تصویب قوانین جدید در خصوص جرم‌بودن هدر دادن آب، تشکیل پلیس آب در زیرمجموعه پلیس پیشگیری و... از مهمترین پیشنهادهای این پژوهش بود. عسکری‌نیا (۱۳۹۸) پژوهشی در مورد عوامل مؤثر بر پایداری منابع آب در شهرستان فاریاب استان کرمان انجام داد و کاهش بارندگی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی را از عوامل مهم کمبود آب معرفی کرد. در این پژوهش پایداری منابع

آب گندم‌کاران فاریاب با استفاده از شاخص اتلاف آب محاسبه شد و پایداری منابع آب معادل با کاهش اتلاف آب در نظر گرفته شد. مدل استفاده شده در این پژوهش مدل لاجیت[۴] بود و نتایج حاصل از آن نشان داد عواملی ازجمله تجربه، بُعد خانوار، نوع سیستم آبیاری و فاصله میان چاه آب و زمین زراعی از عوامل تأثیرگذار بر پایداری منابع آب هستند. شاهرخی ساردو و جلال کمالی (۱۴۰۰) سیستم مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در دشت نسا بم را با روش پویایی سیستم، مدل‌سازی کردند. نتایج مدل‌سازی، نشان داد در سال‌های آینده، افت تراز سطح آب ادامه خواهد داشت. در این پژوهش نشان داده شد که تغذیه مصنوعی، راهکار مؤثری در حفظ و تقویت آب‌های زیرزمینی است. Mehryar و همکاران (۲۰۱۵) بحران آب در شهر رفسنجان را بررسی کردند و مدیریت و برنامه‌ریزی ضعیف طی چند دهه اخیر را مهمترین عامل آن دانستند. آبیاری کارآمد و سیستم‌های کشاورزی مدرن، کنترل بهره‌برداری بیش‌ازحد و پروژه‌های انتقال آب به‌عنوان راهکارهای کوتاه‌مدت معرفی شد. در این پژوهش پیشنهاد شد که شهرهای کم‌آب ایران از دیدگاه اجتماعی-بوم‌شناختی بلندمدت و پیوسته بررسی شوند. Pluchinotta و همکاران (۲۰۲۱) برای بررسی مدیریت پایدار آب شهری در شهر ابسفلت[۵] انگلیس، از روش پویایی سیستم استفاده کردند. رشد جمعیت شهری، تغییر در الگوهای بارندگی و فرسودگی زیرساخت‌ها، از مهمترین چالش‌های مدیریت آب شهری معرفی شد. در این پژوهش، بیان شد رویکرد مدل‌سازی با روش پویایی سیستم، از تصمیم‌گیری در سطح راهبردی پشتیبانی می‌کند. Wang و همکاران (۲۰۲۲) بحران آب در آسیای مرکزی را بررسی کردند و نتایج این پژوهش نشان داد بحران آب در این منطقه شدید بوده و دستیابی به اهداف توسعه پایدار، با مشکل مواجه شده است. در این پژوهش بیان شد تنش آبی در ازبکستان، ترکمنستان و تاجیکستان بالا است و قرقیزستان و قزاقستان تنش آبی متوسط دارند. همچنین، نسبت جمعیت روستایی با دسترسی به آب آشامیدنی سالم، به‌طور قابل توجهی کمتر از جمعیت شهری در همه کشورهای آسیای مرکزی است. همچنین سطح زمین زیرِ کشت و جمعیت نیز به‌عنوان عوامل مهم اثرگذار بر بحران آب، معرفی شد. Zehtabian و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهش خود بیان کردند مدیریت آب در رودخانه زاینده رود تحت تأثیر سیاست‌های ضعیف تخصیص آب است که نیازهای آشامیدنی، کشاورزی، صنعتی و محیط‌زیستی را برآورده نمی‌کند. آن‌ها در پژوهش خود، مدلی با هدف بهبود مدیریت آب در تالاب گاوخونی ارائه کردند. سناریوهای مدیریت آب عبارت بودند از: تغییر در اولویت تأمین آب، تغییر در جریان برگشتی و مدیریت تلفات آب و تغییر در میزان آب انتقالی به حوضه گاوخونی. Carbon (۲۰۲۴) در پژوهش خود ارتباط بین تنش آبی و مدیریت بحران در آلمان را بررسی کرد. در این پژوهش بیان شد تغییرات آب‌وهوایی، بر مخازن آب در سراسر جهان تأثیرگذار است و برخی از مناطق به دلیل دوره‌های طولانی خشکسالی، کاهش شدیدی در منابع آبی خود تجربه می‌کنند. این پژوهش به دنبال ارائه رویکرد جدیدی برای مدیریت آب بود و تحقیقات لازم را که می‌تواند به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری در حفاظت از منابع آب باشد، شناسایی کرد. Ghosh و Bera (۲۰۲۴) بیان کردند فشار بر منابع آب شیرین به دلیل انفجار جمعیت جهانی، توسعه اجتماعی-اقتصادی، تغییرات آب‌وهوا و توسعه زیرساختی رو به افزایش است. آن‌ها مطالعه‌ای در منطقه‌ای از هند انجام دادند که با بحران شدید آب، آلودگی آب‌های زیرزمینی و خشکسالی شدید مواجه بود. هدف پژوهش آن‌ها ارزیابی دینامیک آب سطحی و زیرسطحی با استفاده از مجموعه داده‌های ماهواره‌ای و تعیین مکان‌های مناسب برای ساخت سد، به‌منظور مدیریت بحران آب بود. آن‌ها خروجی پژوهش خود را برای تعیین مکان‌های مناسب سدسازی و مدیریت پایدار منابع آب در محیط‌های نیمه‌خشک مفید دانستند. Naeem و همکاران (۲۰۲۴) رشد سریع جمعیت جهانی و شهرنشینی گسترده در مناطق خشک مانند کشورهای حاشیه خلیج فارس را تهدیدکننده پایداری آب معرفی کردند. آن‌ها در مطالعه خود، یک رویکرد نوآورانه را برای بررسی پایداری آب در مقیاس ملی، با توسعه یک سیستم پشتیبانی تصمیم[۶] و مدل‌سازی با روش پویایی سیستم، ارائه کردند. نتایج پژوهش نشان داد ۱۰ درصد افزایش در عرضه آب و ۱۰ درصد کاهش در مصرف، پایداری آب را تا ۵۰ سال تضمین می‌کند. در ادامه در جدول (۱)، خلاصه‌ای از پژوهش‌های بیان شده و سایر پژوهش‌های مرتبط ارائه می‌شود.

جدول ۱- گزیده مطالعات انجام‌شده در حوزه بحران آب

مرجع	هدف	مطالعه موردی	روش
فدایی و مهدوی (۱۳۹۵)	بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی	استان کرمان	سیستم اطلاعات جغرافیایی[۷]
حلبیان و مجاوری (۱۳۹۵)	بررسی افت آب‌های زیرزمینی	دشت کرمان	نرم‌افزارهای GIS و SURFER
امینی و همکاران (۱۳۹۶)	برآورد آب معادل برف به منظور مدیریت منابع آب	استان کرمان	شبکه عصبی مصنوعی[۸] و رگرسیون چندگانه
بنی‌اسدی و همکاران (۱۳۹۶)	بررسی تغییر الگوی کشت و میزان استخراج منابع آب زیرزمینی با اعمال سیاست‌های کاهش مصرف آب	ارزوئیه	برنامه‌ریزی ریاضی مثبت[۹]
بهادر (۱۳۹۶)	بررسی بحران آب و راهکارهای بهبود	رفسنجان	پویایی‌سیستم‌وطراحی‌آزمایش‌ها

مرجع	هدف	مطالعه موردی	روش
غفاریان بهرمان و کرمی (۱۳۹۶)	بحران آب و چالش‌های امنیتی آن	رفسنجان	آینده‌پژوهی
پارسا و همکاران (۱۳۹۷)	بررسی تأثیر پارامترهای دما و خشکسالی و میزان برداشت آب بر افت سطح آب‌های زیرزمینی	کرمان	الگوریتم ژنتیک[۱۰]
عسکری‌نیا (۱۳۹۸)	بررسی عوامل مؤثر بر پایداری منابع آب	فاریاب (کرمان)	مدل لاجیت
شاهرخی و جلال کمالی (۱۴۰۰)	مدل‌سازی مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی	دشت نسا بم	پویایی‌سیستم‌ها
Mehryar و همکاران (۲۰۱۵)	بررسی بحران آب و علل آن و ارائه راهکارهای بهبود	شهر رفسنجان	برنامه‌ریزی فضایی[۱۱]
Li و همکاران (۲۰۲۰)	تحلیل پتانسیل استفاده از آب بازیابی شده	شمال غربی چین	پویایی‌سیستم‌ها
Xu و همکاران (۲۰۲۰)	آزمایش عملکرد سیستم تأمین آب شهری تحت سناریوهای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت تا بلندمدت	سنگاپور	پویایی‌سیستم‌ها
Pluchinotta و همکاران (۲۰۲۱)	بررسی مدیریت پایدار آب شهری	ابسفلت انگلیس	پویایی‌سیستم
Wang و همکاران (۲۰۲۲)	بررسی بحران آب	آسیای مرکزی	مطالعات کتابخانه‌ای
Zehtabian و همکاران (۲۰۲۳)	ارائه مدلی برای مدیریت آب	تالاب گاوخونی	مدل‌سازی
Carbon (۲۰۲۴)	بررسی ارتباط بین تنش آبی و مدیریت بحران	آلمان	مطالعات کتابخانه‌ای
Ghosh و Bera (۲۰۲۴)	ارزیابی دینامیک آب سطحی و زیرسطحی برای مدیریت بحران آب	منطقه‌ای از هند	مدل‌های یادگیری ماشین[۱۲]
Naeem و همکاران (۲۰۲۴)	بررسی عوامل تهدیدکننده پایداری آب و ارائهٔ یک رویکرد نوآورانه برای حل مشکل	کشورهای حاشیه خلیج فارس	سیستم پشتیبانی تصمیم و روش پویایی سیستم

بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد مسئله مدیریت منابع آب، به‌خصوص آب شهری و پایداری منابع آب زیرزمینی، در استان کرمان و در جهان مورد توجه بوده است. در استان کرمان، مشکلات آب در شهرهای کرمان، رفسنجان، فاریاب و ارزوئیه، همچنین دشت کرمان و بم، بررسی شده است. علاوه‌براین، در سایر نقاط جهان، مطالعات موردی در زمینه مدیریت منابع آب در چین، سنگاپور، کشورهای آسیای مرکزی، هند، انگلیس و آلمان انجام شده است که این مطالعات تنها بخشی از پژوهش‌های پرشمار در این حوزه را تشکیل می‌دهد. در پژوهش حاضر، مسئله آب شهری در استان کرمان به‌عنوان یک موضوع مهم، که در سایر پژوهش‌ها کمتر مورد توجه بوده، بررسی شده و در میان روش‌های استفاده شده در پژوهش‌ها، روش پویایی سیستم پرکاربرد بوده است.

باتوجه‌به آنچه بیان شد، هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی مصرف آب شهری در استان کرمان با استفاده از روش پویایی سیستم در نرم‌افزار Vensim PLE+ و بررسی تأثیر مدیریت بهره‌برداری در حفظ منابع آبی استان است. مدیریت منابع آب نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت و کوتاه‌مدت، با رویکرد کل‌نگر و جزءنگر به مسئله است. همچنین سیستم مصرف آب، یک سیستم پیچیده با متغیرهای گوناگون است که هر متغیر رفتار متفاوتی دارد. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا با شبیه‌سازی سیستم مصرف آب شهری به‌گونه‌ای که درک آن پیچیده نباشد، همچنین بررسی رفتار متغیرها و میزان تأثیرگذاری راهکارهای مختلف، گامی در جهت حل مسئله برداشته شود. نوآوری این پژوهش بررسی مدیریت منابع آب شهری در استان کرمان است که در سایر پژوهش‌ها کمتر به آن اشاره شده و همچنین مدل‌سازی آن با روش پویایی سیستم است که تاکنون انجام نشده است. در این پژوهش، مدل به‌دست‌آمده با روش پویایی سیستم می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری مدیریتی در درک بصری و حل مسئله، به مدیران و پژوهشگران در این عرصه کمک کند.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر یک پژوهش کمی-کیفی در زمینه مدیریت منابع آب با استفاده از روش پویایی سیستم است. این پژوهش با بررسی و مطالعه کتابخانه‌ای مدیریت منابع آب و پیشنیه آن در جهان و استان کرمان آغاز شد و شیوه گردآوری و تحلیل داده‌ها، توصیفی و از نوع مطالعه موردی در استان کرمان است و از نظر هدف یک پژوهش کاربردی-توسعه‌ای محسوب می‌شود. در ادامه منطقه مورد مطالعه و روش پژوهش بیان می‌شود.

۱- منطقه مورد مطالعه

استان کرمان با مساحتی در حدود ۱۸۳۰۰۰ کیلومترمربع و با اختصاص بیش از ۱۱/۵ درصد از خاک ایران، در جنوب شرق فلات ایران واقع شده است. این استان، منطقه‌ای مرتفع و کوهستانی اقلیم‌های متنوعی دارد ، به‌طوری که محدوده کویر لوت و چاله جازموریان با ارتفاع کمتر از ۲۰۰ متر از سطح دریا و ارتفاعات

کوهبنان، هزار، جوپار و لاله‌زار با ارتفاع بیش از ۴۴۶۵ متر از سطح دریا واقع است. استان کرمان از لحاظ اقلیم‌شناسی جز اقلیم نیمه‌خشک بیابانی و گرم محسوب می‌شود و به‌طورکلی پنج اقلیم گرم فراخشک، گرم و خشک، نیمه‌معتدل کوهپایه‌ای، سرد و کوهستانی و گرم و نیمه‌مرطوب دارد. سیستم آبی رودخانه‌های استان نیز در شش حوضه آبریز غرب جازموریان، کویر لوت، کویر ابرقو-سیرجان، کویر در انجیر، بندرعباس-سدیج و کل-مهران واقع شده است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۰).

۲- روش پویایی سیستم

روش پویایی سیستم نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۵۰ معرفی شد. این روش، یک رویکرد تحلیلی است که از شبیه‌سازی رایانه‌ای، برای مطالعه رفتار پویای یک سیستم پیچیده در طول زمان استفاده می‌کند. پویایی سیستم با بهبود شناخت و درک از سیستم‌ها، پیش‌بینی رفتار متغیرها و ایجاد تغییرات در آن‌ها به دنبال ایجاد اثرات مطلوب است. مدل‌سازی به‌روش پویایی سیستم در ابتدا از طریق نقشه‌برداری بود و در ادامه با توسعه مدل و استفاده از نرم‌افزارهایی مانند Vensim تکامل یافت. این روش از نظر کاربرد، یک روش مناسب برای مواجهه با مسائل راهبردی در ارتباط با سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری است و از یک مدل بصری برای آزمایش سیاست‌ها و ارزیابی نتایج استفاده می‌کند. پویایی سیستم با دیگر رویکردهای مدل‌سازی متفاوت است، زیرا با مسائل پیچیده‌ای سروکار دارد که شامل حلقه‌های بازخورد و تأخیرهای غیرخطی و زمانی است که این ویژگی‌ها، بر رفتار کل سیستم اثر می‌گذارد (Zainal-Abidin و همکاران، ۲۰۱۴؛ Rahim و همکاران، ۲۰۱۷). به‌این‌دلیل در این پژوهش، برای شناخت بهتر سیستم مصرف آب شهری و آزمایش راهکارها، از مدل‌سازی به روش پویایی سیستم استفاده شده است. در ادامه مراحل این روش و برخی از فعالیت‌های هر مرحله، بیان می‌شود.

۱) تعریف مسئله: هدف از این مرحله، انجام پیش‌نیازهای مدل‌سازی است. برخی فعالیت‌های این مرحله به شرح زیر است:

- تعیین متغیرهای مسئله؛
- جمع‌آوری داده‌های اولیه.

۲) مدل‌سازی نمودار حلقه‌های علت‌ومعلولی[۱۳]: هدف از این مرحله، نمایش بصری ارتباط میان متغیرهای مدل است. برخی فعالیت‌های این مرحله به شرح زیر است:

- شناسایی حلقه‌ها و رابطه بین متغیرها؛
- ترسیم نمودار.

۳) مدل‌سازی پویا: هدف از این مرحله، بررسی نتایج، شناخت رفتار متغیرها و شناسایی متغیرهای بحرانی است. برخی فعالیت‌های این مرحله به شرح زیر است:

- شناسایی نوع متغیرها (حالت، جریان و کمکی)؛
- تعیین روابط ریاضی متغیرها؛
- شبیه‌سازی نمودار حالت و جریان[۱۴]؛
- اعتبارسنجی مدل؛
- تحلیل نتایج مدل.

۴) برنامه‌ریزی و مدل‌سازی سناریو: هدف از این مرحله، آزمایش راهکارهای مختلف است تا میزان بهبود در مدل مشخص شود. برخی فعالیت‌های این مرحله به شرح زیر است:

- طراحی سیاست‌ها و راهبردهای بهبود؛
- مدل‌سازی سناریوها؛
- بررسی و تحلیل نتایج (Maani و Cavana، ۲۰۰۰).

یافته‌ها و بحث

در این قسمت نتایج به‌دست آمده از اجرای هر یک از مراحل روش پویایی سیستم که در قسمت قبل بیان شد، ارائه می‌شود.

۱- تعریف مسئله

مسئلهٔ این پژوهش همان‌گونه که بیان شد، مدل‌سازی سیستم مصرف آب شهری در استان کرمان است. متغیرهای مدل عبارتند از: جمعیت مناطق شهری، وضعیت آب شهری، آب‌های زیرزمینی و سطحی و مصرف آب شهری استان که شامل هفت بخش خانگی، آموزش و اماکن مذهبی، آزاد و زیربنایی، صنعتی، عمومی و دولتی، تجاری و سایر مصارف است. داده‌های مربوط به متغیرها، بر اساس سالنامه آماری سال ۱۴۰۰، در جداول (۲) تا (۴) ارائه شده است (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۰). مقایسه‌ای از حجم آب‌های زیرزمینی و حجم کل فروش آب در طی سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ و همچنین پیش‌بینی این مقادیر تا سال ۱۴۳۰ با استفاده از نرم‌افزار Excel در شکل (۳) نمایش داده شده است. در این شکل مشهود است که وضعیت آب‌های زیرزمینی روزبه‌روز بحرانی‌تر می‌شود.

جدول ۲- حجم آب تولید شده در مناطق شهری استان کرمان (مترمکعب)

سال	آب‌های سطحی	آب‌های زیرزمینی	جمع
۱۳۹۰	۱۷۲۰۰۰۰	۱۶۶۳۲۳۰۰۰	۱۶۸۰۴۳۰۰۰
۱۳۹۲	۱۵۵۰۰۰۰	۱۶۰۴۳۲۰۰۰	۱۶۱۹۸۲۰۰۰
۱۳۹۳	۱۱۲۱۰۰۰	۱۶۳۷۲۲۰۰۰	۱۶۴۸۴۳۰۰۰
۱۳۹۴	۵۷۱۵۰۰۰	۱۶۵۲۲۹۲۰۰	۱۷۰۹۴۴۲۰۰
۱۳۹۵	۵۸۴۸۰۰۰	۱۷۳۶۵۱۰۰۰	۱۷۹۴۹۹۰۰۰
۱۳۹۶	۲۱۲۷۲۰۰۰	۱۵۷۶۵۴۰۰۰	۱۷۸۹۲۶۰۰۰
۱۳۹۷	۱۹۶۷۴۰۰۰	۱۵۹۴۶۱۰۰۰	۱۷۹۱۳۵۰۰۰
۱۳۹۸	۱۱۹۵۶۱۰۰	۱۶۸۶۳۳۰۰۰	۱۸۰۵۸۹۱۰۰
۱۳۹۹	۲۰۹۳۲۶۰۰	۱۷۹۵۴۲۶۰۰	۲۰۰۴۷۵۲۰۰
۱۴۰۰	۱۵۳۷۸۰۰۰	۱۸۵۱۰۰۰۰۰	۲۰۰۴۷۸۰۰۰

جدول ۳- تعداد انشعاب و حجم فروش آب در نقاط شهری به تفکیک کاربری (مترمکعب)

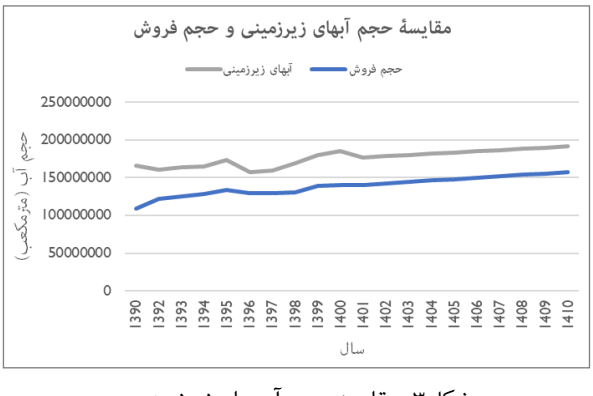
سال	جمع		خانگی		آموزش و اماکن مذهبی		آزاد و زیربنایی	
	انشعاب	حجم فروش	انشعاب	حجم فروش	انشعاب	حجم فروش	انشعاب	حجم فروش
۱۳۹۰	۴۹۸۳۶۰	۱۰۸۷۵۱۰۰۰	۴۱۹۴۴۰	۸۵۴۲۵۰۰۰	۱۸۸۱	۱۲۷۳۱۵۶	۳۹۱۰۹	۳۶۳۱۲۷۸
۱۳۹۲	۵۳۹۶۰۶	۱۲۱۹۲۷۱۸۵	۴۵۲۷۵۰	۹۱۸۸۳۲۴۶	۲۰۳۴	۱۴۶۹۱۴۳	۴۳۳۸۲	۴۷۰۲۵۵۴
۱۳۹۳	۵۵۴۵۲۹	۱۲۵۴۱۵۱۲۶	۴۶۶۲۳۵	۹۶۳۲۸۴۲۵	۲۱۰۵	۱۶۱۷۴۶۷	۴۳۷۶۵	۴۶۱۳۳۱۸
۱۳۹۴	۵۶۴۴۵۳	۱۲۸۷۰۰۹۸۶	۴۷۶۵۲۶	۹۷۹۱۱۳۳۹	۲۱۴۰	۱۶۴۲۶۷۶	۴۱۹۱۵	۵۱۹۶۵۰۸
۱۳۹۵	۵۷۳۵۶۵	۱۳۳۳۵۶۹۵۰	۴۸۶۸۴۵	۱۰۲۲۲۹۸۱۵	۴۹۲۴	۵۰۰۸۸۳۲	۳۹۹۶۳	۵۳۱۲۱۱۳
۱۳۹۶	۵۹۰۷۴۶	۱۲۹۰۵۱۲۶۸	۵۰۱۵۵۳	۹۸۴۷۴۴۱۰	۵۵۰۱	۵۰۱۸۱۷۲	۴۰۸۳۹	۴۲۱۰۶۹۹
۱۳۹۷	۶۰۵۰۳۱	۱۲۹۱۵۹۳۶۴	۵۱۷۷۰۷	۱۰۰۰۵۹۲۰۸	۵۰۱۶	۴۳۲۳۳۶۱	۳۷۸۴۹	۴۳۱۱۵۲۹
۱۳۹۸	۶۲۰۷۶۵	۱۳۰۷۴۴۶۴۹	۵۳۲۰۰۰	۱۰۵۹۳۷۹۰۸	۳۳۳۷	۳۵۳۰۰۵۷	۳۶۹۱۳	۳۷۸۲۴۵۷
۱۳۹۹	۶۵۸۴۹۴	۱۳۹۱۹۶۴۷۸	۵۵۶۸۸۰	۱۱۶۴۶۲۳۴۷	۳۵۷۰	۲۹۲۳۱۴۱	۳۷۱۱۰	۳۸۳۵۶۶۴
۱۴۰۰	۶۶۲۴۷۵	۱۴۰۱۹۱۳۶۱	۵۶۸۰۶۵	۱۱۷۳۴۳۶۱۰	۳۴۴۶	۳۰۷۹۰۰۶	۳۷۴۸۱	۳۴۱۰۳۵۹

ادامه جدول ۳- تعداد انشعاب و حجم فروش آب در نقاط شهری به تفکیک کاربری (مترمکعب)

سال	صنعتی		عمومی و دولتی		تجاری		سایر مصارف	
	انشعاب	حجم فروش	انشعاب	حجم فروش	انشعاب	حجم فروش	انشعاب	حجم فروش
۱۳۹۰	۹۲۸	۳۶۹۰۰۰	۱۷۰۲	۱۵۰۵۸۷۸	۲۹۲۵۳	۳۳۲۳۰۰۰	۶۰۴۷	۱۳۲۲۳۶۸۸
۱۳۹۲	۱۰۵۷	۴۷۶۲۶۱	۱۸۹۸	۲۲۲۹۵۵۷	۳۱۸۰۰	۳۶۴۴۰۵۰	۶۶۸۵	۱۷۵۲۲۳۷۴
۱۳۹۳	۱۰۷۵	۴۵۷۰۱۵	۱۹۰۵	۱۹۱۳۱۲۶	۳۲۶۷۷	۳۶۸۵۸۸۵	۶۷۶۷	۱۶۷۹۹۸۹۰
۱۳۹۴	۱۰۸۰	۵۰۹۰۳۶	۱۹۰۶	۱۹۹۱۰۰۳	۳۳۷۲۹	۳۸۳۴۲۴۰	۷۱۵۷	۱۷۶۱۶۱۸۴
۱۳۹۵	۱۰۸۴	۵۴۱۳۱۶	۱۹۳۵	۳۰۱۷۴۰۹	۳۴۷۲۷	۴۴۸۳۰۳۲	۴۰۸۷	۱۲۷۶۴۴۳۳
۱۳۹۶	۱۰۸۶	۵۴۸۵۶۹	۲۷۲۵	۳۱۲۶۶۶۰	۳۷۰۱۹	۴۳۵۵۷۹۹	۲۰۲۳	۱۳۳۱۶۹۵۹
۱۳۹۷	۱۰۶۰	۵۲۴۷۲۳	۲۰۶۲	۳۱۶۶۲۲۵	۳۷۳۱۶	۴۰۲۱۹۶۰	۴۰۲۱	۱۲۷۵۲۳۵۸
۱۳۹۸	۱۱۶۹	۵۵۱۱۸۸	۲۳۳۷	۲۹۹۲۲۸۵	۳۹۹۷۰	۴۱۰۸۸۳۷	۵۰۳۹	۹۸۴۱۹۱۷
۱۳۹۹	۱۲۹۳	۵۵۶۹۱۵	۳۰۰۱	۴۷۸۱۹۳۴	۴۲۱۴۵	۴۰۸۲۰۲۰	۴۴۹۵	۶۵۵۴۴۵۷
۱۴۰۰	۱۲۹۶	۶۲۵۶۲۱	۲۴۵۳	۳۰۹۷۵۵۶	۴۴۴۳۷	۴۲۰۷۲۵۵	۵۲۹۷	۸۴۲۷۹۵۴

جدول ۴- جمعیت شهری استان کرمان

سال	جمعیت شهری	سال	جمعیت شهری
۱۳۵۵	۳۵۰۸۰۶	۱۳۸۵	۱۵۵۲۵۲۱
۱۳۶۵	۶۹۸۷۵۵	۱۳۹۰	۱۶۸۹۸۴۲
۱۳۷۵	۱۰۶۰۰۷۵	۱۳۹۵	۱۸۵۸۵۸۷



شکل ۳- مقایسه حجم آب‌های زیرزمینی و حجم فروش آب از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۳۰

۲- مدل‌سازی نمودار حلقه‌های علت و معلولی

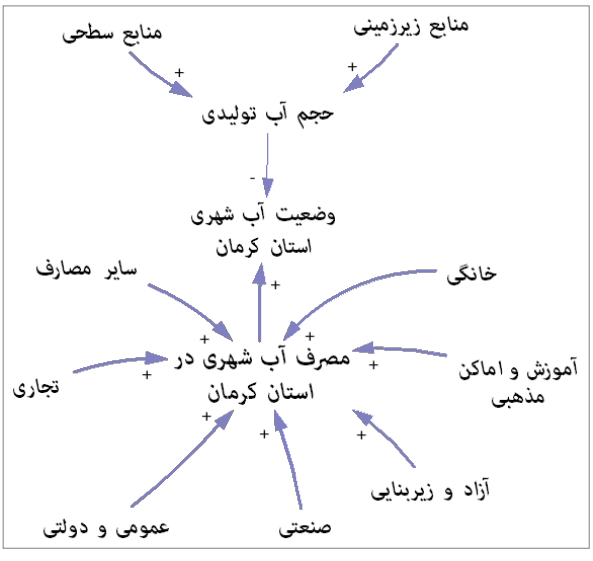
متغیرهای مدل در «قسمت۱: تعریف مسئله» معرفی شد. روابط بین متغیرها و نمودار حلقه‌های علت و معلولی مدل در شکل (۴) نمایش داده شده است.

در شکل (۴) عوامل دیگری ازجمله شرایط اقلیمی مانند شرایط آب‌وهوایی، بارش‌ها و دما؛ عوامل مرتبط با خاک مانند جنس خاک، نوع خاک و توانایی در جذب و نگهداری آب؛ عوامل انسانی مانند

جمعیت، بهره‌برداری از منابع آب، حفر چاه‌ها، تخریب منابع طبیعی، آلودگی و تغییر کاربری اراضی؛ و ساختار زمین مانند تراوایی سنگ‌ها و لایه‌های زمین نیز تأثیرگذار هستند. به دلیل اینکه تمرکز این مطالعه بر مدیریت مصرف آب است و همچنین به دلیل نداشتن آمار دقیق از این عوامل، روشن نبودن رابطه ریاضی بین آن‌ها، در دسترس بودن آمار دقیق مرتبط با میزان آب‌های سطحی و جاری و عدم نیاز به فرمول‌بندی این متغیرها، این عوامل در مدل لحاظ نشده است.

۳- مدل‌سازی پویا

در این مرحله برای مدل‌سازی، نوع متغیرها و روابط ریاضی آن‌ها مشخص می‌شود (جدول ۵)، سپس نمودار حالت و جریان مصرف آب شهری کرمان به‌دست می‌آید (شکل ۵) و شبیه‌سازی از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ صورت می‌گیرد.



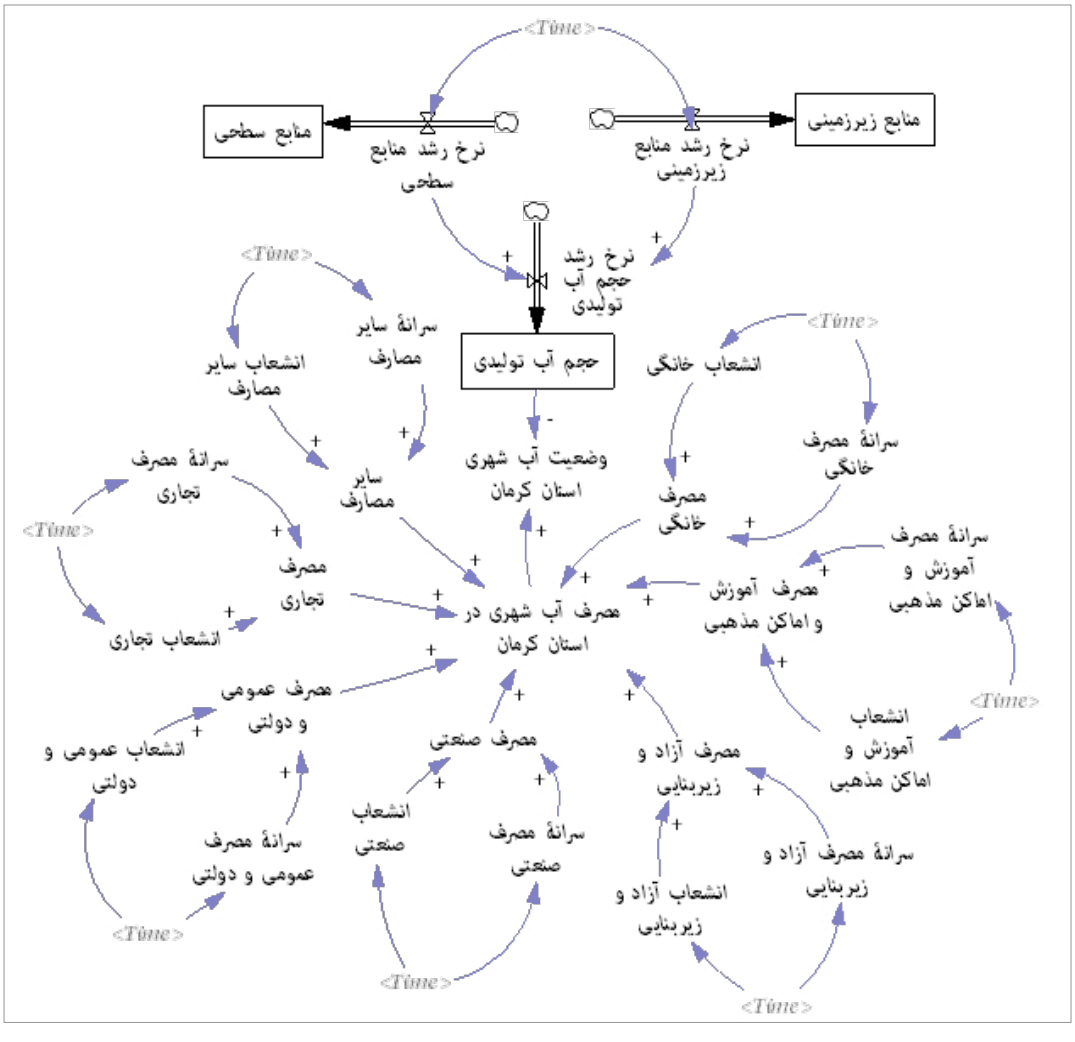
شکل ۴- نمودار حلقه‌های علت و معلولی وضعیت (بحرانی) آب شهری استان کرمان

جدول ۵- نوع و روابط متغیرهای مدل شبیه‌سازی شده

متغیر	نوع	رابطه ریاضی
منابع آب سطحی	حالت	INTEG (نرخ رشد منابع آب سطحی); Initial Value=1.72e+06
نرخ رشد منابع آب سطحی	جریان	With Lookup (بر اساس جدول ۲)
منابع آب زیرزمینی	حالت	INTEG (نرخ رشد منابع آب زیرزمینی); Initial Value=1.66323e+08
نرخ رشد منابع آب زیرزمینی	جریان	With Lookup (بر اساس جدول ۲)
حجم آب تولیدی	حالت	INTEG (نرخ رشد حجم آب تولیدی); Initial Value=1.68043e+08
نرخ رشد حجم آب تولیدی	جریان	نرخ رشد منابع آب سطحی+نرخ رشد منابع آب زیرزمینی
مصرف خانگی	کمکی	مصرف خانگی×انشعاب خانگی
انشعاب خانگی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۳)
سرانه مصرف خانگی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۳)
مصرف آموزشی و اماکن مذهبی	کمکی	سرانهٔ مصرف آموزشی و اماکن مذهبی×انشعاب آموزشی و اماکن مذهبی
انشعاب آموزشی و اماکن مذهبی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۳)
سرانه مصرف آموزشی و اماکن مذهبی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۳)
مصرف آزاد و زیربنایی	کمکی	سرانهٔ مصرف آزاد و زیربنایی×انشعاب آزاد و زیربنایی
انشعاب آزاد و زیربنایی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۳)
سرانه مصرف آزاد و زیربنایی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۳)
مصرف صنعتی	کمکی	سرانهٔ مصرف صنعتی×انشعاب صنعتی
انشعاب صنعتی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
سرانه مصرف صنعتی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
مصرف عمومی و دولتی	کمکی	سرانهٔ مصرف عمومی و دولتی×انشعاب عمومی و دولتی
انشعاب عمومی و دولتی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
سرانه مصرف عمومی و دولتی	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
مصرف تجاری	کمکی	سرانهٔ مصرف تجاری×انشعاب تجاری
انشعاب تجاری	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
سرانه مصرف تجاری	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)

متغیر	نوع	رابطه ریاضی
سایر مصارف	کمکی	سرانهٔ سایر مصارف×انشعاب سایر مصارف
انشعاب سایر مصارف	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
سرانه سایر مصارف	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۴)
مصرف آب شهری استان کرمان	کمکی	مصرف خانگی+مصرف آموزشی و اماکن مذهبی+مصرف آزاد و زیربنایی+مصرف صنعتی+مصرف عمومی و دولتی+مصرف تجاری+سایر مصارف
وضعیت آب شهری استان کرمان	کمکی	حجم آب تولیدی- مصرف آب شهری استان کرمان

* سرانه مصرف (خانگی، صنعتی و...) با تقسیم مصرف (خانگی، صنعتی و...) بر تعداد انشعاب مربوط به آن با استفاده از داده‌های جداول (۲) و (۳) به‌دست آمده است.



شکل ۵- نمودار حالت و جریان وضعیت (بحرانی) آب شهری استان کرمان

نتایج شبیه‌سازی در شکل (۶) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد وضعیت آب شهری کرمان که از اختلاف میان حجم فروش آب و حجم آب تولید شده به‌دست می‌آید، بین ۳۹ میلیون مترمکعب تا ۶۱ میلیون مترمکعب متغیر بوده است. همچنین با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از نمودار حالت و جریان با داده‌های اولیه در جداول (۲) و (۳)، صحت مدل‌سازی در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰مشخص می‌شود. به‌عنوان نمونه مصرف خانگی در سال ۱۳۹۲ برابر با ۹۱۸۸۳۲۴۶ مترمکعب بود (جدول ۳) که خروجی مدل نیز برابر با همین مقدار (9.18834e+07) است (شکل ۶).

Time (Year)	1390	1391	1392	1393
حجم آب تولیدی : وضعیت کنونی	1.68043e+08	1.61982e+08	1.61982e+08	1.64843e+08
سایر مصارف : وضعیت کنونی	1.32237e+07	1.53038e+07	1.75224e+07	1.67999e+07
مصرف آب شهری در استان کرمان : وضعیت کنونی	1.08751e+08	1.15241e+08	1.21927e+08	1.25415e+08
مصرف آزاد و زیربنایی : وضعیت کنونی	3.63128e+06	4.15031e+06	4.70257e+06	4.61331e+06
مصرف آموزش و اماکن مذهبی : وضعیت کنونی	1.27316e+06	1.36941e+06	1.46914e+06	1.61747e+06
مصرف تجاری : وضعیت کنونی	3.32299e+06	3.48289e+06	3.64406e+06	3.6859e+06
مصرف خانگی : وضعیت کنونی	8.54248e+07	8.86601e+07	9.18834e+07	9.63283e+07
مصرف صنعتی : وضعیت کنونی	369000	420923	476261	457015
مصرف عمومی و دولتی : وضعیت کنونی	1.50588e+06	1.85351e+06	2.22956e+06	1.91313e+06
منابع زیرزمینی : وضعیت کنونی	1.66323e+08	1.60432e+08	1.60432e+08	1.63722e+08
منابع سطحی : وضعیت کنونی	1.72e+06	1.55e+06	1.55e+06	1.121e+06
وضعیت آب شهری استان کرمان : وضعیت کنونی	5.92922e+07	4.67411e+07	4.00547e+07	3.94279e+07
Time (Year)	1394	1395	1396	1397
حجم آب تولیدی : وضعیت کنونی	1.70944e+08	1.79499e+08	1.78926e+08	1.79135e+08
سایر مصارف : وضعیت کنونی	1.76162e+07	1.27644e+07	1.3317e+07	1.27524e+07
مصرف آب شهری در استان کرمان : وضعیت کنونی	1.28701e+08	1.33357e+08	1.29051e+08	1.29159e+08
مصرف آزاد و زیربنایی : وضعیت کنونی	5.1965e+06	5.31212e+06	4.21071e+06	4.31153e+06
مصرف آموزش و اماکن مذهبی : وضعیت کنونی	1.64268e+06	5.00884e+06	5.01817e+06	4.32336e+06
مصرف تجاری : وضعیت کنونی	3.83425e+06	4.48305e+06	4.3558e+06	4.02196e+06
مصرف خانگی : وضعیت کنونی	9.79113e+07	1.0223e+08	9.84744e+07	1.00059e+08
مصرف صنعتی : وضعیت کنونی	509036	541316	548569	524723
مصرف عمومی و دولتی : وضعیت کنونی	1.99101e+06	3.0174e+06	3.12667e+06	3.16622e+06
منابع زیرزمینی : وضعیت کنونی	1.65229e+08	1.73651e+08	1.57654e+08	1.59461e+08
منابع سطحی : وضعیت کنونی	5.715e+06	5.848e+06	2.1272e+07	1.9674e+07
وضعیت آب شهری استان کرمان : وضعیت کنونی	4.22433e+07	4.61422e+07	4.98747e+07	4.99756e+07
Time (Year)	1398	1399	1400	
حجم آب تولیدی : وضعیت کنونی	1.80589e+08	2.00475e+08	2.00478e+08	
سایر مصارف : وضعیت کنونی	9.84192e+06	6.55447e+06	8.42795e+06	
مصرف آب شهری در استان کرمان : وضعیت کنونی	1.30744e+08	1.39197e+08	1.40191e+08	
مصرف آزاد و زیربنایی : وضعیت کنونی	3.78248e+06	3.83565e+06	3.41036e+06	
مصرف آموزش و اماکن مذهبی : وضعیت کنونی	3.53005e+06	2.92314e+06	3.079e+06	
مصرف تجاری : وضعیت کنونی	4.10884e+06	4.08202e+06	4.20726e+06	
مصرف خانگی : وضعیت کنونی	1.05938e+08	1.16463e+08	1.17343e+08	
مصرف صنعتی : وضعیت کنونی	551188	556915	625621	
مصرف عمومی و دولتی : وضعیت کنونی	2.99229e+06	4.78194e+06	3.09755e+06	
منابع زیرزمینی : وضعیت کنونی	1.68633e+08	1.79543e+08	1.851e+08	
منابع سطحی : وضعیت کنونی	1.19561e+07	2.09326e+07	1.5378e+07	
وضعیت آب شهری استان کرمان : وضعیت کنونی	4.98446e+07	6.12785e+07	6.02868e+07	

شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی نمودار حالت و جریان در نرم‌افزار Vensim PLE+

۴- برنامه‌ریزی و مدل‌سازی سناریو

در این مرحله، سیاست‌های کنترل مصرف آب شهری جهت بهبود وضعیت آب، از دو جنبه عرضه و تقاضا تدوین می‌شود، این سیاست‌ها با همکاری دولت و شرکت‌های آب قابل اجرا است.

۱) جداسازی آب شرب از آب غیرشرب: جدا کردن آب شرب از آب‌های غیرشرب مانند پساب‌ها در مدیریت منابع آب مؤثر است. واگذاری انشعاب دوم به هر مشترك می‌تواند به میزان ۲۴ لیتر در روز (۸/۷۶ مترمکعب در سال) به‌ازای هر نفر صرفه‌جویی ایجاد کند (فتوحی فیروزآباد و همکاران،۱۳۹۸). برای پیاده‌سازی سیاست جداسازی آب شرب از آب غیرشرب، می‌توان مراحل زیر را دنبال کرد:

• **تدوین قوانین و مقررات:**
- تشکیل یک کمیته متخصص برای تدوین قوانین و مقررات مرتبط با جداسازی آب‌ها.
- تعیین استاندارد برای آب‌های شرب و غیرشرب.
• **تقسیم‌بندی شبکه آب‌رسانی:**
- تعیین مناطق مختلف شهر بر اساس نیاز به آب شرب و آب‌های غیرشرب.
- نصب سیستم‌های جداسازی در نقاط انتقال آب.
• **آموزش و آگاهی‌بخشی:**
- آموزش به شهروندان در مورد اهمیت جداسازی آب‌ها و تأثیر آن بر کیفیت آب مصرفی.
- ترویج رفتارهای صحیح در استفاده از آب‌ها.
• **نظارت و اجرا:**
- نظارت بر اجرای قوانین و مقررات.
- تعیین مسئولیت‌ها برای اجرای جداسازی آب‌ها در شبکه‌های آب‌رسانی.

در خصوص این سیاست باید توجه داشت که اگر جداسازی آب شرب از غیرشرب از ابتدای اجرای شبکه آب شهری صورت می‌گرفت سیاست بسیار مناسبی بود، ولی در شرایط کنونی اجرای آن هزینه‌بر و مشکل می‌باشد.

۲) مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی: کاهش میزان تلفات در شبکه توزیع آب شهری یکی از رویکردهای اصلی شرکت‌های آب‌وفاضلاب برای عبور از بحران کم‌آبی، تخصیص بهینه آب و افزایش درآمد ناشی از فروش آن محسوب می‌شود. برای‌این‌منظور، یک راهکار عملی، مدیریت فشار از طریق تنظیم شیرهای فشارشکن مطابق با الگوی مصرف روزانه در منطقه می‌باشد. این رویکرد منجر به کاهش ۴/۲ درصد در مصرف روزانه آب می‌شود (جمشیدی، ۱۳۹۳). برای پیاده‌سازی سیاست‌های مدیریت تلفات در شبکهٔ آب‌رسانی و کاهش مصرف آب شهری، می‌توان اقدامات زیر را انجام داد:

• مدیریت فشار در شبکهٔ توزیع آب را با شیرهای فشارشکن مطابق با الگوی مصرف روزانه در منطقه، تنظیم کرد.
• تعمیر و نگهداری منظم شبکهٔ آب‌رسانی، کشف و رفع تسریب‌ها و خرابی‌ها را تسهیل می‌کند و باعث کاهش تلفات آب می‌شود.
• استفاده از فناوری‌های هوشمند مانند نصب سنسورها و دستگاه‌های هوشمند، برای تشخیص تسریب‌ها و مدیریت بهینه تلفات آب، مفید است.
• آموزش و افزایش آگاهی مردم در مورد صرفه‌جویی در مصرف آب و رفتارهای مسئولانه به کاهش تلفات کمک کند.

۳) کنترل الگوی مصارف خانگی: ارتقای آگاهی شهروندان در مورد مصرف آب و ترویج رفتارهای صحیح در استفاده از آب منجر به حداقل ۳ درصد صرفه‌جویی می‌شود (Moosavirad و همکاران، ۲۰۲۴). اجرای این سیاست می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

• آموزش و افزایش آگاهی مردم در مورد صرفه‌جویی در مصرف آب مانند آموزش در مدارس، کمپین‌های تبلیغاتی و اطلاع‌رسانی مستقیم به مردم.
• تعیین نرخ آب بر اساس مصرف به‌گونه‌ای که مصرف بیشتر باعث پرداخت هزینه‌های بیشتر می‌شود.

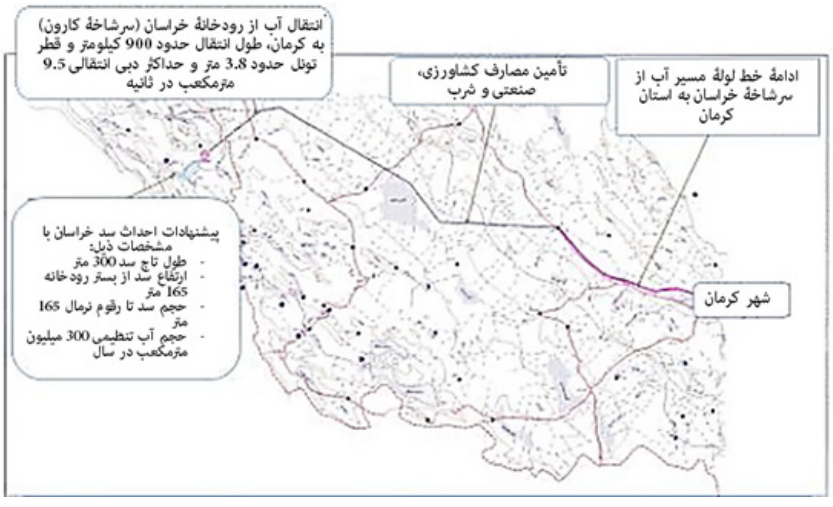
۴) کنترل قیمت یارانه‌ای آب: سیاست کنترل قیمت یارانه‌ای آب، به‌منظور حفظ و مدیریت منابع آب و صرفه‌جویی در مصرف آب اجرا می‌شود. تنظیم قیمت‌ها باید به‌نحوی باشد که مصرف‌های غیرضروری مشمول قیمت یارانه‌ای نشود. افزایش قیمت دو مرحله‌ای به میزان ۳۰ درصد، مصرف آب را ۳/۷ درصد کاهش می‌دهد (Agarwal و همکاران، ۲۰۲۳). این سیاست می‌تواند به چند نحو منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب شوند:

• تغییر الگوی کشت و ترغیب کشاورزان به کشت محصولاتی با مصرف آب کمتر.
• افزایش بازده ناخالص کشاورزی.
• تعادل مصرف آب در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت و خانگی (الهی و همکاران، ۱۴۰۰).

۵) تغذیه مصنوعی آبخوان‌های دشت کرمان: تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها یک روش مؤثر برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی است. در این روش، آب سطحی یا سیلاب به آبخوان‌ها منتقل می‌شود تا حجم آب زیرزمینی را افزایش دهد.

براساس آخرین مطالعات طرح جامع آب کشور، بیلان منفی مجموع آبخوان‌های فلات مرکزی ایران، حدود ۵/۳ میلیارد مترمکعب در سال است. مجموع آب سطحی خروجی از کشور (عمدتاً به خلیج فارس، دریای عمان، دریای مازندران و از رودخانه‌های سیروان گرمسیری از غرب کشور به کشور عراق) معادل ۳۳ میلیارد مترمکعب در سال‌های نرمال و ۱۶ میلیارد مترمکعب در سال‌های خشک می‌باشد. حدود ۱۰ میلیارد از ۳۳ میلیارد مترمکعب آب خروجی از کشور در سال‌های نرمال از طریق رودخانه کارون به خلیج فارس می‌ریزد. بهره‌گیری از منابع آب سطحی خارج شده از کشور و تغذیه مصنوعی آبخوان‌های فلات مرکزی از جمله آبخوان دشت کرمان می‌تواند راهکار مناسبی باشد. مناسب‌ترین منبع آب سطحی مازاد بر مصارف که می‌توان از آن برای تغذیه آبخوان‌ها بهره‌گیری نمود، از منابع آب مازاد بر مصرف در سرشاخه‌های کارون شامل سرشاخه‌های رودخانه خرسان است. در این پژوهش فرض می‌شود ۵ میلیون مترمکعب در سال از آب اضافی به کرمان منتقل شود. یک نمونه از نحوه انتقال آب از رودخانهٔ خرسان به کرمان در شکل (۷) نشان داده شده است.

در ادامه برای آزمایش سیاست‌های معرفی‌شده، متغیرها و روابط ریاضی آن‌ها تعیین می‌شود (جدول ۶) و نمودار حالت و جریان جدید با اعمال سیاست‌ها به‌دست می‌آید (شکل ۸). نتایج شبیه‌سازی در شکل (۹) تا شکل (۱۱) نمایش داده شده است.

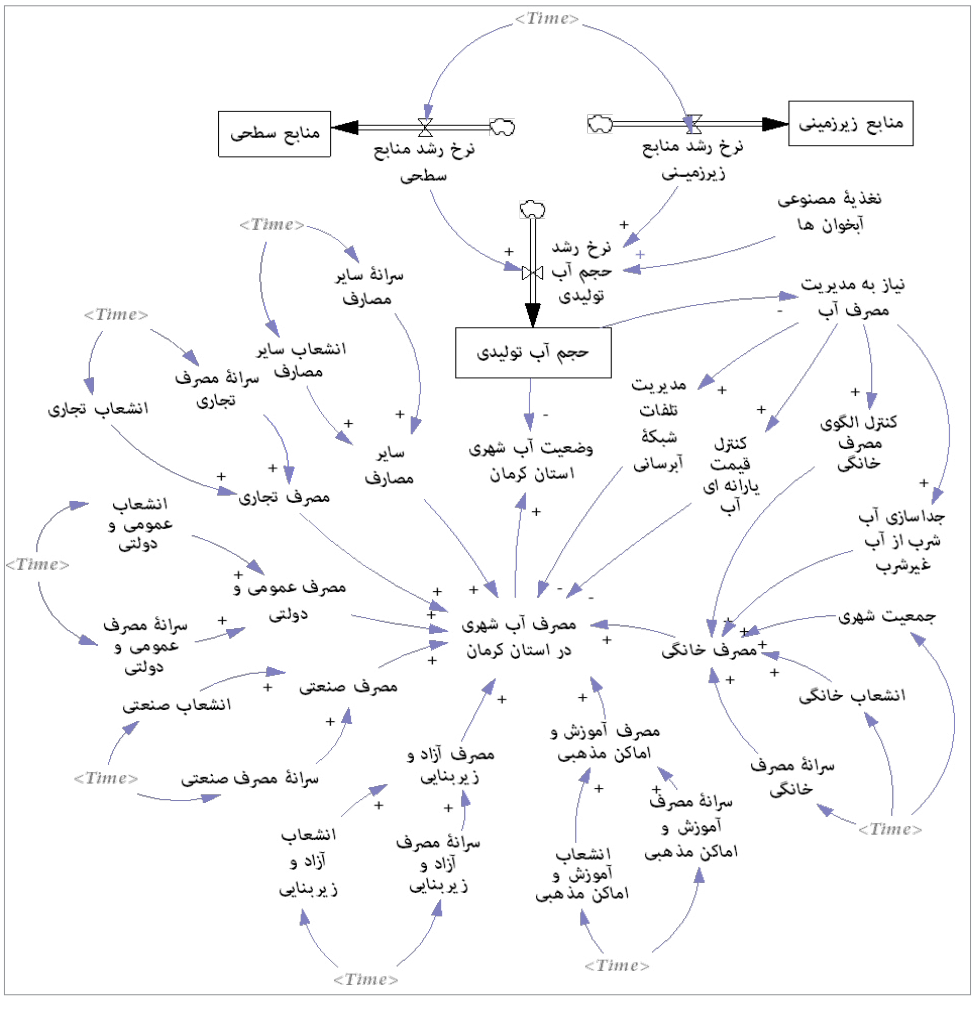


شکل ۷- یک مثال از انتقال آب از رودخانه خرسان به کرمان

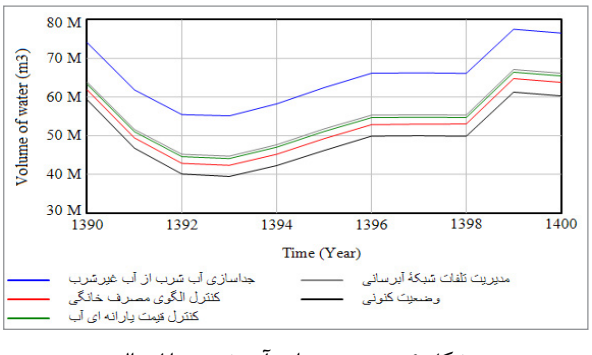
جدول ۶- نوع و روابط متغیرها در نمودار حالت و جریان با اعمال سیاست‌ها

متغیر	نوع	رابطهٔ ریاضی
تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها	کمکی	۵۰۰۰۰۰۰ [مقدار ثابت]
نیاز به مدیریت مصرف آب	کمکی	IF THEN ELSE (حجم آب تولیدی>=1 , 0 ,3e+09)
جداسازی آب شرب از آب غیرشرب	کمکی	IF THEN ELSE(نیاز به مدیریت مصرف آب=0 ,0 , 8.76)
جمعیت شهری	کمکی	With Lookup (بر اساس جدول ۵)
کنترل الگوی مصارف خانگی	کمکی	IF THEN ELSE(نیاز به مدیریت مصرف آب=0 ,0 , 0.03)
مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی	کمکی	IF THEN ELSE(نیاز به مدیریت مصرف آب=0 ,0 , 0.042)
کنترل قیمت یارانه‌ای آب	کمکی	IF THEN ELSE(نیاز به مدیریت مصرف آب=0 ,0 , 0.037)
مصرف خانگی	کمکی	((سرانهٔ مصرف خانگی×انشعاب خانگی) - (جمعیت شهری×جداسازی آب شرب از آب غیرشرب)) × (۱- کنترل الگوی مصارف خانگی)
مصرف آب شهری استان کرمان	کمکی	(مصرف خانگی+مصرف آموزشی و اماکن مذهبی+مصرف آزاد و زیربنایی+مصرف صنعتی+مصرف عمومی و دولتی+مصرف تجاری+سایر مصارف) × (۱-مدیریت تلفات شبکهٔ آب‌رسانی) × (۱-کنترل قیمت یارانه‌ای آب)

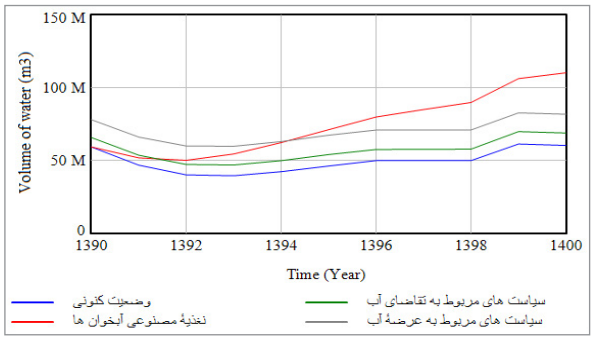
در شکل (۹) تا شکل (۱۱)، محور Y وضعیت مقادیر آب شهری استان کرمان بر حسب میلیون مترمکعب است و بر خلاف محور X که محدوده آن از سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ برای نرم‌افزار تعیین شده است، محدودهٔ خاصی ندارد و نرم‌افزار بر اساس خروجی مدل آن را از صفر تا مقداری بیش از حداکثر خروجی مدل تعیین می‌کند.
در شکل (۹) مقایسه سناریوها به جز تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و وضعیت کنونی مشاهده می‌شود. «جداسازی آب شرب از غیرشرب» بیشترین میزان حفظ منابع آبی را می‌تواند داشته باشد به‌گونه‌ای که در سال ۱۳۹۹، وضعیت منابع آبی استان می‌توانست تا حداکثر حدود ۷۷ میلیون مترمکعب در سال باشد. سایر سناریوها به‌ترتیب اثرگذاری عبارتند از «مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی»، «کنترل قیمت یارانه‌ای آب» و «کنترل الگوی مصرف خانگی» که اختلاف زیادی نسبت به یکدیگر ندارند.
در شکل (۱۰) سناریوهای «جداسازی آب شرب از غیرشرب» و «مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی» در قالب «سیاست‌های مربوط به عرضه آب»، سناریوهای «کنترل قیمت یارانه‌ای آب» و «کنترل الگوی مصرف خانگی» در قالب «سیاست‌های مربوط به تقاضای آب» و «سناریوی تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها» مقایسه شدند. سناریوها به‌ترتیب اثرگذاری عبارتند از «تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها»، «سیاست‌های مربوط به عرضه آب» و «سیاست‌های مربوط به تقاضای آب». «تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها» اثرگذاری بسیاری بالایی دارد به‌گونه‌ای که از سال ۱۳۹۸ به بعد، می‌توانست وضعیت منابع آبی استان را به بیش ۱۰۰ میلیون مترمکعب برساند.
در شکل (۱۱) نیز اجرای هم‌زمان همه سناریوها با وضعیت کنونی مقایسه شده است. اعمال همه سیاست‌ها در کمترین حالت در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ می‌توانست وضعیت منابع آبی را به حدود ۷۵ میلیون مترمکعب برساند.



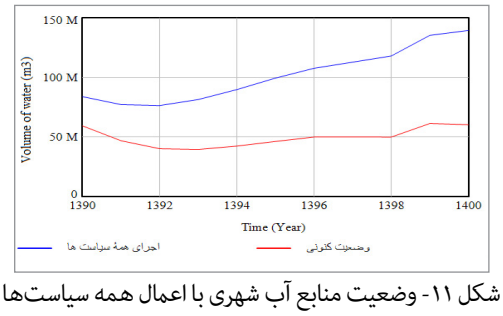
شکل ۸- نمودار حالت و جریان با اعمال سیاست‌ها



شکل ۹- وضعیت منابع آب شهری با اعمال سیاست‌های چهارگانه به تنهایی



شکل ۱۰- وضعیت منابع آب شهری با اعمال سیاست‌های مربوط به عرضا و تقاضا و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها



شکل ۱۱- وضعیت منابع آب شهری با اعمال همه سیاست‌ها

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی مصرف آب شهری در استان کرمان با استفاده از روش پویایی سیستم و همچنین بررسی و آزمایش سیاست‌های مدیریت منابع آب بود. اقلیم خشک استان کرمان و اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی، استان کرمان را با تهدیداتی مواجه کرده است مانند عدم امکان تأمین آب شرب، نشست زمین، عدم امکان استفاده از ظرفیت معادن، از دست رفتن تخلخل زمین، مهاجرت از مناطق روستایی به شهری و از استان کرمان به استان‌های شمالی. در این پژوهش، در قسمت (۱)، موضوع و اهمیت پژوهش بیان شد و مروری بر سایر پژوهش‌ها انجام گرفت؛ در قسمت (۲)، منطقه مورد مطالعه معرفی و روش پویایی سیستم بیان شد؛ و در قسمت (۳)، مدل‌سازی و یافته‌های حاصل از آن ارائه شد.

در بخش مدل‌سازی پژوهش، ابتدا مدلی از وضعیت موجود آب شهری استان شبیه‌سازی شد. نتایج آن نشان داد حجم منابع آب شهری استان کرمان که از اختلاف حجم میان فروش آب و حجم آب تولید شده به‌دست می‌آید، در سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰، بین ۳۹ میلیون مترمکعب تا ۶۱ میلیون مترمکعب متغیر بوده است. لازم‌به‌ذکر است این حجم از آب به دلایلی همچون محدودیت حجم مخازن در مدار و تصفیه‌خانه‌ها به طور کامل در دسترس نیست و برای تأمین آب شهری مشکل وجود دارد.

در ادامه سیاست‌های مدیریت مصرف آب از دو جنبه عرضه و تقاضا بررسی شد. سیاست‌ها به‌ترتیب اثرگذاری عبارت بودند از: «تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها» از سرشاخه‌های کارون شامل سرشاخه‌های رودخانه خرسان با تغذیه ۵ میلیون مترمکعب در سال، «جداسازی آب شرب از آب غیرشرب» با صرفه‌جویی ۸/۷۶ مترمکعب در سال، «مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی» با صرفه‌جویی ۴/۲ درصد در سال، «کنترل قیمت یارانه‌ای آب» با صرفه‌جویی ۳/۷ درصد در سال و «کنترل الگوی مصارف خانگی» با صرفه‌جویی ۳ درصد در سال. خلاصه‌ای از نتایج مدل‌سازی و مزایا و چالش‌های هر سیاست در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد بهترین سیاست یعنی تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها اثرگذاری بسیاری بالایی دارد به‌گونه‌ای که پیش‌بینی می‌شود از سال ۱۳۹۸ به بعد، این سیاست می‌توانست وضعیت منابع آبی استان را به بیش ۱۰۰ میلیون مترمکعب برساند. همچنین حالت دیگری از اجرای سیاست‌ها شبیه‌سازی شد. «جداسازی آب شرب از آب غیرشرب» و «مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی» در قالب «سیاست‌های مربوط عرضه آب» و سناریوهای «کنترل قیمت یارانه‌ای آب» و «کنترل الگوی مصرف خانگی» در قالب «سیاست‌های مربوط تقاضای آب» که سیاست‌های عرضهٔ آب اثرگذارتر است. لازم است سیاست‌ها و راهکارها به‌خصوص سیاست‌های فرهنگی و کنترل قیمت، در مراحل ابتدایی به میزان کمتری اعمال شود تا جامعه آمادگی پذیرش آن را داشته باشد و به مرور زمان، حجم بیشتری از سیاست‌ها اعمال شود. همچنین مطلوب‌ترین حالت، اجرای همه سیاست‌ها است که نیازمند طراحی برنامه راهبردی بلندمدت، تخصیص بودجه، پیش‌بینی زیرساخت‌های لازم و مدیریت صحیح است که منابع پایدار آب برای استان کرمان را تضمین کند.

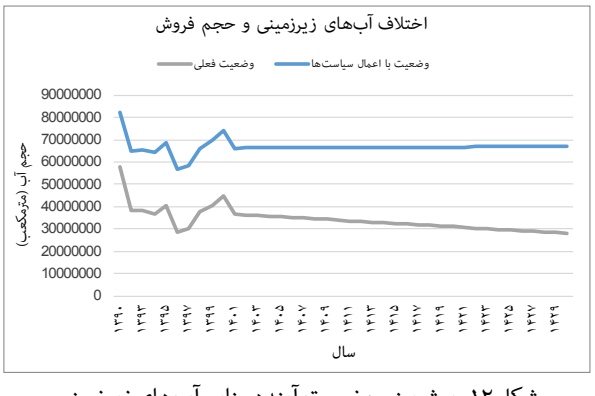
جدول ۷- خلاصه‌ای از نتایج مدل‌سازی

سناریو	کمترین مقدار آب در دسترس (مترمکعب)	بیشترین مقدار آب در دسترس (مترمکعب)	مزایا	چالش‌ها
اجرای همه سیاست‌ها	۷۶۴۰۳۸۰۰	۱۳۹۵۹۹۰۰۰	• تأمین آب پایدار	• زمان‌بر و هزینه‌بر بودن
تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها	۵۰۰۵۴۷۰۰	۱۱۰۲۸۷۰۰۰	• تأمین آب پایدار • مقابله با کاهش سطح آب و جلوگیری از فرونشست زمین • بهبود کیفیت آب تحت فیلتراسیون طبیعی • حوضه‌های تغذیه و تالاب‌های ایجادشده به‌عنوان زیستگاه حیات وحش عمل می‌کنند و سلامت اکوسیستم افزایش می‌یابد.	• هزینه‌های زیرساخت بالا • مشکل کیفیت آب به دلیل وجود آلاینده‌ها در صورت عدم مدیریت صحیح • عدم مناسب‌بودن برخی زمین‌ها برای تغذیه مصنوعی • خطر استخراج بیش از حد • خطرات لرزه‌ای در مناطق زلزله‌خیز
سیاست‌های مربوط به عرضهٔ آب	۵۹۷۲۶۴۰۰	۸۲۷۲۲۲۰۰	• مجموع مزایا جداسازی آب شرب از غیرشرب و مدیریت تلفات شبکهٔ آب‌رسانی	• مجموع چالش‌های جداسازی آب شرب از غیرشرب و مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی
سیاست‌های مربوط به تقاضای آب	۴۶۸۵۱۲۰۰	۶۹۷۹۳۴۰۰	• مجموع مزایای کنترل قیمت یارانه‌ای آب و کنترل الگوی مصرف خانگی	• مجموع چالش‌های کنترل قیمت یارانه‌ای آب و کنترل الگوی مصرف خانگی

سناریو	کمترین مقدار آب در دسترس (مترمکعب)	بیشترین مقدار آب در دسترس (مترمکعب)	مزایا	چالش‌ها
جداسازی آب شرب از غیرشرب	۵۵۱۱۷۹۰۰	۷۷۵۵۹۸۰۰	• دسترسی به آب سالم • حفاظت از سلامت با کاهش آلاینده‌ها • کنترل کیفیت • سفارشی‌سازی برای استفاده‌های خاص	• افزایش مصرف انرژی در روش‌های پیشرفته تصفیه • هزینهٔ بالا • اثرات محیط‌زیستی مانند نمک‌زدایی گازهایی که گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌کند • مشکل تخصیص منابع
مدیریت تلفات شبکه آب‌رسانی	۴۴۶۹۵۴۰۰	۶۷۱۲۴۸۰۰	• افزایش درآمد شرکت آب • صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی به دلیل توزیع کارآمد آب • افزایش قابلیت اطمینان و تداوم خدمات • کاهش مصرف انرژی	• هزینه‌های زیرساخت و سرمایه گذاری • پیچیدگی در مدل‌سازی و مدیریت دقیق شبکه‌ها با نشتی بالا • نیاز به دقت داده‌های مربوط به تجزیه‌وتحلیل نشت و سیاست‌گذاری • سنجیدن هزینه‌ها در برابر منافع
کنترل قیمت یارانه‌ای آب	۴۴۰۶۸۳۰۰	۶۶۴۲۸۸۰۰	• مقرون‌به‌صرفه بودن برای خانوارهای کم‌درآمد • رفع نابرابری • رفاه اجتماعی با ارتقای سلامت، بهداشت و رفاه عمومی • حفاظت از محیط‌زیست با استفاده بهینه از آب	• محدودیت‌های بودجه در دولت • انحرافات بازار و تخصیص ناکارآمد منابع • پیچیدگی اداری در اجرا و مدیریت برنامه‌های یارانه • دقت در هدف‌گذاری
کنترل الگوی مصرف خانگی	۴۲۳۱۷۸۰۰	۶۴۷۷۲۴۰۰	• حفاظت از منابع با کاهش هدر رفت • زندگی پایدار با تشویق به مصرف آگاهانه • ارتقای سلامت و بهداشت • هدفمند کردن معیار مصرف آب	• نیاز به آگاهی عمومی، آموزش و اصلاح رفتار در جامعه • در نظر گرفتن نیازهای متنوع، عوامل اجتماعی-اقتصادی‌وجمعیت‌های‌آسیب‌پذیردرسیاست‌گذاری • انطباق زیرساخت • متعادل کردن محدودیت‌ها

در این پژوهش نشان داده شد با مدل‌سازی یک سیستم پیچیده مانند مصرف آب شهری، درک مدل، شناسایی نقاط بحرانی و آزمایش سیاست‌ها و راهکارها ساده می‌شود و پویایی سیستم یک ابزار مفید مدیریتی برای تصمیم‌گیران است. در ادامه در شکل (۱۲) پیش‌بینی از وضعیت فعلی آب‌های زیرزمینی و حجم فروش تا سال ۱۴۳۰ با استفاده از نرم‌افزار Excel ارائه شده است و همچنین وضعیت افت آب‌های زیرزمینی در صورت اعمال سیاست‌ها با آن مقایسه شده است. باتوجه‌به نتایج اختلاف میزان آب‌های زیرزمینی و حجم فروش با ادامه روند کنونی، در سال ۱۴۳۰ به کمتر از ۳۰ میلیون مترمکعب می‌رسد که با اعمال سیاست‌های پیشنهادی این پژوهش مقدار آن بیش از ۶۷ میلیون مترمکعب خواهد بود.

شکل (۱۲) امکان برآورد نحوه افت ذخیره آبخوان، پیش‌بینی شرایط آینده ذخیره آبخوان برای دهه‌های آتی، اثر آن بر شرایط سطح زیر کشت، ادامه نشست زمین و همچنین اثر آن بر معیشت مردم را فراهم می‌سازد. این اطلاعات می‌تواند راهکاری برای برنامه‌ریزی آینده مناطق مسکونی و شرایط زندگی در استان کرمان و استان‌های مجاور باشد.



شکل ۱۲- پیش‌بینی وضعیت آینده منابع آب‌های زیرزمینی

در انتها، نکات و مواردی برای آگاهی بیشتر پژوهشگران و سیاست‌گذاران و همچنین جهت به‌کارگیری در پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود:

۱) یکی از راهکارهای مدیریت پایدار آبخوان‌ها، افزایش راندمان آبیاری در کشاورزی است. راندمان آبیاری در کشور ایران ۳۰ تا ۵۰ درصد و راندمان آبیاری جهان ۷۵ تا ۹۲ درصد است.

۲) شرکت آب و فاضلاب می‌تواند پس از تصفیه آب شهری، آب تصفیه شده را به سفره‌های آب زیرزمینی تزریق و آبخوان‌ها را برای بهره‌برداری مصارف کشاورزی تغذیه مصنوعی کند.
۳) باتوجه‌به الگوی کشاورزی در استان کرمان، علاوه‌بر پسته، سایر محصولاتی درختی سازگار با کم‌آبی مانند زعفران، زرشک و گل محمدی، بهترین گزینه برای کشت هستند.
۴) مدل ارائه شده در این پژوهش را می‌توان برای یک دوره آماری شامل دوره‌های نرمال، خشک و مرطوب به کار گرفت تا مدیریت بهره‌برداری متناسب با آن شرایط طراحی و اجرا شود.
۵) برای هر یک از متغیرهای مدل پیشنهادی در این مقاله، مدلی با جزئیات بیشتر طراحی شود تا اطلاعات سودمندی در اختیار مدیران و سیاست‌گذاران قرار گیرد.
۶) عوامل مهمی ازجمله کنترل مهاجرت به شهرها، توسعه شهرها، افزایش درآمد، بهبود رفاه جامعه و... نیز برای بررسی سودمند است.

پی‌نوشت‌ها

1-System Dynamics (SD)
2-Design of Experiment (DOE)
3-Future Studies (FS)
4-Logit 5-Ebbsfleet
6-Decision Support System (DSS)
7-Geographic Information System (GIS)
8-Artificial neural network (ANN)
9-Positive mathematical programming (PMP)
10-Genetic algorithm (GA)
11-Spatial Planning (SP)
12-Machine Learning Models (MLM)
13-Causal Loop Diagram (CLD)
14-Stock and Flow Diagram (SFD)

منابع

الهی، مهدی، وکیل‌پور، محمدحسن، نجفی علمدارلو، حامد، و اسعدی، محمدعلی. (۱۴۰۰). بررسی اثرات سیاست‌های مالیاتی و یارانه‌ای در راستای حفظ و پایداری منابع آب دشت کبودرآهنگ. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۳(۳)، ۲۳۷-۲۵۲. https://sanad.iau.ir/Journal/jest/Article/833419

امینی، یاسر، علی‌پور، عباس، هاشمی، سید مصطفی، و باقری، سجاد. (۱۳۹۶). برآورد آب معادل برف در استان کرمان جهت مدیریت منابع آب با استفاده از داده‌های سنجش از دور مایکروویو غیرفعال به روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و تکنیک‌های رگرسیون چندگانه. فصلنامه اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۶(۱۰۲)، ۶۷-۸۰. https://doi.org/10.22131/sepehr.2017.27457

بنی‌اسدی، مصطفی، زارع مهرجردی، محمدرضا، مهرابی بشرآبادی، حسین، میرزایی خلیل‌آبادی، حمیدرضا، رضایی استخروئیه، عباس، و حسن‌وند، مریم. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات الگوی کشت و میزان استخراج منابع آب زیرزمینی با اعمال سیاست‌های کاهش مصرف آب در دشت ارزوئیه استان کرمان. اقتصاد کشاورزی، ۱۱(۳)، ۱۱۱-۱۲۹. https://doi.org/10.22034/iaes.2017.28112

بهادر، صادق. (۱۳۹۶). شبیه‌سازی بحران کمبود آب در شهر رفسنجان با استفاده از پویایی‌های سیستم. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/c90b443414b370c6301ffdecc416986d

پارسا، شیما، ضیاءآبادی، مریم، و زارع مهرجردی، محمدرضا. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر خشکسالی بر افت سطح آب‌های زیرزمینی و پیش‌بینی مقدار افت آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: شهرستان کرمان). اولین همایش بین‌المللی و سومین همایش ملی مدیریت پایدار منابع خاک و محیط‌زیست. دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. https://civilica.com/doc/808675

حلبیان، امیرحسین، و مجاوری، نسرین. (۱۳۹۵). بررسی افت آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و SURFER. کنفرانس ملی دیده‌بانی آینده زمین با محوریت آب‌وهوا، کشاورزی و محیط‌زیست. مرکز توسعهٔ آموزش‌های نوین ایران (متانا)، شیراز، ایران. https://civilica.com/doc/522411

جمشیدی، شروین. (۱۳۹۳). کاهش تلفات شبکه توزیع آب شهری با استفاده از مدیریت فشار. اولین کنفرانس بین المللی مهندسی محیط‌زیست. مرکز راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار. مؤسسه آموزش عالی مهر اروند، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/347572/

شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان. (۱۳۹۳). خلاصه وضعیت منابع آب استان، https://www.krrw.ir/old/SC.php?type=static&id=58. تاریخ به روزرسانی: ۱۳۹۹/۶/۲۱.

مرکز آمار ایران. (۱۴۰۰). سالنامه آماری استان کرمان. https://nnt.sci.org.ir/sites/Apps/yearbook/Lists/year_book_req/Item/newifs.aspx

سلطانی، سارا. (۱۴۰۰). ۶۰ درصد جمعیت استان کرمان در تنش آبی به سر می‌برند. خبرگزاری دانشجویان ایران (ایسنا). تهران، ایران. http://isna.ir/xdJmdg

شاهرخی ساردو، مهدی، و جلال کمالی، نوید. (۱۴۰۰). مدل پویایی سیستم مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و عملکرد تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی دشت نسا بم، کرمان). مجله پژوهش آب ایران، ۱۵(۲)، ۱۰۹-۱۱۸. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10772.html?lang=fa

عسکری‌نیا، محمدرضا. (۱۳۹۸). بررسی عوامل مؤثر بر پایداری منابع

آب: مطالعه موردی گندم‌کاران شهرستان فاریاب (استان کرمان). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/d5cc9003b7fde9c922e133029f3b586c

غفاریان بهرمان، محمد، و کرمی، تاج‌الدین. (۱۳۹۶). آینده‌پژوهی بحران آب و چالش‌های امنیتی آن (مورد مطالعه: شهرستان رفسنجان). فصلنامه دانش انتظامی کرمان، ۴۹-۸۰. http://kerman.jrl.police.ir/article_19667.html

فتوحی فیروزآباد، فرزانه، اختصاصی، محمدرضا، سفید، محمد، و مروتی شریف‌آبادی، علی. (۱۳۹۸). بررسی فنی و مقایسهٔ اقتصادی روش‌های جداسازی آب آشامیدنی از آب غیرآشامیدنی در شهرستان یزد (مطالعه نمونه‌ای: منطقه صفائیه یزد). مهندسی منابع آب، ۷۶-۸۶. https://wej.marvdasht.iau.ir/article_3921.html?lang=fa

فدایی، محمدرضا، و مهدوی، افسون. (۱۳۹۵). ارزیابی وضعیت منابع آب زیرزمینی و خشکسالی جنوب‌شرق کشور با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) (مطالعه موردی: استان کرمان). چهارمین کنفرانس علمی پژوهشی افق‌های نوین در علوم جغرافیا و برنامه‌ریزی معماری و شهرسازی ایران، تهران، ایران. https://civil-ica.com/doc/617304

Agarwal, S., Araral, E., Fan, M., Qin, Y., & Zheng, H. (2023). The effects of policy announcement, prices, and subsidies on water consumption. Nat Water, 1, 176–186. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4318217

Carbon, D. (2024). Linking water stress and measures of crisis management - A systematic review of emergency drinking water management in Germany. Journal of Environmental Management, 359. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120901

The Global Environment Facility (GEF). (2015). The importance of water sustainability. https://www.thegef.org/news/importance-water-sustainability. Update: 1/11/2024

Ghosh, A., & Bera, B. (2024). Identification of potential dam sites for severe water crisis management in semi-arid fluoride contaminated region, India. Cleaner Water, 1, 100011. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100011

Li, Q., Wang, W., Jiang, X., Lu, D., Zhang, Y., & Li, J. (2020). Analysis of the potential of reclaimed water utilization in typical inland cities in northwest China via system dynamics. Journal of Environmental Management, 270. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110878

Maani, K., & Cavana, R. (2000). Systems thinking and modelling: Understanding change and complexity. Pearson Education, New Zealand.

Mehryar, S., Sliuzas, R., Sharifi, M., and Van Maarseveen, M. (2015). The water crisis and socio-ecological development profile of Rafsanjan Township, Iran. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 199, 271-285. https://doi.org/10.2495/RAV150231

Moosavirad, S. H., Torabi, A., and Mirhosseini, M. (2024). Transdisciplinary approach to reduce electricity consumption using system dynamics. Transdisciplinary Journal of Engineering & Science, 15. https://doi.org/10.22545/2024/00249

Naeem, K., Aloui, S., Zghibi, A., Mazzoni, A., Triki, C., and Elomri, A. (2024). A system dynamics approach to management of water resources in Qatar. Sustainable Production and Consumption, 46, 733-753. https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.03.024

Pluchinotta, I., Pagano, A., Vilcan, T., Ahilan, S., Kapetas, L., Maskrey, S., Krivtsov, V., Thorne, C., & O'Donnell, E. (2021). A participatory system dynamics model to investigate sustainable urban water management in Ebbsfleet Garden City. Sustainable Cities and Society, 67, 102709. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102709

Rahim, F., Hawari, N., and Zainal Abidin, N. (2017). Supply and demand of rice in Malaysia: A system dynamics approach. International Journal of Supply Chain Management, 6(4), 234-240. https://ojs.excelingtech.co.uk/index.php/IJSCM/article/view/1945

Wang, X., Chen, Y., Fang, G., Li, Z., and Liu, Y. (2022). The growing water crisis in central Asia and the driving forces behind It. Journal of Cleaner Production, 378, 134574. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134574

Xu, Z., Yao, L. and Chen, X. (2020). Urban water supply system optimization and planning: Bi-objective optimization and system dynamics methods. Computers & Industrial Engineering, 142, 106373. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106373

Zainal Abidin, N., Mamat, M., Dangerfield, B., Haji Zulkepli, J., Baten, M., and Wibowo, A. (2014). Combating obesity through healthy eating behavior: A call for system dynamics optimization. PLOS ONE, 9(12), 1-17. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0114135

Zehtabian, E., Masoudi, R., Yazdandoost, F., Sedghi-Asl, M., and Loáiciga, H. A. (2023). Investigation of water allocation using integrated water resource management approaches in the Zayandehroud river basin, Iran. Journal of Cleaner Production, 395, 136339. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136339