Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

Presenting a mathematical modeling and system dynamics for the supply chain of urban water security in Guilan province

Tayebeh Heydari Kushalshah[1], Maryam Daneshmand-Mehr[*2], Milad Abolghasemian[3]

1. M.Sc. Graduate, Dept. of Industrial Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. E-mail: saloumeh.heydari@gmail.com
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Industrial Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. E-mail: m.daneshmand@liau.ac.ir
3. Dept. of Industrial Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. E-mail: m.abolghasemian.bt@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 11.14.2023
Revised: 03.09.2024
Accepted: 05.15.2024

Keywords:
Optimization,
System dynamics,
Water resource management,
Water security,
Water supply

ABSTRACT

Background and Objectives: Ensuring urban water security refers to a set of measures that are carried out in order to maintain and guarantee the supply of water to cities and communities in a safe approach in terms of health, quality and supply. Urban water security includes issues such as sufficient and sustainable water supply, maintaining water quality, preventing various pollutions, managing water resources, protecting water supply in the face of natural and human threats, and providing water in emergency and critical situations. The ultimate goal is to provide urban water security, improve the quality of life of citizens and maintain public health. Therefore, reducing and increasing fluctuations in urban drinking water availability and ensuring water security for urban communities are important responsibilities that rest on the shoulders of water supply systems. Guilan province is facing issues such as numerous weather fluctuations, which creates unlimited importance for water security.

Materials and Methods: In this paper, using optimization methods, a model for theurban water supply system in Guilan province is presented using mathematical modeling and system dynamics. For this purpose, a hybrid model using mathematical modeling, meta-heuristic algorithms and system dynamics approach is presented. Using the mathematical model and meta-heuristic algorithm, the decision variables that include the number of water resources, the amount of purified water in the water treatment system, the amount of wastewater in the area and the amount of water shortage in the area along with the values of the objective functions, the first objective of which is to minimize the cost of water supply which includes the cost of energy, the amount of energy consumption, the cost of constructing a purification system, the cost of managing water resources, the cost of managing the purification system, the cost of transferring water resources and wastewater. Also, the second goal of the problem is to minimize water shortage for the whole system. Then, these values are entered into the system dynamics model as input values, and thus, the amount of shortage in future periods is predicted.

Results: After checking the accuracy and validity of the model presented in the urban water supply system from different sources, the obtained results indicate that increasing the treatment capacity as well as the

presence of water resources in the province can affect the cost of treatment and reducing the shortage and wastewater. The results of predicting the amount of shortage in future periods showed a linear trend up to more than 520 thousand units. In addition, the sensitivity analysis also showed the inverse effect of the parameters of the capacity and amount of incoming water and the direct effect of the parameters of transmission cost, energy consumption, energy supply cost, treatment cost, source cost, construction cost and demand. Among the parameters with direct effect, energy consumption cost, construction cost and treatment cost have the most effect on supply cost. Also, the parameters of treatment cost and demand have the greatest effect on the shortage and wastewater in the system.

Conclusion: The results of this research provide useful information regarding the prediction of drinking water shortage in the hands of the managers of the water and sewerage company of Guilan province to provide urban drinking water as well as other consumers, including domestic, industrial and agricultural in Rasht metropolis.

Cite this article: Heydari Kushalshah, Tayebeh, Daneshmand-Mehr, Maryam, Abolghasemian, Milad. 2024. Presenting a mathematical modeling and system dynamics for the supply chain of urban water security in Guilan province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31 (2), 1-31.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21920.3694
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

ارائه الگویی مبتنی بر مدلسازی ریاضی و پویایی سیستم برای زنجیره تأمین امنیت آب شهری در استان گیلان

طیبه حیدری کوشالشاه[۱]، مریم دانشمندمهر[۲*]، میلاد ابوالقاسمیان[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران. رایانامه: saloumeh.heydari@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران. رایانامه: m.daneshmand@liau.ac.ir

۳. گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران. رایانامه: m.abolghasemian.bt@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰۲/۰۸/۲۳
تاریخ ویرایش: ۰۲/۱۲/۱۹
تاریخ پذیرش: ۰۳/۰۲/۲٦

واژه‌های کلیدی:
امنیت آب،
بهینه‌سازی،
پویایی سیستم،
تأمین آب،
مدیریت منابع آب

چکیده

سابقه و هدف: تأمین امنیت آب شهری به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که به‌منظور حفظ و تضمین عرضه آب به شهرها و جوامع مطابق با یک رویکرد ایمن از نظر بهداشتی انجام می‌شود. امنیت آب شهری شامل مسائلی مانند تأمین آب به میزان کافی و پایدار، حفظ کیفیت آب، جلوگیری از آلودگی‌های مختلف، مدیریت منابع آب، حفاظت از تأمین آب در مواجهه با تهدیدهای طبیعی و انسانی و تأمین آب در شرایط اضطراری و بحرانی است. هدف نهایی تأمین امنیت آب شهری، بهبود کیفیت زندگی شهروندان و حفظ سلامت عمومی است؛ بنابراین، کاهش و افزایش نوسانات در موجودی آب شرب شهری و تضمین تأمین امنیت آب برای جوامع شهری، مسئولیت‌های مهمی هستند که بر دوش سیستم‌های تأمین آب قرار دارند. استان گیلان، با مسائلی مانند نوسانات جوی متعددی روبرو است که اهمیت نامحدودی برای امنیت آب به وجود می‌آورد.

مواد و روش‌ها: در این مقاله با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی یک الگو برای سیستم آب‌رسانی شهری در استان گیلان با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و پویایی سیستم ارائه شده است. برای این منظور، یک مدل ترکیبی با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم‌های فراابتکاری و رویکرد پویایی سیستم ارائه شده است. با استفاده از مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری متغیرهای تصمیم که شامل میزان منابع آبی، میزان آب تصفیه‌شده در سیستم تصفیه آب، میزان هرزاب در ناحیه و میزان کمبود آب در ناحیه به همراه مقادیر توابع هدف که هدف اول مسأله حداقل کردن هزینه تأمین آب می‌باشد که شامل هزینه انرژی، میزان مصرف انرژی، هزینه احداث سیستم تصفیه، هزینه مدیریت منابع آب، هزینه مدیریت سیستم تصفیه، هزینه

انتقال منابع آب و هرزاب است. هم‌چنین، هدف دوم مسأله حداقل ساختن کمبود آب برای کل سیستم می‌باشد. سپس، این مقادیر به‌عنوان مقادیر ورودی وارد مدل پویایی سیستم شده و به این وسیله میزان کمبود در دوره‌های آتی پیش‌بینی شده است.

یافته‌ها: پس از بررسی صحت و اعتبار مدل ارائه شده در سیستم آب‌رسانی شهری از منابع مختلف، نتایج حاصل شده بیانگر آن است که افزایش ظرفیت تصفیه و هم‌چنین وجود منابع آبی در نواحی استان می‌تواند بر هزینه تصفیه و کاهش کمبود و هرزآب اثرگذار باشد. نتایج حاصل از پیش‌بینی میزان کمبود در دوره‌های آتی یک روند خطی را تا بیش از ۵۲۰ هزار واحد نشان داد. ضمن این‌که تحلیل حساسیت‌های انجام شده نیز اثرگذاری معکوس پارامترهای ظرفیت و میزان آب ورودی و اثرگذاری مستقیم پارامترهای هزینه انتقال، میزان مصرف انرژی، هزینه تأمین انرژی، هزینه تصفیه، هزینه منبع، هزینه احداث و تقاضا را نشان دادند. در میان پارامترهای با اثرگذاری مستقیم، هزینه مصرف انرژی، هزینه احداث و هزینه تصفیه دارای بیش‌ترین اثرگذاری بر هزینه تأمین می‌باشند. هم‌چنین، پارامتر هزینه تصفیه و تقاضا دارای بیش‌ترین اثرگذاری بر کمبود و هرزآب در سیستم می‌باشند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش اطلاعات مفیدی در خصوص پیش‌بینی کمبود آب شرب در اختیار مدیران شرکت آب و فاضلاب استان گیلان برای تأمین آب شرب شهری و هم‌چنین سایر مصرف‌کنندگان اعم از خانگی، صنعتی و کشاورزی در کلانشهر رشت ارائه می‌کند.

استناد: حیدری کوشالشاه، طیبه، دانشمندمهر، مریم، ابوالقاسمیان، میلاد (۱۴۰۳). ارائه الگویی مبتنی بر مدلسازی ریاضی و پویایی سیستم برای زنجیره تأمین امنیت آب شهری در استان گیلان. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۱ (۲)، ۳۱-۱.
DOI: 10.22069/jwsc.2024.21920.3694

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

آب به عنوان یک ماده برای حیات و بقای انسان و توسعه اجتماعی ضروری است. با توسعه سرمایه‌گذاری‌ها در بخش‌های مختلف اقتصادی که باعث ایجاد اشتغال، افزایش تولید و بهبود زیرساخت‌های اقتصادی می‌شود، مشکل مدیریت منابع آب به طور فزاینده‌ای افزایش پیدا کرده است. کمبود منابع آب به شدت توسعه اجتماعی و اقتصادی را محدود می‌کند و حتی امنیت تأمین و توزیع آب آشامیدنی را تهدید می‌کند (۱). به همین دلیل، بحران کمبود آب به‌دلیل تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی روبه رشد است. هم‌چنین، با توسعه تولیدات صنعتی و کشاورزی تقاضا برای منابع آب به تدریج افزایش یافته است (۲). علاوه بر این، رشد روزافزون جمعیت، شهرنشینی، تغییرات آب و هوایی، سوء مدیریت منابع آب و سیستم‌های توزیع آب همراه با برنامه‌ریزی ضعیف، تنش آبی را در بسیاری از کشورهای جهان افزایش می‌دهد. اگرچه بهینه‌سازی سیستم‌های توزیع آب و شیوه‌های مدیریت یکپارچه آب در بسیاری از شهرها و مناطق اجرا شده است، اما یک مطالعه یکپارچه با توجه به سیستم، برنامه‌ریزی و مدیریت آب شهری وجود ندارد (۳). برای این منظور، در چند سال گذشته، به‌دلیل افزایش جمعیت، محدودیت منابع آب و کاهش بارش باران براساس تغییرات جوی، مدیریت آب شهری به دغدغه اصلی سیاست‌گذاران شهری برای توسعه راه‌حل‌های مدیریت کارآمد تبدیل شده است (٤). بنابراین، حل مسائل برای تأمین امنیت آب شهری به دلیل افزایش جمعیت انسانی، کمبود منابع، نگرانی‌های زیست‌محیطی و افزایش نیاز به راه‌حل‌های پایدار برای طرح‌های سیاست‌گذاری آینده، به موضوعات جذابی در حوزه مدیریت فاضلاب و تأمین امنیت آب تبدیل شده‌اند. به ویژه در مناطقی که به‌دلیل عواملی مانند افزایش مهاجرت، رشد سریع صنعتی و گسترش فعالیت‌های گردشگری، تقاضا برای تصفیه فاضلاب به‌طور چشمگیری افزایش یافته است، این موضوع را به یک چالش بحرانی‌تر و پویاتر تبدیل می‌کند (۵). زیرا پیگیری اثرات بلندمدت خدمات آب شهری به‌عنوان پیش‌زمینه برای آینده و یک مبنای علمی مهم برای اهداف توسعه پایدار سیستم‌ها است (٦). زیرا بهره‌برداری صحیح از منابع آب یک اقدام مهم و مؤثر برای تحقق تخصیص بهینه منابع آب به‌شمار می‌رود. برای این منظور، خدماتی که برای تأمین و توزیع آب شهری انجام می‌پذیرد عبارت‌اند از (۷):

- تأمین و توزیع آب شرب: ارائه آب شرب به ساکنان شهری به‌صورت مداوم و بهداشتی.
- خدمات فاضلاب: جمع‌آوری، پالایش و دفع فاضلاب به‌صورت بهداشتی و محیطی.
- خدمات آب‌رسانی برای استفاده در خانه‌ها، مدارس، بیمارستان‌ها، مراکز تجاری و صنعتی و سایر مکان‌های عمومی.
- تعمیر و نگهداری شبکه آب و فاضلاب شهری برای حفظ عملکرد بهینه.
- پیگیری و رفع مشکلات مربوط به آب و فاضلاب شهری از جمله شکایات مردمی و اضطرابات مربوط به کیفیت آب.

تأمین آب برای آب‌رسانی شهری یک تلاش جهانی و چالش بزرگی برای مدیران منابع آب مناطق بزرگ شهری است. تأمین آب مستلزم مدیریت یکپارچه کمیت و کیفیت آب، هم‌چنین سازگاری سیستم با کاربری زمین و تغییرات آب و هوایی در منطقه است (۸).

در مطالعات گذشته تحقیقاتی در خصوص مدیریت و تأمین امنیت سیستم آب‌رسانی شهری از طرق مختلف انجام شده است. برای مثال، گلپیرا و تیرکلایی (۹)، در گزارشی برای ارزیابی اثرات

اجتماعی و اقتصادی سطوح مختلف تخصیص جریان زیست‌محیطی در حوضه رودخانه ویه در چین از مدل پویایی سیستم‌ها و نرم‌افزار VENSIM استفاده نمودند. در این گزارش از چهار روش برای رشد اجتماعی و اقتصادی و چهار روش برای تخصیص آب زیست‌محیطی ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته پویایی سیستم عملکرد خوبی در برابر رفتار پویای سیستم در منطقه مورد مطالعه دارد. نپال و ترن (۱۰)، کاربرد روش پویایی سیستم در شبیه سازی را برای تبیین الگوی کشت محصولات کشاورزی در شبکه آبیاری و زهکشی را در استان اصفهان نشان دادند. تیان و همکاران (۱۱)، با استفاده از الگوریتم PSO[1]، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جامعه مورچگان در بررسی بهینه‌سازی شبکه جمع‌آوری فاضلاب به این نتیجه رسیده شد که الگوریتم PSO می‌تواند با تعداد کم‌تر و سرعت بالاتری به جواب بهینه برسد. ژو و همکاران (۱۲) در این مطالعه تقاضای آب خانگی و صنعتی را براساس ارائه یک مدل دوهدفه برای متعادل کردن هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی در یک سیستم آب‌رسانی شهری طی سه مرحله که شامل فرآیندهای تولید، توزیع و تصفیه آب است ایجاد کردند. پس از بهینه‌سازی، یک مدل مبتنی بر پویایی سیستم برای آزمایش عملکرد سیستم تأمین آب تحت سناریوهای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت اعمال می‌شود. یو و همکاران (۱۳) در مطالعه خود رقابت بین ذینفعان یک عملیات مخزن اکولوژیکی چندهدفه را با هدف تأمین نیازهای اقتصادی، اجتماعی و اکولوژیکی بررسی کردند. برای این منظور، یک مدل تئوری بازی چند هدفه را برای تخلیه آب طی مدت ۱۰ روز را برای برآوردن نیازهای سه‌گانه آب (تولید برق، مصرف اجتماعی–اقتصادی و محیط زیست) مشخص کردند. دی ملو و همکاران (۸) یک روش جدید برای ارزیابی امنیت آب براساس رتبه‌بندی شاخص‌های فشاری که بر روی یک حوزه آبخیز اعمال می‌کنند مانند تقاضای آب، آلاینده‌های معمولی و تصادفی، خشکسالی و تغییرات محیطی (به‌عنوان مثال، سهم پوشش جنگلی) را براساس ارزیابی ریسک ویژگی‌هایی مانند شدت، وقوع و قابلیت تشخیص را ارائه می‌کنند. دنگ و همکاران (۱٤) یک مدل تخصیص منابع آب چند هدفه پایدار را برای بهینه‌سازی کارایی جریان اکولوژیکی رودخانه توسعه داده‌اند. برای این منظور، از الگوریتم (NSGA-II[2]) برای استخراج راه‌حل‌های پارتویی برای تخصیص منابع آبی استفاده شده است. دمیرل و همکاران (۵) یک رویکرد جایگزین مبتنی بر روش پویایی سیستم برای انتخاب مکان تاسیسات تصفیه فاضلاب و مسائل طراحی شبکه پیشنهاد کرده‌اند. مدل شبیه‌سازی پویایی سیستم پیشنهادی برای یک منطقه در شهر آنتالیا ترکیه طراحی شده است. این مدل قادر است مکان و زمان ساخت یک مرکز تصفیه فاضلاب جدید و هم‌چنین ایجاد ساختار شبکه عمومی فاضلاب را برای پنج منطقه واقع در مرکز شهر براساس مسائل هزینه طی سال‌های ۲۰۱۵–۲۰٤۰ تعیین کند. گیلانی و همکاران (۱۵)، یک روش انتخاب پایدار برای مکان تأسیسات تصفیه آب با بهترین–بدترین روش توسعه داده‌اند. علاوه بر این مدل انتخاب فناوری‌های مناسب در تصفیه‌خانه، مدیریت نشت آب در کل شبکه انتقال با استفاده از نوسازی و انتخاب فناوری‌های مختلف انتقال پرداخته‌اند. در نهایت براساس نتایج به‌دست آمده نشان دادند که تعامل آب و انرژی در این شبکه، مورد توجه خاصی قرار گرفته است. شیو و همکاران (٦) یک روش برای ارزیابی چرخه عمر پویا[3] ایجاد

1- Particle Swarm Optimization Algorithm

2- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II

3- Dynamic life cycle assessment (DLCA)

کرده‌اند که تغییرات زمانی و اثرات ناشی از آن را برای رسیدگی به چالش‌های تاسیسات تصفیه آب بر اساس اصول ارزیابی چرخه عمر مدل‌های پویایی سیستم در نظر می‌گیرد. ژو (۱۶) چارچوبی یکپارچه برای تغییرات آب و هوایی را ایجاد کرده‌اند. چارچوب پیشنهاد شده، اثرات تغییرات آب و هوایی را بر جنبه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی در بسیاری از زمینه‌ها، از جمله تصفیه فاضلاب، انتقال انرژی، تصفیه زباله، مدیریت زمین و مدیریت اقیانوس تجزیه و تحلیل می‌کنند. حیدری و همکاران (۷) یک مدل برنامه‌ریزی برای مدیریت تأمین امنیت آب شهری در کلانشهر رشت با استفاده از یک برنامه‌ریزی قطعی ریاضی و پویایی سیستم ارائه کرده‌اند. برای این منظور، یک مدل ریاضی چندهدفه با استفاده از روش اپسیلون محدودیت حل و با استفاده از پویایی سیستم وضعیت کمبود آب تا صد سال آینده برای کلانشهر رشت مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به بررسی ادبیات انجام شده در بالا، صرفاً مدل‌سازی چرخه آب‌رسانی شهری در یک منطقه و پیش‌بینی براساس آن مورد توجه قرار گرفته است؛ بنابراین، معرفی یک سیستم آب‌رسانی که شامل فرآیندهای تولید و توزیع و مصرف باشد، برای ایجاد یک رابطه کمی در سیستم آب‌رسانی شهری و توصیف عملکرد سیستم بر اساس این رابطه توصیه می‌شود. مهم‌ترین مزیت به‌کارگیری این مطالعه این است که با هدف تقویت مدیریت منابع آب به بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی سیستم تأمین آب شهری با استفاده از مدلسازی ریاضی دو هدفه و روش پویایی سیستم به ارائه الگویی برای تأمین امنیت آب شهری پرداخته است که از طریق آن به بررسی پارامترهای کیفی و کمی مربوط به آب و فاضلاب در استان گیلان اقدام شده است. براساس مدلسازی ارائه شده ضمن حصول کارایی کل، منافع اقتصادی در بخش‌های داخلی، صنعتی و کشاورزی حاصل می‌گردد؛ بنابراین، مهم‌ترین خلاهای پژوهش‌های گذشته عبارت‌اند از:

- چارچوبی چنددوره‌ای و یکپارچه برای تعیین پاسخ بهینه برای استراتژی‌های تأمین امنیت آب شرب شهری،
- در نظر گرفتن یک سیستم آب‌رسانی دو مرحله‌ای که شامل فرآیندهای تولید و مصرف است،
- تعریف یک رابطه کمی در سیستم آب‌رسانی شهری برای سنجش عملکرد سیستم بر اساس این رابطه،
- تعریف یک دوره برنامه‌ریزی مطلوب برای سیستم تأمین آب در دنیای واقعی از طریق ترکیبی از برنامه‌ریزی دو هدفه و روش پویایی سیستم.

در جدول ۱، مطالعات گذشته براساس زمینه مطالعاتی، محل اجرای پژوهش، ورودی‌ها و خروجی‌های پژوهش، نوع مدل و روش حل آن‌ها و نتایج حاصل شده به تفکیک طبقه‌بندی شده‌اند.

جدول ۱- طبقه‌بندی ادبیات.

Table 1. Categorization of literature.

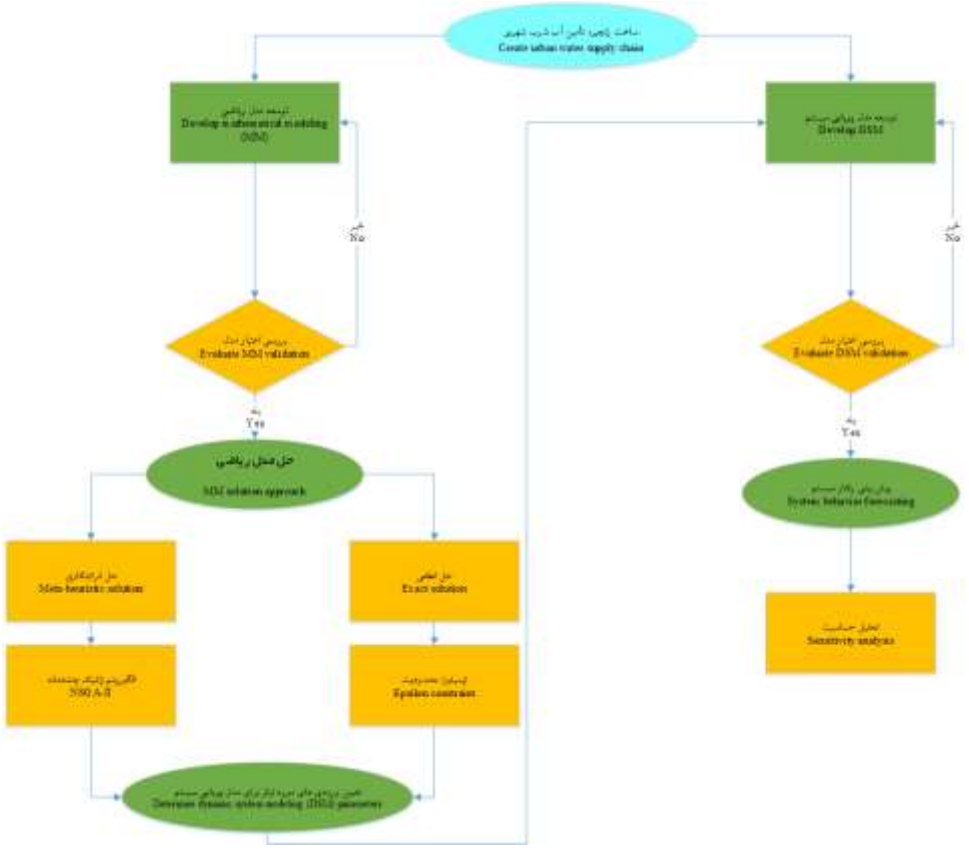
منبع Reference	زمینه تحقیق Research background	کشور Country	ورودی تحقیق Research input	خروجی تحقیق Research output	نوع مدل و روش Model type and method	یافته‌ها Results
(۹)	مدیریت آب با استفاده از مدلسازی پویایی سیستم در مناطق نیمه‌خشک	سنگاپور	اطلاعات حوضه مربوط به مناطق نیمه‌خشک	شناسایی نوسانات سطح آب زیرزمینی بهره‌برداری از سطح آب زیرزمینی تعیین میزان عرضه و کسری مصرف	مدل جامع منابع آب مدل پویایی سیستم	روش پویایی سیستم نشان داد که اگر سیاست مدیریت فعلی ادامه یابد، کاربران در آینده با بحران عرضه آب برای استفاده‌های مختلف مواجه خواهند شد.
(۱۰)	مدیریت آب در سیستم‌های پیچیده، مدل جامع منابع آب برای منطقه ساسکاچوان	کانادا	آبیاری بخش زیر کشت	پویایی نیاز آبی تبخیر ارزش آب	مدل جامع منابع آب مدل پویایی سیستم	مدل جامع منابع آب منطقه برای پیش‌بینی پویایی نیاز آب و پیش‌بینی ارزش آب انجام شده است.
(۱۱)	مدل منابع و مصارف آب شهری با روش پویایی سیستم	انگلستان	منابع آب شهری و جنبه‌های مختلف پایداری	پارامتر اقتصادی پارامتر اجتماعی پارامتر محیط زیستی	مدل منابع و مصارف آب شهری روش پویایی سیستم	ایجاد سیستم پیچیده‌ای همراه با تحلیل نگرشی جامع با روش پویایی سیستم‌ها.
(۱۲)	مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز	ایران	پارامترهای سطح حوضه آبریز	اجزای درونی سیستم و فعل و انفعالات درونی سیستم‌ها	مدل منابع آب حوضه روش پویایی سیستم	سیاست‌های مبتنی بر سناریوهای پیشنهادی توسط مدل اجرا گردید و از نتیجه قابل‌قبولی برخوردار بود.
(۱۳)	استخراج منحنی‌فرمان بهره‌برداری از مخازن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO در مقایسه با روش برنامه‌ریزی خطی	ایران	اطلاعات آبی مربوط به حوضه آبریز قزل‌اوزن	منحنی فرمان بهره‌برداری مخزن محاسبه ورودی آب پایین‌دست محاسبه حجم بهینه مخزن	الگوریتم بهینه‌سازی PSO روش برنامه‌ریزی خطی	پیچیده‌ترین مسأله، PSO توانایی بالاتری در رسیدن به راه‌حل‌های بهینه برای سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سد را دارد
(۱٤)	ارزیابی اثرات اجتماعی و اقتصادی در سطوح مختلف تخصیص جریان زیست‌محیطی در حوضه رودخانه ویه در چین از مدل دینامیک سیستم‌ها و نرم‌افزار VENSIM	چین	اطلاعات حوضه رودخانه	رشد اقتصادی رشد اجتماعی زیست‌محیطی	مدل دینامیک سیستم‌ها مدل توسعه‌یافته پویایی سیستم	مدل توسعه‌یافته پویایی سیستم عملکرد خوبی در برابر رفتار دینامیکی سیستم در منطقه مورد مطالعه دارد
تحقیق حاضر	بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی سیستم تأمین آب شهری با استفاده بهینه‌سازی دو هدفه و روش پویایی سیستم	ایران	اطلاعات مربوط به آب و فاضلاب استان گیلان	چگونگی ارائه الگویی برای تأمین امنیت آب شهری از طریق پویایی سیستم و بهینه‌سازی چندهدفه	مدل‌سازی ریاضی مدل پویایی سیستم	بررسی پارامترهای کیفی و کمی مربوط به آب و فاضلاب

مواد و روش‌ها

این پژوهش از نظر طبقه‌بندی نوع روش تحقیق یک مطالعه کمی محسوب می‌شود که با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و پویایی سیستم انجام شده است برای این منظور، یک مدل ریاضی دوهدفه در جهت بهینه‌سازی منابع آبی ارائه می‌شود. این پژوهش در استان گیلان که یکی از استان‌های شمالی ایران است به‌دلیل داشتن جنگل‌های ارزشمند، سواحل زیبا دارای آب‌وهوای معتدل در ایران است. مرکز استان گیلان، کلان‌شهر رشت، به‌دلیل واقع‌شدن در منطقه جلگه‌ای و نزدیکی به دریای خزر و کوه‌های البرز، از آب‌وهوای بارانی و مرطوبی برخوردار است. عواملی مانند تداوم برخورد بادهای خزری با کوه‌های البرز، ایجاد برهمکنش حرارتی و تبادل آب و رطوبت، باعث افزایش بارش‌های شهر می‌شود. هم‌چنین، وجود جنگل‌ها و ایجاد باغات در اطراف شهر نیز به حفظ رطوبت و افزایش بارش‌ها کمک می‌کند. به همین دلیل، رشت به‌عنوان یکی از شهرهای پرباران ایران شناخته می‌شود و این بارش‌های فراوان و منظم به زراعت و کشاورزی در این منطقه کمک بسیاری می‌کند. به همین دلیل به شهر رشت، شهر باران‌های نقره‌ای نیز گفته می‌شود.

این مدل به‌طور هم‌زمان دو هدف را در نظر می‌گیرد. هدف اول، کاهش هزینه کل سیستم و هدف دوم کاهش کمبود است. در این پژوهش که متمرکز بر استان گیلان یک استان پربارش در منطقه شمالی ایران است، یک مدل ریاضی ارائه می‌شود که ضمن حداقل ساختن هزینه‌ها، حداقل منابع آبی اتلاف شده و منابع آبی به چرخه آب‌رسانی شهری و روستایی بازمی‌گردد. البته لازم به ذکر است که استان گیلان جز معدود نواحی و استان‌های پر آب کشور تلقی می‌شود که می‌تواند الگویی برای بهره‌وری بیش‌تر در حوزه منابع آبی برای سایر استان‌های ایران تلقی شود. دوره آماری پژوهش نیز مربوط به مهرماه ۱۴۰۰ تا فروردین‌ماه ۱۴۰۱ است. در شکل ۱، الگوی مفهومی پژوهش نشان داده شده است.

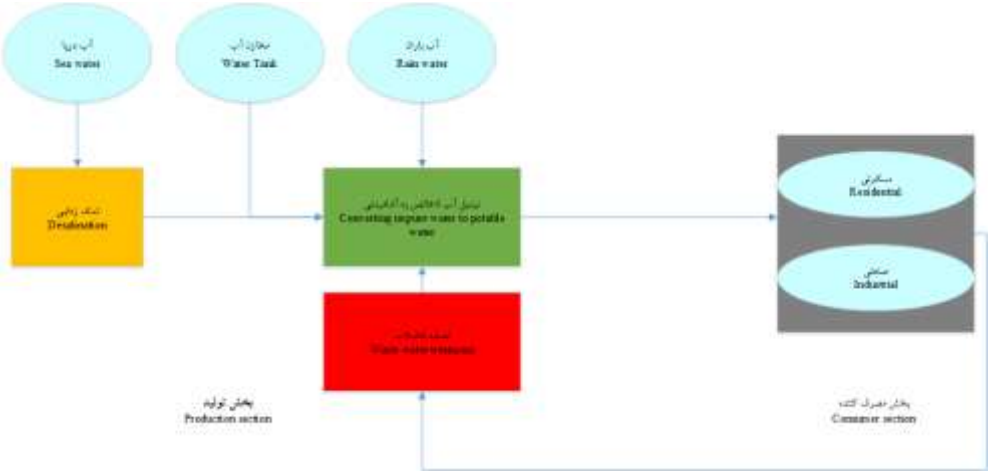
با توجه به الگوی در نظر گرفته‌شده، دو بخش اصلی اجرای این پژوهش شامل توسعه مدل ریاضی و پویایی سیستم است که برای ساخت زنجیره تأمین امنیت آب شرب شهری مورداستفاده قرارگرفته است. هر دو مدل پس از بررسی اعتبار برای حصول نتایج مورداستفاده قرارگرفته‌اند. مدل ریاضی پیشنهادشده به دو صورت قطعی با استفاده از روش اپسیلون محدودیت و فراابتکاری با استفاده از روش NSGA-II حل‌شده‌اند و نتایج مربوط به آن در اختیار مدل پویایی سیستم جهت پیش‌بینی رفتار واقعی سیستم در درازمدت قرار گرفته است؛ زیرا استفاده از مدل‌سازی ریاضی به‌عنوان یک ابزار تحلیلی در کنار مدل‌های پویایی سیستم، به تحلیل دقیق‌تر، پیش‌بینی بهتر و بهبود عملکرد بهتر سیستم کمک می‌کند. سرانجام با اجرای یک تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای تأثیرگذار بر روی هزینه تأمین و میزان کمبود سنجیده شده است.



شکل ۱- ساختار کلی تحقیق.

Figure 1. The general structure of the research.

برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در سیستم آب‌رسانی شهری به‌دلیل داشتن اهداف و قیود مختلف و هم‌چنین متغیرهای بسیار متنوع، می‌تواند به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه مطرح گردد. بنابراین بدین‌منظور ساختار کلی سیستم آب‌رسانی شهری در بخش موردمطالعه، به‌صورت نشان داده‌شده در شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲- مدل کلی سیستم آب‌رسانی شهری موردمطالعه.

Figure 2. The general model of the studied urban water supply system.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک سیستم جامع آب‌رسانی شهری برای تمامی انواع مصارف مسکونی و صنعتی، از یک سازوکار نسبتاً پیچیده برخوردار است که این سازوکار به‌منظور دستیابی به اهداف مهم آن، نیازمند یک برنامه مدیریت جامع و بهینه می‌باشد. بنابراین باتوجه به این‌که در مسأله برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم آب شهری با یک مسأله بهینه‌سازی مواجه هستیم بنابراین، به‌منظور حل این مسأله باید در ساختار استاندارد یک مسأله بهینه‌سازی مدلسازی ایجاد گردد. بنابراین در ادامه به بیان مدل ریاضی مسأله مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه سیستم آب شهری پرداخته می‌شود.

مدلسازی ریاضی مسأله: در این بخش برای معرفی مدلسازی ریاضی برای تشریح مسأله ابتدا مفروضات تحقیق و سپس پارامترها و همه متغیرها و هم‌چنین توابع هدف و محدودیت‌های آن تشریح شده‌اند.

- **نمادگذاری**

کلیه اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای در نظر گرفته شده در مدل ریاضی در جدول ۱ پیوست نشان داده شده است.

- **مفروضات تحقیق**

مهم‌ترین مفروضات تحقیق عبارت‌اند از:

۱- پارامترها قطعی تعیین شده می‌باشند،

۲- مدل چند دوره‌ای است،

۳- هر ناحیه شامل شهرستان و روستاهای تابعه آن می‌باشد،

٤- منابع آبی احداث شده تلقی می‌شوند،

٥- احداث سیستم‌های تصفیه به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است،

٦- سیستم‌های تصفیه به جز هزینه احداث، هزینه مدیریت به ازای هر کیلومتر منابع آبی دارند،

۷- منابع تأمین آب مشمول هزینه می‌باشند،

۸- مصرف انرژی و هزینه آن برای منابع آبی و سیستم‌های تصفیه در نظر گرفته شده است،

۹- هرزآب و کمبود در مدل جاری لحاظ شده است،

- **توابع هدف**

در رابطه ۱ تابع هدف اول مسأله مطرح شده در این رابطه هدف حداقل کردن هزینه تأمین آب می‌باشد که شامل هزینه انرژی، میزان مصرف انرژی، هزینه احداث سیستم تصفیه، هزینه مدیریت منابع آب، هزینه مدیریت سیستم تصفیه، هزینه انتقال منابع آب و هرزآب می‌باشد. هم‌چنین، در رابطه ۲، هدف دوم مسأله که دنبال حداقل ساختن کمبود آب برای کل سیستم می‌باشد که در اینجا کمبود بر اساس میزان ورودی تعیین شده است.

(۱)

$$\min z1 = \sum_i^I \sum_j^J FCJ_{ij} . X_{ij} + \sum_i^I \sum_k^K FCK_{ik} . Y_{ik} + \sum_j^J \sum_t^T VCJ_j . Z_{jt} + \sum_j^J \sum_t^T ENC_j . UENC_j . Z_{jt} + \sum_i^I \sum_k^K ENCK_k . UENCK_k . Y_{ik} + \sum_i^I \sum_j^J \sum_k^K TC_{kji} . U_{kji}$$

(۲)

$$\min z2 = \sum_i^I \sum_t^T LW_{it}$$

- محدودیت‌ها

$$\sum_{i=1}^{I} X_{ij} = 1 \quad (۳)$$

$$U_{kji} \leq X_{ij} \quad (٤)$$

$$\sum_{i=1}^{I} U_{kji} = 1 \quad (٥)$$

$$Y_{ik} \leq CAPK_{ik} \quad (٦)$$

$$Z_{jt} \leq CAPJ_{ij} \quad (٧)$$

$$Z_{jt} \leq M.X_{ij} \quad (٨)$$

$$WW_{it} = EW_{it} - DEM_{it} \quad (٩)$$

$$LW_{it} = DEM_{it} - \sum_{k=1}^{K} Y_{ik} \quad (١٠)$$

$$\sum_{j=1}^{J} Z_{jt} \leq \sum_{k=1}^{K} Y_{ik} \quad (١١)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\};\ U_{kji} \in \{0,1\};\ Y_{ik} \geq 0;\ Z_{jt} \geq 0;\ WW_{it} \geq 0;\ LW_{it} \geq 0 \quad (١٢)$$

رابطه ۳ نشان می‌دهد که هر مرکز تصفیه صرفاً در یک ناحیه قابل احداث است. رابطه ٤ نشان می‌دهد انتقال منابع از مراکز تصفیه به شرح احداث آن مرکز تصفیه می‌باشد. رابطه ٥ نشان می‌دهد انتقال آب از منابع آبی به مراکز تصفیه صرفاً در یک ناحیه معنی دار می‌باشد. رابطه ٦ محدودیت ظرفیت منابع آبی را نشان می‌دهد. رابطه ۷ نشانگر محدودیت ظرفیت مرکز تصفیه می‌باشد. رابطه ۸ نشانگر این است که در صورتی که یک مرکز تصفیه وجود داشته باشد منابع آبی در آن وجود دارد. رابطه ۹ به محاسبه هرزآب در سیستم می‌پردازد. هرزآب بر اساس میزان تقاضا برای منابع آبی ورودی و مصرف محاسبه شده است. رابطه ۱۰ به محاسبه کمبود در سیستم می‌پردازد. رابطه ۱۱ نشان می‌دهد که منابع آبی در مراکز تصفیه نمی‌تواند از منابع آبی در سیستم‌های منابع آبی بیش‌تر باشد. رابطه ۱۲ نشانگر نوع متغیرهای مسأله است که به دو صورت باینری عدد صحیح و پیوسته (مثبت) هستند. بنابراین، نوع مدل ریاضی پیشنهاد شده مختلط عدد صحیح است.

روش حل مسأله

الف) اپسیلون محدودیت

روش حل در پژوهش حاضر شامل روش دقیق است. این روش شامل الگوریتم اپسیلون محدودیت است. در این بخش به تشریح این الگوریتم پرداخته می‌شود. مسأله حاضر با استفاده از روش محدودیت

اپسیلون حل می‌شود. حل مسأله به این صورت است که هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و هدف دوم به حد بالای اپسیلون محدود می‌شود و در قیود مسأله اعمال می‌شود. در این صورت براساس روش اپسیلون محدودیت مدل چندهدفه به مدل تک‌هدفه ۱۳ تبدیل می‌شود. در این روش از بین توابع هدف مختلف، یکی انتخاب و سایر توابع هدف با در نظر گرفتن مقادیری، که تصمیم‌گیرنده یا مدل‌ساز تعیین می‌کند به محدودیت تبدیل می‌شوند و مسأله به یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه تبدیل می‌شود و به شیوه معمول برنامه‌ریزی خطی حل می‌شود. یکی از روش‌های دقیق به دست آوردن راه‌حل‌های پارتوی بهینه استفاده از روش اپسیلون محدودیت است که اولین بار توسط آلجدان ارائه شده است. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها بهینه‌سازی چندهدفه کاربرد آن برای فضاهای حل غیرمحدب است زیرا روش‌هایی مانند ترکیب وزنی اهداف در فضای غیرمحدب کارایی خود را از دست می‌دهند. زمان محاسباتی یک الگوریتم از ویژگی‌های مهم هر الگوریتم جهت ارزیابی آن است از آن‌جایی‌که یکی از ضعف‌های اساسی الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی دقیق از جمله روش اپسیلون محدودیت بالا بودن زمان محاسباتی آن‌هاست، بدیهی است که به‌کارگیری الگوریتم فراابتکاری موجب کاهش شدید زمان محاسباتی خواهد شد. یکی از نسخه‌های اصلاح شده روش اپسلیون محدودیت، چارچوبی است که پیروز و خرم (۱۷) ارائه دادند و ابوالقاسمیان و دارابی (۱۸)؛ ابوالقاسمیان و همکاران (۱۹) و ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰) اخیراً استفاده از آن را به‌دلیل داشتن دو مزیت عمده توصیه کرده‌اند. یکی از مزایای این روش کاهش فضای جستجو برای یافتن نقاط غیرغالب است. یکی دیگر از مزایای این روش زمان اجرا کم‌تر آن در مقایسه با روش اصلی است. طبق این روش ابتدا مسأله بهینه‌سازی تک‌هدفه برای هر هدف را حل می‌کنیم. سپس طول گام را تعیین می‌کنیم. سپس مجموعه نقاط مناسب را تولید می‌کنیم و در نهایت بهینه‌سازی تک‌هدفه را حل کرده و مرز پارتو را تخمین می‌زنیم.

$$\min f_1(x) \quad (۱۳)$$
$$f_i(x) \le e_i$$
$$x \in X$$

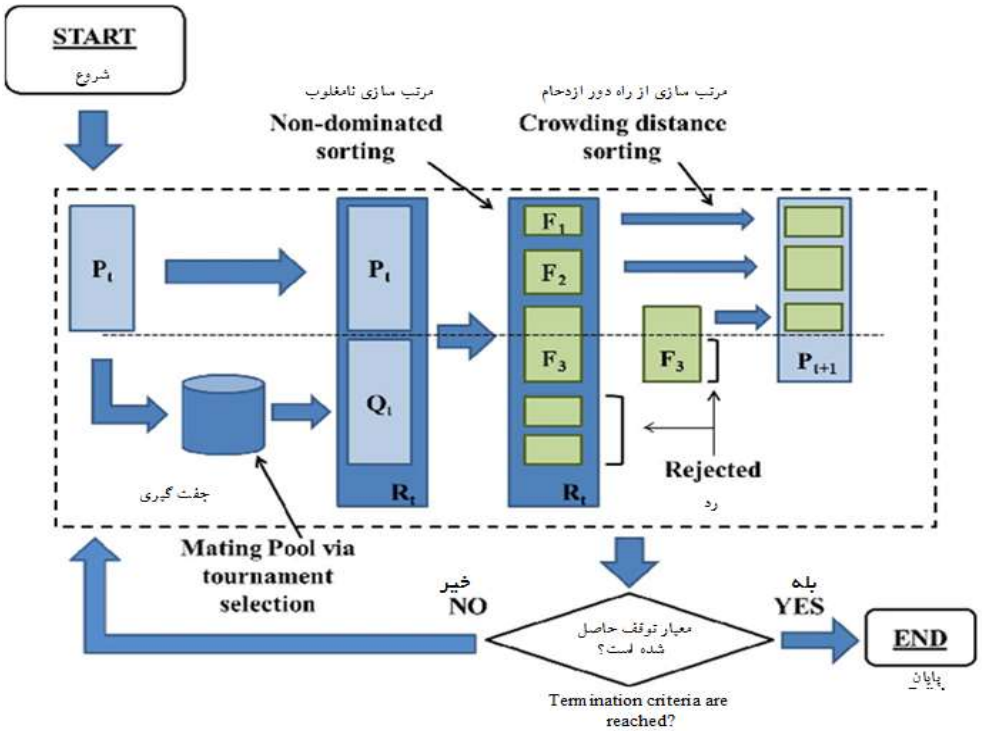
در رابطه ۱۳ هدف اول به‌عنوان هدف اصلی در نظر گرفته می‌شود و اهداف دوم تا n ام به مقدار حداکثر e_i محدود می‌شود در روش اپسیلون محدودیت با تغییر مقادیر e_i جواب‌های مختلفی به‌دست می‌آید که ممکن است کارا نباشند. با اصلاح تکمیل مدل فوق می‌توان مشکل مذکور را مرتفع نمود که به روش اپسیلون محدودیت اصلاح شده معروف است. در این روش رابطه قبلی به این صورت مدل ۱٤ بازنویسی می‌شود.

$$\min f_1(x) - \sum_{i=1}^{2} \phi_i s_i \quad (۱٤)$$
$$fi(x) + s_i = e_i$$
$$x \in X$$
$$s_i \ge 0$$

در رابطه ۱٤، ϕ_i و s_i متغیرهای کمکی و پارامترهای لازم برای نرمالسازی اهداف هستند.

ب) روش ژنتیک چندهدفه

الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل چندهدفه می‌باشد که یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. با توجه به حساسیت نسبتاً زیادی که نحوه عملکرد و کیفیت جواب‌های الگوریتم ژنتیک به پارامترهای اشتراک برازندگی و سایر پارامترها دارند، نسخه دوم الگوریتم ژنتیک با نام NSGA-II توسط دِب و همکارانش در سال ۲۰۰۰ معرفی گردید. در شکل ۳، فرآیند اجرایی و حل مسأله با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک نشان داده‌شده است.



شکل ۳- نمای کلی از فرآیند تکاملی NSGA-II.

Figure 3. Overview of NSGA-II evolution process.

توسعه مدل پویایی سیستم

شبیه سازی با استفاده از رویکرد پویایی سیستم در پژوهش حاضر شامل مراحل ذیل است:

- **توسعه مدل شبیه‌سازی**

برای تجزیه و تحلیل عوامل تأثیرگذار، تمام متغیرهای کلیدی مؤثر، در نمودار حلقه علی- معلولی مشخص می‌شوند و پس از آن توسط نرم‌افزار VENSIM به نمودار جریان تبدیل می‌شوند. سپس یک مدل SD یکپارچه براساس ارتباطات بین متغیرها شبیه‌سازی می‌شود.

- **تعریف رابطه علت و معلولی**

نمودار علت و معلولی به‌منظور نمایش تعاملات پویا مابین عناصر سیستم همواره در نظر گرفته می‌شود و در آن تأثیرگذاری مثبت و منفی عناصر بر یکدیگر

به‌ترتیب با علامت‌های (+) و (-) نمایش داده می‌شود.

- **ترسیم نمودار حالت و جریان**

نمودار حالت و جریان ماهیت کمی دارد و وابسته بر تعریف متغیرهایی برای حل مسأله می‌باشد. متغیرهای به‌کار رفته در پویایی سیستم در پژوهش حاضر شامل متغیرهای مدل ریاضی می‌باشد که با حل مدل ریاضی مقدار آن‌ها به‌دست می‌آید و به‌صورت پارامتر در نرم‌افزار VENSIM وارد می‌شود. متغیرهای علی و معلولی مورد نیاز در مدل پویایی سیستم در جدول ۲ پیوست نشان داده شده است.

نتایج تحقیق

نتایج حل عددی مدل: در این بخش نتایج حل مدل و هم‌چنین اعتبارسنجی آن از طریق حل مدل در ابعاد مختلف (کوچک، متوسط و بزرگ) بررسی می‌شود. برای این منظور، در ابتدا ابعاد مسأله معرفی می‌شود که در جدول ۳ پیوست ارائه گردیده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود ۲۰ نمونه در نظر گرفته شده در جدول نمونه‌های عددی، ابعاد مسأله دچار تغییر شده است. این افزایش ابعاد بر میزان توابع هدف و زمان محاسبه در صورتی‌که مدلسازی به درستی انجام شده باشد اثرگذار می‌باشد. برای این منظور در جدول ۲ نتایج حاصل از مقادیر توابع هدف و زمان محاسبه شده ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج حل مدل ریاضی.

Table 2. Mathematical model solution results.

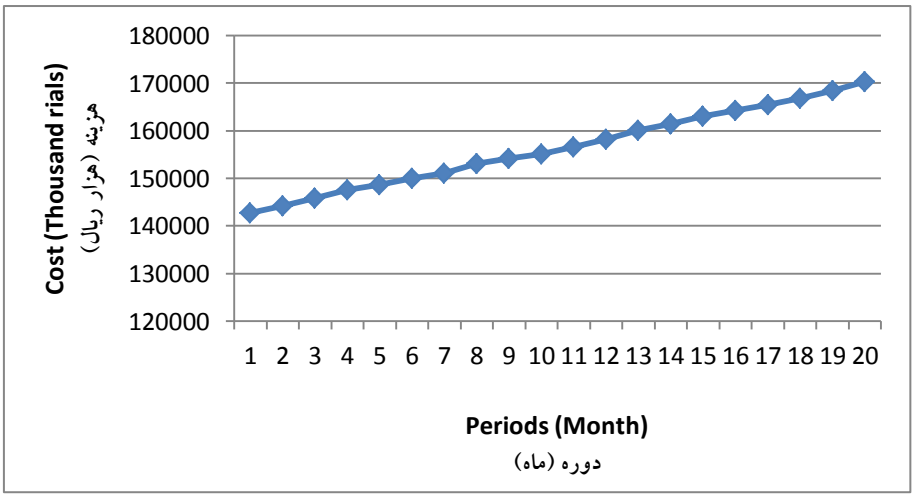
زمان محاسبه (ثانیه) Calculation Time (Seconds)	هرزآب و کمبود (Lit/m^3) Waste water and shortage (Lit/m^3) Z_2	هزینه تأمین (هزار ریال) Supply cost (Thousands rials) Z_1	مسأله Problem	ابعاد مسأله Problem scale
18	3309361	142744	1	کوچک Small
36	3324486	144184	2	
48	3337927	145869	3	
64	3352119	147512	4	
76	3366940	148587	5	
89	3383915	149944	6	
107	3396378	151091	7	
120	3414299	153059	8	متوسط Medium
139	3424478	154107	9	
149	3442370	155121	10	
167	3459297	156516	11	
177	3471627	158157	12	
189	3486565	160079	13	

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

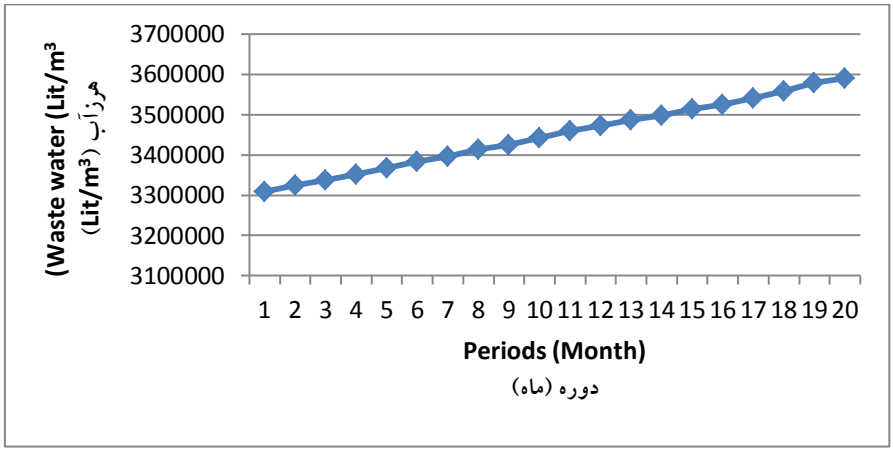
زمان محاسبه (ثانیه) Calculation Time (Seconds)	هرزآب و کمبود (Lit/m^3) Waste water and shortage (Lit/m^3) Z_2	هزینه تأمین (هزار ریال) Supply cost (Thousands rials) Z_1	مسأله Problem	ابعاد مسأله Problem scale
204	3497552	161459	14	بزرگ Large
223	3514357	162997	15	
236	3524721	164203	16	
251	3540257	165461	17	
268	3558616	166838	18	
281	3578511	168390	19	
295	3590094	170349	20	

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در جدول ۲، نتایج ۲۰ مثال که شامل مقادیر هزینه تأمین آب و میزان هرزآب می‌باشد ارائه شده است. به‌منظور بررسی صحت مدل نتایج حاصل از نمودارهای این مقادیر ارائه شده است. برای مثال، همان‌گونه که در شکل ٤ برای یک دوره ۲۰ ماهه مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد مسأله هزینه کل سیستم افزایش یافته است که این امر نشان از صحت و اعتبار مدل دارد. در شکل ۵ مقادیر حاصل از میزان هرزآب و کمبود طی این دوره ۲۰ ماه ارائه شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که با افزایش ابعاد به‌طور طبیعی میزان هرزآب و کمبود در سیستم آب‌رسانی شهری افزایش می‌یابد. سرانجام، در شکل ٦ همان‌طور که نشان داده شده است با افزایش ابعاد مسأله زمان محاسبه نیز در طول این ۲۰ ماه افزایش می‌یابد که این امر نشانگر گواه دیگری دال بر اعتبار مدل می‌باشد.



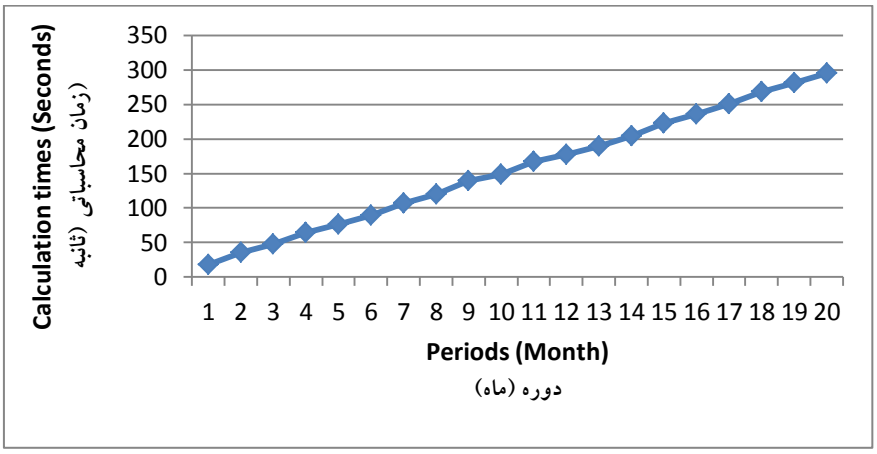
شکل ٤- مقادیر حاصل از هزینه در ابعاد مختلف.

Figure 4. Values resulting from the cost in different dimensions.



شکل ۵- مقادیر حاصل از هرزآب در ابعاد مختلف.

Figure 5. Amounts of waste water in different dimensions.



شکل ٦- مقادیر حاصل از زمان محاسبه در ابعاد مختلف.

Figure 6. The values obtained from the calculation time in different dimensions.

نتایج کاربردی تحقیق

با توجه به این‌که روش اپسیلون محدودیت، برای حل مسأله ریاضی معرفی شده است، به‌ازای مقادیر مختلف اپسیلون مقدار توابع هدف محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است. این مدل با استفاده از نرم‌افزار GAMS و با استفاده از ابزار CPLEX حل شده است. در این جدول مقادیر مختلفی برای اپسیلون تعریف شده و توابع هدف با آن‌ها حل شده است. همان‌طور که از جدول مشخص است، مقادیر تابع هدف با افزایش اپسیلون تا مقدار مشخصی، تغییر قابل‌توجهی از خود نشان نمی‌دهند، اما از جایی به بعد (برای مثال تابع هدف اول) افزایش در مقدار اپسیلون، شیب قابل‌ملاحظه‌ای در مقادیر توابع هدف را نشان می‌دهد. این تغییرات در توابع هدف شیب‌های متفاوتی را از خود نشان داده است. براساس نتایج به‌دست آمده، به‌ازای آزمایش مقادیر مختلف اپسیلون، ناحیه شدنی و بردار بهبوددهنده توابع هدف ایجاد شده است. برطبق نتایج به‌دست آمده سطح تغییرات معنی‌دار اپسیلون بین ۵۰ تا ۹۰۰ به‌عنوان بردار بهبوددهنده تعیین شده است. تعیین این بازه مشخص می‌کند که اگر چنان‌چه مقدار اپسیلون کم‌تر از ۵۰ و بیش‌تر از ۹۰۰ در نظر گرفته شود، پاسخ

مسأله خارج از ناحیه شدنی قرار می‌گیرد. بنابراین، مقدار اپسیلون برای جستجوی جواب بهینه محلی برای تابع هدف اول روی نقطه ۵۰۰ قرار دارد. زیرا، بر روی این نقطه جواب بهینه برای تابع هدف اول رخ می‌دهد. وضعیت بهینه برای تابع هدف دوم در اپسیلون ۱۵۰ رخ می‌دهد. بنابراین، محدوده پاسخ بهینه بین اپسیلون ۱۵۰ تا ۵۰۰ می‌باشد. در جدول ۳ نتایج حل مدل با طول گام برابر با ۵۰ برای اپسیلون نشان داده شده است.

جدول ۳- نتایج حل مدل با روش اپسیلون محدودیت.

Table 3. The results of solving the model with the epsilon constraint method.

اپسیلون Epsilon	هزینه (هزار ریال) Cost (thousands Rials)	مقدار هرزآب و کمبود (Lit/m^3) Quantity of waste water and shortage (Lit/m^3)	زمان نهایی اجرا (دقیقه) Final calculation time (minute)
50	512	0.71	57
100	563	0.74	55
150	382	0.70	62
200	450	0.75	57
250	430	0.78	68
300	413	0.75	75
350	398	0.75	58
400	365	0.75	94
450	348	0.74	86
500	307	0.75	58
550	480	0.71	62
600	512	0.76	48
650	563	0.76	72
700	450	0.82	98
750	460	0.73	78
800	413	0.83	81
850	510	0.75	82
900	398	0.86	70
مقدار بهینه	307	0.70	48

مقایسه حل فراابتکاری و قطعی: برای مقایسه حل فراابتکاری و قطعی لازم است ابتدا برای اجرای الگوریتم NSGA-II پارامترهای این الگوریتم تنظیم شوند. برای تنظیم پارامترها از طرح آزمایش تاگوچی استفاده شده است. به‌منظور طراحی آزمایش‌ها در الگوریتم NSGA-II، ابتدا برای پارامترهای آن ۳ سطح مختلف تعریف می‌شود؛ و سپس آزمایش‌های از پیش تعریف‌شده در این الگوریتم اجرا می‌شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای این الگوریتم مطابق جدول ٤ می‌باشد. این مقادیر اولیه براساس مطالعه چوبر و همکاران (۲۰۲۲) و قاسمی و ابوالقاسمیان (۲۰۲۳) در نظر گرفته شده است (۲۱ و ۲۲). سپس با استفاده از طرح L9 تاگوچی آزمایش‌های مختلف را ایجاد کرده و برای هر کدام از آزمایش‌ها مقدار شاخص میانگین فاصله ایده (MID) بین هر راه‌حل جایگزین و راه‌حل ایده‌آل در یک فضای چندبعدی استفاده می‌شود. این شاخص به تعیین میزان عملکرد هر جایگزین نسبت به راه‌حل ایده‌آل در یک فرآیند تصمیم‌گیری با اهداف متضاد متعدد کمک می‌کند. با محاسبه میانگین فاصله ایده‌آل، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند عملکرد هر جایگزین را ارزیابی کنند و بر اساس نزدیکی به راه‌حل ایده‌آل در همه معیارها، مناسب‌ترین راه‌حل را شناسایی کنند. نتایج اجرا در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ٤- پارامترها و سطوح آن‌ها برای الگوریتم NSGA-II.

Table 4. Parameters and their levels for NSGA-II algorithm.

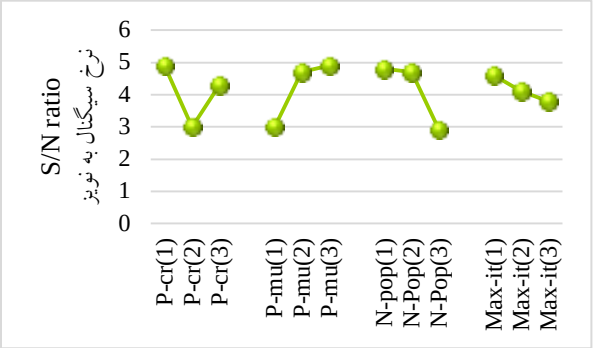
مقادیر هر سطح Value of each level			پارامتر Parameters
سطح 3 Level 3	سطح 2 Level 2	سطح 1 Level 1	
200	100	50	Population size (PS)
0.9	0.7	0.5	Crossover rate (CR)
0.5	0.3	0.2	Mutation rate (MR)
200	150	100	Maximum iterations (Max_iter)

جدول ۵- مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوچی برای NSGA-II.

Table 5. Response variable values in Taguchi technique for NSGA-II.

شماره اجرا Run number	پارامترهای الگوریتم Algorithm parameters				شاخص MID MID Index
	PS	CR	MR	Max_iter	
1	1	1	1	1	0.534
2	1	2	2	2	0.612
3	1	3	3	3	0.537
4	2	1	2	3	0.491
5	2	2	3	1	0.576
6	2	3	1	2	0.637
7	3	1	2	2	0.599
8	3	2	1	3	0.973
9	3	3	3	1	0.642

حال با ارائه این خروجی‌ها به نرم‌افزار MINITAB نمودار S/N به‌صورت شکل ۷ ترسیم می‌شود.



شکل ۷- خروجی مینی‌تب برای روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II.

Figure 7. Minitab output for Taguchi method in NSGA-II algorithm.

حال بر اساس خروجی ارائه شده در نمودار فوق بهترین مقدار هر پارامتر مشخص شده و سایر مثال‌ها با این مقادیر پارامترهای الگوریتم، اجرا می‌شود. در جدول ٦ مقدار بهینه پارامترها ارائه شده است.

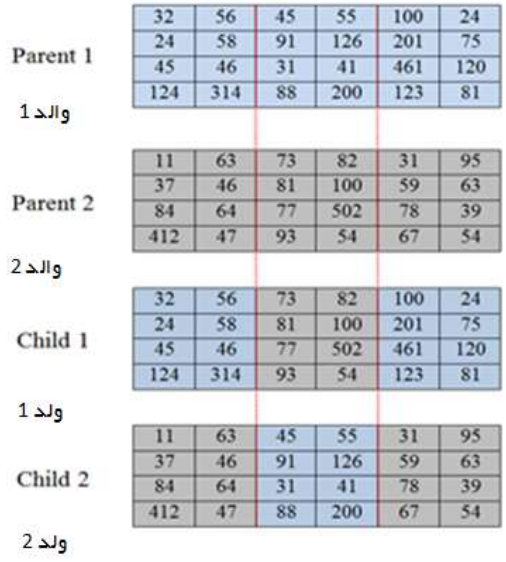
جدول ٦- مقدار بهینه متغیرها در NSGA-II.

Table 6. The optimal value of variables in NSGA-II.

پارامتر Parameters	مقدار بهینه Optimum value
Population size (PS)	150
Crossover rate (CR)	0.8
Mutation rate (MR)	0.5
Maximum iterations (Max_iter)	100

در ادامه، عملیات تقاطع به‌صورت تک‌نقطه‌ای براساس متغیر مکان انجام می‌شود. این مکانیسم انتخاب منجر به حل‌های متمرکز و همگرایی الگوریتم می‌شود. برای این منظور، در این پژوهش از یک تقاطع دونقطه‌ای استفاده شده است که در آن دو نقطه به‌طور تصادفی در کروموزوم انتخاب و جایگزین می‌شوند. در شکل ۸ سازوکار تقاطع نشان داده شده است.

علاوه بر عملیات تقاطع، برای انجام جهش، یک کروموزوم به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. در واقع انتخاب تصادفی منجر به افزایش تنوع راه‌حل‌ها می‌شود. جهش بر اساس متغیر مکان به‌عنوان درصدی از طول کروموزوم انجام می‌شود. در این مطالعه، کروموزوم‌ها به‌طور تصادفی انتخاب شده‌اند که برای انجام جهش وارونه می‌شوند. در شکل ۹ عملیات جهش نشان داده شده است.



32	56	45	55	100	24
24	58	91	126	201	75
45	46	31	41	461	120
124	314	88	200	123	81

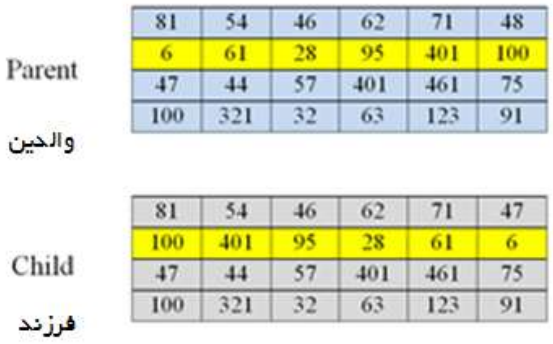
11	63	73	82	31	95
37	46	81	100	59	63
84	64	77	502	78	39
412	47	93	54	67	54

32	56	73	82	100	24
24	58	81	100	201	75
45	46	77	502	461	120
124	314	93	54	123	81

11	63	45	55	31	95
37	46	91	126	59	63
84	64	31	41	78	39
412	47	88	200	67	54

شکل ۸- عملگر تقاطع.

Figure 8. Crossover operator.



81	54	46	62	71	48
6	61	28	95	401	100
47	44	57	401	461	75
100	321	32	63	123	91

81	54	46	62	71	47
100	401	95	28	61	6
47	44	57	401	461	75
100	321	32	63	123	91

شکل ۹- عملگر جهش.

Figure 9. Mutation operator.

سرانجام، با اجرای نمونه‌های کوچک، متوسط، بزرگ و خیلی بزرگ با استفاده از الگوریتم NSGA-II مقایسه‌ای بین نتایج حل مدل قطعی و فراابتکاری ارائه شده است. در جدول ٦ نتایج راه‌حل مدل در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ نشان داده شده است. دو مورد اول برای مقیاس‌های کوچک، دو مورد دوم برای مقیاس‌های متوسط و دو مورد سوم برای مقیاس‌های بزرگ و دو مورد آخر برای مقیاس‌های خیلی بزرگ هستند. با توجه به نتایج، مدل با استفاده از روش حل قطعی محدودیت اپسیلون و روش فراابتکاری NSGA-II حل‌شده است. مطابق با جدول ۷ زمان حل رویکرد قطعی با افزایش ابعاد مسأله به‌طور تصاعدی افزایش می‌یابد، درحالی‌که زمان‌های حل فرابتکاری NSGA-II با نرخ پایین‌تری افزایش می‌یابد. هم‌چنین خطای NSGA-II در تابع هدف اول کم‌تر از ۱٪ و در تابع هدف دوم کم‌تر از ٦٪ است. بنابراین، می‌توان به نتایج به‌دست‌آمده از این‌روش برای حل مسائل در مقیاس خیلی بزرگ اعتماد کرد.

جدول ۷- نتایج مقایسه‌ای برای حل مسائل کوچک و متوسط.

Table 7. Comparative results for solving small and medium problems.

شماره	Exact			NSGA-II		Error%	
	f_1	f_2	Time(s)	f_1	f_2	Time(s)	f_1	f_2
1	625	213.6	1.11	631	225.3	1.01	0.009	0.05
2	661	358.3	25.69	674	364.1	3.6	0.008	0.03
3	684	365.3	36.14	697	371.5	5.14	0.007	0.04
4	689	371.8	84.74	702	382.1	12.17	0.007	0.05
5	978	583.9	657.11	1022	621.7	22.17	0.006	0.04
6	-	-	-	1125	647.5	33.69	-	-
7	-	-	-	1361	751.6	37.17	-	-

تحلیل حساسیت: در این بخش از پژوهش یک تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مهم مسأله و مقایسه میزان اثرگذاری هر پارامتر برروی مقادیر توابع هدف هزینه تأمین آب و میزان هرزآب و کمبود پرداخته شده است. نتیجه این تحلیل حساسیت در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.

جدول ۸- مقایسه پارامترهای اثرگذار بر هزینه آب‌رسانی شهری.

Table 8. Comparison of parameters affecting the cost of urban water supply.

هزینه تأمین آب Water supply cost	تقاضا Demand	هزینه احداث Construction cost	هزینه منبع Resource cost	هزینه تصفیه The cost of treatment	میزان آب ورودی Value of input water	ظرفیت Capacity	هزینه مصرف انرژی The cost of energy consumption	میزان مصرف انرژی the amount of energy consumption	هزینه انتقال Transport Cost
10%	0.86%	0.94%	1.18%	0.84%	-1.21%	-1.21%	1.11%	1.12%	0.88%
20%	1.98%	1.83%	2.35%	1.93%	-2.28%	-2.40%	2.04%	2.15%	1.83%
30%	2.74%	3.11%	3.25%	3.24%	-3.53%	-3.79%	3.23%	2.83%	2.51%
40%	3.54%	4.13%	3.87%	4.26%	-5.01%	-5.38%	4.03%	3.75%	3.21%
50%	4.41%	5.06%	4.63%	4.88%	-6.13%	-6.63%	5.11%	4.72%	3.90%

براساس جدول ۸، پارامتر هزینه مصرف انرژی و هزینه احداث با نزدیک به ۵ درصد دارای بیش‌ترین اثرگذاری بر روی افزایش هزینه‌های تأمین آب به‌شمار می‌روند. بنابراین، باعث بدتر شدن جواب در بخش هزینه می‌شود این در حالی است که پارامترهای ظرفیت و میزان آب ورودی دارای اثر مثبتی بوده و موجب بهبود جواب می‌شوند. طبق نتایج به‌دست آمده؛ اثرگذاری ظرفیت ٦/٦٣- درصد و اثرگذاری میزان آب ورودی ٦/١٣- درصد می‌باشد به این معنا که افزایش ظرفیت می‌تواند تا ۵۰ درصد هزینه را کاهش دهد و این در حالی است که میزان آب ورودی در صورتی که ٦/١٣ درصد افزایش یابد موجب کاهش ۵۰ درصدی در میزان هزینه‌ها می‌شود. دو پارامتر ظرفیت و میزان آب ورودی تنها پارامترهای کاهشی بوده و بقیه دارای اثر افزایشی می‌باشند.

جدول ۹- مقایسه پارامترهای اثرگذار بر هرزآب و کمبود.

Table 9. Comparison of parameters affecting waste water and shortage.

هزینه انتقال Transport Cost	میزان مصرف انرژی the amount of energy consumption	هزینه مصرف انرژی The cost of energy consumption	ظرفیت Capacity	میزان آب ورودی Value of input water	هزینه تصفیه The cost of treatment	هزینه منبع Resource cost	هزینه احداث Construction cost	تقاضا Demand	هرزآب و کمبود Waste water and shortage
0.58%	0.32%	0.37%	-0.32%	-0.35%	0.51%	0.33%	0.36%	0.49%	10%
0.89%	0.70%	0.89%	-0.76%	-0.90%	1.08%	0.87%	0.69%	0.95%	20%
1.18%	1.25%	1.37%	-1.34%	-1.30%	1.59%	1.34%	1.02%	1.47%	30%
1.55%	1.65%	1.67%	-1.84%	-1.80%	2.04%	1.72%	1.54%	1.92%	40%
1.97%	1.96%	2.15%	-2.29%	-2.34%	2.54%	2.03%	1.83%	2.45%	50%

براساس جدول ۹، میزان آب ورودی و ظرفیت موجب کاهش میزان هرزآب و کمبود می‌شود ضمن این‌که هزینه تصفیه و تقاضا در صورت افزایش ۲/۵٤ و ۲/٤٥ درصدی دارای بیش‌ترین اثر بر کمبود می‌باشند. نکته قابل ذکر این است که میزان آب ورودی تا ۲/۳٤ درصد و ظرفیت نیز نزدیک به ۲/۲۹ درصد افزایش یابد از میزان کمبود کم می‌کند. یعنی درصورت افزایش میزان آب ورودی و توسعه ظرفیت‌های نگهداری برای ذخیره‌سازی به کاهش کمبود در سیستم تأمین امنیت آب شهری کمک می‌کند. با توجه به رابطه عکس این دو پارامتر با کمبود، با علامت منفی نشان داده شده است.

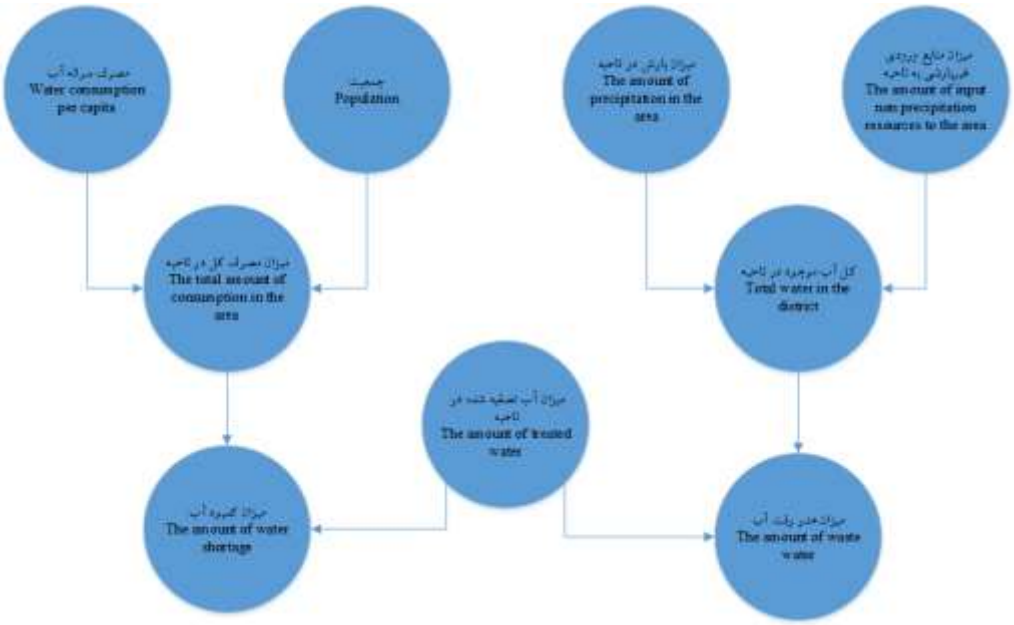
پویایی سیستم: در این بخش به‌منظور بررسی عملکرد سیستم آب‌رسانی شهری در درازمدت به تحلیل مدل پویایی سیستم پرداخته شده است. برای اجرای مدل نیاز به پارامترهای از پیش‌تعیین‌شده‌ای است که مقادیر آن‌ها با استفاده از مدل ریاضی تعیین می‌شوند. بنابراین، مقدار متغیرهای مدل ریاضی که در مدل پویایی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- پارامترهای تعیین‌شده مدل پویایی سیستم براساس مدل ریاضی.

Table 10. Determined parameters of the system dynamics model based on the mathematical model.

پارامتر Parameter	منبع تأمین آب Water supply source		
	20	25	30
Y_{ik}	1555	1724	1853
	سیستم تصفیه Purification system		
Z_{jt}	12	14	16
	1222	1456	1525
	دوره زمانی (ماه) Time periods (Month)		
WW_{it}	10	12	15
	333	286	328
	دوره زمانی (ماه) Time periods (Month)		
LW_{it}	10	12	15
	1200	1500	1600

با در نظر گرفتن مقادیر به‌دست آمده در جدول ۱۱ براساس حل مدل ریاضی در مدل پویایی سیستم، نمودار علت و معلولی مطابق با شکل ۱۰، ایجاد می‌شود.

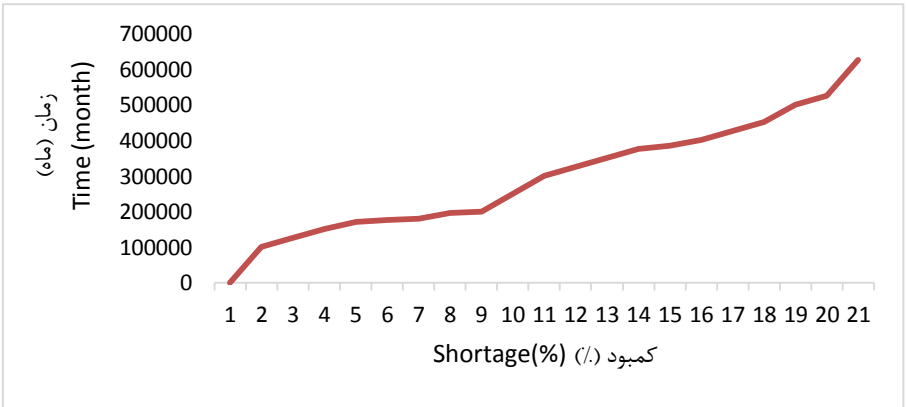


شکل ۱۰- نمودار علی و معلولی پژوهش حاضر.

Figure 10. Cause and effect diagram of the current research.

در شکل ۱۱، میزان مصرف سرانه ضربدر جمعیت ناحیه شده و در پی آن میزان مصرف حاصل شده است. در ادامه میزان آب ورودی به همراه میزان بارش تشکیل‌دهنده کل میزان آب موجود در ناحیه را تشکیل می‌دهند که در نهایت میزان کمبود بر اساس میزان آب تصفیه شده و میزان هدررفت تعیین می‌شود.

با اجرای مدل علی معلولی طراحی شده در شکل ۱۱، مدل پویایی سیستم اجرا شده است. نتایج روابط علی و معلولی در قالب یک نمودار کمی ارائه شده که برای پیش‌بینی میزان کمبود مورد استفاده قرار خواهد گرفت. نتایج نهایی کمبود برای بیست و یک سال آینده در استان گیلان مطابق با شکل ۱۰ می‌باشد.



شکل ۱۱- پیش‌بینی میزان کمبود.

Figure 11. Predicting the amount of shortage.

بر طبق شکل ۱۰، پیش‌بینی می‌شود میزان کمبود در ناحیه مورد بررسی در طی بیست و یک سال آینده از یک روند خطی پیروی کرده و در هر دوره بر میزان کمبود با توجه به افزایش جمعیت و هم‌چنین کاهش میزان بارش در ناحیه به طور صعودی افزایش می‌یابد. اما نکته قابل‌توجه این است که این افزایش از توزیع نمایی و تصاعدی تبعیت نمی‌کند و به اندازه افزایش در جمعیت و هم‌چنین میزان بارش می‌توان انتظار میزان کمبود را در ناحیه مورد بررسی داشت.

نتیجه‌گیری کلی

هدف پژوهش حاضر بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی سیستم آب‌رسانی شهری با استفاده بهینه‌سازی دوهدفه و روش پویایی سیستم بود که موردمطالعه انتخاب سازمان آب و فاضلاب استان گیلان بود. برای این منظور ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای صورت گرفت و براساس مطالعات انجام شده شکاف تحقیقاتی استخراج گردید. روش تحقیق پیشنهادی در این پژوهش ارائه یک مدل ترکیبی از مدل‌سازی ریاضی، الگوریتم‌های فراابتکاری و رویکرد پویایی سیستم است که با استفاده از مدل ریاضی و الگوریتم فراابتکاری متغیرهای تصمیم که شامل میزان منابع آبی موجود در منبع، میزان آب تصفیه‌شده در سیستم تصفیه آب، میزان هرزاب در ناحیه و میزان کمبود آب در ناحیه بود به همراه مقادیر توابع هدف به‌دست‌آمده و سپس این مقادیر به‌عنوان مقادیر ورودی وارد رویکرد پویایی سیستم شده و به این وسیله میزان کمبود در دوره‌های آتی پیش‌بینی شد که نشانگر یک‌روند خطی و تا بیش از ۵۲۰ هزار واحد می‌باشد. ضمن این‌که تحلیل حساسیت‌های انجام‌شده نیز اثرگذاری معکوس پارامترهای ظرفیت و میزان آب ورودی و اثرگذاری مستقیم پارامترهای هزینه انتقال، میزان مصرف انرژی هزینه مصرف انرژی هزینه تصفیه، هزینه منبع، هزینه احداث و تقاضا می‌باشد که در بین پارامترهای با اثرگذاری مستقیم هزینه مصرف انرژی و هزینه احداث و هزینه تصفیه دارای بیش‌ترین اثرگذاری بر هزینه تأمین و پارامتر هزینه تصفیه و تقاضا دارای بیش‌ترین اثرگذاری بر کمبود و هرزاب در سیستم است. بنابراین، براساس یافته‌های پژوهش حاضر مهم‌ترین پیشنهادها برای مدیران به‌عنوان مسیر راه در آینده به شرح زیر مطرح می‌باشد:

۱- افزایش ظرفیت تصفیه و هم‌چنین منابع آبی در نواحی استان گیلان می‌توان بر هزینه تصفیه و کاهش کمبود و پساب اثرگذار باشد. بنابراین، یکی از رویکردها در خصوص پیشگیری از کمبود و کنترل پساب با توجه به منابع آبی فراوان در استان گیلان به‌طور طبیعی افزایش سرمایه‌گذاری در جهت بالا بردن ظرفیت تصفیه و منابع آبی می‌باشد. البته سرمایه‌گذاری قطعاً در کوتاه‌مدت هزینه‌بر خواهد بود اما در بلندمدت مانع از افزایش هزینه‌ها و پیدایش کمبود آب خواهد شد.

۲- در خصوص پارامترهایی که اثرگذاری مثبتی دارند مانند میزان آب ورودی غیربارشی که از نواحی و استان‌های دیگر وارد استان گیلان می‌شود، کنترل مناسبی به‌وسیله روش‌های مختلف که می‌تواند منجر به افزایش منابع آبی استان شود انجام بگیرد. تا جایی که حفظ آب‌های ورودی می‌تواند منافعی بیش از آب‌های بارشی داشته باشد. بنابراین، اگر سیستم‌های درستی برای کنترل آب‌های ورودی تعبیه و به‌خوبی مدیریت شود می‌توان انتظار افزایش منابع آبی و درنتیجه کاهش هزینه و پساب را در استان گیلان داشت.

۳- کنترل مصرف انرژی از مواردی است که به‌شدت بر هزینه اثرگذار می‌باشد. استفاده از دستگاه‌های با مصرف کم‌تر انرژی می‌تواند در خصوص تصفیه و نگهداری منابع آبی می‌تواند در این زمینه سودمند باشد.

٤- هزینه احداث به‌عنوان عاملی مهم در خصوص هزینه تلقی می‌شود. این امر نشان می‌دهد اگر بتوان از منابع موجود به‌خوبی استفاده کرد و احداث تسهیلات

جدید را در دستور کار قرار نداد این امر ازنظر هزینه‌ای اثر قابل‌توجهی می‌تواند بر جا داشته باشد.

۵- تقاضا به‌عنوان یک عامل مهم در ایجاد کمبود در مدل جاری در نظر گرفته‌شده است. البته اثر تقاضا بر هزینه به‌اندازه سایر پارامترها نیست اما یقیناً بر کمبود و پساب اثرگذار است. در این راستا فرهنگ‌سازی در خصوص مصرف و بهینه‌سازی مصرف با استفاده از ابزارها و شیرآلات ساختمانی می‌تواند به بهبود تقاضا کمک نماید.

در این پژوهش، برخلاف مطالعات گذشته مانند دمیرل و همکاران (۵)، شیو و همکاران (٦)، نپال گلپیرا و تیرکلائی (۹) و ترن (۱۰) که فقط از مدل پویایی سیستم و هم‌چنین مطالعه تیرکلائی و همکاران (۱۱) که فقط از روش برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است؛ از یک مدل ترکیبی شامل مدلسازی ریاضی و پویایی سیستم برای ارائه الگویی جهت تأمین امنیت آب شهری استفاده شده است. به‌کارگیری هم‌زمان این دو مدل در این پژوهش باعث شده است تا تحلیل‌های بیش‌تر و بهتر با دقت بالایی برای دوره‌های مختلف تحت مفروضات مختلف ارائه شود. علاوه بر این، در این پژوهش برخلاف مطالعات قبلی که صرفاً الگویی برای مدیریت منابع آبی ارائه شده است چارچوبی برای تأمین امنیت آب شهری که بحث داغ جوامع پیشرفته است، ارائه شده است.

هم‌چنین، مهم‌ترین پیشنهاداتی که به منظور توسعه پژوهش حاضر برای مطالعاتی آتی مطرح می‌شود عبارت‌اند از: ارائه مدل جاری در استان‌های کم‌آب کشور مانند یزد و کرمان و تجزیه و تحلیل آن؛ استفاده از متغیرهای تصمیم و پارامترهای بیش‌تر در مدل ریاضی؛ استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری متعدد و مقایسه عملکرد آن‌ها؛ در نظر گرفتن عدم قطعیت در برخی پارامترها مانند تقاضا در خصوص پساب و هم‌چنین، استفاده از ابزار پویایی سیستم جهت پیش‌بینی وضعیت در درازمدت.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دارند تا از همه زحمات سردبیر محترم و داوران گرامی مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک برای بررسی دقیق و ارسال نقطه‌نظرات سازنده تشکر و قدردانی نمایند.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های لازم برای اجرای این پژوهش از سازمان آب و فاضلاب استان گیلان اخذ شده است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان می‌باشد.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌ها، انجام محاسبات و تحلیل‌های نرم‌افزاری.

نویسنده دوم: طرح تحقیق و روش‌شناسی، تهیه منابع مطالعاتی لازم، بررسی نهایی تحقیق، نظارت بر روند اجرای تحقیق، پاسخ به نظرات داوران.

نویسنده سوم: تهیه مقاله در فرمت مجله، انجام اصلاحات و ویرایش‌ها طبق نظر داوران و سردبیر محترم مجله با نظارت نویسنده دوم (مسئول مکاتبات)

اصول اخلاقی

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت شده است و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

این پژوهش از هیچ حمایت مالی برخوردار نبوده است.

منابع

1. Song, W., Liu, Y., Arowolo, A., Zhang, Y., & Xu, Q. (2018). Optimal water allocation scheme in integrated water-ecosystem-economy system. *River Basin Management. Springer Press, Singapore*.
2. Tian, J., Guo, S., Liu, D., Pan, Z., & Hong, X. (2019). A fair approach for multi-objective water resources allocation. *Water Resources Management*, 33, 3633-3653.
3. Parween, S., & Sinha, R. C. (2023). Identification of Indicators for Developing an Integrated Study on Urban Water Supply System, Planning, and Management. *Journal of Environmental Engineering*, 149 (3), 04022095.
4. Nezami, N., Zarghami, M., Tizghadam, M., & Abbasi, M. (2022). A novel hybrid systemic modeling into sustainable dynamic urban water metabolism management: Case study. *Sustainable Cities and Society*, 85, 104065.
5. Demirel, D. F., Gönül-Sezer, E. D., & Pehlivan, S. A. (2022). Analyzing the wastewater treatment facility location/network design problem via system dynamics: Antalya, Turkey case. *Journal of Environmental Management*, 320, 115814.
6. Shiu, H. Y., Lee, M., Lin, Z. E., & Chiueh, P. T. (2023). Dynamic life cycle assessment for water treatment implications. *Science of the Total Environment*, 860, 160224.
7. Heydari Kushalshah, T., Daneshmand-Mehr, M., & Abolghasemian, M. (2023). Hybrid modelling for urban water supply system management based on a bi-objective mathematical model and system dynamics: A case study in Guilan province. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 15 (1), 260-279.
8. de Melo, M. C., Formiga-Johnsson, R. M., de Azevedo, J. P. S., de Oliveira Nascimento, N., Machado, F. L. V., Pacheco, F. A. L., & Fernandes, L. F. S. (2021). A raw water security risk model for urban supply based on failure mode analysis. *Journal of Hydrology*, 593, 125843.
9. Golpîra, H., & Tirkolaee, E. B. (2019). Stable maintenance tasks scheduling: A bi-objective robust optimization model. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106007.
10. Nepal, S., & Tran, L. T. (2019). Identifying trade-offs between socio-economic and environmental factors for bioenergy crop production: A case study from northern Kentucky. *Renewable Energy*, 142, 272–283.
11. Tian, Y., Li, C., Yi, Y., Wang, X., Shu, A. (2020). Dynamic model of a sustainable water resources utilization system with coupled water quality and quantity in Tianjin city. *Sustainability*, 12 (10), 4254.
12. Xu, Z., Yao, L., & Chen, X. (2020). Urban water supply system optimization and planning: Bi-objective optimization and system dynamics methods. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106373.
13. Yu, Y., Zhao, R., Zhang, J., Yang, D., & Zhou, T. (2021). Multi-objective game theory optimization for balancing economic, social and ecological benefits in the Three Gorges Reservoir operation. *Environmental Research Letters*, 16 (8), 085007.
14. Deng, L., Guo, S., Yin, J., Zeng, Y., & Chen, K. (2022). Multi-objective optimization of water resources allocation in Han River basin (China) integrating efficiency, equity and sustainability. *Scientific Reports*, 12 (1), 1-21.
15. Gilani, H., Shobeiry, S., Kami, M. B., & Sahebi, H. (2022). A sustainable redesign model for the water/wastewater supply network: A water–energy nexus approach. *Kybernetes*, 52 (5), 1842-1860.
16. Xu, Z. (2023). Water-climate change extended nexus contribution to social welfare and environment-related sustainable development goals in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (14), 40654-40669.
17. Pirouz, B., & Khorram, E. (2016). A computational approach based on the ε-constraint method in multi-objective

optimization problems. *Advances and Applications in Statistics*, 49 (6), 453.

18. Abolghasemian, M., & Darabi, H. (2018). Simulation based optimization of haulage system of an open-pit mine: Meta modeling approach. *Organizational resources management researchs*, 8 (2), 1-17.
19. Abolghasemian, M., Kanai, A. G., & Daneshmandmehr, M. (2020). A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *Iranian journal of management studies*, 13 (4), 705-732.
20. Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., & Daneshmand-Mehr, M. (2022). Simulation-Based Multiobjective Optimization of Open-Pit Mine Haulage System: A Modified-NBI Method and Meta Modeling Approach. *Complexity*, 2022 (1), 3540736.
21. Chobar, A. P., Adibi, M. A., & Kazemi, A. (2022). Multi-objective hub-spoke network design of perishable tourism products using combination machine learning and meta-heuristic algorithms. *Environment, Development and Sustainability*, 1-28.
22. Ghasemi, P., & Abolghasemian, M. (2023). A Stackelberg game for closed-loop supply chains under uncertainty with genetic algorithm and gray wolf optimization. *Supply Chain Analytics*, 4, 100040.

پیوست

جدول ۱- نمادگذاری ریاضی.

Table 1. Mathematical model notation.

اندیس‌ها Indices	
نماد Signitaure	توضیحات Discription
i	تعداد ناحیه‌ها Number of areas
j	تعداد سیستم‌های تصفیه Number of treatment systems
k	تعداد منابع تأمین آب Number of water supply resources
t	دوره زمانی Time periods
پارامترها	
نماد Signitaure	توضیحات Discription
DEM_{it}	میزان مصرف آب در ناحیه i در دوره t The amount of water consumption in area i in time t
FCJ_{ij}	هزینه احداث سیستم تصفیه آب j در ناحیه i Cost of water treatment system construction j in area i
FCK_{ik}	هزینه منبع تأمین آب k در ناحیه i Cost of water supply resource k in area i
VCJ_j	هزینه تسویه سیستم تصفیه آب j Cost of settling the water treatment system j
EW_{it}	میزان منابع آب ورودی به ناحیه i در دوره زمانی t The amount of water resources entering the area i in time t
$CAPJ_{ij}$	ظرفیت سیستم تصفیه آب j در ناحیه i Capacity of water treatment system j in area i
$CAPK_{ik}$	ظرفیت منبع آبی k در ناحیه i Water resource capacity k in area i
ENC_j	میزان مصرف انرژی برای تصفیه آب در سیستم تصفیه آب j The amount of energy consumption for water treatment in the water treatment system j
$UENC_j$	هزینه هر واحد مصرف انرژی برای تصفیه آب در سیستم تصفیه آب j Cost of energy consumption per unit for water treatment in the water treatment system j
$ENCK_k$	میزان مصرف انرژی در منبع تأمین آب k The amount of energy consumption in the water supply resource k
$UENCK_k$	هزینه هر واحد مصرف انرژی برای منبع تأمین آب k Cost of energy consumption per unit for the water supply resource k
TC_{kji}	هزینه انتقال آب از منبع تأمین آب k به سیستم تصفیه آب j در ناحیه i Cost of water transmission from water supply resource k to water treatment system j in area i

ادامه جدول ۱-

Continue Table 1.

متغیرها Variables	
X_{ij}	یک متغیر باینری است. اگر سیستم تصفیه آب j در ناحیه i احداث شود ۱ و در غیر این‌صورت صفر Its value is 1 water treatment system j is constructed in area i; otherwise it is zero
U_{kji}	یک متغیر پیوسته است. میزان انتقال آب از منبع تأمین آب k به سیستم تصفیه آب jدر ناحیه i The amount of water transmission from water supply resource k to water treatment system j in area i
Y_{ik}	یک متغیر پیوسته است. میزان منابع آبی موجود در منبع تأمین آب k در ناحیه i The amount of water resources available in water supply resource k in area i
Z_{jt}	یک متغیر پیوسته است. میزان آب تصفیه شده در سیستم تصفیه آب j در دوره زمانی t The amount of treated water in the water treatment system j in time t
WW_{it}	یک متغیر پیوسته است. میزان هرزآب در ناحیه i در دوره زمانی t The amount of wastewater in area i in time t
LW_{it}	یک متغیر پیوسته است. میزان کمبود آب در ناحیه i در دوره زمانی t The amount of water shortage in area i in time t

جدول ۲- متغیرهای مدل پویایی سیستم.

Table 2. System dynamics model variables.

معادلات پویایی Dynamic equation	پارامترهای مدل پویا Parameters of dynamic model	
	توضیحات Discription	نماد Signitaure
$SMOOTH\ (Water\ supply)$	میزان منابع آبی موجود در منبع تأمین آب k در ناحیه i The amount of water resources available in water supply source k in area i	Y_{ik}
$SMOOTH\ (Watertreatment)$	میزان آب تصفیه شده در سیستم تصفیه آب j در دوره زمانی t The amount of treated water in the water treatment system j in the time t	Z_{jt}
$SMOOTH\ (Wastewater)$	میزان هرزآب در ناحیه i در دوره زمانی t The amount of wastewater in area i in time t	WW_{it}
$SMOOTH\ (Shortage\ water)$	میزان کمبود آب در ناحیه i در دوره زمانی t The amount of water shortage in area i in time t	LW_{it}
	متغیرهای مدل پویا Variables of dynamic model	
$F1(support)$	کل هزینه سیستم منابع آبی Total cost of water resources system	$F1$
$F2(support)$	میزان کل کمبود و هرزآب در سیستم Total amount of shortage and waste water in the system	$F2$

جدول ۳- نمونه‌های عددی از پیش تعیین شده.

Table 3. Predetermined numerical samples.

دوره زمانی Time periods t	منابع تأمین آب Water supply source k	سیستم تصفیه Purification system j	ناحیه Zone i	مسئله Problem	ابعاد مسأله Problem scale
10	20	12	15	1	کوچک Small
10	20	12	16	2	
10	20	12	17	3	
10	20	12	18	4	
10	20	12	19	5	
10	20	12	20	6	
10	20	12	21	7	
12	25	14	22	8	متوسط Medium
12	25	14	23	9	
12	25	14	24	10	
12	25	14	25	11	
12	25	14	26	12	
12	25	14	27	13	
15	30	16	28	14	بزرگ Large
15	30	16	29	15	
15	30	16	30	16	
15	30	16	31	17	
15	30	16	32	18	
15	30	16	33	19	
15	30	16	34	20	