Research Paper

Multi-objective Optimization and Management of Treated Wastewater Allocation for Urban Green Space Irrigation

Seyed Ali Kazeminezhad fard[1], Akramolmolok Lahijanian[2]*, Mohammad Reza Nikoo[3], Amir Hesam Hasani[4]

1. Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Full Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering and Architecture, Sultan Qaboos University, Muscat, Oman
4. Full Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2023/01/01
Revised: 2023/01/01
Accepted: 2023/03/19

Use your device to scan and read the article online

DOI:
10.30495/wej.2024.31391.2375

Keywords:
urban green space, water resource management, treated wastewater, multi-objective optimization, system dynamics, Shiraz city

Abstract

Introduction: Effective management in metropolitan planning of urban green space water resources is very important due to the rapid growth of urbanization and the limitation of water resources. The purpose of this research is multi-objective optimization and management of treated wastewater allocation using dynamic system models for urban green space irrigation in Shiraz metropolis.

Methods: The factors affecting the supply of water resources and irrigation of the green spaces of Shiraz city have been simulated and according to that, the consumption forecast and the number of available resources and the allocation optimization have been presented. Also, in the current research, effective factors in the current and future conditions that can affect the proposed model have been taken into consideration, and two scenarios have been applied, including increasing the efficiency of green space irrigation and the use of treated wastewater.

Results: The results showed that increasing the efficiency of irrigation through management of transfer, storage and distribution of water and also irrigation at the right times has a much greater effect compared to the use of purified wastewater in order to reduce the extraction of limited resources. In such a way, by increasing the irrigation efficiency by 40% and 50%, respectively, 14% and 39% of water shortages will be solved.

Conclusion: The simulation results showed that in order to achieve the stability of the system, a combination of scenarios of reducing per capita water consumption in green spaces, increasing irrigation efficiency, using purified wastewater and dry landscaped spaces should be considered in the development of urban spaces.

Citation: Kazeminezhad fard A, Lahijanian A, Nikoo M, Hasani A. Multi-objective optimization and management of treated wastewater allocation for urban green space irrigation. Water Resources Engineering Journal. 20254; 16(59): 61-78.

***Corresponding author:** Akramolmolok Lahijanian
Address: Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Tell: +989121328459
Email: lahijanian@hotmail.com

Extended Abstract

Introduction

Multi-objective optimization and management of treated wastewater allocation as one of the key factors in the simulation and decision-making of urban water resources management and subsequent irrigation of urban green spaces in Shiraz metropolis, province Fars, Iran. The most important innovations of the current research are as follows:

- Development of a model based on combining the dynamics of systems and multi-objective optimization in order to use treated wastewater in providing the necessary resources for irrigation of urban green spaces.
- Taking advantage of a top-down systemic view and having a holistic view instead of a detailed view in order to monitor interactions and all influencing and interfering factors in the results and build cause and effect circles to make comprehensive management decisions.
- Simultaneous consideration of conventional water sources (such as dams, wells and aqueducts) and unconventional water sources (purified sewage) as well as other optimization measures (increasing irrigation efficiency) in the multi-objective optimization of the dynamic system
- Investigating and evaluating water resources management with the approach of providing irrigation resources for urban green space in Shiraz

Methods

In this research, the wastewater allocation model of the city of Shiraz was developed as follows: the first objective is to maximize the minimum reliability of water needs and the amount of wastewater that can be allocated during the planning period, while the second objective is to minimize the violation caused by not meeting the consumption needs, especially the use of urban green space, which was optimally considered.

In the current research, it was tried to take into account the sources of surface water, underground water and water that can be recovered and recycled as available resources, along with the determination of irrigation needs and uses. In this research, an attempt has been made to consider the boundaries of the model. Further, all stakeholders (domestic, public, industry, agriculture and environment) and the sources of their needs (underground and surface resources) are considered. Also, considering treated wastewater as an important resource for providing green space irrigation resources, Shiraz sewage treatment plants are also placed in the simulation boundaries. In order to verify the validity, the behavior repetition test has been used. This test focuses on the evaluation of the model outputs, in such a way that the data produced by the model is compared with the historical data to determine the degree of conformity and consistency of the estimated data with the observational data. In order to compare the variables of the volume of underground water, the water needs of Shiraz city, the water needs of Shiraz's green space, the lack of available resources and the needs of users, and the coefficient of determination (R^2) and the average absolute value of error (MAPE) were used to evaluate the behavior of the model.

Results

In the current research, using the multi-objective optimization method, the water resources and consumption model of Shiraz city was investigated. The results were unanalyzed based on the scenarios including increasing the efficiency of green space irrigation, allocating the purified wastewater to the urban green space sector and constructing the Tang-Sarkh dam. The results showed that the use of 30%, 50%, 75% and 100% of the treated wastewater for green spaces will decrease by 3%, 5%, 7% and 9%, respectively. Also, an increase of 10 and 20 percent in irrigation efficiency will decrease the deficit by 14 and 39 percent, respectively.

The simulation results showed that in order to achieve the stability of the system, a combination of scenarios of reducing per capita water consumption in green spaces, increasing irrigation efficiency, using treated wastewater and dry landscaped spaces should be considered in the development of urban spaces.

The results showed that increasing the efficiency of irrigation through management of transfer, storage and distribution of water and also irrigation at the right times has a much greater effect compared to the use of purified wastewater and the construction of the Tang-Sorkh dam in order to reduce the extraction of limited resources. In such a way that by increasing the irrigation efficiency by 40% and 50%, respectively, 14% and 39% of water shortages will be solved.

The best plan to meet the needs of urban green spaces is to increase irrigation efficiency. Also, with the development of sewage treatment, this source can be used to compensate for the lack of water in the green spaces of Shiraz city.

Examining the long-term rainfall data of Shiraz city shows that different periods of drought have been repeated alternately. For this purpose, three periods of drought, were extracted from long-term data and each was repeated alternately until the year of the project horizon. The results of each of these scenarios on the volume of the Shiraz underground water table are presented in Figure 4. The results show that even in the most optimistic case, the drop of the underground water table is quite evident. Therefore, the necessity of planning in order to stop or reduce the negative level of the underground water table in the plain is clear. The simulation results show that the construction of the Tang-Sorkh dam, due to the low flow of the dry river, did not have much effect on the reduction of the shortage and only caused an improvement of 2%. Of course, considering the cost of more than 5000 billion rials to build this dam, and it's not-so-great impact on providing expenses, the construction of the dam will be justified only for the purpose of tourism development. It is necessary to mention that the capacity of Maharlo lake is considered to be 16 million cubic meters per year in the simulation and the annual share of green space from the dam is assumed to be 6 million cubic meters. Considering the low volume of the river and the goal of changing the river from seasonal to permanent, the results show that the effect of the dam on Maharlo Lake is not very effective and the lake will not be seriously threatened.

Conclusion

It is clear that investing in the sector of increasing efficiency is up to 10 times more useful than using treated sewage and about 15 to 20 times more efficient than building a dam (Tang-Sorkh dam). Considering the high costs of building a treatment plant or buying purified wastewater, as well as building a dam and optimizing and mechanizing green space irrigation systems, it is clear that increasing irrigation efficiency is much more justified compared to other options. Also, in order to make the system sustainable in the plan horizon, a combination of scenarios including reducing the growth rate of migration and population, reducing the per capita consumption of green space and domestic water, managing the transfer, storage and distribution of water resources, increasing the efficiency of irrigation, and the use of wastewater treatment. For the green space and to stop and reduce the development of the green space, it is necessary to water abundantly and use rain water and run-off water and implement dry-landscape projects in urban spaces so that the system reaches the desired stability.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design, Methodology, data analysis and final writing: Seyed Ali Kazeminejad fard, Mohammad Reza Nikoo, Amir hesam Hasani
Supervision: Akramolmolok Lahijanian

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب تصفیه‌شده به منظور آبیاری فضای‌سبز شهری

سید علی کاظمی نژادفرد [۱]، اکرم الملوک لاهیجانیان [۲*]، محمدرضا نیکو [۳]، امیرحسام حسنی [۴]
۱. دانشجوی دکتری مدیریت محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، گروه مدیریت محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. دانشیار دانشکده مهندسی، بخش مهندسی عمران و معماری، دانشگاه سلطان قابوس، مسقط، عمان
۴. استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱
تاریخ داوری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI:
10.30495/wej.2024.31391.2375

واژه‌های کلیدی:
فضای سبز شهری، مدیریت منابع آب، پساب تصفیه‌شده، بهینه‌سازی چندهدفه، پویایی سیستم، شهر شیراز

چکیده

مقدمه: کشور ایران از جمله کشورهای خشک و کم‌آب جهان محسوب می‌شود که تأمین آب شرب در بسیاری از شهرهای آن، یکی از معضلات اصلی مدیریت منابع آب شهری می‌باشد. در این راستا، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای مبارزه با کم‌آبی، کاهش و محدودسازی استفاده از آب‌های با کیفیت بالا در آبیاری فضای سبز می باشد. لذا نیاز به مدیریت مؤثر در برنامه‌ریزی‌های کلان شهری در بخش مدیریت منابع آب فضای سبز شهری، به‌ویژه در فصل‌های گرم سال بیش از پیش احساس می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، بهینه‌سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب تصفیه‌شده با استفاده از مدل های پویایی سیستم (سیستم داینامیک) به‌منظور آبیاری فضای سبز شهری در کلان‌شهر شیراز می‌باشد.

روش: بدین منظور، عوامل مؤثر بر تأمین منابع آب و آبیاری فضای سبز شهر شیراز، شبیه‌سازی شده و با توجه به آن، پیش‌بینی مصارف و میزان منابع در دسترس و بهینه‌سازی تخصیص، ارائه شده است. هم‌چنین، در پژوهش حاضر، عوامل مؤثر در شرایط فعلی و آینده که می‌تواند بر مدل پیشنهادی تأثیرگذار باشد، مورد توجه قرار گرفته و دو سناریو افزایش بازده آبیاری فضای سبز و استفاده از پساب تصفیه‌شده اعمال گردیده است.

یافته‌ها: نتایج نشان دادند که افزایش بازده آبیاری از طریق مدیریت انتقال، ذخیره و توزیع آب و هم‌چنین آبیاری در ساعات مناسب، تأثیر به مراتب بیش‌تری در مقایسه با استفاده از پساب تصفیه‌شده به منظور کاهش برداشت از منابع محدود کنونی خواهد داشت؛ به‌گونه‌ای که با افزایش راندمان آبیاری به میزان ۴۰ و ۵۰ درصد به‌ترتیب مقدار ۱۴ و ۳۹ درصد از کمبودهای آبی برطرف می‌شود.

نتیجه‌گیری: نتایج شبیه‌سازی نشان داد که به‌منظور رسیدن به پایداری سامانه باید ترکیبی از انواع سناریوهای کاهش سرانه مصرف آب فضای سبز، افزایش بازده آبیاری، استفاده از پساب تصفیه‌شده و فضاهای خشک‌منظر در توسعه فضاهای شهری مدنظر قرار گیرد.

* **نویسنده مسئول:** اکرم الملوک لاهیجانیان
نشانی: گروه مدیریت محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
تلفن: ۰۹۱۲۱۳۲۸۴۵۹
پست الکترونیکی: lahijanian@hotmail.com

مقدمه

در سال‌های اخیر، مسائل گوناگونی از قبیل رشد سریع جمعیت و گسترش شهرها مشکلات عدیده محیط‌زیستی را در پی داشته است که از مهم‌ترین اثرات آن، می‌توان به کمبود منابع آب اشاره کرد. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد در اجلاس جهانی مکزیک، در سال ۲۰۰۶ بیش از ۱/۲ میلیارد نفر از مردم جهان از دسترسی به منابع آب شرب بهداشتی محروم بوده‌اند و پیش‌بینی شده است این تعداد در سال ۲۰۲۵ به ۲/۸ میلیارد نفر و در سال ۲۰۵۰ به ۴ میلیارد نفر برسد (۴۷,۴۸). رشد تصاعدی جمعیت همراه با توسعه شهری و گرایش به توسعه صنایع زیربنائی همگام با توسعه کشاورزی، نیازمندی به منابع آبی را افزایش داده است (۴،۶،۷). بر این اساس، افزایش نیاز و وابستگی به آب به‌دلیل افزایش جمعیت، خشکسالی و وقوع پیامدهای غیرقابل پیش‌بینی اقلیمی در حال حاضر به‌یک هشدار جدی در اکثر مناطق دنیا تبدیل شده است. این نگرانی‌ها باعث شده است تا ضرورت طرح و برنامه‌ریزی اصولی منابع آب برای پاسخ‌گویی به نیازهای فعلی و آتی بیش از پیش احساس شود. بنابراین، حفاظت از منابع موجود به معنای مدیریت عرضه و تقاضا، برداشت‌های بهینه و کنترل شده و استفاده مجدد از پساب‌ها ضروری به‌حساب می‌آید و می‌تواند یک راه‌کار مناسب در برنامه‌ریزی توسعه منابع آب و تأمین نیازهای آبی درنظر گرفته شود (۱۶).

کشور ایران به‌دلیل کمبود ریزش‌های جوی و بالا بودن میزان تبخیر و تعرق، جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا محسوب می‌شود (۲۷) که در حال حاضر با حدود ۹ میلیارد مترمکعب اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی و افت حدود ۲۰ متری سطح آبخوان‌های کشور، کاهش بارش، افزایش بی‌سابقه مصارف به‌ویژه در بخش کشاورزی و کاهش ۴۶ درصدی در رواناب‌های سطحی و با حدود ۱۷۰۰ مترمکعب سرانه آب تجدیدپذیر در معرض تنش آبی قرار دارد. به‌طوری‌که از ۹۵ میلیارد مترمکعب آب مصرفی کشور، ۹۲ درصد آن در بخش کشاورزی (با راندمان آبیاری ۳۰ درصد)، حدود ۲ درصد در بخش صنعت، و حدود ۶ درصد به‌عنوان آب شرب مصرف می‌شود (۱۱) بنابراین، مصرف این میزان آب در بخش‌های مختلف، منجر به تولید ۳۲ میلیارد مترمکعب فاضلاب می‌شود که تصفیه آن و استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده(۱،۲،۳،۹) می‌تواند پتانسیل خوبی برای تأمین بخشی از آب مورد نیاز کشور باشد.

استفاده مجدد از پساب‌های خانگی (۲۰)، کشاورزی (۱۳،۳۵،۲۸)، صنعتی و تصفیه‌خانه‌ها به‌منظور جبران بخشی از نیازهای غیر شرب (۱۹،۲۳،۲۴،۴۹) از اقدامات مهم حفاظت از منابع آب می‌باشد. در این راستا، مطالعات کاربردی و نتایج استفاده از پساب در بخش کشاورزی (۱۷,۱۲,۲۱، ۴۴,۲۸,۱۵،)، صنعت (۱۲, ۲۴)، فضای سبز (۳۹،۳۷،۲۲،۸) و آبیاری (۴۴,۳۱, ۱۴, ۴۶,۳۲) ارائه شده است. بنابراین شناخت روشهای تأمین و بهره گیری اصولی از منابع آبی در اختیار و قابل استحصال و استفاده از مدل‌های مدیریتی به‌عنوان اساسی‌ترین راه‌حل برای ارزیابی و بهینه‌سازی مصرف است. در واقع، اهمیت موضوع استفاده از منابع حاصل از بازچرخانی منابع آبی و استفاده مجدد از فاضلاب ها برای مصارف غیرشرب از جمله آبیاری فضاهای سبز و صنعت یکی از کارآمدترین تصمیمات مدیران و برنامه‌ریزان آب شهری تبدیل شده و تحقیقات گسترده‌ای در استفاده از این منبع مهم انجام و عملیاتی شده است. یکی از اولین فعالیت‌ها در این زمینه مدل‌سازی سیستم آب‌رسانی و فاضلاب شهری پیوسته با برنامه‌ریزی غیرخطی با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های تامین آب بین چند منبع تولید می‌باشد (۳۶). پس از آن در دهه ۸۰ میلادی مدل‌های پیچیده‌تر بازیافت و استفاده مجدد از فاضلاب مطرح شد، به‌طوری‌که با طراحی یک مدل دینامیک، بهینه-ترین محل و اندازه یک تصفیه‌خانه فاضلاب با توجه به مکان مصرف-کننده‌های پساب مشخص شد (۴۲,۵۰). بازیافت و بازچرخانی پساب به‌عنوان یکی از منابع مطمئن و باکیفیت آب نامتعارف در راستای پاسخ به دغدغه‌های اخیر آبی مطرح گردیده است. یکی از مهم‌ترین مزایای بازیافت پساب در جهان، سهم غیرقابل انکار آن برای افزایش پایداری مدیریت منابع آب طی دهه‌های آتی خواهد بود. در مقابل باید توجه نمود که این مفهوم برای گسترش و کاربردی شدن، نیازمند همگرایی در عرصه‌های مختلف حکمرانی، قانون‌گذاری، سلامت، فرهنگ و اقتصاد می‌باشد (۳۳). عدم وجود یک مدل جامع برای تمام شهرها و مناطق، نیاز است که با استفاده از ابزارهای مختلف و در راستای نیازهای آن منطقه، مطالعاتی صورت پذیرد. اگرچه مطالعات متنوعی با موضوعات تخصیص پساب در سطح دنیا انجام گرفته اما اکثر این تحقیقات بر امکان‌سنجی و پیامدهای سلامت متمرکز بوده است (۱۸, ۴۵, ۳۲,۳۸, ۴۱, ۱۰, ۳۱, ۳۰). استفاده از پساب تصفیه شده در آبیاری علاوه بر کاهش آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی، می‌تواند کاهش هزینه مصرف کود شیمیایی را هم به همراه داشته باشد (۵۳).

در پژوهش حاضر بهینه‌سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب تصفیه‌شده به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در شبیه‌سازی و تصمیم-گیری‌های مدیریت منابع آب شهری و متعاقب آن آبیاری فضای‌سبز شهری در کلان‌شهر شیراز، استان فارس، ایران می‌باشد که پس از ارائه نتایج، راه‌کارهای حرکت به سمت توسعه پایدار شهری و کاهش یا رفع مشکل کمبود آب با استفاده از ابزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نیز ارائه می‌شود. مهمترین نوآوری‌های تحقیق حاضر به شرح زیر است:

- توسعه یک مدل مبتنی بر تلفیق پویایی سیستم‌ها و بهینه‌سازی چندهدفه به منظور بهره گیری از پساب تصفیه شده در تأمین منابع مورد نیاز آبیاری فضاهای سبز شهری.
- بهره‌گیری از دیدگاه سیستمی بالا به پایین و برخورداری از نگاه کلی‌گرایانه به جای نگاه جزئی‌نگر به منظور رصد اندرکنش‌ها و همه عوامل تأثیرگذار و مداخله کننده در نتایج حاصل و ساخت حلقه‌های علی و معلولی برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی جامع (۲۹،۲۶،۲۵،۵۲،۵۱،۴۳،۴۰،۳۳).
- لحاظ همزمان منابع آبی متعارف (نظیر سد، چاه و قنات‌ها) و منابع آبی نامتعارف (پساب تصفیه‌شده) و همچنین سایر اقدامات بهینه سازی (افزایش بازدهی آبیاری) در بهینه‌سازی چندهدفه سیستم داینامیک و استفاده از خروجی داده‌ها در ترسیم سناریوهای مختلف خشکسالی، ترسالی و نرمال و بررسی شرایط رسیدن سیستم مورد مطالعه به پایداری.
- بررسی و ارزیابی مدیریت منابع آب با رویکرد تأمین منابع آبیاری فضای سبز شهری شیراز که تاکنون مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته،

با توجه به جایگاه و اهمیت نقش فضای سبز در بهبود کیفیت محیط شهری.

۱- مواد و روش‌ها

۱-۱- منطقه موردمطالعه:

شهر شیراز، مرکز استان فارس به‌عنوان یکی از پاک‌ترین کلان‌شهرهای کشور به‌شمار می‌رود و این مهم، مرهون سرانه مناسب اکولوژیکی حاصل از فضای سبز عمومی شهری و ارتفاعات پیرامون شهر و نیز باغات قدیمی درون‌شهر است (شکل ۱)، که متاسفانه طی سال‌های اخیر بر اثر خشکسالی و پایین‌افتادن سطح آب‌های زیرزمینی چاه‌ها و قنوات به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تأمین‌کننده آب آبیاری در معرض تهدید، تنش و خطر از بین رفتن قرار گرفته است. شهر شیراز در ارتفاع ۱۴۸۴ متری سطح دریا و در منطقه کوهستانی زاگرس واقع شده که آب‌وهوایی معتدل دارد. حداکثر درجه حرارت در گرم‌ترین روز تابستان و در سردترین روز زمستان به‌ترتیب ۴۰/۲ و ۱۴/۴- و متوسط سالانه آن ۱۸ درجه سلسیوس می‌باشد و متوسط بارندگی سالانه آن ۳۱۸/۴ میلی‌متر برآورد شده است. شهر شیراز به یازده منطقه شهرداری تقسیم شده و مساحتی بالغ بر ۲۱۷ کیلومتر مربع دارد که جمعیت آن در سرشماری سال ۱۳۹۵ بالغ بر ۱/۵۸۷/۴۴۱ نفر برآورد شده است .

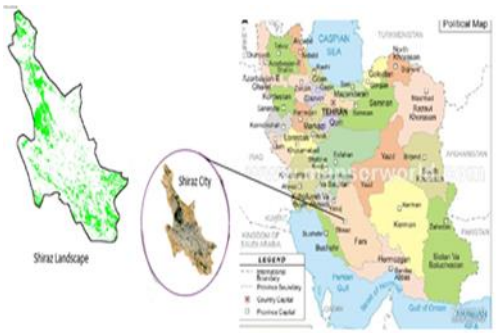
فضای سبز شهری و باغات شیراز در سال‌های اخیر با شرایط بسیار حادتری نسبت به سالیان گذشته روبه‌رو می‌باشد، آبدهی اغلب چاه‌ها کاهش یافته و چند حلقه چاه فضای سبز نیز خشک شده و تعدادی از چاه‌ها نیز در ساعاتی از شبانه روز با توجه به ضرورت تامین آب شرب شهروندان در اختیار آبفای شهری قرار گرفته است. هم‌چنین دبی جریان آب در قنوات قدیمی شیراز که عمده ترین تأمین کننده آب جهت آبیاری باغات قدیمی که در محدوده شهری هستند نیز به کم‌ترین مقدار رسیده، به‌گونه‌ای که اغلب باغات شهر با تنش جدی کم‌آبی مواجه شده و فاصله دوره آبیاری باغات نیز بسیار افزایش یافته است. (۵).

۱-۲- جمع آوری داده‌ها:

منابع آبی موجود برای آبیاری فضاهای سبز شهر شیراز، شامل چاه‌ها و قنوات می‌باشد که با توجه به بررسی‌های صورت گرفته قنوات صرفاً برای باغات قدیمی واقع در محدوده شهر شیراز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به این‌که طی سالیان اخیر، میزان بارندگی در شهر شیراز کاهش پیدا کرده و این امر منجر به افت سطح آبخوان گردیده، آب‌دهی چاه‌ها نیز بسیار کاهش یافته است. بنابراین در این بخش تلاش می‌شود منابع مورد نیاز آبیاری در شرایط فعلی، چشم‌اندازهای ۱۰ساله و ۲۰ساله نیز موردتوجه قرار گیرد و کسری منابع و نیاز آبی فضای سبز با توجه به وضعیت فعلی و توسعه آینده بر مبنای طرح های جامع شهری برآورد شود.

۱-۲-۱- شناسایی منابع دراختیار و در دسترس فضای سبز:

در حال حاضر ۹۷ حلقه چاه فضای سبز با مجموع دبی ۱۴۷۴ لیتر بر ثانیه در سطح شیراز در حال بهره‌برداری بوده و آب مورد نیاز آبیاری فضای سبز شهری را تأمین می‌نماید. هم‌چنین تعداد ۱۳ رشته قنات و ۱۴ حلقه چاه با مجموع دبی ۶۸۹ لیتر بر ثانیه در حال حاضر تأمین‌کننده بخش اصلی نیاز آبیاری باغات قدیمی شیراز می باشد. پیش‌بینی می‌شود میزان آبدهی چاه‌ها طی سال‌های آینده به تدریج کاهش یابد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، میزان آبدهی ۹۷ حلقه چاه فضای سبز، براساس مطالعات پایداری منابع آبی، در سال ۱۴۲۰ به ۱۰۲۶ لیتر در ثانیه کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین برآورد گردیده است منابع تأمین آب باغات، شامل چاه‌ها و قنوات از ۲۵۴ و ۴۳۵ لیتر بر ثانیه به‌ترتیب به ۱۷۴ و ۲۳۵ لیتر بر ثانیه در افق طرح تنزل یابد (34). این موضوع نشان دهنده بحران کم‌آبی در سال‌های آتی و پررنگ‌تر شدن اهمیت اجرایی شدن این مطالعات در راستای افزایش راندمان مصرف آب و طرح‌های تامین آب با سیاست‌های جایگزینی منابع آب نامتعارف برای سال‌های پیش‌رو می‌باشد (جدول ۱). لازم به‌ذکر است، درختکاری های ارتفاعات پیرامونی، منبع آبی مجزا نداشته و در حال حاضر از چاه‌های در اختیار فضای سبز تامین آب می‌گردد.



شکل ۱- موقعیت شهر شیراز و نقشه پراکنش فضای سبز.

۱-۲-۱- نیاز آبی فضای سبز شهری و باغات شیراز:

در سال ۱۴۰۰، مجموع نیاز آبی فضای سبز شهری و ارتفاعات پیرامونی ۱۰۰۴ لیتر در ثانیه می‌باشد، که این نیاز برای ۲۴ ساعت آبیاری می‌باشد. آب‌دهی چاه‌های در اختیار شهرداری در سال ۱۴۰۰، معادل ۱۴۷۴ لیتر در ثانیه می‌باشد (34،۵).علی‌رغم اینکه آبدهی چاه‌ها از نیاز آبی مورد نیاز در وضع موجود بیش‌تر است، ولی به‌دلیل پراکنش نامناسب منابع آبی، عدم اتصال شبکه‌های انتقال، ذخیره و توزیع مناسب در سطح شهر و همچنین اختلاف ارتفاع زیاد بین مناطق مختلف شهر شیراز، بخشی از شهر (به‌طور خاص، قسمت غربی و جنوبی شهر شیراز)، دارای کمبود آب شدیدی می‌باشد. لازم به ذکر است، نیاز آبی لحظه‌ای ارائه‌شده بر اساس ماه بیش‌ترین مصرف (تیر ماه)، برآورد گردیده و میزان مصرف آب در ماه‌های مختلف سال، متفاوت خواهد بود. در همین راستا، به‌منظور این‌که دید کامل‌تری نسبت به میزان آب مورد نیاز فضای سبز به وجود آید، میزان آب مورد نیاز سالانه برای هر یک از سطوح فضای سبز محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول۱- وضعیت منابع آب در دسترس فضاهای سبز شیراز

ردیف	شرح	نوع منابع تأمین	آبدهی (لیتردر ثانیه)		
			سال ۱۴۰۰	سال ۱۴۱۰	سال ۱۴۲۰
۱	فضای سبز شهری	۹۷ حلقه چاه	۱۴۷۴	۱۲۵۴	۱۰۲۶
۲	درختکاری ارتفاعات	استفاده از منابع آب فضای سبز	۰	۰	۰
۳	باغات	۱۴ حلقه چاه	۲۵۴	۲۱۴	۱۷۴
		۱۳ رشته قنات	۴۳۵	۳۳۵	۲۳۵

جدول ۲- مشخصات سطوح سبز و نیاز آبی شهر شیراز

ردیف	شرح	وضع موجود سال ۱۴۰۰			پیش بینی سال ۱۴۱۰			پیش بینی سال ۱۴۲۰		
		مساحت (هکتار)	نیاز آبی لحظه ای (لیتر در ثانیه)	نیاز آبی سالانه (میلیون مترمکعب)	مساحت (هکتار)	نیاز آبی لحظه ای (لیتر در ثانیه)	نیاز آبی سالانه (میلیون مترمکعب)	مساحت (هکتار)	نیاز آبی لحظه ای (لیتر در ثانیه)	نیاز آبی سالانه (میلیون مترمکعب)
۱	فضای سبز شهری	۱۲۸۶	۶۶۷	۱۰,۵۵	۱۹۱۸	۸۷۹	۱۴,۳۷	۲۵۴۹	۱۰۹۱	۱۸,۱۸
۲	درختکاری ارتفاعات پیرامونی	۱۴۸۵	۳۳۷	۵,۶۴	۱۶۳۴	۳۷۰	۶,۲	۱۷۸۲	۴۰۴	۶,۷۶
	جمع کل (هکتار)	۲۷۷۱	۱۰۰۴	۱۶,۱۹	۳۵۵۲	۱۲۴۹	۲۰,۵۷	۴۳۳۱	۱۴۹۵	۲۴,۹۴
*	باغات قدیمی شیراز	۱۱۲۹	۱۶۶۷	۲۳,۸۸	۱۱۲۹	۱۶۶۷	۲۳,۸۸	۱۱۲۹	۹۸۱	۱۴,۰۵

۱-۲-۳- کسری منابع آب فضای سبز شهری و باغات شیراز

با مقایسه میزان منابع آبی موجود و نیاز آبی سطوح فضای سبز، میزان کسری یا مازاد آب قابل محاسبه می‌باشد. در افق‌های زمانی پژوهش حاضر (سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۲۰)، با توجه به توسعه شهر و فضای سبز شهری، نیاز آبی سالانه افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر، با توجه به کاهش بارندگی و افت سطح ایستابی در سال‌های پیش‌رو، آب‌دهی منابع آبی در دسترس کاهش پیدا کرده و بحران کم‌آبی به طرز چشم-گیری افزایش پیدا می‌کند. میزان کسری آب در افق‌های زمانی متفاوت نشان داده شده است (جدول ۳). با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، در حال حاضر کسری آب جدی برای فضای سبز عمومی شهر وجود نداشته و می‌توان با مدیریت منابع آبی در دسترس و احداث خطوط انتقال آب از زون‌های دارای مازاد آب به زون‌های دارای کسری آب، مشکل را تا حد زیادی کنترل نمود. ولی از آن‌جایی که ارتفاعات پیرامونی منبع آب مجزا نداشته و تامین آب آن‌ها از چاه‌های در اختیار شهرداری انجام می‌گردد، همچنین لزوم آینده نگری و کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی در راستای حفاظت از محیط زیست و آبخوان های شهری و اطمینان از پایداری منابع مورد نیاز آبیاری ایجاب می-نماید برنامه جایگزینی منابع فعلی منابع بازچرخانی و پساب‌های تصفیه شده در دستورکار قرار گیرد. ضمناً کسری آب باغات قدیمی در افق۲۰ ساله با توجه به لحاظ تمهیدات لازم بهینه سازی آبیاری باغات در آینده درج شده است. (۵)

جدول ۳- میانگین و رتبه گویه‌های شاخص تضاد ادراک شده درباره آب کشاورزی

ردیف	شرح	میزان کسری آب (لیتردر ثانیه)		
		سال ۱۴۰۰	سال ۱۴۱۰	سال ۱۴۲۰
۱	فضای سبز شهری	۵۱	۱۹۸	۴۴۰
۲	درختکاری ارتفاعات پیرامونی	۳۳۷	۳۷۰	۴۰۴
	جمع کل (هکتار)	۳۸۸	۵۶۸	۸۴۴
*	باغات قدیمی	۹۷۸	۱۱۱۸	۵۷۲

۱-۲-٤- منابع پساب تصفیه شده فاضلاب شهری

در حال حاضر دو تصفیه‌خانه اصلی در محدوده شهر شیراز و یک تصفیه‌خانه اصلی به‌همراه یک تصفیه‌خانه محلی در شهر صدرا، پساب فاضلاب شهری را تصفیه می‌نماید (جدول ۵).

تصفیه‌خانه شماره۱ شیراز واقع در جنوب شرقی شهر شیراز با ظرفیت ۸۱ هزار مترمکعب در روز و تصفیه‌خانه شماره۲ واقع در شرق شهر شیراز با ظرفیت ۱۰۰ هزار مترمکعب در روز و تصفیه‌خانه شرق صدرا در شهر اقماری صدرا در شمال غرب کلان‌شهر شیراز با ظرفیت تصفیه

۱۳ هزار مترمکعب در روز، سه تصفیه‌خانه اصلی بوده که به‌همراه یک تصفیه‌خانه محلی در غرب شهر صدرا به ظرفیت ۳ هزار مترمکعب در روز، تقریباً معادل ۵۵ درصد از جمعیت شهر شیراز را تحت پوشش داشته و در حال حاضر این تصفیه خانه‌ها سهمی در تأمین نیاز آبی فضای سبز شهری ندارند ولی می‌توان با برنامه‌ریزی و اخذ مجوز تخصیص از شرکت آب و فاضلاب شیراز با توجه به برنامه‌ها و پیش بینی توسعه آنها، به‌عنوان گزینه مهمی برای تأمین کسری آب مورد نیاز برای آبیاری فضای سبز شهر شیراز در چشم‌انداز ۲۰ سال آینده مورد بررسی قرار گیرند. در واقع تنها گزینه محتمل برای تأمین کسری آب مورد نیاز فضای سبز شهری، استفاده از بخشی از پساب فاضلاب تصفیه‌خانه‌های ذکر شده و احداث تصفیه‌خانه های کوچک محلی توسط شهرداری خواهد بود که در حال حاضر اجرای یک واحد تصفیه خانه محلی با ظرفیت ۱۰۰ لیتر بر ثانیه معادل تقریبی ۸۶۰۰ مترمکعب در حال احداث است.

جدول ٤- منابع پساب تصفیه شده در دسترس شهر شیراز (سند سازگاری با کم آبی، استانداری فارس، ۱۳۹۷)

ردیف	نام تصفیه خانه	ظرفیت فعلی/مترمکعب در روز	ظرفیت توسعه آینده/مترمکعب در روز
۱	تصفیه خانه شماره ۱ شیراز	۸۱۰۰۰	۱۵۵۰۰۰
۲	تصفیه خانه شماره ۲ شیراز	۱۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰
۳	تصفیه خانه شرق صدرا	۱۳۰۰۰	۳۹۰۰۰
۴	تصفیه فاضلاب غرب صدرا	۳۰۰۰	۳۹۰۰۰
۵	پکیج تصفیه فاضلاب شهرداری	۰	۸۰۰۰

۱-۲-۵- بررسی اطلاعات

فضای سبز شهر شیراز به سه دسته، فضای سبز عمومی شهر، باغات و درختکاری‌های ارتفاعات پیرامونی تقسیم‌بندی می‌شود که با توجه به مطالعات انجام شده، مساحت هر کدام از دسته‌ها به تفکیک ارزیابی شده است. با توجه به این‌که همراه با توسعه شهر، فضای سبز شهری نیز افزایش پیدا می‌کند، بر اساس نقشه‌های مصوب توسعه شهری، میزان توسعه فضای سبز شهری مشخص بوده و در جدول ۱ میزان منابع آب در اختیار فعلی و در جدول ۲، میزان سطوح فضای سبز در هر سه دسته مشخص شده است. لازم به توضیح است که در این مطالعات فرض بر این بوده که وسعت باغات در سطح شهر شیراز افزوده نخواهد شد و میزان سطوح درخت‌کاری ارتفاعات پیرامونی نیز به میزان ۲۰ درصد افزایش پیدا کند. هم‌چنین فرض شده است که تا سال ۱۴۱۰، نیمی از سطوح فضای سبز توسعه شهری و ارتفاعات پیرامونی و همچنین فضای سبز پیش بینی شده در طرح‌های توسعه شهری محقق گردد. لازم به ذکر است که با توجه به نحوه تأمین و توزیع منابع موردنیاز باغات قدیمی از قنوات شهر شیراز و آبیاری سنتی به روش غرقابی، تغییر آبیاری از روش سنتی به روشهای نوین در این بخش مهم از شیراز ضروری بوده و نیازمند بازکاشت درختان و همچنین پژوهش درباره نحوه آبیاری درختان باغات که غالب آنها مثمر هستند با پسابهای بازچرخانی شده است، به همین سبب در این مقاله از این بخش صرف نظر شده و صرفاً اطلاعات آن به منظور توسعه مدل در آینده لحاظ گردیده است.

به منظور برآورد حجم آب مورد نیاز سطوح فضای سبز شهر شیراز، با برآورد میزان تبخیر و تعرق در قسمت‌های مختلف شهر شیراز، و همچنین با استفاده از روش پنمن مانتیس اصلاح شده، نیاز آبی سطوح فضای سبز و کسری منابع مورد نیاز آبیاری در افق های ۱۰ و ۲۰ ساله برآورد گردیده که در جداول ۲ و ۳، ارائه شده است.

۱-۳- مدل‌سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب

در این تحقیق مدل تخصیص پساب شهر شیراز به صورت چندهدفه بدین ترتیب تدوین شد، هدف اول یعنی حداکثر نمودن حداقل اطمینان پذیری نیازهای آبی و مقدار قابل تخصیص پساب در طی دوره برنامه ریزی در مقابل هدف دوم یعنی حداقل نمودن تخطی ناشی از عدم تأمین نیاز مصارف مختلف به ویژه مصارف فضای سبز شهری که به نحو مطلوبی در نظر گرفته شد (رابطه ۱الی۳).

محدودیت ها و قیود مدل:

– مجموع پساب تخصیص داده شده به یکی از مصارف مشخص باید از نیاز (تقاضا) اعلام شده کمتر باشد. (این بحث با توجه به عدم موجودی کافی جهت برآورده کردن کل مصارف است)

– مجموع جریان خروجی از تصفیه خانه های شیراز باید برابر ظرفیت تولید پساب تصفیه شده تصفیه خانه ها باشد.

– مجموع پساب تخصیص داده شده در محدوده موردمطالعه از مجموع تقاضای مصارفی که وجود دارند باید کمتر باشد.

– میزان پساب تخصیص یافته از تولید کننده i ام به مصرف کننده j ام می بایست بزرگتر و یا مساوی صفر باشد.

$$F_1 = \text{Maximize (Minimum Reliability)}$$

$$F_2 = \text{Minimize } (\sum_{t=1}^{m}\sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns}(DM_{tzs} - TAW_{tzs})^2 + \text{Loss}$$

$$\text{Reliability} = \sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns} TAW_{tzs} \; / \sum_{z=1}^{nz}\sum_{s=1}^{ns} DM_{tsz}$$

که در آن:

$DMtsz$ = نیاز آبی بخش s در دوره t از منطقه z

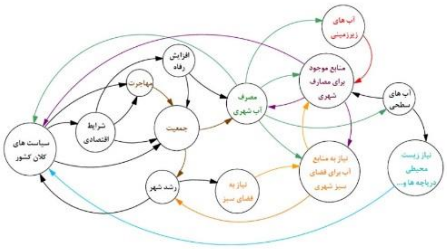
$TAWtzs$ = میزان کل آب تخصیص داده شده به بخش s در دوره t از منطقه z

$Loss$ = میزان کل جریمه تخصیص داده شده به دلیل عدم رعایت اولویت‌ها و عدم تأمین نیازها از فاضلاب

۱-٤- شناسایی منابع دراختیار، قابل استحصال و دردسترس

در پژوهش حاضر تلاش گردید که منابع آب سطحی، آب‌های زیرزمینی و آب‌های قابل بازیافت و بازچرخانی به‌عنوان منابع قابل استحصال دردسترس، به‌همراه تعیین مصارف و نیازهای آبیاری مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، مدل مفهومی حاکم بر سامانه منابع و مصارف آب شهر شیراز در شکل ۲ ارائه شده است. در این پژوهش تلاش شده تا مرزهای مدل به‌گونه‌ای درنظر گرفته شود که کلیه‌ی ذی‌نفعان (نیازهای خانگی، عمومی، صنعت، کشاورزی و محیط زیست) و منابع تأمین نیازهای آن‌ها (منابع زیرزمینی و سطحی) را شامل شود. همچنین، با توجه به در نظر گرفتن پساب تصفیه شده به عنوان یک منبع مهم به منظور تأمین منابع آبیاری فضای سبز، تصفیه خانه‌های فاضلاب شیراز نیز در مرزهای شبیه‌سازی قرار گرفته است.

شهر شیراز به‌لحاظ طولی دارای امتداد شمال غربی- جنوب شرقی بوده که به دریاچه مهارلو ختم می‌گردد و مسیر جریان آب‌های سطحی و زیرزمینی این دشت نیز در راستای شمال غربی به جنوب شرقی است. وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی دشت شیراز در حال حاضر در وضعیت بحرانی قرار داشته و ۱۵ تا ۵۰ متر افت داشته است. بنابراین به‌منظور مدل‌سازی مفهومی و بر اساس چشم‌اندازهای ۱۰ساله و ۲۰ساله از داده‌های سال‌های ۱۳۷۵ الی ۱۴۰۰ استفاده شد. در مدل مذکور سعی گردید کلیه ذی‌نفعان منابع آب شامل مصرف‌کنندگان خانگی، فضای سبز، صنعتی، کشاورزی و محیط زیست در نظر گرفته شده و اثرات،



شکل ۲- مدل مفهومی ارائه شده منابع و مصارف شهر شیراز

برای هر کدام قابل برداشت و ارائه باشد. در مدل مفهومی ارائه شده (شکل۲)، زیربخش‌های منابع آب زیرزمینی، جمعیت، نیاز آبی، تراز آب سطحی، تصفیه فاضلاب و فضای سبز شهری درنظر گرفته شد که در ادامه به‌اختصار درباره هر کدام از این زیر بخش‌ها توضیحاتی ارائه می‌شود:

۱-٤-۱- زیرمدل (زیربخش) آب زیرزمینی

بر اساس گزارش وضعیت آب شهر شیراز سفره آب زیرزمینی شهر شیراز شامل، نفوذ بارندگی (۱۰درصد)، نفوذ ناشی از تلفات شبکه‌های لوله‌کشی شهری (۲۰درصد)، نفوذ ناشی از آبیاری فضای سبز، زمین‌های کشاورزی و باغ ها (۲۳درصد) و نفوذ ناشی از رواناب سطحی (۴درصد) در نظر گرفته شده است. برداشت‌های سفره نیز شامل زهکش از قسمت‌های جنوبی شیراز به علت بالا بودن تراز آب (۳/۵ $MCM/Month$)، تبخیر از سفره آب زیرزمینی (۰/۱۳ $MCM/Month$) و جریان خروجی به دریاچه مهارلو (۴/۱۶ $MCM/Year$) منظور شده است (۸). همچنین با توجه به تأمین ۷۵ درصدی نیازهای آب شهری و تقریباً ۱۰۰درصدی نیاز فضای سبز از سفره آب زیرزمینی، این متغیرها نیز در زیرمدل آب زیرزمینی اعمال شده است.

۱-٤-۲- جمعیت

جمعیت، فراسنج اصلی تأثیرگذار در مصارف می‌باشد که تابعی از متغیرهای نرخ تولد، نرخ فوت و مهاجرت است (رابطه ۴).

$$Pt = P0 + B - D + I - E$$

که در آن:

Pt جمعیت در زمان t ، P0 جمعیت در زمان مبدأ، B تعداد موالید، D تعداد مرگ و میر، I مهاجرت به داخل، E مهاجرت به خارج

۱-٤-۳- نیاز آبی

نیاز آبی شهر شیراز شامل مصارف خانگی، فضای سبز، اداری، تجاری، صنعت و عمومی تفکیک می‌باشد. برای نیازهای بخش خانگی و فضای سبز متغیرها به صورت درون‌زا در مدل درنظر گرفته شده‌اند که آثار جمعیت و کمبود آب برای آن‌ها مؤثر می‌باشد. برای سایر نیازها، با توجه به مصارف در سال‌های قبل، میانگین مصرف هر واحد به‌دست آمد، سپس بر اساس رابطه بین افزایش تعداد مصرف‌کنندگان برحسب زمان، و ضرب آن در میانگین مصرف، اندازه آن برای هر بخش مشخص شد. (نیاز آبی بر اساس نرخ رشد جمعیت در زیر مدل ساخته شده مورد محاسبه و بررسی قرار گرفته است).

۱-٤-٤- تراز آب سطحی

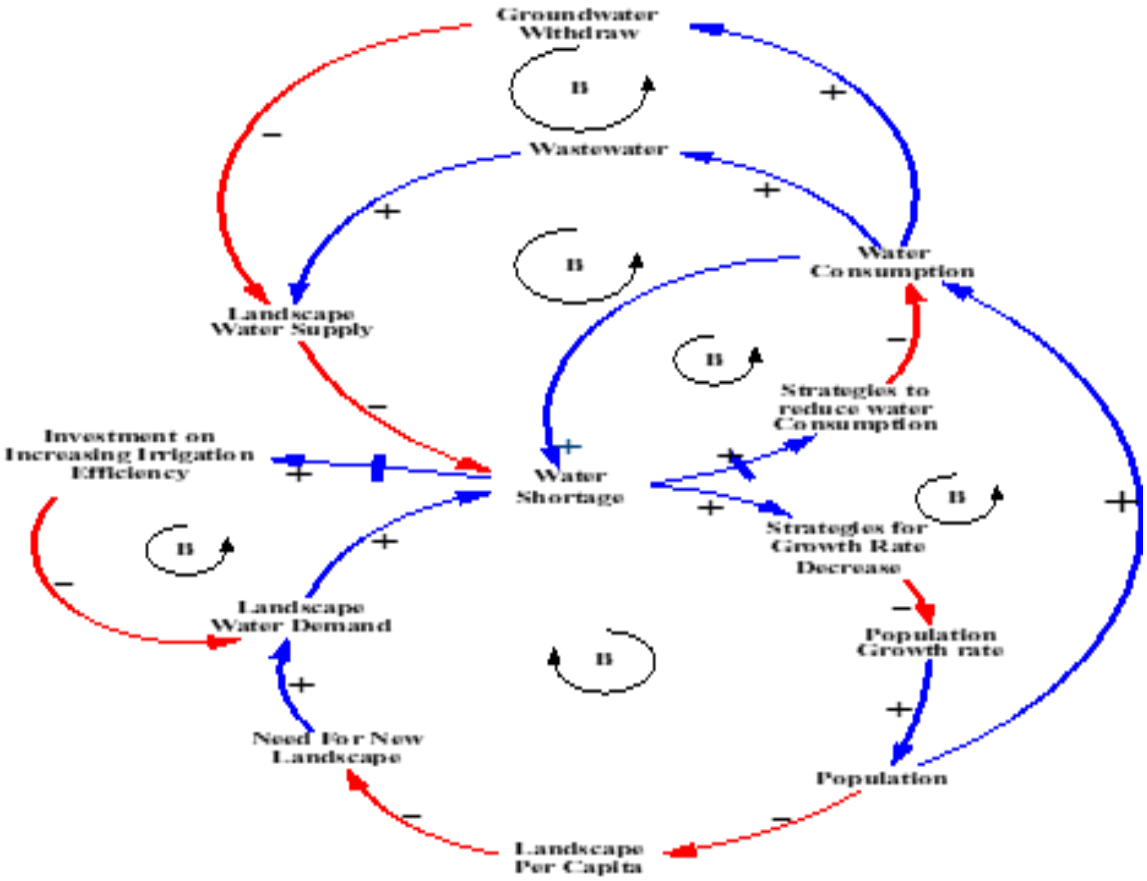
در این زیرمدل، تقاضای کلی آب شیراز و کلیه منابع تأمین‌کننده آن اعمال، و در صورت کم‌تر بودن آب تولیدی از مصرف، فراسنج کمبود تعریف شد.

۱-٤-٥- تصفیه فاضلاب شهری

برای شهر شیراز در مجموع چهار تصفیه‌خانه درنظر گرفته شده که تصفیه‌خانه اضطراری شماره ۱ شیراز با ظرفیت ۸۱۰۰۰ m^3/Day از سال ۱۳۸۴ مورداستفاده قرار گرفته و آب جمع‌آوری شده قسمت‌های جنوب و جنوب شرق شیراز را تصفیه می‌کند. تصفیه خانه‌ی شماره ۲ شیراز با ظرفیت ۱۰۰۰۰۰ m^3/Day که احداث کامل آن در سال ۱۳۹۹ اتمام یافته و دو تصفیه‌خانه کوچک که در قسمت‌های شمال غربی شهر با مجموع ظرفیت ۱۶۰۰۰ m^3/Day به‌منظور تصفیه فاضلاب شهر صدرا احداث گردیده است. در شبیه‌سازی تصفیه‌خانه شماره۱ لحاظ شده، اما تصفیه خانه شماره۲ از سال ۱۳۹۹ در شبیه‌سازی وارد شده است.

۱-٤-٦- مصرف آب فضای سبز

با توجه به سهم مصرف بالای فضای سبز، یک زیرمدل برای فضای سبز در مدل مفهومی تعریف شده است. براساس این فراسنج‌ها و روابط موجود بین آن‌ها، یک نمودار علت و معلولی در شکل ۳ نشان داده شده است که حرکت های سیستم برای ایجاد تعادل را مشخص می نماید.



شکل ۳- نمودار علت و معلولی در تأمین آب فضای سبز شهری (شهر شیراز)

۱-٤-۷- صحت‌سنجی مدل پیشنهادی

به‌منظور صحت‌سنجی، از آزمون تکرار رفتار استفاده شده است. این آزمون به بررسی خروجی‌های مدل توجه دارد، بدین صورت که داده‌های تولیدی مدل با داده‌های تاریخی مقایسه می‌گردد تا میزان مطابقت و هم‌خوانی داده‌های تخمینی با داده‌های مشاهده‌ای مشخص گردد. برای مقایسه از متغیرهای حجم آب زیرزمینی، نیاز آبی شهر شیراز، نیاز آبی فضای سبز شیراز، کمبود منابع موجود و نیازهای بهره‌برداران استفاده شده و آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، و میانگین قدرمطلق درصد خطا ($MAPE$) به منظور ارزیابی رفتار مدل مورد استفاده قرار گرفت.

پژوهش حاضر به منظور بهینه‌سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب تصفیه‌شده به منظور آبیاری فضاهای سبز شهری و باغات قدیمی در محدوده شهر شیراز انجام شده است. نمودار جریانی مراحل مختلف پژوهش در جدول ۶ ارائه شده است.

گام اول	شناسایی منابع در اختیار، قابل استحصال و در دسترس	آب های سطحی	احداث سد تنگ سرخ
			انتقال آب سد درودزن
			بهره گیری از رواناب ها و باران
		آب های زیرزمینی	چاه های فضای سبز
			قنوات قدیمی
		آب های قابل بازچرخانی از فاضلاب های شهری	تصفیه خانه های فاضلاب متمرکز شهری
			تصفیه خانه های فاضلابغیرمتمرکز محلی
	تعیین مصارف و نیازهای آبیاری	فضای سبز شهری و درختکاری های ارتفاعات پیرامون شهر	
		باغات قدیمی شیراز	
	محاسبه کسری منابع موردنیاز آبیاری	در وضعیت فعلی	
		در افق ۱۰ سال آینده	
		در افق ۲۰ سال آینده	
گام دوم	مدل سازی و ارائه سناریوهای مدیریت منابع آب و پساب	ابزار شبیه سازی چندهدفه	
		استفاده از مدل های پویایی سیستم ها	
		تلفیق روش های چندهدفه و پویایی سیستم	
گام سوم	ارائه راه های عملی استفاده مناسب از منابع موجود و قابل استحصال برای کاهش وابستگی به منابع تجدیدناپذیر و رسیدن به پایداری سیستم		

۲- نتایج و بحث

۲-۱- مدل‌سازی چندهدفه و مدیریت تخصیص پساب

۲-۱-۱- صحت‌سنجی مدل پیشنهادی

نتایج صحت‌سنجی مدل مفهومی پیشنهادی با آماره‌های ضریب تبیین و میانگین درصد مطلق خطا در جدول ۷ ارائه شده است.

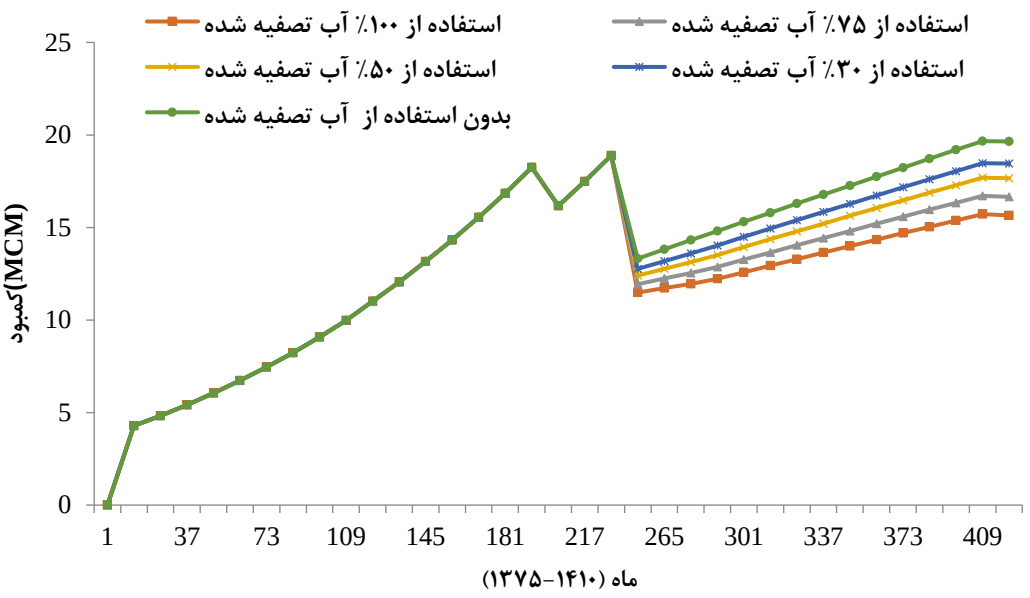
جدول ۷- نتایج آزمون‌های آماری متغیرهای حالت (*MCM*)

متغیر حالت	*R2*	*(%) MAPE*
حجم آب زیرزمینی	۰/۹۷	۱/۲۶
نیاز آبی شهر شیراز	۰/۹۲	۸/۸۶
مساحت فضای سبز شهر شیراز	۰/۸۵	۴/۶۹
کمبود آب	۰/۹۱	۲/۲۳

با توجه به مطالب ذکر شده سناریوهایی به‌منظور بررسی عوامل مؤثر بر سامانه منابع آب و به طور خاص فضای سبز شهر شیراز اعمال و برای افق سال ۱۴۱۰ شبیه‌سازی‌ها انجام شد.

۲-۱-۲- بررسی استفاده از پساب تصفیه شده به منظور آبیاری مصارف فضای سبز

با احداث کامل تصفیه‌خانه‌های شیراز و اتصال کامل تمام مصرف‌کنندگان به سامانه جمع‌آوری فاضلاب، می‌توان بخشی از پساب تصفیه‌شده را به منظور آبیاری فضای سبز استفاده کرد. نتایج شبیه‌سازی حاصل از استفاده ۳۰٪، ۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و بدون استفاده از پساب تصفیه‌شده به‌منظور آبیاری فضای سبز شهری بر میزان کمبود آب سامانه در شکل ۴ ارائه شده است



شکل ٤ - میزان حجم کمبود آب شهر شیراز با اختصاص

مقادیر مختلف آب تصفیه شده به بخش فضای سبز

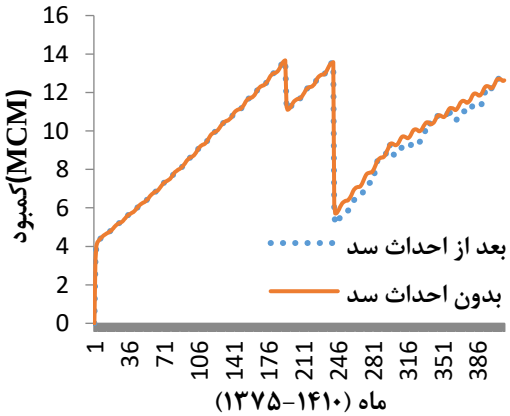
همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد، استفاده از آب تصفیه‌شده به‌منظور آبیاری فضای سبز بر میزان کمبود منابع و مصارف شهر شیراز تأثیر چندانی نداشته و با توجه به مصرف بالای فضای سبز، تنها می‌توان از این راه‌کار به‌عنوان یک منبع کمکی استفاده کرد. شکستگی‌های نمودار به‌علت اجرایی شدن احداث خط دوم انتقال آب از سد درودزن به شهر شیراز و در در خط قرار گرفتن تصفیه خانه های اصلی شیراز است. در ادامه میزان کاهش کمبود با اعمال درصدهای مختلف آب تصفیه‌شده با سناریوهای مختلف در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸- میزان کاهش کمبود آب شهر شیراز با اعمال سناریوهای مختلف استفاده از آب تصفیه شده

حجم کمبود (MCM)	درصد استفاده از آب تصفیه شده	درصد کاهش کمبود
۵۳۷۱/۳۳۱	۳۰	٪۳
۵۲۶۹/۳۴۴	۵۰	٪۵
۵۱۴۱/۸۶	۷۵	٪۷
۵۰۱۴/۳۷۶	۱۰۰	٪۹

۲-۱-۳- بررسی تأثیر احداث سد تنگ سرخ

عملیات اجرای سد تنگ‌سرخ در شمال غربی شیراز پس از سیلاب سال ۱۳۸۰ مورد توجه قرار گرفت. احداث این سد با ظرفیت مخزن ۲۹ میلیون مترمکعب به‌منظور تأمین آب فضای سبز باغ‌های قصرالدشت و فضای سبز قسمت‌های شمال غرب شیراز پیش‌بینی شده است. اگرچه احداث این سد از نظر منتقدان باعث خشک‌شدن دریاچه‌ی مهارلو در جنوب شرقی شیراز خواهد شد. با توجه به مطالب ذکر شده اثر احداث این سد بر میزان کمبود آب فضای سبز شهری (شکل ۵) نشان داده شده است.



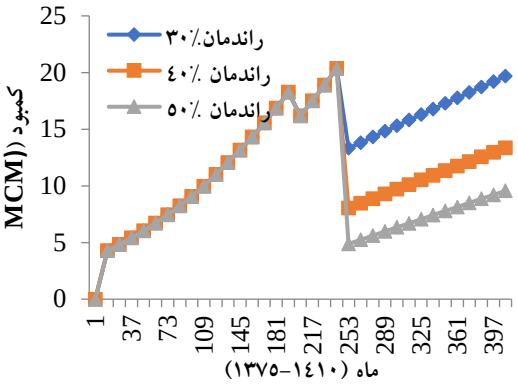
شکل ۵- تأثیر احداث سد تنگ سرخ بر میزان کمبودآب شهر شیراز

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که احداث سد تنگ سرخ، با توجه به آورد کم رودخانه‌ی خشک، تأثیر چندانی بر کاهش کمبود نداشته و تنها باعث بهبود ۲ درصدی می‌شود. البته با توجه به هزینه قابل توجه احداث این سد، و تأثیر نه‌چندان زیاد آن در تأمین مصارف، تنها با هدف توسعه‌ی گردشگری، ساخت سد مزبور توجیه‌پذیر خواهد بود. ذکر این نکته لازم است که حقابه دریاچه‌ی مهارلو در شبیه سازی ۱۶ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شده و سهم سالانه فضای سبز از سد به میزان ۶ میلیون متر مکعب فرض شده است. با توجه به حجم کم بده رودخانه و هدف تبدیل رودخانه از فصلی به دائمی نتایج نشان می‌دهد که تأثیر سد بر دریاچه مهارلو چندان تأثیرگذار نبوده و دریاچه تهدید جدی نخواهد شد.

۲-۱-٤- بررسی افزایش بازده آبیاری در بخش فضای سبز

بازده آبیاری در ایران بنا به گزارش سازمان جهاد کشاورزی، حدود ۳۰ درصد است. با مکانیزه کردن آبیاری فضای سبز و آموزش کارکنان در آبیاری در ساعات مناسب و همچنین مدیریت انتقال و توزیع منابع آب می‌توان در مصرف آب به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای صرفه‌جویی کرد. بدین منظور افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی بازده آبیاری بر میزان کمبود منابع آب، شبیه‌سازی و در شکل (۶) نشان داده شده است.

نتایج افزایش بازده برای دوره‌ی ۲۰ساله آینده نشان می‌دهد که با افزایش بازده آبیاری به ۴۰ درصد می‌توان به میزان ۱۴درصد از کمبودها کاست. در صورت افزایش بازده به ۵۰ درصد، ۳۹ درصد از میزان کمبود آب کاسته می‌شود. نتایج هر سه سناریو در جدول ۹ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج شبیه‌سازی و مقادیر جدول ۹ بهترین طرح به منظور تأمین نیاز فضای سبز شهری، افزایش بازده آبیاری است. همچنین با توسعه‌ی تصفیه‌ی فاضلاب نیز می‌توان از این منبع به منظور جبران کمبود آب فضای سبز شهر شیراز استفاده کرد.



شکل ٦- تأثیر افزایش بازده آبیاری بر کمبود منابع آب شهر شیراز

جدول ۹- مقایسه تأثیر سناریوهای مختلف اعمال شده در مدل آب شیراز در افق طرح

سناریو		درصد بهبود
استفاده از پساب تصفیه شده	استفاده ۳۰ درصدی	۳
	استفاده ۵۰ درصدی	۵
	استفاده ۷۵ درصدی	۷
	استفاده ۱۰۰ درصدی	۹
افزایش بازده آبیاری	۱۰ درصد افزایش راندمان	۱۴
	۲۰درصد افزایش راندمان	۳۹

۳- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش بهینه‌سازی چند هدفه، مدل منابع و مصارف آب شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس سناریوهای شامل افزایش بازده آبیاری فضای سبز، اختصاص پساب تصفیه‌شده به بخش فضای سبز شهری و احداث سد تنگ-سرخ نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده ۳۰، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصدی از پساب تصفیه شده برای فضای سبز به‌ترتیب باعث کاهش ۳، ۵ ، ۷ و ۹ درصدی خواهد شد. همچنین افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی بازده آبیاری به ترتیب موجب کاهش ۱۴ و ۳۹ درصدی کمبود می‌شود. بنابراین، مشخص است که سرمایه‌گذاری در بخش افزایش بازده تا ۱۰ برابر مفیدتر از استفاده از پساب تصفیه‌شده و حدود ۱۵ تا ۲۰ برابر

از احداث سد کارایی دارد (سد تنگ‌سرخ). با توجه به هزینه‌های بالای احداث تصفیه‌خانه یا خرید پساب تصفیه شده و همچنین احداث سد و در مقابل بهینه سازی و مکانیزه‌کردن سامانه های آبیاری فضای سبز، مشخص است که افزایش بازده آبیاری توجیه-پذیری به‌مراتب بیش‌تری نسبت به سایر گزینه‌ها دارد. هم‌چنین، به منظور پایداری سامانه در افق طرح، ترکیبی از سناریوها شامل کاهش نرخ رشد مهاجرت و جمعیت، کاهش سرانه مصرف آب فضای سبز و خانگی، مدیریت انتقال، ذخیره و توزیع منابع آب، افزایش بازده آبیاری و استفاده از پساب تصفیه‌شده برای فضای سبز و توقف و کاهش توسعه فضای سبز نیازمند آبیاری فراوان و بهره گیری از آب باران و روانابها و اجرای طرح‌های خشک-منظری در فضاهای شهری می‌باشد تا سامانه به پایداری مطلوب برسد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی، ایده‌پردازی، روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: سیدعلی کاظمی نژادفرد، اکرم الملوک لاهیجانیان، محمدرضا نیکو، امیرحسام حسنی نظارت و نگارش نهایی: اکرم الملوک لاهیجلنیان

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Ahmadi., M.H., Zarghami. M & Y. HassanZadeh, Y. 2018. Providing dynamic optimization in order to investigate the problems of water supply in the green spaces of Shiraz city. Water Engineering Journal. 39(11): 104-114. [In Persian]. https://www.sid.ir/paper/169397/fa
2. Barzegar, Z. 2012. Urbanization and effects on food, water and energy security in Iran, case study:Shiraz. [In Persian]. https://jzpm.marvdasht.iau.ir/article_115.html
3. Hosseini, S. A., and Bagheri, A. 2013. Modeling the dynamics of Mashhad water resources system to analyze sustainable development strategies. Journal of water and sewage. 24(4): 28-39. [In Persian]. https://www.wwjournal.ir/article_3186.html
4. Nazarian, A., Karimi, B., and Roshni, A. 2018. Evaluation of physical development of Shiraz city with emphasis on natural factors. Zagros landscape Geographical Journal. [In Persian]. https://www.sid.ir/paper/175704/fa
5. Studies in water supply and water distribution of available water for green space irrigation in Shiraz, Reyab consulting Inc, 2021. [In Persian]
6. Tabesh, M., Gosheh, S., and Yazdanpanah, M. 2016. Prediction of short-term water demand in Tehran using artificial neural networks. Technical Faculty Journal. 41(1): 11-24. [In Persian]. https://www.sid.ir/paper/14124/fa
7. Salavi Tabar, A., Zarghami, M., and Abrisham-Chi, A. 2015. System dynamics model in urban water management of Tehran. Journal of water and sewage. 59(3): 12-28. [In Persian]. https://www.wwjournal.ir/article_2288.html
8. Water scarcity adaptation plan. Fars Province. 2018. [In Persian].
9. Yazdian, M, Rukhshandeh Ro, Gh, Niko, MR, Taleb Bidakhti, N. (1401). Presenting a game theory-based model for optimal allocation of water to stakeholders in common water resources under water bankruptcy conditions: application of the chicken game. Scientific-Research of Water

Resources Engineering, 15(52), 1-12. [In Persian]. 10.30495/WEJ.2021.26673.2284

10. Axelrad, G., & Feinerman, E. 2009. Regional planning of wastewater reuse for irrigation and river rehabilitation. Journal of Agricultural Economics, 60(1), 105-131.10.1111/j.1477-9552.2008.00170.x
11. Bagheri Ardebilian, P., Sadeghi, H., Nabaii, A., & Bagheri Ardebilian, M. 2010. Assessment of wastewater treatment plant efficiency: a case study in zanjan. Journal of health, 1(3), 67-75. 10.22038/jreh.2020.43484.1327.
12. Barbosa, B., Costa, J., Fernando, A. L., & Papazoglou, E. G. 2014. Wastewater reuse for fiber crops cultivation as a strategy to mitigate desertification. Industrial Crops and Products, 68, 17-23. 10.1016/j.indcrop.2014.07.007.
13. Burnham, M., Ma, Z., & Zhu, D. 2015. The human dimensions of water saving irrigation: lessons learned from Chinese smallholder farmers. Agriculture and Human Values, 32(2), 347-360. 10.1007/s10460-014-9565-8.
14. Chu, J., Chen, J., Wang, C., & Fu, P. 2004. Wastewater reuse potential analysis: implications for China's water resources management. Water Research, 38(11), 2746-2756. 10.1016/j.watres.2004.04.002
15. Cirelli, G. L., Consoli, S., Licciardello, F., Aiello, R., Giuffrida, F., & Leonardi, C. 2012. Treated municipal wastewater reuse in vegetable production. Agricultural Water Management, 104, 163-170. 10.1016/j.agwat.2011.12.011.
16. de Castro Carvalho, I., Calijuri, M. L., Assemany, P. P., e Silva, M. D. F. M., Neto, R. F. M., da Fonseca Santiago, A., & de Souza, M. H. B. 2013. Sustainable airport environments: a review of water conservation practices in airports. Resources, Conservation and Recycling, 74, 27-36. 10.1016/j.resconrec.2013.02.016
17. Elsokkary, I. H., & Abukila, A. F. 2014. Risk assessment of irrigated lacustrine & calcareous soils by treated wastewater. Water Science, 28(1), 1-17. 10.1016/j.wsj.2014.08.001.
18. Feigin, A., Ravina, I., & Shalhevet, J. 2012. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection (Vol. 17). Springer Science & Business Media. ISBN-3-540-50804-X.
19. Feng, K., Hubacek, K., Siu, Y. L., & Li, X. 2014. The energy and water nexus in Chinese electricity production: a hybrid life cycle analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 342-355. 10.1016/j.rser.2014.07.080.
20. Fagan, J.E., Reutera, M.A. and Langford, K.J.. 2010. Dynamic performance metrics to assess sustainability and cost effectiveness of integrated urban water systems. Resources, Conservation and Recycling. 54: 719–736. 10.1016/j.resconrec.2009.12.002.
21. Ganoulis, J. (2012). Risk analysis of wastewater reuse in agriculture. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 1(1), 1-9. 10.1186/2251-7715-1-3
22. Group Studies and Urban Planning Department of the Interior .1990. Urban green spaces, standards and types. Tehran. 10.1007/s10668-021-01970-4.
23. Hammer, M. J. 1986. Water and wastewater technology.
24. Hansen, E., Rodrigues, M. A. S., & de Aquim, P. M. 2016. Wastewater reuse in a cascade-based system of a petrochemical industry for the replacement of losses in cooling towers. Journal of Environmental Management, 181,157-162. 10.1016/j.jenvman.2016.06.014 .
25. Hassanzadeh, E., Alshorbaghy, A., Wheater, H., and Gober, P. 2016. Managing water in complex systems: An

integrated water resources model for Saskatchewan, Canada. Environmental Modeling and Software, 58: 12-26. 10.1016/j.envsoft.2014.03.015.
26. Hjorth, P., and Bagheri, A. 2006. Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach. Futures, 38(1): 74-92. 10.1016/j.futures.2005.04.005.
27. Huertas, E., Salgot, M., Hollender, J., Weber, S., Dott, W., Khan, S. & Chikurel, H. 2008. Key objectives for water reuse concepts. Desalination, 218(1-3), 120-131. 10.1016/j.desal.2006.09.032.
28. Kibuye, F. A., Gall, H. E., Elkin, K. R., Ayers, B., Veith, T. L., Miller, M., ... & Elliott, H. A. 2019. Fate of pharmaceuticals in a spray-irrigation system: From wastewater to groundwater. Science of the Total Environment, 654, 197-208. 10.1016/j.scitotenv.2018.10.442.
29. Larsen, T.A., and Gujer, M. 1997. The Concept of sustainable urban water management. Wat Sci Tech, 35(9): 3-10.
30. Lawrence, P., Adham, S., & Barrott, L. 2003. Ensuring water re-use projects succeed—institutional and technical issues for treated wastewater re-use. Desalination, 152(1-3), 291-298. 10.1016/j.desal.2005.04.086.
31. Lubello, C., Gori, R., Nicese, F. P., & Ferrini, F. 2004. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation. Water research, 38(12), 2939-2947. 10.1016/j.watres.2004.03.037.
32. Mahjouri, N., & Pourmand, E. 2017. A social choice-based methodology for treated wastewater reuse in urban and suburban areas. Environmental monitoring and assessment, 189(7), 1-18. 10.1007/s10661-017-6039-7
33. Miller, G. W. 2006. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. Desalination, 187(1-3), 65-75. 10.1016/j.desal.2005.04.068
34. Ministry of Energy, National Water and Wastewater Engineering Company. 2004. Shiraz water supply and wastewater project report. LAR Consulting Engineers in collaboration with Iran AB Consulting Engineers Volume 1 and 2.
35. Mohammadi Moghadam, F., Mahdavi, M., Ebrahimi, A., Tashauoei, H. R., & Mahvi, A. H. 2015. Feasibility study of wastewater reuse for irrigation in Isfahan, Iran. Mahvi, 23. 10.5829/idosi.mejsr.2015.23.10.22752.
36. Mulvihill, M. E., & Dracup, J. A. 1974. Optimal timing and sizing of a conjunctive urban water supply and waste water system with nonlinear programing. Water Resources Research, 10(2), 170-175. 10.1016/j.envsoft.2013.11.004
37. Onder, S. 2010. Water saving opportunities urban green space applications. International Multidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM, Bulgaria, Vol. 2: 859-864.
38. Pourmand, E., & Mahjouri, N. 2018. A fuzzy multi-stakeholder multi-criteria methodology for water allocation and reuse in metropolitan areas. Environmental monitoring and assessment, 190(7), 1-20. 10.1007/s10661-018-6813-1.
39. Ramaiah, M., & Avtar, R. 2019. Urban green spaces and their need in cities of rapidly urbanizing India: A review. Urban Science, 3(3), 94. 10.3390/urbansci3030094.
40. Rehan, R., Knight, M.A., Unger AJA and Haas, C.T. 2013. Development of system dynamics model for financially sustainable management of municipal water main networks. Water Research Journal. 47(20): 7184- 7205. 10.1016/j.watres.2013.09.061.
41. Sa-nguanduan, N., & Nititvattananon, V. 2011. Strategic decision making for urban water reuse application: A case

from Thailand. Desalination, 268(1-3), 141-149. 10.1016/j.desal.2010.10.010.
42. Schwartz, M., & Mays, L. W. (1983). Models for water reuse and wastewater planning. Journal of environmental engineering, 109(5), 1128-1147. 10.1061/(ASCE)0733-9372..
43. Stave, K.A. 2003. A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. J. of Environmental Management, 67: 303-313. 10.1016/s0301-4797(02)00205-0 .
44. Taheriyoun, M., Alavi, V., & Ahmadi, A. 2016. Risk analysis of wastewater reuse in agriculture using Baysian network. Amirkabir Journal of Civil Engineering (Amirkabir), 48, 101-109.
45. Tayebikhorami, S., Nikoo, M. R., & Sadegh, M. 2019. A fuzzy multi-objective optimization approach for treated wastewater allocation. Environmental monitoring and assessment, 191(7), 1-24. 10.1007/s10661-019-7557-2.
46. Tayebikhorami, S., Nikoo, M. R., Izady, A., & Adamowski, J. 2020. A novel CVaR-based conflict resolution model for optimal allocation of treated wastewater under bankruptcy conditions. Journal of Cleaner Production, 252, 119766. 10.1016/j.jclepro.2019.119766
47. United Nations. 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.ISBN 978-92-1-151517-6.
48. United Nations Report. 2012. World Water Development. 2.
49. Van Rensburg, P. 2016. Overcoming global water reuse barriers: the Windhoek experience. International Journal of Water Resources Development, 32(4), 622-636. 10.1080/07900627.2015.1129319
50. Vieira, J. M. P., & Lijklema, L. 1989. Development and application of a model for regional water quality management. Water research, 23(6), 767-777. 10.1016/0043-1354(89)90212-1
51. Zarghami, M. and Akbariyeh, S. 2012. System dynamics modeling for complex urban water systems; Application to the City of Tabriz, Iran. Resources, Conservation and Recycling, 60: 99-106. 10.1016/j.resconrec.2011.11.008.
52. Zhang, X.H., Zhang, H.W., Chen, B., Chen, G.Q. and Zhao, X.H. 2008. Water resources planning based on complex system dynamics: A case study of Tianjin City. Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 13: 2328-2336. 10.1016/j.cnsns.2007.05.031.
53. Zeinal, Z. 2015. Basil leaf plant response to absorb cadmium and lead through different concentrations of sewage sludge irrigation in greenhouses around Tehran. Journal of Food and Agriculture, 13(133), 31-28. 10.1016/j.yrtph.2019.03.009.