2023, Vol.9, No.4, Pages 23 to 36
Journal of Water and Sustainable Development

سال نهم، شماره ٤، ١٤٠١، صفحات ٢٣ تا ٣٦
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Applied Article

نوع مقاله: پژوهش کاربردی

Urban Water Metabolism, an Efficient Tool for Evaluating Urban Water Management Performance (Case study: Isfahan City)

N. Nezami[1], M. Tizghadam[2*], M. Zarghami[3], M. Abbasi[2]

1,2- PhD in Environmental Engineering and Assistant Professor, Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran Iran. 3- Professor, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz and Policy Research Institute, Sharif University of Technology, Iran.

*(Corresponding Author Email: m_tizghadam@sbu.ac.ir)

Received: 27-07-2022 Revised: 04-12-2022
Accepted: 11-12-2022 Available Online: 11-03-2023

متابولیسم آب شهری، ابزاری کارآمد جهت ارزیابی عملکرد مدیریت آب شهری (مطالعه موردی شهر اصفهان)

نیما نظامی[1]، مصطفی تیزقدم[2*]، مهدی ضرغامی[3]، مریم عباسی[2]

۱و۲- به ترتیب دکترای مهندسی محیط‌زیست و استادیار، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران- آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. ۳- استاد دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط‌زیست دانشگاه تبریز و استاد مدعو پژوهشکده سیاست‌گذاری دانشگاه صنعتی شریف، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: m_tizghadam@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۲۰

Abstract

With the increase in climate and social change, the issue of water security in cities is becoming more highlighted and urban decision makers are paying attention to issues such as water productivity and reuse of sewage to achieve sustainable municipal water management. In this study, a framework of urban water metabolism was developed based on the water balance. The water flow patterns in the urban areas examined and the performance of water management in Isfahan was evaluated. In this article, previous equations of urban water metabolism reviewed and new relationships were defined by adding parameters such as Non-revenue water, taking into account the conditions of urban water management in developing countries such as Iran. The developed water metabolism model was first used on Isfahan city as a real sample for 2019 and the pattern of water use and urban water performance of Isfahan were analyzed. The city of Isfahan is largely dependent on surface water (water of the Zayandeh-Rud Dam and River), While having a lot of domestic consumer, it has a high potential in terms of gray water and treated wastewater. Studies showed that more than 80% of Isfahan's water requirement is provided from foreign sources, and this indicates that Isfahan's sustainable water supply is weak and there is severe dependence on the surrounding areas for water supply. These results show that the water metabolism framework helps to facilitate more comprehensive understanding and evaluations of city water performance.

Keywords: Urban Water Metabolism, Water Management, Urban Water, Isfahan, Mass Balance.

چکیده

با افزایش تغییرات آب‌وهوایی و اجتماعی، چالش امنیت آبی شهرها پررنگ‌تر می‌شود و تصمیم‌گیران شهری برای دستیابی به مدیریت پایدار آب شهری در زمینه‌هایی مانند بهره‌وری آب و استفاده مجدد از فاضلاب حرکت می‌کنند. در این پژوهش یک چارچوب متابولیسم آب شهری براساس موازنه جرمی آب گسترش داده شد. با استفاده از آن الگوهای جریان آب در بخش‌های شهری بررسی و کارایی مدیریت آب در شهر اصفهان ارزیابی شد. در این مقاله معادله‌های پیشین متابولیسم آب شهری بررسی و رابطه‌های تازه‌ای با در نظر گرفتن جایگاه مدیریت آب شهری در شهرهای کشورهای درحال‌توسعه مانند ایران، با اضافه شدن پارامترهایی مانند آب بدون درآمد، تعریف شد. مدل متابولیسم آب ساخته شده برای اولین بار بر روی شهر اصفهان به‌عنوان یک نمونه واقعی برای سال ۱۳۹۸ به‌کار گرفته شد و الگوی استفاده از آب و کارایی آب شهری اصفهان تحلیل شد. شهر اصفهان تا اندازه بسیاری به آب سطحی و منابع آب سد و رودخانه زاینده‌رود وابسته است. درحالی‌که با داشتن تعداد بسیاری مصرف‌کننده خانگی پتانسیل بالایی از دیدگاه منابع آب خاکستری و فاضلاب تصفیه شده دارد. بررسی‌ها نشان داد بیش از ۸۰ درصد از نیاز آبی شهر اصفهان از منابع خارجی تأمین می‌شود و همین مورد گویای شکننده بودن فراهم کردن آب پایدار و وابستگی شدید شهر اصفهان به بخش‌های پیرامون برای فراهم کردن آب خود است. این نتایج نشان می‌دهد، چارچوب متابولیسم آب به آسان کردن درک و ارزیابی‌های فراگیرتر از کارایی آب شهرها کمک می‌کند.

واژه‌های کلیدی: متابولیسم آب شهری، مدیریت آب، آب شهری، اصفهان، موازنه جرمی.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir

How to cite this article: Nezami N., Tizghadam M., Zarghami M. and Abbasi M. 2023. Urban Water Metabolism, an Efficient Tool for Evaluating Urban Water Management Performance (Case study: Isfahan City). Journal of Water and Sustainable Development, 9(4): 23-36. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v9i4.2207.1162

مقدمه

شیوه‌های کنونی مدیریت آب شهری توان پاسخگویی به تغییرات ناشی از رشد جمعیت، افزایش سرانه درخواست آب و تغییرات اقلیمی را ندارند. در سال ۲۰۱۴، ۵۴ درصد مردم دنیا در شهرها ساکن بودند ولی پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، ۷۰ درصد جمعیت جهان ساکن بخش‌های شهری باشند (United Nations، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۸b). این رشد شتابنده می‌تواند شهرها را باتوجه‌به محدودیت منابعی مانند آب، انرژی و مواد غذایی در فراهم کردن نیازهای اساسی ساکنان دچار چالش‌های بنیادی کند. در حال حاضر، بسیاری از شهرها در سراسر جهان در برابر کمبود آب آسیب‌پذیر هستند و پیش‌بینی می‌شود که شاید یک شهر از هر شش شهر بزرگ دنیا تا سال ۲۰۵۰ درگیر خطر کسری چشمگیر آب باشند (Ffion Atkins و همکاران، ۲۰۲۱). این استفاده فزاینده از منابع به‌دست شهرها گویای رشد آن‌ها، افزایش آلودگی و همچنین فشار بر محیط طبیعی است. آب یک منبع بنیادی در سیستم شهری است که نیاز به توجه و مدیریت ویژه دارد (Jeong و Park، ۲۰۲۰). برای شناسایی فرآیندهای باارزشی که توسعه پایدار شهرها را تهدید می‌کنند، رویکرد متابولیسم شهری با ردیابی و کنترل جریان مواد و چرخه‌های داخلی شهرها معرفی شده است. یک چارچوب متابولیسم شهری تصویری گسترده‌تر از جریان منابع و همچنین تجزیه و تحلیل کمی از ورودی‌ها و خروجی‌ها، چگونگی آب، انرژی، زباله، مواد مغذی و مواد دیگر را نشان می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب مفهومی و تحلیلی استفاده شود (Wolman، ۱۹۶۵؛ Kennedy و همکاران، ۲۰۱۱؛ Farooqui و همکاران، ۲۰۱۶؛ Renouf و همکاران، ۲۰۱۶). متابولیسم شهری به سیاست‌گذاران شهری کمک می‌کند تا کارآیی منابع را برای ارائه کالاها و خدمات باتوجه‌به ظرفیت منطقه خود ارزیابی کنند (Jeong و Park، ۲۰۲۰). متابولیسم شهری را می‌توان در مقیاس‌های مختلف از سطح جهانی تا شهر و خانوار استفاده کرد (Agudelo-Vera و همکاران، ۲۰۱۲) و می‌تواند فهرستی از موجودی جریان منابع (آب، انرژی، مواد مغذی/آلاینده‌ها، کربن و سایر مواد) را با گذشت زمان تولید کند (Kennedy و همکاران، ۲۰۰۷). چنین حسابداری همچنین به مقایسه شهرها با یکدیگر کمک می‌کند (Kennedy و همکاران، ۲۰۱۱). با وجود انجام مطالعات بسیاری در حوزه متابولیسم شهری در مورد منابع مختلف، منابع آب توجه نسبتاً کمتری را به خود جلب کرده است (Jeong و Park، ۲۰۲۰). Kennedy و همکاران در سال ۲۰۱۱، پژوهش‌های کتابخانه‌ای جامعی در مورد مقاله‌های مرتبط با متابولیسم شهری انجام دادند. آن‌ها در این پژوهش بیش از ۵۰ مقاله را در مورد شهرهایی از ۸ منطقه جهانی بررسی کردند (Kennedy و همکاران، ۲۰۱۱). مطالعه آن‌ها نشان داد بیشتر مطالعات متابولیسم شهری[1] بر روی کمّی‌سازی جریان‌های انرژی، مواد زائد، مواد مغذی، مواد معدنی، غذا و گازهای گلخانه‌ای تمرکز دارند (Warren-Rhodes و Koenig، ۲۰۰۱؛ Forkes، ۲۰۰۷؛ Baker، ۲۰۰۹؛ Barles، ۲۰۰۹؛ Zhang و همکاران، ۲۰۰۹) و تنها ۳ مقاله به جریان آب پرداخته بود (Hermanowicz و Asano، ۱۹۹۹؛ Gandy، ۲۰۰۴؛ Baker، ۲۰۰۹). Wolman (۱۹۶۵) پیشگام در استفاده از متابولیسم شهری به‌عنوان یک چارچوب ارزیابی برای تحلیل یک شهر فرضی آمریکایی (نیویورک) با جمعیت یک میلیون نفری بود. Wolman این مفهوم را برای پرداختن به کیفیت آب‌وهوای شهرهای آمریکایی توسعه داد (Wolman، ۱۹۶۵؛ Kennedy و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعه وی فقط شامل ورودی‌های جریان‌های متمرکز آب مدیریت شده توسط زیرساخت‌های شهری بود و در آن تخمین زده شد که ورودی آب برای یک میلیون نفر جمعیت در ایالات متحده حدود ۶۲۵ هزار تن در روز است. بیشتر این جریان به‌عنوان فاضلاب تخلیه می‌شد و بقیه آن توسط فعالیت‌های مختلف انسانی از بین می‌رفت. این مطالعه نشان داد که فاضلاب خروجی بین ۷۵ تا ۱۰۰ درصد آب تأمین شده (جریان ورودی) را نشان می‌دهد (Wolman، ۱۹۶۵). Larsen و همکاران (۲۰۱۶) این موضوع را در ادامه بررسی و تأکید نمودند. در باور آنان مقدار زیادی از این فاضلاب را می‌توان برای برآورده کردن تقاضای آب شهری به‌منظور جلوگیری از واردات منابع آب از راه دور، که نیازمند صرف انرژی قابل توجهی است، استفاده کرد. علاوه‌برآن، هدررفت آب از سیستم‌های متمرکز آب شهری نیز در بسیاری از شهرهای کشورهای درحال‌توسعه بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است. جلوگیری از این هدررفت آب می‌تواند پتانسیل بالایی برای کاهش نیاز آبی و کاهش تولید آب ایجاد کند (Mehta و همکاران، ۲۰۱۴). López و Giampietro (۲۰۱۵) استدلال کردند ترسیم یک جریان مستقیم از آب دشوار است زیرا جریان‌های چرخه‌ای آب با جریان مواد یک‌طرفه و برگشت‌ناپذیر از منابع دیگر مانند سوخت‌های فسیلی متفاوت است.

توجه به منابع آب و راندمان آب یا چگونگی به حداکثر رساندن بهره‌وری هر واحد آب ورودی از طریق استفاده بهینه و بازیافت داخلی، یکی از اهداف مهم شهرها است (Renouf و همکاران، ۲۰۱۷). شهرها طیف وسیعی از اهداف مرتبط با آب از جمله تأمین امنیت آبی، عملکرد خدمات آب، حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت ریسک دارند (Renouf و همکاران، ۲۰۱۷). به‌منظور نظارت و پایش پیشرفت این اهداف، تعیین عملکرد آب شهری اهمیت پیدا می‌کند. درحالی‌که بخش زیادی از پژوهش‌های موجود به موضوع مدیریت و عملکرد آب می‌پردازد، دیدگاه‌ها، روش‌ها و دامنه‌های کاربرد آن‌ها متفاوت است و ارزیابی سیستماتیک و جامع عملکرد آب شهری را پیچیده می‌کند (Jeong و Park، ۲۰۲۰). Renouf و Kenway (۲۰۱۷) نبود رویکرد جامعی برای ارزیابی عملکرد آب در مقیاس کلان شهری را مهم دانستند و اظهار داشتند، رویکرد متابولیسم آب شهری بیشترین کمک را برای دستیابی به این هدف دارد.

تعداد کمی از شهرها در سطح جهان حسابداری جامع و دقیقی از منابع آبی شهر خود دارند. یک کمّی‌سازی جامع و سیستماتیک به داده‌های خوب و درک کاملی از منابع موجود نیاز دارد (Kennedy و همکاران، ۲۰۱۱؛ Kenway و همکاران، ۲۰۱۱؛ Renouf و همکاران، ۲۰۱۶). رویکردها و روش‌های گوناگونی برای تجزیه‌وتحلیل جریان منابع در سیستم‌های آب شهری، مانند ارزیابی چرخه عمر (LCA)[۲]، ردپاهای محیط‌زیستی[۳] و مدل‌سازی یکپارچه چرخه آب وجود دارد. LCA میزان منابع موجود در کالاها و خدمات (مانند ردپاهای آب و انرژی) را در یک سیستم شهری مشخص می‌کند. ردپاهای محیط‌زیستی از LCA سرچشمه می‌گیرد و تحلیل ورودی-خروجی یک روش از بالا به پایین برای تعیین کمیت جریان منابع در طول یک سیستم شهری یا اقتصاد است. مدل‌سازی یکپارچه چرخه آب، یک سیستم آب را در یک واحد شهری مانند منطقه در نظر می‌گیرد، اما کل منطقه شهری یا کل اقتصاد را بررسی نمی‌کند (Bach و همکاران، ۲۰۱۴).

پژوهش‌های متابولیسم آب شهری پس از Wolman (۱۹۶۵) در شهرهای هنگ‌کنگ، تورنتو، توکیو، وین، بروکسل، لندن، کیپ‌تاون، بنگلور، ایرلند، سیدنی و سایر شهرهای استرالیا انجام گرفته است (Hendriks و همکاران، ۲۰۰۰؛ Sahely و همکاران، ۲۰۰۳؛ Gandy، ۲۰۰۴؛ Kennedy، ۲۰۰۷؛ Browne و همکاران، ۲۰۰۹؛ Kenway و همکاران، ۲۰۱۱؛ Renouf و همکاران، ۲۰۱۶؛ Paul و همکاران، ۲۰۱۸). برخی از پژوهش‌های قبلی که به بررسی جریان آب شهری پرداخته بودند تصاویر ناقصی در مورد متابولیسم آب ارائه داده‌اند. به‌عنوان مثال، Binder و همکاران (۱۹۹۷) متابولیسم آب را برای شهر Tunja در کشور کلمبیا توسعه دادند، اما با مشکلات بسیاری در مورد در دسترس بودن و کیفیت ضعیف داده‌ها مواجه بودند (Binder و همکاران، ۱۹۹۷). Sahely و همکاران (۲۰۰۳) جریان آب را به‌عنوان بخشی از جریان‌های بزرگ‌تر منابع شهری در نظر گرفتند و به جزئیات آن نپرداختند (Sahely و همکاران، ۲۰۰۳). Kenway و همکاران (۲۰۱۱) یک چارچوب جامع موازنه جرمی آب را برای درک بهتر آب و جریان‌های مرتبط انرژی و مواد با آن در شهرها ایجاد کردند. در مدل آن‌ها، هدررفت سیستم نادیده گرفته شده بود که می‌تواند یک مؤلفه مهم موازنه جرمی آب شهری در یک شهر درحال‌توسعه باشد. علاوه‌برآن، تحلیل موازنه جرمی آب شهری تاکنون برای تعداد محدودی از شهرها به‌عنوان مطالعات موردی واقعی انجام شده است (Kenway و همکاران، ۲۰۱۱؛ Farooqui و همکاران، ۲۰۱۶). Kenway و همکاران (۲۰۱۱) گزارش جامعی از متابولیسم آب شهری و شاخص‌هایی که می‌توانند به سرعت بر اساس نتایج تجزیه‌وتحلیل متابولیکی اندازه‌گیری شوند، ارائه دادند. آن‌ها دریافتند که شهرهای خاصی از استرالیا جریان آب خطی دارند و جریان زیادی از آب باران، رواناب‌ها و فاضلاب بدون استفاده باقی‌مانده است. چارچوب متابولیسم آب شهری که توسط Kenway و همکاران (۲۰۱۱) ارائه شد در سال‌های بعد برای ارزیابی عملکرد آب شهری در چندین مطالعه اخیر مورد استفاده قرار گرفته است (Singkran، ۲۰۱۷؛ Paul و همکاران، ۲۰۱۸؛ Ghosh و همکاران، ۲۰۱۹). به‌علاوه برای انجام تحلیل استاتیک متابولیسم آب، Farooqui و همکاران (۲۰۱۶) برای ارزیابی شش گزینه خدمات آبی (مانند جمع‌آوری آب باران/رواناب و استفاده مجدد از فاضلاب و آب خاکستری در مقیاس‌های مختلف شهری) یک تحلیل سناریو محور را انجام دادند. آن‌ها شاخص‌های جدیدی مانند «عملکرد هیدرولوژیکی» را برای اندازه‌گیری میزان تغییر جریان هیدرولوژیکی نسبت به قبل از توسعه را ارائه دادند. Renouf و Kenway (۲۰۱۷) مجموعه‌ای از شاخص‌های متابولیسم آب شهری را باتوجه‌به چهار هدف آب شهری شامل بهره‌وری منابع، تأمین درونی، حفاظت از منابع آب و عملکرد آب ارائه دادند. این اهداف که می‌توانند با تحلیل متابولیسم ارزیابی شوند، به‌ویژه با امنیت تأمین آب مرتبط هستند. درحالی‌که شهرها طیف گسترده‌تری از اهداف مانند مدیریت ریسک یا حفاظت از محیط‌زیست را مدنظر دارند (Renouf و همکاران، ۲۰۱۷).

نقطه قوت رویکرد متابولیسم آب شهری در جامع بودن و درستی آن است که در استفاده از موازنه جرمی هیدرولوژیکی، نهفته است (Renouf و Kenway، ۲۰۱۷). ابزارهای مدل‌سازی سیستم آب شهری مانند Aquacycle, Urban Water Optioneering Tool, Dynamic Urban Water Simulation model و City Water Balance model هم جریان آب را بر اساس موازنه آب در نظر می‌گیرند، اما تمایل دارند روی کمیت آن دسته از جریان‌های مدیریت شده توسط زیرساخت‌های شهری، بیشتر در مقیاس حوضه آبریز یا منطقه تمرکز کنند و تأثیر چارچوب شهری را بر هیدرولوژی شبیه‌سازی می‌کنند. شاخص‌هایی مانند سرانه مصرف آب که روی آب‌رسانی خانگی متمرکز است، به‌طور معمول اندازه‌گیری می‌شود، درحالی‌که شاخص‌های بازده آب حاصل از متابولیسم آب شهری میزان مصرف کل آب در بخش‌های مختلف مناطق شهری را اندازه‌گیری می‌کند. با در نظر گرفتن تمام جریان‌های آب، رویکرد متابولیسم آب شهری به سرعت می‌تواند یک نمای کلی از مدیریت آب شهری را ایجاد کند و بهره‌وری آب را در سیستم آب شهری ارزیابی کند (Renouf و همکاران، ۲۰۱۷). یک تعادل جامع آب باتوجه‌به تمام مؤلفه‌های چرخه آب شهری (آب باران، منابع ورودی، آب‌های غیرمتمرکز، فاضلاب، رواناب‌ها، تبخیر و تعرق، تغذیه آب‌های زیرزمینی و استفاده مجدد از پساب)، به‌جای شمارش فقط ورودی‌ها و خروجی‌ها، برای درک بهتر متابولیسم آب شهری در شهرهایی که با افزایش کمبود آب روبه‌رو هستند، یافتن منابع جایگزین آب محلی و تعیین کمیت پتانسیل‌های استفاده مجدد، اهمیت بسیار زیادی دارد. در این پژوهش ابتدا به معرفی منطقه و ابعاد سیستم مورد مطالعه پرداخته شده، سپس چارچوب متابولیسم آب شهری و ابعاد و روابط

آن تشریح شده است. در گام بعد شاخص‌های عملکردی آب شهری معرفی شد و چارچوب متابولیسم آب شهری برای شهر اصفهان پیاده‌سازی و تجزیه‌وتحلیل شده است. این مطالعه بر اهمیت بررسی کل سیستم آب شهری برای بهینه‌سازی استفاده از منابع آب داخلی و دستیابی به اهداف آب شهری تأکید دارد. هدف پژوهش بررسی چگونگی کاربرد چارچوب متابولیسم آب در ارزیابی مدیریت آب شهری مناطق مختلف به‌منظور ارتقای وضعیت بهره‌وری آب است. از آنجایی‌که توسعه و کاربرد متابولیسم آب شهری و شاخص‌های مربوط به آن در مرحله‌ای نسبتاً اولیه قرار دارد (Renouf و Kenway، ۲۰۱۷)، این پژوهش با آزمایش این چارچوب در کشور ایران به توسعه دانش موجود کمک می‌کند. به‌طور خاص، این پژوهش به بررسی مسائل مربوط به داده‌های مربوط به مطالعه مدیریت آب شهری می‌پردازد، همچنین بحث در مورد انواع و اشکال داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی متابولیسم آب شهری، گام زمانی، مقیاس، واحد و همچنین مطمئن بودن داده‌ها از نظر درستی و دقت از دیگر موارد مورد بررسی است.

معرفی مدل مفهومی متابولیسم شهری

در سال‌های اخیر کاربرد متابولیسم شهری در برنامه‌ریزی‌ها برای بهبود وضعیت آب، انرژی و بهره‌وری مواد افزایش یافته است. چارچوب متابولیسم شهری تصویری گسترده‌تر از جریان منابع و همچنین تجزیه و تحلیل کمی از ورودی‌ها و خروجی‌ها، وضعیت آب، انرژی، زباله، مواد مغذی، آلاینده‌ها و سایر مواد را ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان مدل مفهومی و تحلیلی مورد استفاده قرار گیرد (Wolman، ۱۹۶۵؛ Kennedy و همکاران، ۲۰۱۱؛ Farooqui و همکاران، ۲۰۱۶؛ Renouf و همکاران، ۲۰۱۶). به‌صورت ساده متابولیسم شهری موازنه جرمی مواد موجود در سیستم شهری را در نظر می‌گیرد (Sahely و همکاران، ۲۰۰۳). متابولیسم شهری به سیاست‌گذاران شهری کمک می‌کند تا کارایی منابع را برای ارائه کالاها و خدمات باتوجه‌به ظرفیت منطقه خود، ارزیابی کنند. متابولیسم شهری را می‌توان در مقیاس‌های مختلف از سطح جهانی تا شهر و خانوار استفاده کرد (Agudelo-Vera و همکاران، ۲۰۱۲؛ Jeong و Park، ۲۰۲۰). این نحوه حسابداری منابع همچنین به مقایسه شهرها با یکدیگر کمک می‌کند (Kennedy و همکاران، ۲۰۱۱). Fischer-Kowalski (۱۹۹۸) عقیده داشتند ایده متابولیسم شهری، قوی‌ترین پارادایم و رویکرد بین‌رشته‌ای برای بررسی تجربی روابط بین جامعه و محیط است. باوجود انجام مطالعات بسیاری در حوزه متابولیسم شهری در مورد منابع مختلف، آب توجه نسبتاً کمتری را به خود جلب کرده است (Jeong و Park، ۲۰۲۰). در متابولیسم شهری جریان‌های آب، مواد و انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد ولی متابولیسم آب شهری به بررسی جریان آب در سیستم می‌پردازد.

در تعریف متابولیسم آب شهری می‌توان گفت متابولیسم آب شهری، یک شهر را به‌عنوان سیستمی با مرزهای سه‌بعدی در نظر می‌گیرد که از موازنه جرمی برای تعیین تمام جریان‌های آب بین محیط‌زیست استفاده می‌کند. به‌این‌ترتیب می‌توان مشخص کرد این سیستم چگونه با محیط ارتباط برقرار می‌کند. مطالعه ذخایر منابع و تبادل‌های جریان آب در شهرها دیدگاهی را برای تحلیل سیستم‌های شهری و پتانسیل درک خودکفایی، کارایی و انعطاف پذیری ارائه می‌دهد. مزیت متابولیسم شهری را می‌توان در بررسی منابع مورد نیاز، در دسترس بودن، توجه به نرخ تغییر و انباشت دانست. متابولیسم شهری درکی از منابع (جریان‌های ورودی) مورد نیاز برای حفظ رشد و توسعه شهر، یا توانایی‌های شهر در جهت تنظیم جریان، جذب یا تصفیه مواد زائد و کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد.

چارچوب متابولیسم آب شهری نگاه جامعی از سیستم آب شهری را حاصل می‌کند. مهمترین چالش در تهیه یک مدل متابولیسم دقیق، جمع‌آوری و گردآوری داده‌ها است. این چالش‌های از موجود نبودن داده‌ها تا ناسازگاری در روش‌ها و قالب‌های جمع‌آوری و گزارش‌دهی داده‌ها، عدم قطعیت و قابلیت اطمینان داده‌ها را در بر می‌گیرد. علاوه‌برآن یک شهر و سیستم آب آن رفتاری ماهیتی پویا دارند در صورتی‌که ویژگی پویا بودن جریان آب در مدل متابولیسم آب شهری در نظر گرفته نمی‌شود. هر چند این مدل نمی‌تواند جزئیات دقیق جریان پویای آب را شبیه‌سازی و مدل‌سازی کند ولی توانایی ارزیابی راندمان کلی آب را با در نظر گرفتن تمام داده‌های ورودی و خروجی دارد.

مواد و روش‌ها

• منطقه مورد مطالعه

شهر اصفهان بعد از تهران و مشهد سومین شهر بزرگ ایران است. این شهر در ارتفاع ۱۵۷۵ متر از سطح دریا، مرکز شهرستان و استان اصفهان است. محدوده شهری اصفهان شامل پانزده منطقه شهری است و در خارج از محدوده شهری نیز از سمت شمال به شاهین‌شهر از شرق به دشت سگزی از جنوب کوه صفه و سپاهان شهر و از غرب به سمت خمینی‌شهر و نجف‌آباد محدود می‌شود. رودخانه زاینده‌رود که بزرگ‌ترین رودخانه فلات مرکزی محسوب می‌شود، با طول حدود ۳۶۰ کیلومتر از شهر اصفهان عبور می‌کند. این رود از ارتفاعات زردکوه بختیاری سرچشمه گرفته و در راستای غرب به شرق با عبور از شهر اصفهان و تقسیم آن به دو قسمت شمالی-جنوبی، به باتلاق گاوخونی که در ۱۴۰ کیلومتری جنوب شرقی اصفهان قرار دارد می‌ریزد (Safavi و همکاران، ۲۰۱۵؛ شهرداری اصفهان، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۹). براساس گزارش مرکز آمار ایران جمعیت شهر اصفهان در یک دوره ۵۰

ساله ۶/۵ برابر شده است و از ۲۸۷۸۹۸ نفر در سال ۱۳۳۵ به ۱۹۶۱۲۶۰ نفر در سال ۱۳۹۵ افزایش‌یافته است (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). مرز سیستم (شکل ۱) به‌عنوان مرز منطقه‌ای تعیین شده است که مناطق شهری و حریم آن را در بر می‌گیرد.

جدول ۱- ویژگی‌های شهر اصفهان

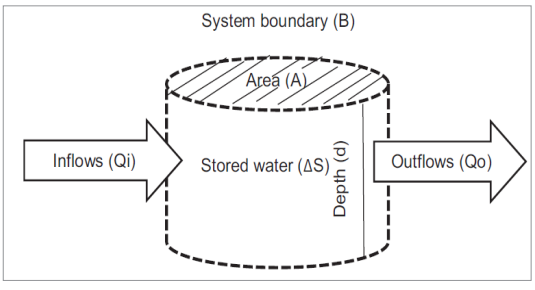
عنوان	مقدار
مساحت (Km^2)	۵۵۰،۷۲
جمعیت (نفر)*	۱،۹۶۱،۲۶۰
بارش (mm)	۱۳۹
منبع اصلی آب	سد زاینده‌رود (رودخانه زاینده‌رود)

* بر اساس سرشماری سال ۱۳۹۵ (مرکز آمار ایران ۱۳۹۵)

شکل ۱- مرز سیستم در محدوده شهری و حریم شهر اصفهان (شهرداری اصفهان ۱۳۹۹)

• روش تحلیل جریان مواد

اغلب پژوهش‌های گذشته از روش تحلیل جریان مواد[۴] (MFA) استفاده کرده‌اند. این روش جریان‌های کلی منابع (انرژی، مواد، غذا و آلاینده‌هایی مانند مواد مغذی و کربن) را فراهم می‌کند، به درک استفاده از منابع و روند آن‌ها در طول زمان کمک می‌کند و به گزارش‌گیری‌های محیط‌زیستی کمک می‌کند (Kennedy و همکاران، ۲۰۰۷؛ Kenway و همکاران، ۲۰۱۱؛ Renouf و همکاران، ۲۰۱۶). اما وقتی صحبت از آب می‌شود MFA نمی‌تواند جریان‌های مجزا (مانند منابع آب غیرمتمرکز) یا جریان هیدرولوژیکی (مانند آب باران، نفوذ آب زیرزمینی، رواناب سطحی و تبخیر و تعرق) را یکپارچه در نظر بگیرد، بنابراین نمی‌تواند اطلاعاتی را برای بهبود مدیریت جامع منابع آب ارائه دهد. نخستین بار این موضوع را Kenway و همکاران (۲۰۱۱) توجه نمودند که یک چارچوب جامع موازنه جرمی آب شهری را برای درک بهتر جریان آب و جریان‌های مرتبط انرژی و مواد در یک شهر تهیه کردند. Kenway و همکاران (۲۰۱۱) اهمیت اساسی یک مرزبندی شفاف سیستم را برای تعریف حجم جریان در مرز سیستم و حجم ذخیره شده در محدوده توضیح دادند. در شکل (۲) نشان داده شده است (Kenway و همکاران، ۲۰۱۱).



شکل ۲- تعریف محدوده سیستم (Kenway و همکاران، ۲۰۱۱)

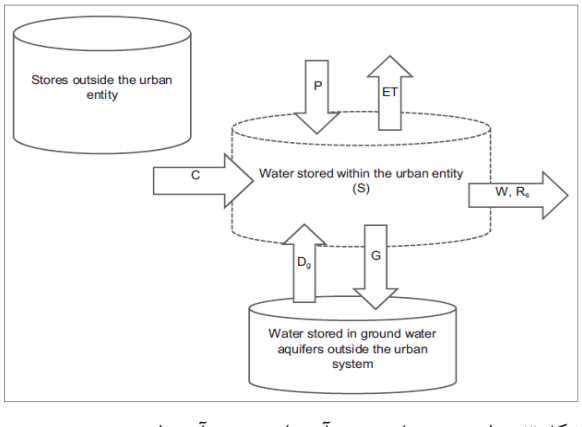
اگر B یک مرز سیستم تعریف شده باشد و A منطقه مرزی با عمق D باشد، موازنه جرمی آب بر اساس اصول پایستگی جرم برابر است با ورودی (Q_i) منهای خروجی (Q_o) و تغییر در ذخیره (حجم یا جرم) ΔS در محدوده سیستم در طی یک دوره زمانی T_1-T_2 که می‌توان مانند رابطه (۱) بیان کرد.

$$\Delta S=(S_{t1}-S_{t2})=Q_i(t_1-t_2)-Q_o(t_1-t_2) \quad (۱)$$

برای یک سیستم مشخص، اگر بازه زمانی و محدوده سیستم تعریف شده باشد و تمام واحدها به‌عنوان جریان حجم یا جرم در واحد زمان بیان شوند، رابطه (۱) می‌تواند به شرح زیر ساده شود:

$$\Delta S=Q_i-Q_o \quad (۲)$$

در شکل (۳) P: بارش، ET: تبخیر و تعرق، C: تأمین آب متمرکز، S: آب ذخیره‌شده توسط زیرسیستم‌های مختلف، W: فاضلاب، Rs: رواناب‌های سطحی، G: آب زیرزمینی، Dr: آب غیرمتمرکز ناشی از بارش باران و Dg: آب غیرمتمرکز ناشی از آب زیرزمینی است.



شکل ۳- چارچوب موازنه جرم آب با توجه به آب‌های زیرزمینی در زیر شهر و مخازن خارج از شهر (برگرفته از: Kenway و همکاران، ۲۰۱۱)

براساس رابطه (۲) و شکل (۳) خواهیم داشت:

$$S=(P+C+D_r+D_g)-(W+R_s+G+ET) \quad (۳)$$

Kenway و همکاران (۲۰۱۱) این چارچوب موازنه جرمی آب را برای مطالعات موردی در شهرهای ملبورن، سیدنی، بریزبن، پرث و گولد کوست استرالیا برای ارزیابی پتانسیل گزینه‌های جایگزین تأمین آب به‌منظور تقویت جریان‌های متمرکز ورودی و کاهش

جریان‌های خروجی استفاده کردند. این چارچوب شامل منابع جایگزین آب مانند آب باران، رواناب سطحی، فاضلاب، تأمین آب غیرمتمرکز، تبخیر و تعرق و نفوذ به آب‌های زیرزمینی بود. این چارچوب بعدها توسط Farooqui و همکاران (۲۰۱۶) با اضافه شدن جریان‌های دیگری مانند آب بازیافتی غیرمتمرکز در داخل و خارج از سیستم شهری تکمیل شد. اما Renouf و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کردند این چارچوب با ترکیب استفاده از آب برای خدمات اکوسیستمی، زمینه دیگری برای توسعه دارد. بااین‌حال، آن‌ها بیان نکردند که چگونه این چارچوب می‌تواند جدا از نیاز به ترکیب استفاده از آب برای خدمات اکوسیستمی، در یک کشور درحال‌توسعه استفاده شود.

هر شهر از نظر مدیریت آب و موقعیت جغرافیایی ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود را دارد. یک چارچوب ارزیابی متابولیسم آب شهری (UWMF)[5] ممکن است بر اساس مشخصات شهری از یک شهر به شهر دیگر متفاوت باشد (مرز سیستم، انواع منابع آب ورودی، مصارف، استفاده مجدد، هدررفت، مقیاس، زمان و سایر عوامل). مطالعات گذشته نیز از مقیاس‌ها، رویکردها و دیدگاه‌های مختلف UWMF پیروی می‌کنند (Kenway و همکاران، ۲۰۱۱؛ Farooqui و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه‌برآن، آخرین مدل ارزیابی متابولیسم آب شهری گسترش یافته نیز مؤلفه‌هایی مانند هدررفت آب را که یک مؤلفه قابل توجه در متابولیسم آب شهری در شهرهای درحال‌توسعه (۳۰ تا ۵۰ درصد کل جریان) و سایر مناطق جهان است در نظر نگرفته است (Mehta و همکاران، ۲۰۱۴)، همچنین تأثیر زیادی در چرخه هیدرولوژیکی دارد. یکی از شواهد این موضوع در مطالعه انجام شده توسط Mehta و همکاران (۲۰۱۴) قابل مشاهده است. آن‌ها باتوجه‌به هدررفت آب در خطوط لوله و جریان بازگشتی با انجام فرضیاتی به دلیل دسترسی نداشتن به داده‌ها برای اندازه‌گیری جریان آب زیرزمینی در بنگلور، از یک مدل توده‌ای در یک چارچوب اجتماعی-اکولوژیکی استفاده کردند. مطالعه آن‌ها نشان داد سطح آب‌های زیرزمینی در بنگلور در منطقه اصلی شهر افزایش یافته است، اما در حاشیه شهر که مردم کمبود آب بیشتری را تجربه می‌کنند و آب‌های زیرزمینی را استخراج می‌کنند این اتفاق نیفتاده است (Mehta و همکاران، ۲۰۱۴). از جمله دیگر جریان‌های آب در کشورهای درحال‌توسعه که در حال افزایش است، تأمین آب توسط خرده‌فروشان یا تانکرهای آب است. این شرکت‌ها در تأمین آب کافی برای مردم شهرها هم ناکام هستند. چنین مؤلفه‌هایی برای تحلیل جامع موازنه جرمی آب باید در UWMF گنجانده شوند.

Kenway و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند وجود یک مرز سیستم مشخص به تعریف و ترکیب تمام جریان‌های ورودی و خروجی آب در سیستم آب شهری کمک می‌کند (Kenway و همکاران ۲۰۱۱). قبل از Kenway و همکاران (۲۰۱۱) تعادل آب در حوضه شهری توسط Mitchell و همکاران (۲۰۰۳) و Sahely و همکاران (۲۰۰۳) شرح داده شده بود. آن‌ها تلاش کردند جریان‌های ورودی و خروجی کلیدی را در نظر بگیرند، اما به خاطر عدم وجود مرز سیستم بسیاری از مؤلفه‌ها را در تجزیه‌وتحلیل خود حذف کردند. علاوه‌برآن‌ها Mitchell و همکاران (۲۰۰۳) از معادله موازنه آب برای درک عملکرد هیدرولوژیکی حوضه آبریز استفاده کردند، اما رویکرد آنان مناسب بررسی عملکرد در یک منطقه شهری نبود. اگرچه Sahely و همکاران (۲۰۰۳) به مرز سیستم توجه داشتند ولی این محدوده مرزی برای منطقه بزرگی از تورنتو در نظر گرفته شد. همچنین آن‌ها فاضلاب و رواناب‌های سطحی را با هم دیگر به‌عنوان یک خروجی در نظر گرفتند که در کنار جریان‌های دیگر قابل تشخیص نیستند. همچنین Kenway و همکاران (۲۰۱۱) و Paul و همکاران (۲۰۱۸) تعدادی شاخص عملکردی از جمله متمرکزسازی تأمین، قابلیت جایگزینی تأمین از منابع متمرکز و قابلیت جایگزینی استفاده از فاضلاب، آب باران و رواناب‌های سطحی در مصرف کل آب را تعریف کردند و روش‌هایی را برای محاسبه این شاخص‌ها برای یک شهر توسعه دادند که در جدول (۲) آمده است.

آن‌ها این شاخص‌ها را در تعدادی از شهرهای استرالیا به‌کار بردند و مشاهده شد بین شهرهای مختلف در جمع‌آوری آب باران از ۰/۱ تا ۲۲ درصد، در جایگزینی منابع متمرکز با آب باران ۲۵۷ تا ۳۹۷ درصد، در پتانسیل جایگزینی و استفاده مجدد از پساب ۲۶ تا ۸۶ درصد، در پتانسیل استفاده مجدد از آب سطحی ۴۷ تا ۱۰۴ درصد و در استفاده مجدد از جریان‌های ورودی انسان‌ساخت بین ۱ تا ۴ درصد در سال ۲۰۰۵-۲۰۰۴ تفاوت وجود دارد. این شاخص‌ها نشان می‌دهد این شهرها به‌طور مناسب برای استفاده کامل از پتانسیل این جریان‌های قابل توجه، طراحی نشده‌اند و به تأمین آب شیرین از منابع متمرکز وابسته هستند. همان‌طور که پیش‌ازاین اشاره شد، UWMF به عوامل مختلفی در یک محیط شهری خاص بستگی دارد و جریان‌های مختلف آب در داخل و خارج از شهر را در نظر می‌گیرد. همچنین شاخص‌های جدیدی نیز مانند بازیابی هدررفت آب قابل تعریف هستند و می‌توانند به شاخص‌های مهم عملکرد آب شهری در یک کشور درحال‌توسعه تبدیل شوند. براساس بررسی مطالعات پیشین مشاهده شد که چارچوب متابولیسم شهری ساخته شده مبتنی بر موازنه جرمی آب کارایی لازم را برای تجزیه‌وتحلیل سیستم‌های پیچیده آب شهری دارد، ولی این چارچوب تا به حال برای یک شهر واقعی در یک کشور درحال‌توسعه پیاده‌سازی نشده است. چارچوب متابولیسم آب شهری Kenway و همکاران (۲۰۱۱) که توسط Farooqui و همکاران (۲۰۱۶) توسعه داده شد بر روی یک شهر فرضی در استرالیا اجرا شده است.

جدول ۲- شاخص‌های عملکردی و تعریف آن‌ها (Kenway و همکاران، ۲۰۱۱؛ Paul و همکاران، ۲۰۱۸)

	شاخص	روش محاسبه	رابطه
سیستم‌های متمرکز آب	تأمین متمرکز آب (٪)	آب تأمین‌شده از منابع متمرکز/ مصرف آب کل	C/(C+D)×100
	پتانسیل جمع‌آوری آب باران (٪)	آب غیرمتمرکز/بارش	D/P×100
پتانسیل استفاده از آب باران	قابلیت جایگزینی با سیستم متمرکز	بارش/آب سیستم متمرکز	P/C×100
	قابلیت جایگزینی برای کل مصارف	بارش/مصرف کل	P/(C+D)
پتانسیل استفاده مجدد از پساب	قابلیت جایگزینی با سیستم متمرکز	فاضلاب/آب تأمین‌شده از سیستم متمرکز	W/C×100
	قابلیت جایگزینی برای کل مصارف	فاضلاب/کل آب تأمین‌شده	W/(C+D)
پتانسیل استفاده از رواناب سطحی	قابلیت جایگزینی با سیستم متمرکز	رواناب سطحی/آب تأمین‌شده از سیستم متمرکز	R_s/C×100
	قابلیت جایگزینی برای کل مصارف	رواناب سطحی/کل آب تأمین‌شده	R_s/(C+D)
شبکه درهم فاضلاب و رواناب سطحی	پتانسیل قابلیت جایگزینی برای کل مصارف	(فاضلاب + رواناب سطحی)/مصرف کل آب	(W+R_s)/(C+D)×100
	پتانسیل بازگردانی هدررفت آب برای جایگزینی مصارف آب کل	هدررفت آب/مصرف آب کل	C_{WL}/(C+D)×100

• چارچوب متابولیسم آب شهری

در این مطالعه، براساس چارچوب‌های متابولیسم آب شهری که Kenway و همکاران (۲۰۱۱) و Renouf و همکاران (۲۰۱۸) ساختند، چارچوب جدیدی با اضافه شدن آب بدون درآمد و سایر منابع برای سازگاری با شرایط یک کشور درحال‌توسعه مانند ایران توسعه داده شده و ارتقا یافته است. رابطه (۴) این چارچوب را نشان می‌دهد. جریان‌های انسان‌ساخت، که توسط زیرساخت‌های آب شهری اداره می‌شوند، شامل منابع آب متمرکز و غیرمتمرکز، جریان فاضلاب، هدررفت آب و جریان بازچرخانی شده هستند. جریان هیدرولوژیکی طبیعی شامل بارش، رواناب سطحی، نفوذ به آب‌های زیرزمینی و تبخیر و تعرق است. براساس اصل تعادل جرم، کل جریان‌های ورودی باید از نظر تئوری با کل خروجی‌ها در مرز سیستم و در کلیه فرآیندهای اصلی سیستم آب شهری برابر باشند. فرض بر این بود که هیچ تغییری در ذخیره آب مانند خاک یا مخازن ایجاد نشده است.

$$P+C+D+Re= ET+SW+WW+NRW+G+Re+\Delta S \quad (۴)$$

که در آن، P: آب باران جمع‌آوری نشده در محدوده شهری، C: کل آب متمرکز (خارجی) تأمین‌شده از آب‌های سطحی (C_S) و آب زیرزمینی (C_G)، D: کل منابع آب غیرمتمرکز (داخلی) برداشت‌شده از بارش (D_P) و آب چاه (D_G)، ET: تبخیر و تعرق از محدوده درون‌شهری، SW: رواناب سطحی که از محدوده سیستم تخلیه می‌شود، WW: فاضلاب تخلیه شده از محدوده سیستم، به استثنای بخشی که بازیافت شده است، NRW: آب بدون درآمد شامل هدررفت و مصارف غیرمجاز و مجاز بدون درآمد، G: نفوذ به آب‌های زیرزمینی، Re: استفاده مجدد و بازچرخانی فاضلاب و S: تغییر در آب ذخیره‌شده در سیستم است. یکی از نکات مهم در مدیریت آب شهری، مدیریت جریان‌های مختلف آب توسط نهادهای مختلف است. علاوه‌براین، جریان‌های گوناگون آب هزینه‌های متفاوتی دارند. مصرف‌کنندگان در مناطق مختلف هزینه‌های مختلفی (ازجمله هزینه‌های مصرف آب رودخانه یا تعرفه آب سد) را برای تأمین آب و خدمات تصفیه فاضلاب پرداخت می‌کنند. کاربردهای آب براساس قوانین مربوط به آن به چهار بخش طبقه‌بندی شده‌اند: مصارف شهری، صنعتی، کشاورزی و فضای سبز. مصارف شهری کلیه موارد استفاده را به استثنای مصارف صنعتی و کشاورزی از جمله استفاده آب خانگی، فعالیت‌های تجاری، مدارس، ساختمان‌های دولتی و عمومی، پادگان‌ها، حمام‌های عمومی و ... را پوشش می‌دهد. سطح تفکیک جریان باتوجه‌به محدودیت داده‌های آماری تنظیم شده است. همچنین جریان‌های تعادلی دیگری مانند جریان آب خروجی (انتقال بین منطقه‌ای)، هدررفت آب و نفوذ به زمین در سیستم وجود دارد.

• داده‌های مدل متابولیسم آب شهری

داده‌های مورد نیاز براساس چارچوب موازنه جرمی آب که در رابطه (۵) بیان شد جمع‌آوری شده‌اند. باتوجه‌به در دسترس بودن داده‌ها، دوره زمانی فروردین تا اسفند سال ۱۳۹۸ برای پژوهش در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است داده‌های سال‌های دیگر نیز برای کشف روندهای زمانی و ارزیابی قابلیت اطمینان داده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. داده‌های مربوط به آب زیرزمینی از گزارش‌های دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب برداشت شده است. داده‌های مصارف آب و آب سطحی، تولید فاضلاب و استفاده مجدد از فاضلاب نیز از سالنامه آماری شهر اصفهان منتشرشده توسط شهرداری اصفهان براساس اطلاعات شرکت آب و فاضلاب اصفهان جمع‌آوری شده است. برای برآورد اندازه جریان‌های هیدرولوژیکی طبیعی مانند بارش (P)، رواناب سطحی (SW)، نفوذ به آب‌های

زیرزمینی (G) و تبخیر و تعرق (ET) از داده‌ها و روابط موجود و پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. مساحت محدوده سیستم، جمعیت، آب‌وهوا و بارندگی و سایر پارامترها نیز از گزارش‌های مختلف، مقاله‌ها و اسناد رسمی مانند گزارش سنتز مطالعات آمایش استان اصفهان منتشر شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان، گزارش سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ منتشر شده توسط مرکز آمار ایران و سالنامه اقلیمی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ منتشر شده توسط اداره کل هواشناسی استان اصفهان جمع‌آوری شده‌اند. اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای مدل متابولیسم آب شهری اصفهان در جدول (۳) آمده است.

باتوجه‌به این تنوع داده‌ها، متابولیسم آب شهری برای شهر در شکل (۴) ترسیم شده است.

جدول ۳- مقادیر داده‌ها و اطلاعات موردنیاز برای مدل متابولیسم آب شهر اصفهان

دسته	عنوان	مقدار
اطلاعات محلی	مساحت (Km^2)	۵۵۰،۷۲
	جمعیت تحت پوشش شبکه آب (نفر)*	۱،۹۶۱،۲۶۰
	تعداد مشترکین دسترسی به آب آشامیدنی	۴۲۶،۹۹۰
	متوسط جمعیت هر خانوار	۴/۵۹
منابع آب	سرانه منابع آب سطحی در دسترس (m^3/year/capita)	۱۴۸
	مقدار آب زیرزمینی در دسترس (MCM/year)	۱۳۷
	تعداد منابع آب سطحی	۱
	تعداد منابع آب زیرزمینی (چاه)	۵۴
	ظرفیت تولید آب سطحی (مترمکعب)	۱۶۱،۵۳۳،۳۱۱
	ظرفیت تولید آب زیرزمینی (مترمکعب)	۱۲،۷۷۴،۰۴۷
	مجموع ظرفیت تولید آب (مترمکعب)	۱۷۴،۳۰۷،۳۵۸
نیاز آبی	هدر رفت آب (٪)	۱۶
	سرانه آب مصرفی مسکونی (لیتر بر روز)	۱۴۹
	سرانه آب مصرفی کل (لیتر بر روز)	۱۹۸

• شاخص‌های عملکرد آب شهری

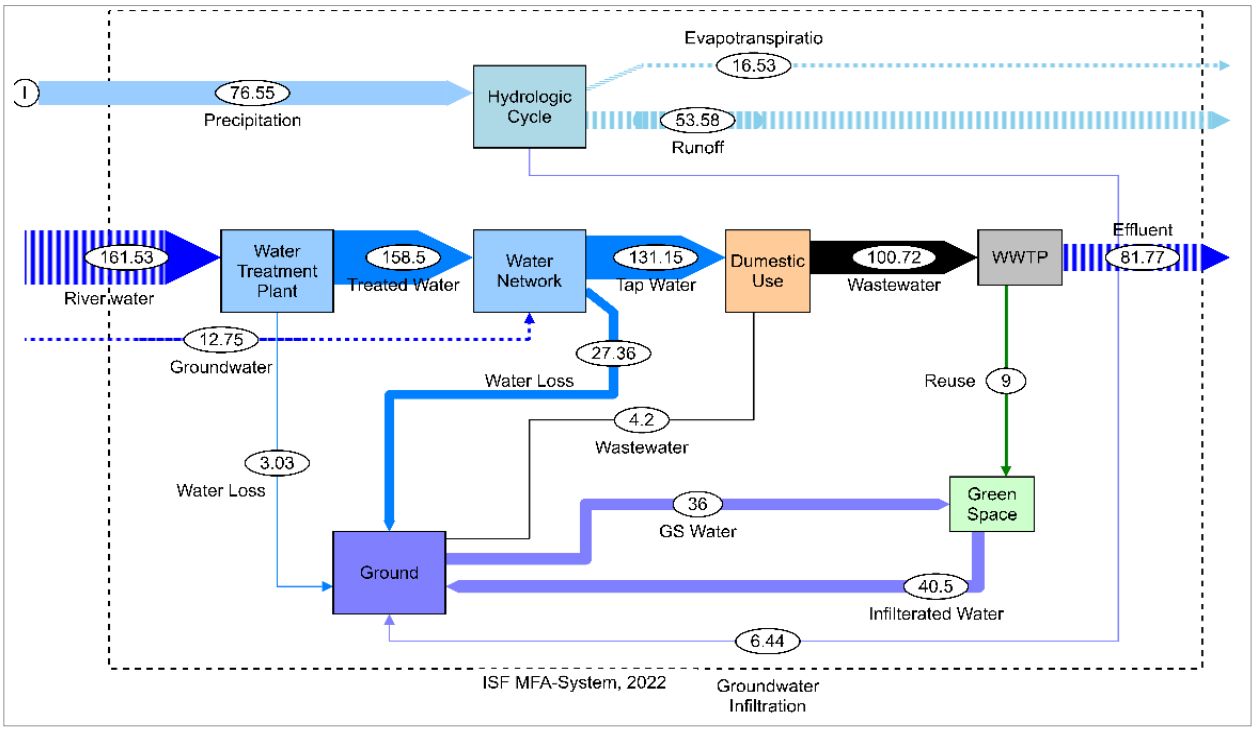
این پژوهش بر روی دو هدف خاص، راندمان آب و خودکفایی (تأمین از منابع داخلی یا عدم وابستگی به منابع خارجی) متمرکز شده است، که هر دو مربوط به اطمینان از تأمین کارآمد و پایدار آب هستند (Renouf و همکاران، ۲۰۱۷). برای ارزیابی عملکرد آب شهری، در این پژوهش براساس نتایج متابولیسم آب شاخص‌های مصرف آب، شدت استخراج آب، تأمین آب از منابع داخلی، پتانسیل سایر منابع آب برای جایگزینی و نرخ جریان‌های انتقالی ورودی محاسبه شده است (Farooqui و همکاران، ۲۰۱۶؛ Renouf و همکاران، ۲۰۱۸). شدت مصرف آب، به‌ازای مصرف آب هر فرد اندازه‌گیری می‌شود و می‌توان آن را به مصرف آب در بخش‌های مختلف مانند مصارف شهری، خانگی یا صنعتی تفکیک کرد. این شاخص هم منابع آب متمرکز و هم غیرمتمرکز در کل محدوده شهری از جمله هدررفت آب را در نظر می‌گیرد، درحالی‌که شدت استخراج آب نشانگر برداشت آب از منابع متمرکز است. شدت استخراج آب به‌صورت نرخ برداشت آب خارجی به‌ازای هر نفر در سال محاسبه می‌شود (m^3/year/capita). وابسته نبودن به منابع آب خارجی و داخلی‌سازی آب‌رسانی نشان‌دهنده میزان استفاده از منابع آب جایگزین است. این شاخص به‌عنوان سهم کل تقاضای آب شهری که در داخل از طریق برداشت آب باران، استفاده از آب خاکستری یا استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه‌شده تأمین شده است بیان می‌شود. شاخص‌های پتانسیل به عنوان نسبت منابع جایگزین آب به کل تقاضای آب محاسبه می‌شوند. علاوه بر این شاخص‌ها، میزان آب انتقالی ورودی از خارج حوضه نیز محاسبه شد، که نسبت میزان واردات آب در مقایسه با کل تقاضای آب به صورت ویژه برای ارزیابی خودکفایی یک سیستم آب شهری یا میزان وابستگی به مناطق دیگر برای تأمین آب است.

نتایج

پس از ترسیم مدل متابولیسم آب شهر اصفهان مانند شکل (۴) مشاهده می‌شود این سیستم جریان خطی دارد، به این معنا که آب باران و فاضلاب تولید شده بدون استفاده بیشتر تخلیه و از سیستم خارج می‌شود. این امر باعث می‌شود شهر اصفهان

در برابر هرگونه خطری که ممکن است در دسترس بودن آب و دسترسی به رودخانه زاینده‌رود را کاهش دهد، آسیب پذیر باشد. ترسیم جریان در چارچوب مدل متابولیسم آب شهری کمک می‌کند تا دید یکپارچه، همه‌جانبه و کلی‌نگری به سیستم آب شهری حاصل شود و بتوان از نظر کمی بهره‌وری مصرف آب را بررسی و سیاست‌های مدیریتی جدیدی تعریف کرد. با بررسی شکل (۴) می‌توان دریافت مصرف آب شهری اصفهان در سال ۱۳۹۸ تقریباً دو برابر حجم بارش بوده است. بیش از ۸۰ درصد نیاز آبی شهر از خارج تأمین می‌شود (منابع آب ورودی به سیستم شامل خط انتقال از آب سد و آب زیرزمینی و بارش) و این نشان می‌دهد شهر اصفهان در تأمین منابع آب خود، خودکفا نیست. اگرچه در سال‌های اخیر سعی در توسعه استفاده از منابع آب جایگزین مانند استفاده از پساب تصفیه شده و استفاده از آب خاکستری انجام گرفته است ولی این کارها کافی نیست و این شهر در درجه اول به برداشت آب از رودخانه و سد متکی است. داخلی‌سازی تأمین آب در اصفهان تنها ۳ درصد بود (شامل استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده در فضای سبز شهری) (جدول ۴). برنامه‌ای برای جمع‌آوری و استفاده از آب باران در این شهر وجود ندارد، ۲۱ درصد بارش‌ها تبخیر، حدود ۷۰ درصد به‌صورت رواناب روی زمین جاری می‌شود و تنها ۹ درصد در زمین نفوذ می‌کند. علاوه‌براین از این حجم آب استفاده‌ای نمی‌شود، هر ساله مشکلات متعددی از آبگرفتگی معابر و بالازدگی فاضلاب را ایجاد می‌کند. باتوجه‌به پاسخگو نبودن ظرفیت شبکه آب‌های سطحی در مواقع بارندگی شدید، آب باران به شبکه جمع‌آوری فاضلاب هدایت می‌شود که این کار باعث پس‌زدگی فاضلاب در انشعابات فاضلاب زیر تراز ۶۰ سانتی‌متر یا انشعابات قدیمی خواهد شد و حتی ورود با فشار آب به شبکه فاضلاب می‌تواند سبب ریزش لوله‌های بتنی شبکه شود. از سوی دیگر شن، نخاله و زباله نیز همراه رواناب‌ها وارد شبکه فاضلاب می‌شود، بنابراین شبکه دچار گرفتگی و در نهایت پس‌زدگی فاضلاب خواهد شد. از آنجایی‌که اصفهان حجم بالایی فاضلاب خانگی تولید می‌کند، از نظر تئوری امکان تأمین بخش زیادی از تقاضای آب توسط فاضلاب تصفیه شده (پتانسیل فاضلاب تصفیه‌شده ۶۸/۸٪) امکان پذیر است و با در نظر گفتن ملاحظه‌های بهداشتی می‌توان اغلب مصارف شهری به جز مصارف شرب و بهداشتی را از این طریق پوشش داد.

درحالی‌که جریان آب اصفهان طی سال‌های گذشته خطی بوده است ولی مصرف آب آن کارامدتر شده است. بررسی زمانی از متابولیسم آب شهری اصفهان نشان داد شدت مصرف آب از حدود ۳۸۲ مترمکعب در سال به‌ازای هر مشترک در سال ۱۳۸۸ به ۳۴۳ مترمکعب در سال به‌ازای هر مشترک در سال ۱۳۹۸ کاهش یافته است. آموزش و افزایش آگاهی اجتماعی و کاهش آب بدون درآمد و هدررفت آب که با ارتقا و نگهداری زیرساخت‌های آب امکان‌پذیر می‌شود از دیگر محرک‌های افزایش بهره‌وری است.



شکل ۴- متابولیسم آب شهری اصفهان

نتایج و بحث

• وضعیت متابولیسم آب شهری اصفهان در مقایسه با چند شهر دنیا

مشاهده می‌شود شدت مصرف آب و شدت استخراج آب اصفهان در مقایسه با سایر شهرها بالااست. این موضوع نشان‌دهنده الگوی مصرف آب بالا در این شهر است که نیاز به اصلاح دارد. باتوجه‌به کاهش پتانسیل بارش و خشکسالی‌های چند سال اخیر در این منطقه که پیامدهای اجتماعی و گاهی اعتراض‌های مردمی را نیز در پی داشته است افزایش بهره‌وری و کاهش فشار بر منابع و استخراج آب این شهر باید از اولویت‌های تصمیم‌گیران قرار گیرد. شهرهای با جمعیت بیشتر و بافت مسکونی پتانسیل فاضلاب بالاتری دارند. اصفهان در مقایسه با شهرهای پرجمعیت مانند ملبورن و بنگلور پتانسیل فاضلاب بالاتری را نشان می‌دهند. در شهر ملبورن تقریباً ۲۶ درصد آب در بخش مسکونی مصرف می‌شود. شهر سئول نیز به دلیل ساختار مصرف‌کنندگان آب آن که بیشتر مصارف خانگی است بیشترین پتانسیل فاضلاب را دارد. در میان این شهرها، شهر بنگلور باتوجه‌به میزان بارندگی، باران‌های موسمی و آب‌وهوای معتدل و مرطوب، با وجود سیستم‌های جمع‌آوری آب باران بالاترین میزان تأمین داخلی آب را دارد. در نتیجه تأمین آب آن نسبتاً پایدار است و شهر اصفهان کمترین میزان تأمین داخلی و خودکفایی را دارد. با کاهش بارندگی در سال‌های اخیر پتانسیل آب باران اصفهان نیز از حدود ۶۴ درصد در سال ۸۸ به ۵۲/۳ درصد در سال ۹۸ رسیده است ولی همچنان پتانسیل بالایی محسوب می‌شود و نیازمند توجه و برنامه‌ریزی برای استفاده است. شهر ملبورن استرالیا نیز پتانسیل بالایی برای استفاده از آب باران دارد ولی نزدیک به ۸ درصد از بارش‌ها داخل زمین نفوذ می‌کند و بقیه به‌صورت رواناب از سیستم خارج یا تبخیر می‌شود. در سال ۲۰۱۴ حدود ۱/۵ درصد از فاضلاب تولیدی شهر ملبورن نیز بازچرخانی و مورد استفاده مجدد قرار گرفته بود.

جدول ۴- شاخص‌های عملکردی متابولیسم آب شهر اصفهان و مقایسه با چند شهر دنیا

شاخص	اصفهان		سئول	ملبورن	بنگلور	دهلی
سال	۱۳۸۸	۱۳۹۸	۲۰۱۵	۲۰۱۴-۲۰۱۳	۲۰۱۴-۲۰۱۳	۲۰۱۶
جمعیت (میلیون نفر)	۱/۷۹	۲/۰۲	۱۰/۳	۴/۳۵	۹/۵	۱۷/۳۵
شدت مصرف آب (m^3/capita/year)	۱۲۱/۷	۱۰۸/۲۳	۱۳۳	۱۰۷	۷۹/۷	۵۳/۶
شدت استخراج آب (m^3/capita/year)	۱۰۵/۴۶	۸۶/۱۸	۱۲۰	۹۰	۴۲/۶	۴۰/۵
تأمین داخلی آب (٪)	۰	۳	۹	۱۶	۴۸	۲۴/۵
پتانسیل آب باران (٪)	۶۳/۹۲	۵۲/۳	۳۵	۴۸۹	۸	۶۵/۳
پتانسیل فاضلاب (٪)	۶۸	۶۸/۸	۹۷	۵۸	۵۵	۷۸/۲
نرخ واردات آب (٪)	۳۳	۳۶/۴۲	۵/۹	-	-	-

• مدیریت منابع آب جایگزین در شرایط فعلی و آینده

در سال‌های اخیر باتوجه‌به بروز مشکلات شدید ناشی از کم‌آبی در مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی و تأمین نشدن حق‌آبه محیط زیستی تالاب گاوخونی که ناشی از دو عامل اصلی متناسب نبودن تقاضا با ظرفیت منابع آب و کاهش بارش و خشکسالی است، منابع آب جایگزین مانند پساب تصفیه شده، آب باران و آب خاکستری بسیار پراهمیت شده‌اند. براساس برنامه عملیاتی شهر اصفهان حدود ۳۵ درصد از منابع آبی فضای سبز از طریق پساب تأمین خواهد شد. برای استفاده از این منابع احداث تصفیه‌خانه‌های فاضلاب تکمیلی و توسعه ظرفیت تصفیه‌خانه‌های موجود در دستور کار قرار گرفته و در حال بهره‌برداری است. همچنین در راستای استفاده از آب خاکستری دستگاه‌های اجرایی استان در تدوین «سند اجرایی تصفیه و بازچرخانی آب‌های خاکستری» همکاری دارند تا بتواند ساختمان‌های با مساحت بیش از ۲۰۰۱ متر مربع و شش طبقه به بالا را متعهد به تصفیه، ذخیره‌سازی و پمپاژ آب‌های خاکستری‌تصفیه شده کنند. در راستای طرح‌های کارگروه سازگاری با کم‌آبی استان اصفهان نیز کاشت گونه‌های گیاهی سازگار با اقلیم این منطقه در فضای سبز شهر انجام شده و کاشت درختان کم آب‌بر در طرح‌های جدید در دستور کار سازمان پارک‌ها و فضای سبز اصفهان قرار گرفته است.

وجود برنامه‌ریزی و توسعه اجرای طرح‌های استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری فضای سبز، مصارف صنعتی و تغذیه منابع آب زیرزمینی نشان دهنده پیگیری جدی هدف استفاده مجدد از فاضلاب است. براساس جدول (۳) فاضلاب پتانسیل بالایی برای تأمین نیاز آبی شهر دارد و در صورت برنامه‌ریزی صحیح و جایگزینی در مصارف مناسب می‌تواند نقش پررنگی در بهبود شرایط آبی شهر اصفهان داشته باشد. در مورد آب خاکستری و آب باران نیز مشاهده شد استفاده قابل توجهی از این منابع انجام نگرفته است و این

ظرفیت‌ها بدون استفاده از سیستم خارج می‌شوند و حتی با آب گرفتگی معابر چالش‌هایی را برای شهروندان و نظام خدمات شهری ایجاد می‌کنند. در نمونه‌های مشابه کشورهای خارجی عوامل مهمی مانند عدم تقاضا به دلیل نرخ پذیرش پایین و احساس منفی نسبت به کیفیت آب، عدم جذابیت اقتصادی به دلیل هزینه نگهداری بالا و نقص عملکرد و کمبود بهره‌برداران حرفه‌ای مانع گسترش سیستم‌های جمع‌آوری آب باران و آب خاکستری در ساختمان‌های مسکونی بوده است (Seoul Metropolitan Government، ۲۰۱۳) که با فراهم‌کردن پیش‌نیازهای قانونی، اقتصادی و اجتماعی می‌توان تمایل به استفاده از این منابع را نیز افزایش داد.

• مزایا و محدودیت‌های چارچوب متابولیسم آب شهری

چارچوب متابولیسم آب شهری درک مناسبی از ساختار جامع سیستم‌های آب شهری را نمایش می‌دهد. استراتژی‌های مدیریت آب باید متناسب با شرایط هر منطقه باشد. مشاهده شد شهر اصفهان جریان آب خطی دارد (یعنی تأمین آب از منابع داخلی کم است) و در درجه اول وابستگی به برداشت آب سد و رودخانه زاینده‌رود دارد. این ساختار متابولیک آب ناپایدار باعث شده است شهر اصفهان درگیر چالش‌های زیادی مانند انتقال آب از شهرهای اطراف و انجام هزینه‌های بالاتر شود. از آنجایی‌که پتانسیل تقاضای بالایی برای آب در بخش صنعت و کشاورزی در اطراف شهر اصفهان وجود دارد، این شهر باید تمرکز ویژه‌ای بر ترویج و گسترش بازچرخانی فاضلاب برای مصارف صنعتی، کشاورزی و فضای سبز داشته باشد. تأمین آب این مصارف از منابع آب جایگزین، در مقابل شرایط را برای استفاده از منابع آب محدود سطحی و زیرزمینی بهبود می‌بخشد و از فشار وارده بر این منابع می‌کاهد. البته توجه به تغذیه منابع آب زیرزمینی و احیای آبخوان‌ها نکته مهم دیگری است که نباید به آن بی‌توجهی شود و ساماندهی رواناب‌های سطحی و نفوذ آن‌ها به داخل زمین در محدوده شهری راه‌حل مناسبی برای این موضوع خواهد بود. داخلی‌سازی بالاتر باعث کاهش برداشت آب از منابع خارجی و کاهش رواناب سطحی و همچنین آلودگی و تخلیه فاضلاب می‌شود. فاضلاب تصفیه شده می‌تواند علاوه‌بر حفاظت از رودخانه برای برآورده کردن نیازهای جریان محیط‌زیستی نیز استفاده شود. بااین‌حال، انتظار می‌رود با افزایش جمعیت، تقاضای آب نیز افزایش یابد، درحالی‌که سطح و کیفیت آب‌های زیرزمینی و سطحی رو به کاهش است برای پاسخ به این تغییرات، پژوهش‌ها و کارهای تکمیلی در مورد آلودگی‌ها و مدیریت مواد مغذی مورد نیاز خواهد بود.

شاخص‌های عملکردی به‌دست آمده از متابولیسم آب شهری به ارزیابی وضعیت مدیریت آب شهری کمک می‌کنند. در این پژوهش مجموعه‌ای از شاخص‌های مربوط به راندمان آب و خودکفایی محاسبه شد. یکی از شاخص‌ها شدت مصرف آب بود، که ممکن است با سرانه آبرسانی اشتباه شود. سرانه آبرسانی، تنها تأمین سرانه آب لوله‌کشی را اندازه‌گیری می‌کند، ولی شاخص شدت مصرف آب مورد استفاده در مطالعه نشان دهنده تمام منابع ورودی آب به محدوده سیستم ازجمله آب لوله‌کشی، آب‌های زیرزمینی و منابع آب جایگزین است. این رویکرد نشان می‌دهد چارچوب متابولیسم آب شهری با ارائه تصویری جامع از جریان آب شهری به ارزیابی عملکرد آب شهری کمک می‌کند. شاخص‌های عملکرد همچنین امکان مقایسه سریع عملکرد شهرها را همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است فراهم می‌کنند. همچنین، موازنه جرمی مورد استفاده برای ساخت یک متابولیسم شهری در بررسی داده‌های مفقود (به‌عنوان مثال نشت آب و هدررفت در برخی موارد) و بررسی قابلیت اطمینان داده‌ها مفید است. در واقعیت جریان ورودی باید با جریان خروجی برابر باشد(Kenway، ۲۰۱۱). در این پژوهش تفاوت بین جریان ورودی و خروجی حدود ۱۹/۵ درصد بود. بخشی از این تفاوت را می‌توان ناشی از تفاوت در محاسبه مقدار نفوذ به آب‌های زیرزمینی، خطا در ضریب فرضی رواناب و محاسبه حجم جریان‌های ناشی از بارندگی و نفوذ به سیستم فاضلاب و دقت پایین سایر داده‌ها دانست. Paul و همکاران (۲۰۱۸) برای شهر بنگلور و Jeong و Park (۲۰۲۰) برای شهر سئول تفاوت مقدار جریان‌های ورودی و خروجی به‌ترتیب ۱۷/۵ و ۲۹ درصد گزارش شده است. Jeong و Park (۲۰۲۰) نبود تخمین‌های کافی از مقدار نفوذ و رواناب و منابع نامشخص آن‌ها را از دشواری‌های محاسبات دانسته و نبود تطابق در اندازه‌های پارامترهای گزارش‌شده توسط نهادهای مختلف را از عوامل بروز این خطا دانسته اند. بااین‌حال، داده‌ها، در هر صورتی‌که جمع‌آوری شوند مانند اندازه‌گیری مستقیم، مدل‌سازی و گزارش خوداظهاری، عدم قطعیت‌های ذاتی دارند. به‌طورکلی، جریان‌های رواناب سطحی، نفوذ به آب زیرزمینی و جریان تخلیه شده به محیط‌زیست به دلیل فرضیات ما در رابطه با تبدیل داده‌ها، میزان عدم قطعیت و عدم اطمینان زیادی دارند. درحالی‌که متابولیسم آب شهری تصویری جامع از مدیریت آب شهری را براساس آمار ملی موجود ارائه می‌دهد، در تهیه یک مدل متابولیک دقیق، چالش‌ها و محدودیت‌های مختلفی وجود دارد. از آنجایی‌که آمار منابع مختلف با استفاده از روش‌ها و قالب‌های مختلف جمع‌آوری داده‌ها گردآوری شده است، یکپارچه‌سازی چنین داده‌هایی باعث ناسازگاری و تفاوت می‌شود. محدوده داده‌ها اغلب شفاف نبود و پرسش‌هایی در مورد همپوشانی و نقاط تکراری داده‌ها مطرح می‌شد. همچنین واحدها و مقیاس‌های مختلف اندازه‌گیری چالش‌هایی را برای رویکرد متابولیسم آب ایجاد کردند. برخی از داده‌ها، به ویژه داده‌هایی که از طریق نظرسنجی و گزارش‌های خوداظهاری گردآوری شده‌اند، ممکن است قابلیت اطمینان بالایی نداشته باشند. از آنجایی‌که این آمار و اطلاعات به‌منظور ایجاد یک متابولیسم جامع آب شهری

تولید نشده و از مجموعه داده‌ها و گزارش‌های مختلف جمع‌آوری شده است، ممکن است با اطلاعات ناقص به‌عنوان‌مثال در مورد منابع یا مصارف خاصی از آب همراه باشد. برای گنجاندن چنین اطلاعاتی در مدل و تکمیل و یکنواخت کردن اطلاعات، نیاز به پژوهش‌های اضافی در زمینه متابولیسم وجود دارد. در شرایطیکه اطلاعات دقیق در دسترس نبود، منطقی‌ترین فرضیات در نظر گرفته شده و محاسبات انجام گرفته است. این موضوع نیاز به ایجاد یک پلتفرم داده آب هماهنگ، یکپارچه و استاندارد را پررنگ‌تر می‌کند. علاوه‌براین، اساس ایجاد و محاسبه متابولیسم آب فرآیندی پیچیده است، زیرا آب از طریق یک چرخه هیدرولوژیکی پویا در جریان است و داده‌های جریان طبیعی آب، به‌ویژه رواناب‌های سطحی، تبخیر و تعرق و نفوذ به آب‌های زیرزمینی، باید با استفاده از سایر پژوهش‌ها و مدل‌سازی وارد مدل متابولیسم شوند. در این شرایط ویژگی پویا بودن جریان طبیعی آب در مدل متابولیسم شهری ساده شده و نادیده گرفته می‌شود. اگرچه چارچوب متابولیسم شهری نمی‌تواند جریان پویای آب را با جزئیات زیاد مدل کند، ولی می‌تواند راندمان کلی آب را ارزیابی کند، زیرا تمام داده‌های ورودی را در نظر می‌گیرد که هر کدام چنین جریان‌هایی هستند (به‌عنوان‌مثال جریان ورودی به تصفیه‌خانه فاضلاب شامل برخی از جریان‌های آب باران و نفوذ آب زیرزمینی می‌شود و پیوستگی آن‌ها در مدل لحاظ می‌شود).

• پژوهش‌های آینده

با استفاده از آمار و اطلاعات جمع‌آوری شده به‌صورت سالانه، مدل متابولیسم آب شهری برای شهر اصفهان ساخته شد. این مطالعه اولین مطالعه کاربردی و واقعی متابولیسم آب شهری بر روی شهرهای ایران است. اگر داده‌های با دقت و جزئیات بالاتر در دسترس باشد، متابولیسم آب می‌تواند به‌صورت فصلی، ماهانه و یا در سطح منطقه بازسازی شود. این امر به‌ویژه برای بررسی شرایط کم آبی، مانند دوره‌های خشک‌سالی یا فصول مختلف سال مفید خواهد بود. دقت مدل متابولیسم آب را می‌توان با داده‌های با کیفیت بالاتر که در بخش‌های تأمین آب، تصفیه‌خانه فاضلاب و سایر بخش‌ها استاندارد و یکنواخت شده‌اند، افزایش داد. مطالعات تکمیلی و جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر که بخشی از عوامل زمینه‌ای و فرآیندهای سیستم آب شهری را روشن‌تر کنند، می‌توانند به ارزیابی کمی عدم قطعیت در جریان کمک کنند (Laner و همکاران، ۲۰۱۶). یکپارچه‌سازی و هماهنگی بیشتر نهادی در مدیریت آب و تلاش برای ارتقاء مدیریت یکپارچه منابع آب که در برنامه محیط‌زیست سازمان ملل نیز به آن اشاره شده است (United Nations، ۲۰۱۸a)، به همراه استفاده از فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی برای مدیریت جریان آب در طول چرخه عمر خود، در درجه اول به مدیریت یکپارچه داده‌ها و در نهایت به توسعه حساب‌های دقیق‌تر و جامع آب کمک می‌کند. این مطالعه بر ساخت مدل متابولیسم آب شهری بر اساس داده‌های فیزیکی جریان آب متمرکز بود، اما می‌توان در راستای تکمیل و ارتقای مدل، تجزیه و تحلیل مواد مغذی، آلاینده‌ها و یا هزینه‌ها را نیز به مدل اضافه کرد. با ادغام یکپارچه‌سازی متابولیسم آب و بررسی جریان مواد مغذی مانند نیتروژن، مسئله کیفیت آب زیرزمینی ممکن است بهتر درک شود. تحلیل جریان مواد ابزاری است که به‌طور گسترده در سیستم‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی به‌کار رفته است و همچنین می‌تواند در سیستم‌های آب نیز به‌کار گرفته شود (Jakrawatana و همکاران، ۲۰۱۷).

نتیجه‌گیری

متابولیسم شهری می‌تواند یک رویکرد جامع برای ارزیابی مدیریت آب شهری و تکمیل روش‌های دیگر فراهم کند. با تکیه بر پژوهش‌های اخیر در مورد متابولیسم آب شهری، در این پژوهش یک نمونه تجربی و واقعی متابولیسم آب شهری برای شهر اصفهان ارائه شد. در این مطالعه سعی شد تا چگونگی استفاده از چارچوب متابولیسم آب برای بررسی مدیریت آب در زمینه‌های مختلف بررسی و پیشنهادهایی متناسب با منطقه مورد مطالعه ارائه شود. نتایج و بررسی‌ها نشان داد، چارچوب متابولیسم آب می‌تواند ارزیابی‌های کمی از عملکرد آب شهری ارائه دهد. همچنین امکان مقایسه در مناطق مختلف و نظارت بر عملکرد را در طول زمان‌های مختلف فراهم می‌کند. علاوه‌براین موارد به درک کلی از جریان‌های آب شهری و شناسایی مناطقی که نیازمند یا پتانسیل بهبود راندمان آب دارند کمک می‌کند. شهر اصفهان با بهبود زیرساخت‌های آب و آگاهی‌رسانی‌های اجتماعی راندمان آب خود را افزایش داده است. این شهر برنامه‌هایی برای ترویج منابع جایگزین آب (به‌عنوان‌مثال استفاده مجدد از پساب و آب خاکستری) دارد ولی وابستگی آن به برداشت از آب سطحی و منابع آب خارجی زیاد است. همین عوامل مشکلات بسیاری را برای تأمین آب پایدار این شهر ایجاد کرده است و اهمیت توجه هرچه سریعتر به استفاده از پتانسیل‌های منابع آب موجود داخلی، افزایش بهره‌وری آب در مصارف گوناگون و اجرایی کردن برنامه‌های از پیش تعیین‌شده را پررنگ‌تر می‌نماید.

با استفاده از مجموعه داده‌های مختلف موجود در مورد سامانه آب‌رسانی شهر اصفهان، این پژوهش علاوه‌بر بررسی درستی حساب جریان آب براساس تعادل و موازنه جرمی، تصویری جامع از مدیریت آب ایجاد کرد. بااین‌حال، ایجاد یک متابولیسم دقیق‌تر آب به داده‌های بهتری با کیفیت و انسجام بالاتر در اندازه‌گیری‌ها نیاز دارد.

پی‌نوشت

1-Urban Metabolism
2-Life Cycle Assessment (LCA)
3-Environmental Footprint
4-Mass Flow Analysis
5-Urban Water Metabolism Evaluation Framework

منابع

شهرداری اصفهان، ۱۳۹۶. سالنامه آماری سال ۱۳۹۶ شهر اصفهان. اصفهان.

شهرداری اصفهان، ۱۳۹۹. سالنامه آماری سال ۱۳۹۹ شهر اصفهان. اصفهان.

مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵. سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵. اصفهان.

Agudelo-Vera C. M., Leduc W. R., Mels A. R. and Rijnaarts H. H. 2012. Harvesting urban resources towards more resilient cities. Resources, conservation and recyclingm, 64: 3-12.

Bach P. M., Rauch W., Mikkelsen P. S., Mccarthy D. T. and Deletic A. 2014. A critical review of integrated urban water modelling–Urban drainage and beyond." Environmental modelling & software, 54: 88-107.

Baker L. A. 2009. New concepts for managing urban pollution. The water environment of cities, Springer: New York, USA.

Barles S. 2009. Urban metabolism of Paris and its region. Journal of industrial ecology, 13(6): 898-913.

Binder C., Schertenleib R., Diaz J., Bader H.-P. and Baccini P. 1997. Regional water balance as a tool for water management in developing countries. International Journal of Water Resources Development, 13(1): 5-20.

Browne D., Regan B. O'. and Moles R. 2009. Assessment of total urban metabolism and metabolic inefficiency in an Irish city-region. Waste Management, 29(10): 2765-2771.

Farooqui T. A., Renouf M. A. and Kenway S. J. 2016. A metabolism perspective on alternative urban water servicing options using water mass balance. Water research, 106: 415-428.

Ffion Atkins J., Flügel T. and Hugman R. 2021. The urban water metabolism of Cape Town: Towards becoming a water sensitive city. South African Journal of Science, 117(5-6): 1-11.

Fischer-Kowalski M. 1998. Society's metabolism: the intellectual history of materials flow analysis, Part I, 1860–1970. Journal of industrial ecology, 2(1): 61-78.

Forkes J. 2007. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. Resources, conservation and recycling, 52(1): 74-94.

Gandy M. 2004. Rethinking urban metabolism: water, space and the modern city. City, 8(3): 363-379.

Ghosh R., Kansal A. and Venkatesh G. 2019. Urban Water Security Assessment Using an Integrated Metabolism Approach—Case Study of the National Capital Territory of Delhi in India. Resources, 8(2): 62.

Hendriks C., Obernosterer R., Müller D., Kytzia S., Baccini P. and Brunner P. H. 2000. Material flow analysis: a tool to support environmental policy decision making. Case-studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands. Local Environment, 5(3): 311-328.

Hermanowicz S. W. and Asano T. 1999. Abel Wolman's "The Metabolism of Cities" revisited: a case for water recycling and reuse. Water Science and Technology, 40(4-5): 29-36.

Jakrawatana N., Ngammuangtueng P. and Gheewala S. H. 2017. Linking substance flow analysis and soil and water assessment tool for nutrient management. Journal of Cleaner Production, 142: 1158-1168.

Jeong S. and Park J. 2020. Evaluating urban water management using a water metabolism framework: A comparative analysis of three regions in Korea. Resources, Conservation and Recycling, 155: 104597.

Kennedy C., Cuddihy J. and Engel-Yan J. 2007. The changing metabolism of cities. Journal of industrial ecology, 11(2): 43-59.

Kennedy C., Pincetl S. and Bunje P. 2011. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environmental pollution, 159(8-9): 1965-1973.

Kenway S., Gregory A. and McMahon J. 2011. Urban water mass balance analysis. Journal of Industrial Ecology, 15(5): 693-706.

A. 2018. Understanding urban water performance at the city-region scale using an urban water metabolism evaluation framework. Water research, 137: 395-406.

Safavi H. R., Golmohammadi M. H. and Sandoval-Solis S. 2015. Expert knowledge based modeling for integrated water resources planning and management in the Zayandehrud River Basin. Journal of hydrology, 528: 773-789.

Sahely H. R., Dudding S. and Kennedy C. A. 2003. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto Area case study. Canadian Journal of Civil Engineering, 30(2): 468-483.

Seoul Metropolitan Government. 2013. Seoul's Management Plan for Water Reuse. Seoul Metropolitan Government. Seoul, Korea.

Singkran N. 2017. Water budget analysis and management for Bangkok Metropolis, Thailand. Water Science and Technology, 76(6): 1545-1554.

United Nations. 2014. World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights. , United Nations, Department of economic and social affairs. New York, USA.

United Nations. 2018a. Progress on Level of Water Stress: Global baseline for SDG indicator 6.4. 2., Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.

United Nations. 2018b. World Urbanisation Prospects: The 2018 Revision (Key Facts). United Nations, Department of International Economic and Social Affairs. New York, USA.

Warren-Rhodes K. and Koenig A. 2001. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971–1997. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 30(7): 429-438.

Wolman A. 1965. The metabolism of cities. Scientific American, 213(3): 178-193.

Zhang Y., Yang Z. and Yu X. 2009. Evaluation of urban metabolism based on emergy synthesis: A case study for Beijing (China). Ecological modelling, 220(13-14): 1690-1696.

Laner D., Feketitsch J., Rechberger H. and Fellner J. 2016. A novel approach to characterize data uncertainty in material flow analysis and its application to plastics flows in Austria. Journal of industrial ecology, 20(5): 1050-1063.

Larsen T. A., Hoffmann S., Lüthi C., Truffer B. and Maurer M. 2016. Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world. Science, 352(6288): 928-933.

Madrid-López C. and Giampietro M. 2015. The water metabolism of socio-ecological systems: Reflections and a conceptual framework. Journal of Industrial Ecology, 19(5): 853-865.

Mehta V. K., Goswami R., Kemp-Benedict E., Muddu S. and Malghan D. 2014. Metabolic urbanism and environmental justice: the water conundrum in Bangalore, India. Environmental Justice, 7(5): 130-137.

Mitchell V. G., McMahon T. A. and Mein R. G. 2003. Components of the total water balance of an urban catchment. Environmental Management, 32(6): 735-746.

Paul R., Kenway S., McIntosh B. and Mukheibir P. 2018. Urban metabolism of Bangalore city: a water mass balance analysis. Journal of Industrial Ecology, 22(6): 1413-1424.

Renouf M., Kenway S., Serrao-Neumann S. and Low Choy D. 2016. Urban metabolism for planning water sensitive cities: Concept for an urban water metabolism evaluation framework, Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities. Clayton, VIC, Australia.

Renouf M., Serrao-Neumann S., Kenway S., Morgan E. and Choy D. L. 2017. Urban water metabolism indicators derived from a water mass balance–bridging the gap between visions and performance assessment of urban water resource management. Water research, 122: 669-677.

Renouf M. A. and Kenway S. J. 2017. Evaluation approaches for advancing urban water goals. Journal of Industrial Ecology, 21(4): 995-1009.

Renouf M. A., Kenway S. J., Lam K. L., Weber T., Roux E., Serrao-Neumann S., Choy D. L. and Morgan E.