تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال شانزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۳۹۹
Volume 16, No. 3, Fall 2020 (IR-WRR)
۶۳-۷۹

مروری بر چارچوب مفهومی چرخه تعاملاتی و فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده در حوزه مدیریت آب شهری

سید احمدرضا شاهنگیان[۱]، مسعود تابش[۲*] و هانیه صفرپور[۳]

چکیده

سیاست‌های مدیریت آب شهری، اثرات مستقیم و غیرمستقیم و نیز مثبت و منفی گسترده‌ای بر جنبه‌های مختلف دارند و می‌توانند با اثرگذاری بر اجزای مختلف سیستم، شدت و گستره این تبعات را تحت‌تأثیر قرار دهند. همچنین اعمال این سیاست‌ها بر سیستم‌های اجتماعی که از عامل‌های انطباق‌پذیر با رفتارهای پیچیده تشکیل شده‌اند (اثرات غیرمستقیم) و در مقیاس میکرو با یکدیگر در تعامل‌اند، موجب بروز پدیده‌های نوظهور در سطح سیستم (مقیاس ماکرو) می‌شوند. علاوه بر پیچیدگی‌های ناشی از ماهیت درونی سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی و چرخه تأمین- تقاضای آب شهری، رفتارهای پیچیده زیرساخت‌های شهری نیز چالش دیگری را در این حوزه پدید می‌آورد. بنابراین سیستم آب شهری، به‌عنوان یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده شناخته می‌شود که نیازمند ارزیابی یکپارچه و مدل‌سازی پیچیدگی‌های سیستم در ابعاد مختلف است. لذا این مقاله به مروری بر دو مفهوم اصلی پیرامون ارزیابی و مدل‌سازی سیاست‌های زیست‌محیطی از جمله سیاست‌های مدیریت آب شهری، یعنی (۱) مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و (۲) ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه و انواع رویکردهای رایج در آنها می‌پردازد. با مرور این مفاهیم و تحقیقات پیشین در حوزه مدیریت آب شهری، چرخه تعاملاتی و فرآیند مدل‌سازی در این حوزه استخراج می‌شود. این مقاله با مقدمه‌ای در رابطه با اهمیت مدیریت آب شهری به‌ویژه مدیریت تقاضا، آغاز و با مروری بر الزامات و مفاهیم اساسی در ساختار ارزیابی و مدل‌سازی سیاست‌های زیست‌محیطی ادامه می‌یابد. سپس چارچوب پیشنهادی بر مبنای تحقیقات گذشته ارائه و در نهایت مدل‌سازی عامل‌بنیان، به‌عنوان رویکردی قدرتمند در ارزیابی و مدل‌سازی مدیریت آب شهری به‌کمک دو رویکرد فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: مدیریت تقاضا، مدل‌سازی عامل بنیان، سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، رفتارهای نوظهور، ارزیابی یکپارچه.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۱۳

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

A Review of the Conceptual Framework of the Interactive Cycle and Modeling Process Used in Urban Water Management

S.A.R. Shahangian[1], M. Tabesh[2], and H. Safarpour[3]*

Abstract

Water demand management policies have widespread positive and negative effects on various aspects and by affecting various components of the system can influence the severity and extent of such effects. Also, the application of these policies to social systems, which are composed of adaptable factors with complex behaviors (indirect effects) and interactions in micro scale, causes emerging phenomena at the system level (macro scale). In addition to the complications of the inner nature of socio-ecological systems and the urban water supply-demand cycle, the complications of urban infrastructure behaviors also present another challenge in this area. Therefore, the urban water system is known as a complex adaptive system that requires integrated evaluation and modeling of system complexities in different dimensions. So, this article reviews the two main concepts regarding the evaluation and modeling of environmental policies, including urban water management policies, namely (1) modeling of complex adaptive systems and (2) integrated evaluation and modeling and the types of common approaches for them. By reviewing these concepts and previous researches in the field of urban water management, the interactive cycle and modeling process in this field is extracted. This paper begins with an introduction to the importance of urban water management, especially demand management, and continues with an overview of the basic requirements and concepts in the structure of assessment and modeling of environmental policies. The proposed framework is then presented based on past researches. At the end, agent-based modeling, as a powerful tool in evaluation and modeling of urban water management, has been investigated using the two approaches above.

Keywords: Demand Management, Agent-Based Modelling, Complex Adaptive Systems, Emergent Behaviour, Integrated Assessment.

Received: March 24, 2020
Accepted: July 3, 2020

1- Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
2- Professor, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail address: mtabesh@ut.ac.ir
3- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

مطالعات سازمان ملل متحد، نشان می‌دهد که کمبود آب مشکلی حاد در سراسر خاورمیانه است. بر طبق گزارش هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC[1]) در سال ۲۰۰۷، منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA[2]) با حدود پنج درصد از جمعیت جهان و تنها بهره‌مندی از یک درصد از کل آب شیرین، به‌شدت تحت تأثیر آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی خواهند بود (IDRC, 2010). بنابراین در سال‌های اخیر به‌دلیل محدودیت در منابع آب و افزایش میزان تقاضا، بحران و کمبود این منبع حیاتی به یکی از مهم‌ترین مسائل به‌ویژه در این مناطق تبدیل شده (Darbandsari et al., 2017) و تأمین پایدار آب را، به یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در بسیاری از کشورها تبدیل کرده است (Behboodian and Kerachian, 2020). از سوی دیگر، به‌طور سنتی متولیان صنعت آب از یک رویکرد واکنشی برای تأمین منابع استفاده کرده‌اند؛ به‌طوری‌که افزایش تقاضا را با احداث پروژه‌ها و ایجاد منابع جدید تأمین آب، پاسخ داده‌اند (Tsegaye and Vairavamoorthy, 2009). از این‌رو در دهه‌های گذشته چالش اصلی در مدیریت منابع آب از جمله مدیریت آب شهری، اطمینان از تأمین تقاضای آبی از پیش تعیین‌شده و اغلب ناکافی با تمرکز بر سیاست‌های مدیریت عرضه بوده است (Galán et al., 2009). اما به‌تدریج افزایش محدودیت‌های اکولوژیکی، مالی و سیاسی، موجب شد تا موضوع مصرف آب بیشتر مورد توجه قرار گیرد (Abbaspour et al., 2017)؛ تاجایی‌که دولت‌ها را مجبور ساخته تا به مدیریت تقاضای آب، به‌عنوان یک راه‌حل نسبتاً کم‌هزینه، پایدار و قابل‌اعتماد (Baumann et al., 1998) در مدیریت آب شهری روی آورند.

مدیریت تقاضای آب شهری که به‌عنوان پاسخی به کمبود آب و پایداری محیط‌زیست مطرح می‌شود (Stavenhagen et al., 2018)، کمک می‌کند تا بیشترین خدمات آبی با حداقل حجم آب ممکن فراهم شود (Cheng, 2002). برقراری تعادل مناسب بین گسترش ظرفیت تأمین و مدیریت تقاضای آب، می‌تواند منافع زیادی از جمله به تأخیر انداختن هزینه‌های بالای تأمین آب و آثار منفی زیست‌محیطی آن، کاهش در هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش فاضلاب، کاهش مصرف آب گرم و صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی را به همراه داشته باشد (Cheng, 2002; 2016). بنابراین مدیریت تقاضای آب که در عمل شامل سه عنصر و هدف کلیدی بهره‌وری، عدالت و پایداری است (IDRC, 2010)، می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های مؤثرتر و کارآمدتر در مدیریت آب شهری شود (Athanasiadis et al., 2005). مدیریت تقاضای آب طیف گسترده‌ای از اقدامات را دربر می‌گیرد (Tsegaye and Vairavamoorthy, 2009) که به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود (Ramsey et al., 2017): سیاست‌های وابسته به قیمت آب (PPs[3]) و سیاست‌های غیروابسته به قیمت آب (NPPs[4]). برخی از این سیاست‌ها عبارتند از: ۱) کمپین‌های آموزش و آگاهی عمومی (فرهنگ‌سازی)، ۲) قیمت‌گذاری، ۳) اقدامات حفاظت از آب[5] و صرفه‌جویی در مصرف آن، ۴) برنامه‌های مشوق مالی برای استفاده مؤثر از آب، ۵) اعمال محدودیت‌های مصرف آب، ۶) برنامه‌های مدیریت فشار و کاهش نشت و غیره.

در میان کاربری‌های مختلف، تأمین آب شهری به‌علت مسائل بهداشتی و نیاز اولیه و اساسی انسان به آب و نیز احتمال بروز تنش‌های اجتماعی، از حساسیت و اولویت بالاتری برخوردار بوده (Maleki Nasab et al., 2010; Nasab et al., 2007 Maleki) و تأمین آن شامل فرآیندهای بسیار پر هزینه‌تر و پیچیده‌تری است (Keshavarzi et al., 2006). با توجه به این موضوع و سکونت بخش اعظم جمعیت جهان در مناطق شهری (House-Peters and Chang, 2011)، پیش‌بینی و مدیریت تقاضای آب به‌ویژه در بخش خانگی و شناخت عوامل مؤثر بر آن به‌عنوان مهم‌ترین بخش مصرف آب شهری، برای مدیریت منابع محدود و کمیاب آب امری بسیار ضروری و مهم است (Darbandsari et al., 2017; Tabesh et al., 2015). این موضوع به‌دلیل رابطه محکمی که بین انسان و سیستم‌های طبیعی در مناطق شهری وجود دارد، به مسأله‌ای پیچیده اما ضروری تبدیل و منجر به تعاملات چندگانه‌ای بین فرآیندها و الگوهای کوچک‌مقیاس یا میکرو (فرد یا خانوار) و بزرگ‌مقیاس یا ماکرو (شهری یا منطقه‌ای) شده است (House-Peters and Chang, 2011). در واقع ماهیت درونی سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی در مدیریت منابع طبیعی، چالش بزرگی برای مدیران آب محسوب می‌شود که تجزیه و تحلیل جداگانه این سیستم‌ها را به‌علت پاسخ‌ها و واکنش‌های پیچیده و اغلب غیر قابل پیش‌بینی آنها به شوک‌ها، سیاست‌ها و اقدامات، غیرممکن می‌سازد (House-Peters and Chang, 2011). همچنین چرخه عرضه- تقاضای آب شهری[6]، منعکس‌کننده یک بازار انحصاری غیرمعمول از یک منبع طبیعی است که ارزش آن، ابعاد گسترده‌ای از جمله جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و غیره را شامل می‌شود (Athanasiadis and Mitkas, 2005). به‌عنوان مثال، توانایی و امکان تخمین تقاضای آب خانگی تحت شرایط چندگانه اقلیمی، رشد جمعیت و سناریوهای مختلف حفاظت از آب ارتباط تنگاتنگی با فرآیندها و مدل‌سازی هیدرولوژیکی شهری دارد (House-Peters and Chang, 2011).

نکته حائز اهمیت دیگر این است که اعمال هرگونه سیاستی در حوزه مدیریت آب شهری به‌ویژه مدیریت تقاضای آب، بسته به نوع آن می‌تواند تبعات مثبت و منفی گسترده‌ای را دربر داشته باشد؛ به‌طوری‌که دامنه این تبعات می‌تواند ذینفعان (گروداران)[7] این حوزه (مثل خانوارها و شرکت‌های آب و فاضلاب) و حتی زیرساخت‌های شهری (از جمله شبکه‌های توزیع آب و جمع‌آوری فاضلاب) را تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو در ارزیابی سیاست‌های مدیریت تقاضای آب شهری، علاوه بر پیچیدگی[8]های ناشی از ماهیت درونی سیستم‌های اجتماعی–اکولوژیکی، رفتارهای پیچیده زیرساخت‌های شهری نیز چالش دیگری را در این حوزه پدید می‌آورد (Shahangian et al., 2020). از سوی دیگر، در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای نقش اساسی و مهم بعد انسانی در مدیریت منابع مشخص شده است (Pahl-Wostl and Hare, 2004). لذا تمایل افراد به اقدامات صرفه‌جویانه و حفاظت از آب و نیز عکس‌العمل‌های آنها در قبال سیاست‌های اتخاذی، عامل‌های مهم و تأثیرگذار دیگری در مدیریت تقاضای آب شهری به‌ویژه در بخش خانگی هستند و نقش حائز اهمیتی در پیچیدگی‌های آن ایفا می‌کنند (Shahangian et al., 2020). بنابراین سیاست‌ها و اقدامات مدیریت تقاضای آب شهری علاوه بر تأثیرگذاری بر کاهش مصرف آب، اثرات مستقیمی بر جنبه‌های مختلف زیست‌محیطی، فنی و غیره و اثرات غیرمستقیمی نیز ناشی از فرآیندهای اجتماعی دارند (Shahangian et al., 2019a).

با توجه به مطالب فوق می‌توان دریافت، سیستم آب شهری که به‌عنوان یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده (CAS[9]) شناخته می‌شود (Athanasiadis et al., 2005; López-Paredes et al., 2005; Galán et al., 2009; Tsegaye and Vairavamoorthy 2009; Chu et al., 2009; Zechman, 2011; Shafiee and Zechman, 2011; Kanta and Zechman, 2014; Berglund, 2015; Giacomoni and Berglund, 2015; Koutiva and Makropoulos, 2016) از مؤلفه‌های فنی، زیست‌محیطی و اجتماعی از جمله زیرساخت‌های آبی، منابع آب و مصرف‌کنندگان آب تشکیل شده است که به‌صورت پویا و پیوسته با یکدیگر تعامل دارند و روابط آنها در لحظه تغییر و تحول می‌یابد (Koutiva and Makropoulos, 2016). لذا نیازمند ارزیابی جامع و یکپارچه از جنبه‌های مختلف تأثیرگذار بر سیستم و تأثیرپذیر از آن و مدل‌سازی پیچیدگی‌های رفتاری آن در ابعاد مختلف است. با توجه به اهمیت موضوعات فوق و ضرورت پرداختن به آنها، در این مقاله به مروری بر چارچوب مفهومی مورد استفاده تحقیقات گذشته در حوزه مدیریت آب شهری، پرداخته می‌شود. این چارچوب بر چرخه تعاملاتی در حوزه مدیریت آب شهری و نیز فرآیند مدل‌سازی در این حوزه تأکید دارد. لذا این چارچوب دربرگیرنده الزامات و مفاهیمی است که پیش‌زمینه و لازمه تحقیقات در حوزه ارزیابی سیاست‌های مدیریت آب شهری به‌ویژه مدیریت تقاضای آب است که در ادامه مقاله به شرح مفصلی از آنها پرداخته می‌شود. از این‌رو لازم است با مفاهیم اصلی در این زمینه یعنی مفهوم پیچیدگی، سیستم‌های پیچیده و انطباق‌پذیر پیچیده، یکپارچه‌سازی دانش و انواع رویکردهای ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه آشنایی پیدا کرد. شناخت این مفاهیم کمک می‌کند تا بتوان با ابزارها و رویکردهای مدل‌سازی در آنها آشنایی و درک بهتری را از توانایی و گستره کاربرد آنها پیدا کرد. انتظار می‌رود که مدل ارائه‌شده، به درک و بینش عمیق‌تر نسبت به تحقیقات در حوزه مدیریت آب شهری و به‌ویژه مدیریت تقاضای آب کمک شایان و قابل‌توجهی کند.

بنابراین ساختار مقاله در بخش‌های مختلف به شرح زیر است: (۱) در بخش دوم مقاله، الزامات و مفاهیمی که پیش‌زمینه پرداختن به چارچوب مفهومی هستند از جمله پیچیدگی، سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده (CAS) و ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه (IAM[10]) به‌عنوان مفاهیمی در ارزیابی‌ها و مدل‌سازی‌های زیست‌محیطی از جمله مدیریت آب شهری شرح داده و مرور می‌شوند، (۲) در بخش سوم، به بررسی سیستم آب شهری به‌عنوان یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده پرداخته و چارچوب مفهومی مورد استفاده محققین گذشته استخراج و نهایتاً (۳) در بخش چهارم به معرفی و بررسی رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان (ABM[11])، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی و ارزیابی سیاست‌های مدیریت آب شهری پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که ساختار این مقاله با مرور تعداد زیادی از کتب و تحقیقات گذشته در زمینه مدل‌سازی عامل بنیان، پیچیدگی و سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، یکپارچه‌سازی دانش و مدیریت تقاضای آب شهری شکل گرفته و نسخه تجمیعی و توسعه داده‌شده Shahangian et al. (2019a; 2019b; 2020) است؛ با این تفاوت که در این مقاله چارچوب مفهومی از چرخه تعاملاتی و فرآیند مدل‌سازی در حوزه مدیریت آب شهری استخراج شده و محتوای مقاله نیز در بخش‌های مختلف، با توجه به هدف مقاله و چارچوب مفهومی حاصل از مرور تحقیقات گذشته توسعه یافته است.

۲- مفاهیم اصلی در حوزه مدیریت آب شهری؛ کاربرد رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان

۲-۱- پیچیدگی

پیچیدگی یک ویژگی عمیق از یک سیستم است و زمانی به‌وجود می‌آید که وابستگی بین المان‌ها اهمیت پیدا کند (Miller and Page,

2009). رفتار پیچیده از فعالیت اجزا در سطوح پایین بروز می‌کند (Miller and Page, 2009) و در هر سیستمی که متشکل از تعداد زیادی مؤلفه‌های تعاملی باشد که به‌صورت غیرخطی با یکدیگر تعامل می‌کنند، می‌تواند رخ دهد (Auyang, 1998). پیچیدگی نتیجه روابط، تعاملات و ارتباطات درونی المان‌ها، داخل یک سیستم و نیز میان یک سیستم و محیط آن است و در سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده به پتانسیل بروز رفتارهای نوظهور (بروز یافته)[12] در پدیده‌های پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی اشاره دارد (Chan, 2001). بسیاری از سیستم‌های طبیعی (مانند سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیکی) و به‌طور فزاینده بسیاری از سیستم‌های مصنوعی (مثل سیستم‌های هوش مصنوعی[13]) بوسیله رفتارهای پیچیده‌ای که اغلب نتیجه تعاملات غیرخطی زمانی- مکانی تعداد زیادی از اجزا (مؤلفه‌های) سیستم در سطوح مختلف است، مشخصه‌سازی می‌شوند (Chan, 2001). علم سیستم‌های پیچیده، هم از نظر دامنه و هم روش به‌سرعت در حال رشد و تحول است (Miller and Page, 2009). ابزارها و ایده‌های نشأت‌گرفته از تحقیقات در زمینه این سیستم‌ها، رویکردهای موجود را تکمیل می‌کنند و به محققین اجازه می‌دهند تا با یکپارچه‌سازی تکنیک‌های موجود، تئوری‌های بسیار بهتر و دقیق‌تری درباره جهان واقعی ایجاد کنند (Miller and Page, 2009). در سیستم‌های پیچیده تعاملات کوچک مقیاس بین افراد (عامل[14]ها) در طول زمان و مکان، متغیرهایی را در مقیاس‌های میکرو و ماکرو ایجاد می‌کنند (رفتارهای بروز یافته) که ابعاد و گستره تأثیرات این رفتارها به نفوذ (تأثیرگذاری)[15] در تعاملات بین عامل‌ها یا محدود کردن انتخاب‌های فردی (از جمله تعیین قوانین رفتاری و غیره) بازمی‌گردد (House-Peters and Chang, 2011).

۲-۲- سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده (CAS)

در دهه ۱۹۹۰، زمینه علمی جدیدی تحت عنوان سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده با تمرکز بر اینکه چگونه خصوصیات تجمعی[16] افراد می‌توانند بر اساس ویژگی‌ها و رفتارهای آن‌ها تعیین شوند، پایه‌گذاری شد (Railsback, 2001). ماهیت این سیستم‌ها، مطالعه سامانه‌های تشکیل‌یافته از تعداد زیادی مؤلفه‌های فعال (پویا) و تعاملاتی است که اغلب به‌عنوان عامل یا بازیگر[17] شناخته می‌شوند و از نظر شکل و توانایی، با یکدیگر متفاوت هستند (Holland, 2006; Berglund, 2015). در واقع مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، به‌نوعی تلاش برای بررسی و درک نحوه تأثیر پاسخ‌های سطح- سیستم بر خصوصیات افراد (عامل‌ها) است که قادر به سازگاری (تطبیق) از طریق تعامل با یکدیگر و با محیط اطرافشان هستند (Auyang, 1998; Railsback, 2001). تمرکز تحقیقات سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، از پایین به بالا[18] است؛ به‌نحوی که انواع عامل‌ها و محیط‌ها را توصیف می‌کند و سپس به‌طور تجربی متوجه می‌شوند که چه نوع پویایی‌های پیچیده‌ای توسط سیستمی متشکل از عامل‌ها به نمایش گذاشته می‌شود (Railsback, 2001). در واقع، سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده از عامل‌های کوچک مقیاس (میکرو) تشکیل شده‌اند که برای ایجاد خصوصیات در سطح جهانی سیستم، با یکدیگر تعامل و این خصوصیات، بازخورد در تعاملات کوچک مقیاسی را به روش‌های متعدد ایجاد می‌کنند. این بازخوردها هم در سیستم فیزیکی و هم در سیستم اجتماعی، اتفاق می‌افتند و به این ترتیب، ویژگی‌های سیستم را به‌صورت پویا تغییر می‌دهند (Miller and Page, 2009). اقتصاد، اکوسیستم‌ها، مغز انسان و جامعه مورچگان نمونه‌هایی از این سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده هستند (Chan, 2001).

فرآیندی که درون مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده رخ می‌دهد، به شرح زیر است: در این سیستم‌ها، بازیگران تصمیم‌گیری می‌کنند و اقداماتی را به‌طور مستقل و شخصی انجام می‌دهند. آنها به یک زیر گروه مشخص از بازیگران وصل می‌شوند و برای کسب و انتقال اطلاعات یا منابع با هم تعامل می‌کنند. آنها می‌توانند رفتارهای خود را از طریق سازگاری تغییر دهند و ممکن است اقدامات خود را بر اساس حافظه خود از تصمیماتی که در گذشته گرفته‌اند و یا یادگیری، به‌روز کنند. سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، نشان‌دهنده بروز (پدیدار شدن رفتارهای نوظهور) در سطح سیستم هستند که به‌عنوان پدیده‌ای شناخته می‌شود که در آن رفتار(های) تجمعی از رفتارهای فردی ناشی می‌شود. همانطور که بازیگران تصمیمات خود را به‌روز رسانی می‌کنند، می‌توانند اطلاعات اکتسابی خود را با دیگر بازیگران به اشتراک بگذارند. بنابراین ویژگی‌های سطح- سیستم، مجموع رفتارها در میان یک جمعیت از بازیگران نیست؛ بلکه طبق نفوذ (تأثیرگذاری) تعاملات در میان بازیگران است و از طریق آن بروز می‌یابد. همچنین بازیگران به یک محیط مشترک متصل می‌شوند و همانطور که تلاش می‌کنند اهداف خود را بهینه کنند، ممکن است ناخواسته باعث تنزل یا بهینه‌سازی خصوصیات سطح- سیستم شوند. سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده، پیچیدگی سازمان‌یافته‌ای را نشان می‌دهند که در آن تعاملات بین مؤلفه‌های فردی می‌توانند نتایج را تعدیل یا تقویت کنند (Berglund, 2015). شکل ۱ شماتیکی از این سیستم‌ها را نشان می‌دهد.

تفاوت اساسی بین مدل‌های سیستم‌های اجتماعی پیچیده و سیستم‌های فیزیکی، فرضیاتی است که در رابطه با قوانین رفتاری آنها در نظر گرفته می‌شود.

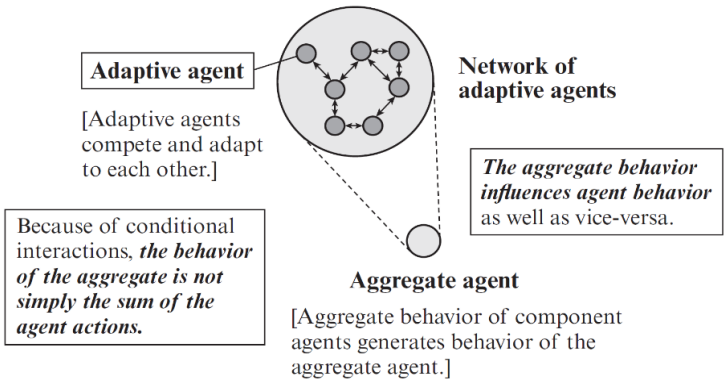


Fig. 1- Scheme of complex adaptive system (Holland, 2006)

شکل ۱- شماتیکی از سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده (Holland, 2006)

در واقع، آنچه که سیستم‌های فیزیکی را از سیستم‌های اجتماعی متمایز می‌کند، این است که عامل‌ها در سیستم‌های اجتماعی اغلب رفتار خـــود را در پاسخ بـــه نتایج پیش‌بینی‌شده تغییر می‌دهند (Miller and Page, 2009). امروزه مدل‌های کامپیوتربنیان، به ابزاری با کاربرد گسترده برای بررسی و پرداختن به سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده تبدیل شده‌اند، زیرا آنها می‌توانند تعاملات شرطی "اگر یک اتفاق مشخص رخ دهد، سپس یک اقدام خاص انجام می‌شود" را در نظر بگیرند. چنین تعاملاتی به‌علت غیرخطی بودن، مشکلاتی را برای مدل‌های معادله- محور سنتی ایجاد می‌کند (Holland, 2006). در این میان، مدل‌های عامل بنیان که در دهه‌های اخیر به ابزاری با کاربرد گسترده در مطالعه و بررسی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده تبدیل شده‌اند (Holland, 2006)، تـوانایی شبیه‌سازی رفتارهای نوظهور را در ایـــن سیستم‌ها دارنـد (Berglund, 2015). در واقع مدل‌سازی عامل بنیان زمانی‌که سیستم مورد بررسی رفتار انطباق‌پذیر از خود نشان می‌دهد (مانند سیستم آب شهری)، روش بسیار مناسبی است (Chan, 2001).

۲-۳- ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه (IAM)

طراحی و پیاده‌سازی سیاست‌های مؤثر زیست‌محیطی، نیازمند درک جامعی از فرآیندهای سیستم، تعاملات پیچیده بین آنها و چگونگی پاسخ آنها به تغییرات مختلف است. ارزیابی نتایج پیش‌بینی‌شده بایستی بر اساس بازخوردها، اثرات جانبی و گاهی سبک و سنگین کردن میان اهداف مختلف (و اغلب متضاد) و یا اثرات توزیع‌شده درون یک هدف، مثلاً به لحاظ بعد مکانی باشد. از سوی دیگر ممکن است اثرات مثبت و منفی، در مقیاس زمانی بسیار متفاوت رخ دهند. اثرات زیست‌محیطی گاهاً تا سال‌ها و حتی در برخی موارد تا دهه‌ها قابل رویت نیستند؛ در حالی که هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی سریع‌تر بروز می‌کنند و با دقت بیشتری نیز تخمین زده می‌شوند. در حال حاضر، آگاهی روبه رشدی درباره پیچیدگی ارزیابی چنین وابستگی‌های درونی برای آگاه‌سازی تصمیم‌گیران وجود دارد (Kelly et al., 2013). از سوی دیگر، اگرچه مدل‌سازی فرآیندهای زیست‌محیطی، دهه‌ها است که مورد توجه محققین بوده است (Parker et al., 2002)؛ اما همزمان با افزایش چشم‌گیر تأثیرات فعالیت‌های بشر بر محیط‌زیست، علاقه‌مندی به تجزیه و تحلیل سیستم‌هایی که طیف وسیعی از علوم را دربر می‌گیرند بیشتر شده است. این سیستم‌ها پیچیده‌تر بوده و بایستی با مدل‌هایی توصیف شوند که می‌توانند شامل اجزای مختلفی که دارای مقیاس‌ها و دقت‌های متفاوت بـــوده و بـر اساس فرضیات و الگوهای مختلفی که از حـــوزه‌های علوم معتدد توسعه یافته‌اند، باشند (Voinov and Shugart, 2013).

مدل‌سازی یکپارچه، رویکردی در حال توسعه برای تجمیع و گردهم آوردن اطلاعات، نظریه‌ها و داده‌های متعددی است که از علوم مختلف نشأت می‌گیرد. تفاوت در علوم مختلف، نه فقط به دلیل این است که آنها اهداف و سیستم‌های متفاوتی را مطالعه و بررسی می‌کنند؛ بلکه علت آن است که به روش‌های متعدد و با استفاده از زبان‌ها، فرضیات، مقیاس‌ها و تکنیک‌های متفاوت عمل می‌کنند (Voinov and Shugart, 2013). ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه به یک مدل خاص محدود نمی‌شود، بلکه اهمیت فرآیند را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. این فرآیند، مدل‌های مختلف را در یک چارچوب شفاف و تعاملی ادغام می‌کند تا امکان مشارکت ذینفعان را در تمام مراحل این روند فراهم کند (Parker et al., 2002). اصطلاح یکپارچگی توسط افراد مختلف و به روش‌های متعددی مورد استفاده قرار گرفته است که حداقل پنج مورد متمایز استفاده از این اصطلاح در زمینه ارزیابی یکپارچه در فرآیند مدل‌سازی با مروری بر ادبیات فنی، به چشم می‌خورد که عبارتند از (Kelly et al., 2013): ۱) رفتار یکپارچه

مسائل[۱۹] که ناشی از تأثیرگذاری راهکارهای مدیریتی بر دیگر مسائل و جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و غیره است؛ ۲) یکپارچگی با ذینفعان[۲۰] که می‌تواند از به‌روزرسانی گروه‌های جامعه بر اساس خروجی‌های مدل تا دخالت و ورود بزرگ مقیاس دیدگاه‌ها و دانش ذینفعان در تمامی مراحل روند مدل‌سازی متفاوت باشد؛ ۳) یکپارچه‌سازی علوم[۲۱] (دیدگاه بین رشته‌ای) که شامل لحاظ یکپارچه دو یا بیش از دو دیدگاه علمی از رشته‌های مختلف نسبت به یک مشکل مدیریتی و مرزهای سیستمی مرتبط با آن است؛ ۴) یکپارچه‌سازی فرآیندها و مدل‌ها[۲۲] که نیازمند ترکیب دو یا چند مدل از سیستم‌ها یا فرآیندهای متعدد درون یک سیستم است و ۵) یکپارچه‌سازی مقیاس‌های ملاحظات[۲۳] که علت لحاظ آن، این موضوع است که مسائل مربوط به منابع و محیط‌زیست اغلب ممکن است در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوتی در نظر گرفته شوند.

۲-۴- رویکردهای رایج در ارزیابی یکپارچه و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده

مدل‌هایی که امروزه در طیف وسیعی از زمینه‌ها (از جمله محیط‌زیستی، هیدرولوژیکی، اقتصادی و غیره) توسعه یافته‌اند و وظیفه یکپارچه‌سازی دانش و ادغام فرآیندهای متعدد سیستم را درون یک چارچوب واحد دارند، ابزار کاربردی و مفیدی برای کمک به ارزیابی پیچیدگی‌های یکپارچه‌سازی و درک ماهیت آنها، تجزیه و تحلیل سناریوها (گزینه‌ها) با ذینفعان[۲۴]، ارزیابی نتایج آنها و برقراری ارتباط بین نتایج به روشی شفاف و روشن هستند. نیاز به چنین مدل‌ها یا ابزارهایی در ارزیابی یکپارچه، به‌طور گسترده‌ای برای اثربخشی در تصمیم‌گیری و مدیریت مورد تأیید قرار گرفته است (Kelly et al., 2013). پنج مدل یا رویکرد معمول و رایج در مدل‌سازی و ارزیابی یکپارچه که توانایی درک پیچیدگی‌های سیستم و یکپارچه‌سازی دانش از حوزه‌های مختلف علوم را به‌وسیله توسعه مدل‌ها دارند و می‌توانند مسائل، مقادیر، مقیاس‌های چندگانه و ملاحظات عدم قطعیت‌ها را در خود جای دهند و مشارکت ذینفعان را نیز تسهیل کنند، عبارتند از (Kelly et al., 2013): ۱) پویایی سیستم‌ها[۲۵]، ۲) شبکه‌های بیزین[۲۶]، ۳) مدل‌های مؤلفه پیوندی[۲۷]، ۴) مدل‌های عامل بنیان و ۵) مدل‌های دانش‌محور[۲۸] (به‌عنوان سیستم‌های خبره[۲۹] نیز شناخته می‌شوند). شکل ۲ درخت تصمیم‌گیری برای انتخاب مناسب‌ترین رویکرد در مدل‌سازی یکپارچه را نشان می‌دهد.

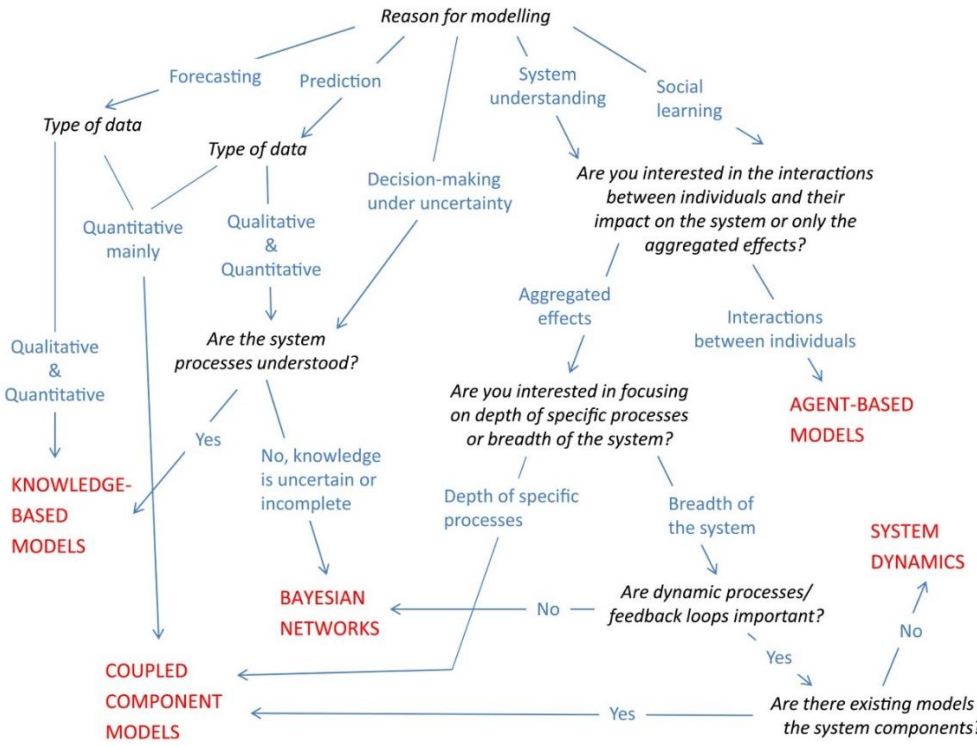


Fig. 2- Decision tree for selecting the most appropriate integrated assessment and modeling approach (Kelly et al., 2013)

شکل ۲- درخت تصمیم‌گیری برای انتخاب مناسب‌ترین رویکرد ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه (Kelly et al., 2013)

همان‌طور که در شکل ۲ نیز مشاهده می‌شود، مدل‌های پویایی سیستم و عامل بنیان برای اهدافی مانند درک از سیستم و یادگیری اجتماعی مناسب هستند. این موضوع به دلیل تأکید این روش‌ها بر بررسی فرض‌ها و نتایج احتمالی و معقول، به جای پیش‌بینی یا تصمیم‌گیری دقیق است. چنین مدل‌هایی اغلب برای کمک به تصمیم‌گیران و ذینفعان در راستای آزمودن مدل و فرضیه‌های متعدد در ارتباط با فرآیندهایی که درک ضعیفی نسبت به آنها وجود دارد، توسعه پیدا می‌کنند. همچنین ثابت شده است که مدل‌های عامل بنیان ابزارهای بسیار مناسبی برای یادگیری اجتماعی در طیف وسیعی از محیط‌ها هستند که در آن، فرضیات درباره فرآیندها و تعاملات بررسی و به اشتراک گذاشته می‌شود. همچنین این مدل‌ها می‌توانند اثرات منحصر به فرد و یا تجمعی را در نظر بگیرند. همچنین چنانچه هدف از مدل‌سازی تعاملات بین افراد باشد و نه اثرات تجمعی سیستم، رویکرد عامل بنیان مناسب‌ترین گزینه است (Kelly et al., 2013). تفاوت بارز دیگر بین این دو رویکرد این است که در روش پویایی سیستم، رویکرد از بالا به پایین و نگاه سیستمی از کل به جزء بوده؛ در حالی که در مدل‌سازی عامل بنیان، رویکرد از پایین به بالا و نگاه سیستمی از جزء به کل است. در واقع در رویکرد پویایی سیستم، فرآیندهای پویا و حلقه‌های بازخورد و همچنین اثرات تجمعی ناشی از تعاملات بین عامل‌ها اهمیت دارد؛ در حالی کـــه در رویکرد عامل بنیان، تعاملات بین عامل‌ها و تأثیر آن بـــر روی سیستم حائز اهمیت است (Shahangian et al., 2019).

علاوه بر این، مدل‌سازی عامل بنیان چارچوبی را مهیا می‌کند تا بتوان روش‌های قابل‌اجرایی را که با الزامات متعدد مدل‌سازی مدیریت زیست‌محیطی مطابقت داشته باشد، اعمال کرد. به عبارت دیگر شبیه‌سازی عامل بنیان اجازه می‌دهد تا مدل‌های زیست‌محیطی را به سیستم‌های اجتماعی که در آنها تعبیه شده است، متصل کرد؛ به‌گونه‌ای که می‌توان نقش تعاملات اجتماعی و انطباق‌پذیر و تصمیمات فردی (در مقیاس میکرو) در مدیریت زیست‌محیطی مدل‌سازی کرد. علاوه بر این، اجازه مطالعه و بررسی تعاملات بین مقیاس‌های متعدد از تصمیم‌گیران، بررسی واکنش‌های انطباق‌پذیر، پاسخ‌های جمعی به تغییر محیط‌ها و سیاست‌های مدیریت زیست‌محیطی را می‌دهد (Hare and Deadman, 2004). مدل‌های عامل بنیان، برای یادگیری اجتماعی و ابزار پشتیبان مدیریت بسیار مناسب هستند و عمدتاً برای تجزیه و تحلیل نهادی و سیاست‌گزاری و شبیه‌سازی فرآیندهای اجتماعی- اقتصادی یا اجتماعی- اکولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند تا درک حاصل از تعاملات و اثرات متقابل پویا بین عوامل و محیط آنها را بهبود بخشند (Kelly et al., 2013).

۳- مدیریت آب شهری، یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده

مدیریت آب شهری از جمله مدیریت تقاضا، طیف وسیعی از اقدامات و سیاست‌ها را دربر می‌گیرد و متأثر از محرک‌های بسیاری از جمله اجتماعی، اقتصادی، مدیریتی، اقلیمی، فنی و غیره است. این محرک‌ها می‌توانند با اعمال فشار بر سیستم و تغییر در شرایط موجود، متولیان را مجبور به اتخاذ سیاست‌هایی در این حوزه کنند که نوع نگرش متولیان و تجربیات آنها از موارد مشابه در گذشته، در اتخاذ و اجرای موفق این سیاست‌ها بسیار حائز اهمیت است. به‌عنوان مثال در شرایط خشکسالی سال ۱۳۸۰، متولیان صنعت آب و فاضلاب در شهر تهران تصمیم به اتخاذ سیاست جیره‌بندی گرفتند؛ اما این شرایط پایدار نبود و نهایتاً به علل مشکلات متعدد فنی، اقتصادی و اجتماعی و علی‌رغم افزایش میزان تقاضا در سال‌های بعد، این سیاست دیگر اجرایی نشد؛ لذا متولیان به راهکارهای دیگری در راستای مدیریت تأمین از جمله تشدید حفر چاه‌های زیرزمینی و اقداماتی در راستای مدیریت تقاضا از جمله فرهنگ‌سازی (رویکردهای ساختاری و غیرساختاری) روی آوردند.

علاوه بر این، زنجیره تأمین- تقاضای آب شهری که در دید اول دو گروه اصلی ذینفع در این حوزه یعنی شرکت‌های آب و فاضلاب و خانوارها را شامل می‌شود، رشته‌ای از تعاملات را بین این دو ذینفع ایجاد می‌کند. بنابراین اتخاذ هر سیاستی در این حوزه که در راستای بهبود شرایط موجود و آینده اجرایی می‌شود، بسته به نوع آن می‌تواند به‌طور مستقیم تبعات مثبت و منفی گسترده‌ای را درپی داشته باشد؛ به‌طوری‌که دامنه این تبعات می‌تواند ذینفعان حوزه شهری از مصرف‌کنندگان (خانوارها یا مشترکین) تا شرکت‌های خدمت‌رسان (مثل شرکت آب و فاضلاب) و حتی زیرساخت‌های شهری (مانند شبکه توزیع آب) را تحت تأثیر قرار دهد. این تبعات می‌توانند به تشدید یا تضعیف محرک‌های موجود و وخیم‌تر شدن یا بهبود شرایط منجر شوند (اثرات مستقیم).

از سوی دیگر در حوزه مدیریت آب شهری، گروه عمده مصرف‌کنندگان آب را خانوارها (مشترکین) تشکیل می‌دهند. بنابراین گروه مهم دیگری که تحت تأثیر اعمال سیاست‌های مدیریت آب شهری قرار دارند، مشترکین یا همان ذی‌نفعان اصلی در این حوزه هستند که توجه به نقش و تأثیرگذاری آنها در اجرای موفق اقدامات و سیاست‌گزاری‌های مدیریت آب شهری، بسیار حائز اهمیت است. نقش خانوارها که بخش قابل‌توجهی از سیستم اجتماعی در این حوزه را تشکیل می‌دهند، از سه جنبه حائز اهمیت است: ۱) نگرش و انگیزه رفتاری خانوارها در رابطه با رفتارهای صرفه‌جویانه و حفاظت از آب؛ ۲) نگرش و انگیزه رفتاری

آنها در مورد پذیرش یا عدم پذیرش عمومی این سیاست‌ها و ۳) عکس‌العمل‌ها و تصمیمات آنها در پاسخ به تغییر شرایط که می‌تواند تبعات مثبت و منفی دیگری را در پی داشته باشد؛ به نحوی که گستره تبعات ناشی از این‌گونه اقدامات می‌تواند متولیان، زیرساخت‌ها و حتی خود مشترکین را نیز تحت تأثیر قرار دهد (اثرات غیرمستقیم).

بنابراین سیاست‌های مدیریت آب شهری علاوه بر تأثیرگذاری بر مصرف آب، اثرات مستقیم و غیرمستقیمی را بر جنبه‌های مختلف از جمله ابعاد اجتماعی، زیست‌محیطی، فنی، اقتصادی و انرژی دارند. اثرات غیرمستقیم، ناشی از تأثیر اعمال سیاست‌ها بر سیستم‌های اجتماعی است که از عامل‌های انطباق‌پذیری (خانوارها) تشکیل شده‌اند که با یکدیگر و محیط اطرافشان در مقیاس میکرو تعامل می‌کنند و موجب بروز رفتارها و پدیده‌های نوظهور در سطح سیستم (مقیاس ماکرو) می‌شوند. در واقع خانوارها نسبت به اعمال سیاست‌ها، از خود رفتارها و عکس‌العمل‌هایی بروز می‌دهند که اگرچه این تعاملات در سطح عامل‌ها و در مقیاس میکرو بروز می‌کنند، اما منجر به ایجاد اثرات تجمعی در مقیاس ماکرو می‌شوند.

این چرخه و فرآیند، سیستم را به یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده تبدیل می‌کند و نیازمند ارزیابی جامع و یکپارچه از تبعاتی است که بر ابعاد مختلف دارد. بنابراین تعیین سیاست‌های بهینه مدیریت آب شهری به ویژه مدیریت تقاضا، نیازمند استفاده از ابزارها و روش‌های مدل‌سازی مناسبی است که بتواند تعاملات پویا بین تمامی ذینفعان آب را شبیه‌سازی کند (Tsegaye and Vairavamoorthy, 2009) و امکان مطالعه یکپارچه سیستم‌های پیچیده (López-Paredes et al., 2005) در این حوزه را به کمک بررسی پیچیدگی‌های موجود، شبیه‌سازی رفتارهای نوظهور (بروز یافته) حاصل از تعاملات و ادغام دانش از حوزه‌های مختلف علوم، فراهم سازد (Shahangian et al., 2020). بایستی توجه داشت که یکپارچه‌سازی یا ادغام در مدل‌سازی سیستم‌های آب شهری به سه اصل مهم و اساسی اشاره دارد (Bach et al., 2014): (۱) مدل‌سازی تعداد زیادی از مؤلفه‌ها (بیوفیزیکی، اقتصادی و فراتر از آنها) و شبیه‌سازی تعاملات بین این مؤلفه‌ها، (۲) درنظر گرفتن اثرات کوتاه‌مدت، بلندمدت و با تأخیرات زمانی بر روی فرآیندهای کمی و کیفی آب در یک دوره زمانی طولانی از شبیه‌سازی و (۳) توانایی در لحاظ کردن و بررسی فرآیندهای محلی و چشم‌انداز بزرگ‌مقیاس جهانی به‌منظور آگاهی‌رسانی بهتر ومناسب‌تر از نتایج حاصل از تصمیم‌گیری‌ها، سیاست‌ها یا دانش علمی.

۳-۱- چارچوب مفهومی از چرخه تعاملاتی و فرآیند مدل‌سازی در حوزه مدیریت آب شهری (ICMPUWM)[۳۰]

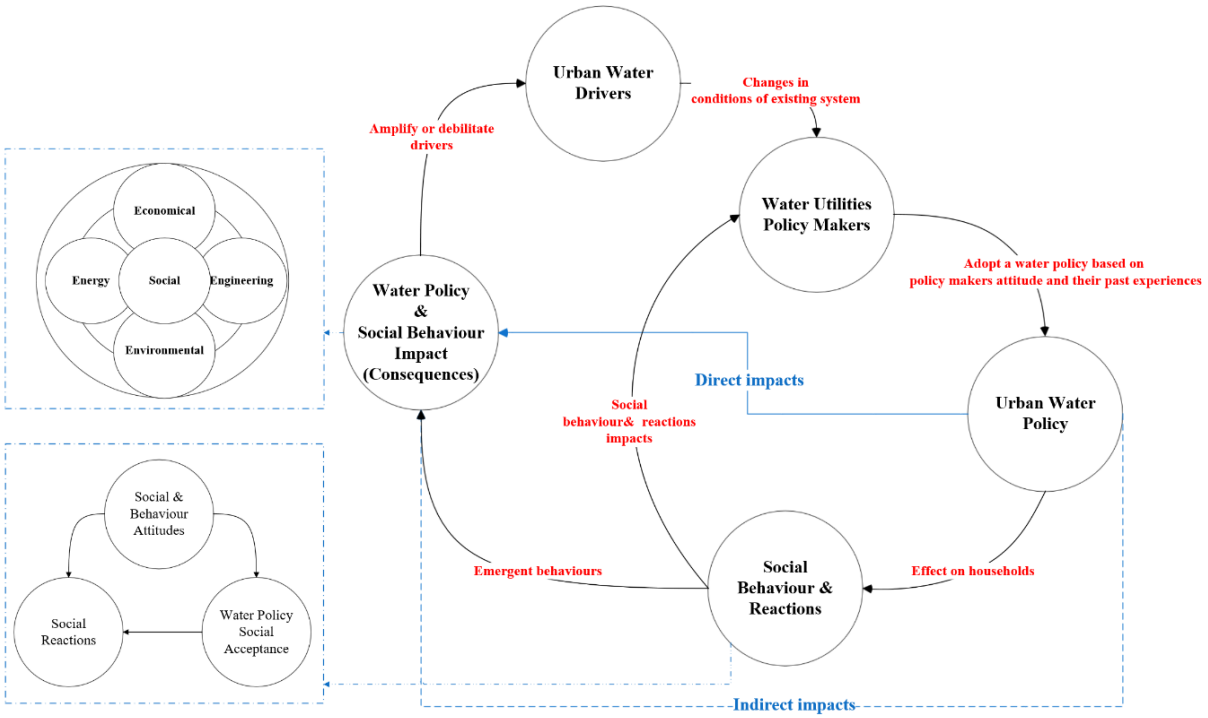
شکل ۳ چارچوب مفهومی از چرخه تعاملاتی و فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده در حوزه مدیریت آب شهری را نشان می‌دهد که بیانگر چرخه تعاملاتی میان ذینفعان اصلی این حوزه، تبعات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از این‌گونه تعاملات و چارچوبی برای مدل‌سازی و ارزیابی در این حوزه است. بر اساس مطالب ارائه‌شده که با مروری بر تحقیقات پیشین در حوزه ارزیابی و مدل‌سازی زیست‌محیطی گردآوری و ارائه شده است و نیز چارچوب مفهومی استخراج شده می‌توان دریافت ارزیابی سیاست‌های مدیریت آب شهری، نیازمند لحاظ دو رویکرد اصلی در مدل‌سازی است: ۱) مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و ۲) ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه (یکپارچه‌سازی دانش).

بر اساس مدل مفهومی ارائه‌شده در شکل ۳، می‌توان دریافت که در حوزه مدیریت آب شهری از جمله مدیریت تقاضا (به‌ویژه بخش خانگی)، سه گروه اصلی از ذینفعان باید مدنظر تحقیقات این حوزه قرار گیرد (شکل ۴): ۱) خانوارها و مصرف‌کنندگان آب در بخش خانگی که همان مشترکین شرکت‌های آب و فاضلاب هستند، ۲) شرکت‌های آب و فاضلاب و ۳) سامانه‌های آب و فاضلاب شهری. اگرچه امکان لحاظ ذینفعان دیگر در مدل، ازجمله شرکت‌های تأمین‌کننده آب (آب منطقه‌ای)، شهرداری و دیگر سازمان‌ها و نهادها نیز وجود خواهد داشت.

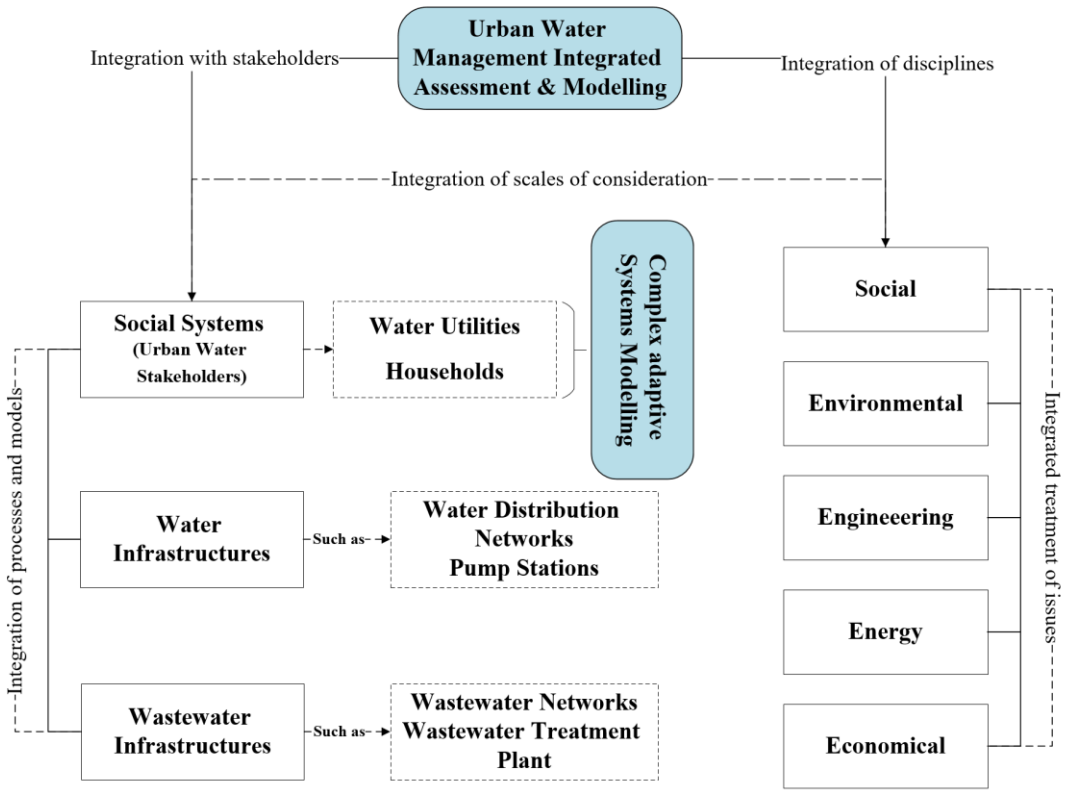
به‌منظور بیان روشن‌تری از پیچیدگی‌ها، تعاملات و تبعات مذکور در حوزه مدیریت آب شهری، در شکل ۵ مثالی برای بررسی اثرات ناشی از کاهش کیفیت آب در یک منطقه و چرخه‌ای که بر اثر تعاملات بین سه ذینفع اصلی (ناشی از اعمال سیاست‌ها توسط متولیان، رفتارها و عکس‌العمل‌های مردم و رفتارهای زیرساخت‌ها) در این حوزه شکل می‌گیرد، ارائه شده است.

۴- رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان

رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان، ابزاری برای بررسی خصوصیات و ویژگی‌های پیچیده سیستم‌های منابع آب و جایگزینی برای تکنیک‌های مدل‌سازی سنتی است و رویکردی را برای یکپارچه‌سازی سیستم‌ها در مقیاس‌های زمانی، فضایی و سازمانی فراهم می‌کند (Berglund, 2015). این شبیه‌سازی که تکنیکی قدرتمند در بررسی انواع سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده است (Chu et al., 2009)، یک مدل محاسباتی است که اقدامات و تعاملات موجودیت‌های مستقل[۳۱]



(a) (الف)



(b) (ب)

Fig. 3- Conceptual framework of Interactive Cycle (a) and Modeling Process (b) in Urban Water Management (ICMPUWM)

شکل ۳- چارچوب مفهومی از چرخه تعاملاتی (الف) و فرآیند مدل‌سازی (ب) در حوزه مدیریت آب شهری (ICMPUWM)

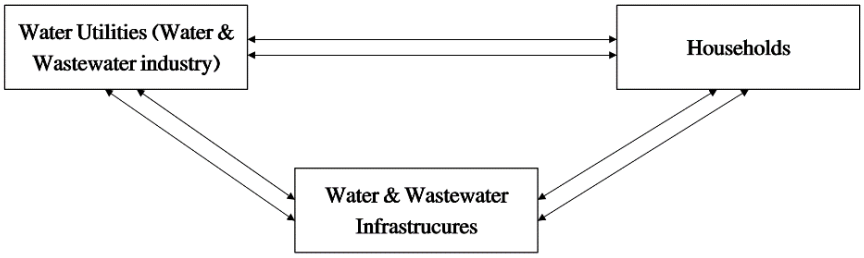


Fig. 4- Interactive cycle of the main stackholders in urban water management (Shahangian et al., 2020)

شکل ۴- چرخه تعاملاتی بین ذینفعان اصلی در حوزه مدیریت آب شهری (Shahangian et al., 2020)

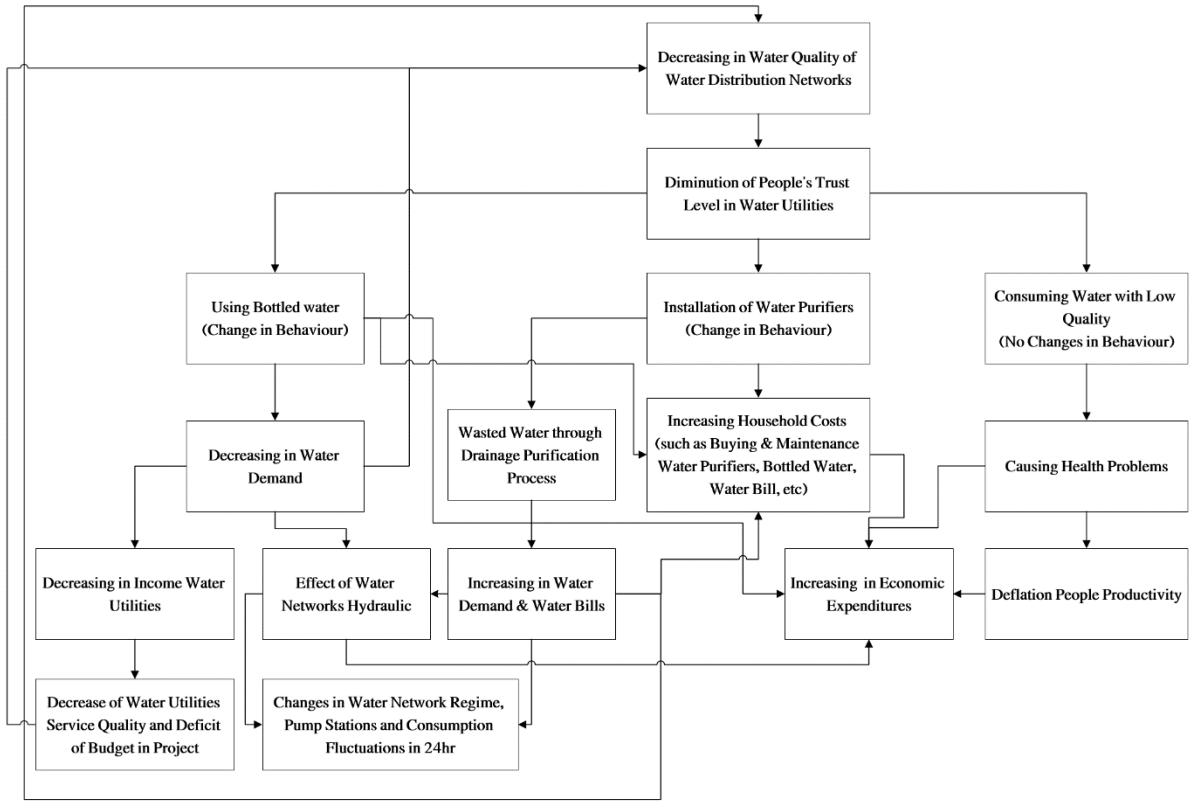


Fig. 5- An example of compelexities and consequences caused by water quality decrease in urban water interactive cycle

شکل ۵- مثالی از پیچیدگی‌ها و تبعات ناشی از کاهش کیفیت آب در چرخه تعاملاتی آب شهری

در یک شبکه را برای تعیین اثرات کلی آن‌ها بر روی سیستم، شبیه‌سازی می‌کند (Zechman, 2007). بنابراین مدل‌سازی عامل بنیان به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین رویکردهای از پایین به بالا (Pouladi et al., 2019)، با ایجاد یک جامعه مصنوعی همه زیرفرآیندهایی که برای مطالعه یکپارچه سیستم‌های پیچیده لازم هستند را به یک واحد یکپارچه متصل می‌کند (Athanasiadis et al., 2005). مدل‌سازی عامل بنیان در شاخه‌های مختلفی از علوم (Pouladi et al., 2019) شامل اکولوژی، علوم اجتماعی، ارزیابی زیست‌محیطی، رباتیک و بازی‌های کامپیوتری، به‌منظور بررسی روش‌هایی برای دستیابی به یک هدف مشترک و یا توضیح یک رفتار مشترک به‌کار گرفته می‌شود. در شبیه‌سازی عامل بنیان اگرچه مرحله طراحی در سطح عامل‌ها و در مقیاس میکرو انجام می‌شود، ولی هـــدف اصلی درک رفتارهای تجمیعی بروز یافته (نوظهور) و بـروز خـــواص ماکروسکوپی ناشی از تعاملات در سطح ماکرو است (López-Paredes et al., 2005). همچنین هدف کلی این رویکرد شبیه‌سازی، پیش‌بینی دقیق وضعیت سیستم مدل‌شده نیست؛ بلکه کشف نحوه رفتار و چگونگی ارتقای سیستم بر اثر یک سری سیاست‌های خاص است (Athanasiadis and Mitkas, 2005).

یک مدل عامل بنیان بوسیله سه المان تعریف می‌شود: ۱) مجموعه‌ای از عامل‌ها که توسط ویژگی‌ها و رفتارهایشان مشخص می‌شوند؛ ۲) مجموعه‌ای از روابط (قوانین) و روش‌ها برای تعامل عامل‌ها؛ و ۳) یک محیط. به عامل‌ها، خصوصیات یا ویژگی‌هایی اختصاص داده می‌شود که حالت فردی آن‌ها را توصیف می‌کند. همچنین به آن‌ها رفتارهایی اختصاص می‌یابد که به‌عنوان قوانین متشکل از بیان‌های منطقی و ریاضی ارائه و در پاسخ به یک سیگنال یا رویداد اجرا می‌شوند. یک مدل عامل بنیان، بر اساس یک جدول زمانی یا مجموعه‌ای از گام‌های زمانی گسسته اجرا می‌شود و عامل‌ها مکرراً قوانین رفتاری را ارزیابی، رفتارها را اجرا و خصوصیات (ویژگی‌های) فردی را به‌روز می‌کنند. عامل‌ها الزاماً مستقل هستند، یعنی هر یک از عامل‌ها از دیگر عامل‌ها یا مؤلفه‌ها در سیستم متمایز و قادر به انجام اقدامات مستقل هستند. هر عامل می‌تواند مقادیر متفاوتی برای ویژگی‌ها، قوانین رفتاری متمایز و یک مسیر، تاریخچه، یا وضعیت (حالت) خاص برای خود داشته باشد. یک محیط مشترک، منابع و اطلاعاتی را برای عامل‌ها فراهم می‌کند و تعاملات بین عامل‌ها و محیط اطرافشان، برای نمایش انتقال اطلاعات و منابع به‌طور خاص مشخص می‌شود (Berglund, 2015). شکل ۶ شمای کلی از این رویکرد مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

بنابراین مدل‌های عامل بنیان، متشکل از عامل‌هایی هستند که در یک زمان مشابه قرار دارند، در منابع مشترکی سهیم و نهایتاً در ارتباط با یکدیگر هستند؛ در واقع عامل‌ها همان بازیگران اجتماعی، مانند مردم و سازمان‌های نهادی هستند که برای واکنش به محیط طراحی شده‌اند (Yuan et al., 2014) و قادر به واکنش نسبت به تغییرات دریافتی از محیط اطرافشان از طریق کنش به محیط یا سازگاری درونی بوده (Kelly et al., 2013) و با یکدیگر و محیط، بر اساس مجموعه‌ای از قوانین تعامل دارند (Bruch and Atwell, 2015) که این تعاملات در مقیاس میکرو، منجر به بروز پیامدهایی در مقیاس ماکرو می‌شود (Heckbert et al., 2010). این رویکرد، می‌تواند بینش جدیدی را برای برنامه‌ریزی منابع آب و مشکلات مدیریتی آن از طریق یک رویکرد مدل‌سازی که بازخورد بین زیرسیستم‌ها و بازیگران را شبیه‌سازی می‌کند ایجاد نماید؛ زیرا بازخورد، انطباق‌پذیری و رفتار هدف- محور غیر متمرکز می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر خصوصیات بروزیافته از سیستم‌های منابع آبی اثرگذار باشد. بنابراین کاربرد این رویکرد مدل‌سازی دیدگاه جدیدی را در رابطه با سیستم‌های آبی، به‌عنوان سیستم‌های پویایی که رفتار پیچیده آنها در طول زمان تغییر می‌کند، بوجود می‌آورد (Berglund, 2015). مدل‌سازی عامل بنیان به‌عنوان بخشی از یک رویکرد سیستم انطباق‌پذیر پیچیده، تعاملات پویا بین ذینفعان در حوزه مدیریت آب شهری را بررسی می‌کند (Zechman, 2011). با توجه به مطالب فوق می‌توان ادعا کرد که رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان، ابزار قدرتمندی در ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه و جامع در حوزه سیاست‌های مدیریت تقاضای آب شهری است که هم توانایی یکپارچه‌سازی دانش از علوم و حوزه‌های متعدد و هم امکان مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده را دارد (Shahangian et al., 2020).

۴-۱- کاربرد مدل‌سازی عامل بنیان در مدیریت آب شهری

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشم‌گیری در زمینه کاربرد رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان در حوزه مدیریت منابع آب و به‌ویژه مدیریت آب شهری صورت و به تبع آن زمینه‌های تحقیقاتی گسترده‌ای نیز بر اساس آن شکل گرفته است. در این بخش به شرح مختصری از تعدادی از مقالات ارائه‌شده در حوزه مدیریت آب شهری (با تمرکز بیشتر بر مدیریت تقاضای آب در بخش خانگی) بر مبنای این رویکرد مدل‌سازی اشاره می‌شود. Athanasiadis et al. (2005) و Athanasiadis and Mitkas (2005) یک مدل عامل بنیان هیبرید (ترکیبی) که تلفیقی از یک مدل اجتماعی و یک مدل اقتصادسنجی است را به‌منظور تخمین تقاضای آب خانگی در آینده، شبیه‌سازی رفتارهای اجتماعی افراد جامعه و ارزیابی سیاست‌های قیمت‌گذاری آب و فرهنگ‌سازی ارائه کردند. López-Paredes et al. (2005) یک شبیه‌ساز عامل بنیان را برای ارزیابی یکپارچه آب شیرین ارائه دادند که امکان شبیه‌سازی و ارزیابی سیاست‌های عرضه و تقاضا را تحت سناریوهای مختلف تکنولوژیکی و اقلیمی برای سیاست‌گزاران فراهم می‌کند. Bernhardt and McNeil (2008) مدل‌سازی عامل بنیان را به‌عنوان رویکردی در راستای بهبود تصمیمات در حوزه مدیریت زیرساخت‌ها معرفی کردند.

Chu et al. (2009) یک شبیه‌سازی عامل بنیان را به منظور بررسی و شبیه‌سازی ویژگی‌های رفتاری مصرف آب خانگی توسعه دادند. Galán et al. (2009) یک مدل عامل بنیان هیبرید را برای تجزیه و تحلیل روابط پیچیده علت- معلولی که زمینه‌ساز شکل‌گیری تقاضای آب خانگی در مناطق شهری است، ارائه دادند. این مدل، زیرمدل‌های مختلف شامل مدل اجتماعی، مدل پویایی شهری، انتشار فناوری و مدل آماری مصرف آب را درون یک مدل عامل بنیان که با یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS[32]) لینک شده، ادغام کرده تا تأثیر جنبه‌های متعدد تأثیرگذار بر تقاضای آب خانگی را بررسی کند.

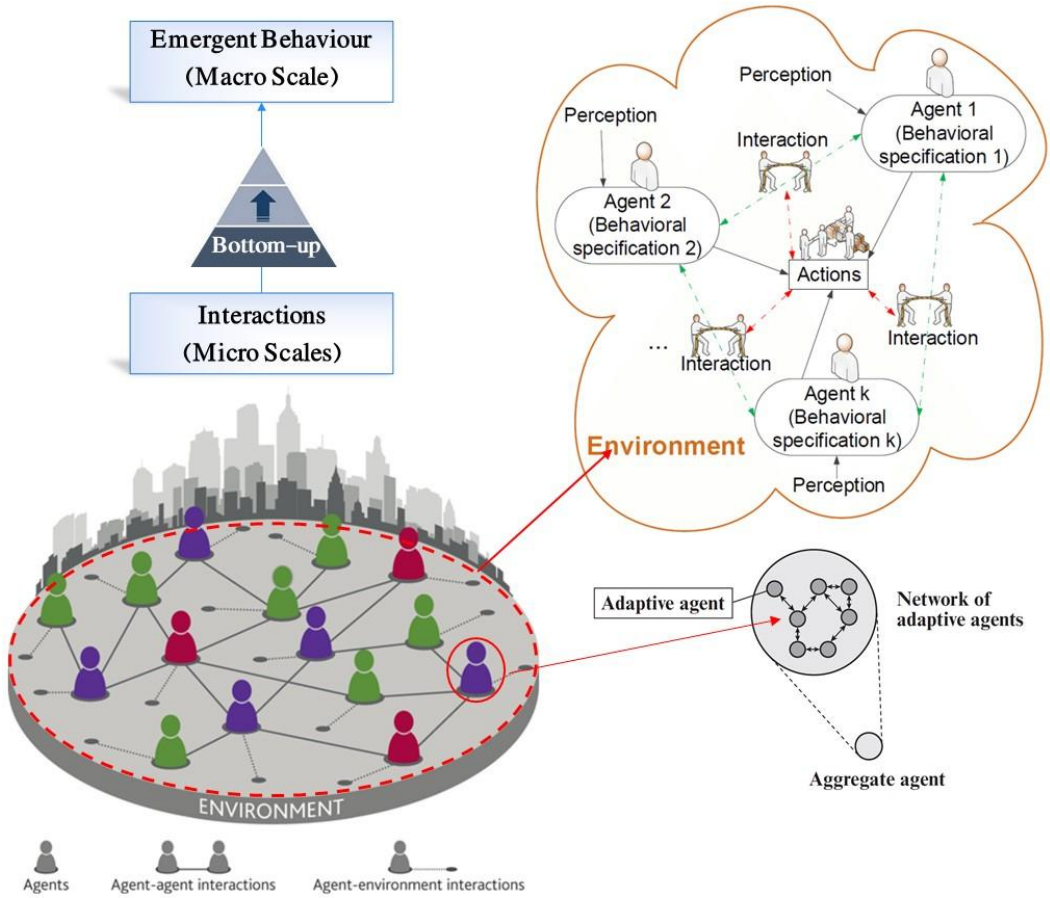


Fig. 6- Scheme of agent-based modeling

شکل ۶- شمای کلی از رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان

Tsegaye and Vairavamoorthy (2009) یک مدل عامل بنیان را به‌منظور پرداختن به پیچیدگی‌های ناشی از عوامل متعدد مؤثر بر مصرف آب خانگی از جمله تعاملات پویا و پیچیده بین ذینفعان این حوزه و نیز ارزیابی استراتژی‌های بهینه مدیریت تقاضا توسعه دادند. Zechman (2011) یک مدل عامل بنیان را برای شبیه‌سازی رویداد ورود آلودگی به شبکه توزیع آب و ارزیابی استراتژی‌های کارآمد کاهش و مدیریت تهدید در این شرایط، ارائه داد. این مدل، فرآیند تعاملی و پویای ناشی از اقدامات، واکنش‌ها و تصمیمات عامل‌ها و تأثیرات آنها بر عملکرد هیدرولیکی شبکه و گسترش ستون آلودگی را شبیه‌سازی می‌کند. این مقاله رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان، به‌عنوان رویکرد سیستمی پیچیده انطباق‌پذیر را با مدل شبکه توزیع آب تلفیق کرده تا اثرات تجمعی ناشی از تعاملات و اقدامات عامل‌ها بر روی شرایط هیدرولیکی شبکه و بهداشت عمومی را بررسی کند. Shafiee and Zechman (2011) یک چارچوب مدل‌سازی عامل بنیان را برای شبیه‌سازی اقدامات و واکنش‌های پویا و انطباق‌پذیر در شرایط ورود آلودگی به شبکه توزیع آب شهری توسعه دادند تا پویایی‌های ناشی از رویداد آلودگی در یک شبکه توزیع آب را نشان دهند. Kandiah et al. (2013) یک چارچوب مدل‌سازی عامل بنیان را برای شبیه‌سازی تعاملات بین مصرف‌کنندگان و رفتارهای آنها، پذیرش فناوری‌های استفاده مجدد از آب و تأثیر آن بر زیرساخت‌های موجود تأمین آب توسعه دادند.

Kanta and Zechman (2014) تأمین آب شهری را به‌عنوان یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده با استفاده از تلفیق یک مدل غیرقطعی تقاضا برای مصرف‌کنندگان و یک مدل عرضه آب، در قالب یک چارچوب مدل‌سازی عامل بنیان فرض کردند. Yuan et al. (2014) یک مدل عامل بنیان برای پیش‌بینی تقاضای آب خانگی توسعه دادند. Koutiva and Makropoulos (2016) روشی برای ترکیب دو ابزار مدل‌سازی شامل یک مدل شبیه‌سازی اجتماعی عامل بنیان، برای شبیه‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان در پاسخ به سیاست‌های مدیریت تقاضا و یک ابزار مدیریت شهری برای ارزیابی سیر تحول تقاضای آب خانگی ارائه کردند. Liu et al. (2016) یک مدل یکپارچه را برای

ارزیابی عملکرد شبکه‌های توزیع آب و سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب، با توجه به تقاضای آب خانگی بر اساس مدل‌سازی عامل بنیان توسعه دادند. Mashhadi Ali et al. (2017) یک رویکرد مدل‌سازی برای شبیه‌سازی پویای عرضه- تقاضا را با استفاده از یک چارچوب مدل‌سازی عامل بنیان توسعه دادند. Darbandsari et al. (2017) یک مدل شبیه‌سازی رفتاری عامل بنیان را برای مدیریت تقاضای آب در بخش خانگی، ارائه دادند تا بتوانند ویژگی‌های رفتاری مصرف‌کنندگان آب خانگی را شبیه‌سازی و تعاملات اجتماعی آنها را در قبال سیاست‌های قیمت‌گذاری و آموزش و فرهنگ‌سازی مدل‌سازی کنند. Monroe et al. (2018) چارچوبی چند عامله را به کمک مدل‌سازی عامل بنیان برای شبیه‌سازی حمله به یک سیستم توزیع و دفاع از آن توسعه دادند تا بتوانند استراتژی‌های تخصیص منابع امنیتی برای محافظت در برابر حوادث آلودگی شیمیایی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند. Alvi et al. (2018) با هدف بررسی دقیق میزان مصرف آب، یک چارچوب مدل‌سازی و شبیه‌سازی ترکیبی را ارائه دادند. مدل شبیه‌سازی رفتاری توسعه‌یافته در این مقاله، مصرف آب خانگی را در دو مقیاس میکرو و ماکرو و به کمک یک رویکرد هیبرید که دو رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان و پویایی سیستم را با یکدیگر ادغام می‌کند، مورد بررسی قرار دادند. Xiao et al. (2018) یک روش مدل‌سازی عامل بنیان برای ارزیابی رفتار مصرف‌کنندگان آب را در پی اتخاذ سیاست‌های مدیریت تقاضای آب ارائه کردند. در این مدل، هر عامل استراتژی خاص خود را در مورد صرفه‌جویی در مصرف آب یا مصرف بیشتر برای دستیابی به بازده اقتصادی بهتر دارد و تأثیر رفتارهای عامل‌ها بر بازده اقتصادی خود و تأثیرات تجمعی رفتار فردی بر سیستم بررسی شده است. Tourigny and Filion (2019) نتایج تحلیل حساسیت انجام‌شده در یک مدل عامل بنیان را به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای غیرقطعی بر روی پیش‌بینی مصرف آب و انرژی مصرفی برای پمپاژ و تصفیه آب در یک سیستم توزیع، ارائه دادند. Lin et al. (2020) از مدل‌سازی عامل بنیان برای مدیریت منابع آب و با هدف پرکردن خلاء تحقیقاتی این رویکرد مدل‌سازی در تفسیر نتایج عددی حاصل از مطالعات فرضی به سیاست‌های اجرایی در حوزه مدیریت آب در دنیای واقعی (پیوند دادن یافته‌های عددی حاصل از مدل‌های عامل بنیان با سیاست‌های اجرایی مدیریت آب در یک مورد در دنیای واقعی) استفاده کردند.

۴-۲- پروتکل ODD[33] (بررسی اجمالی، مفاهیم طراحی و جزئیات)

Grimm et al. (2006) یک پروتکل استاندارد تحت عنوان پروتکل ODD را برای توصیف مدل‌های عامل بنیان ارائه دادند که توسط ۲۸ مدل‌ساز با طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها در اکولوژی، توسعه یافته و مورد آزمایش قرار گرفته است. در ادامه Grimm et al. (2010) با بررسی و ارزیابی کاربردهای موجود از نسخه اولیه پروتکل ODD، بخش‌هایی از آن که نیازمند بهبود و شفاف‌سازی بودند را شناسایی و نسخه به‌روزسانی‌شده این پروتکل را ارائه کردند. سپس با توجه به نقش اساسی تصمیمات انسانی در مدل‌سازی عامل بنیان، Müller et al. (2013) نسخه جدیدی از این پروتکل تحت عنوان ODD+D را ارائه کردند. هدف نسخه جدید، توسعه و اصلاح پروتکل به‌منظور ایجاد استانداردی برای توصیف مدل‌های عامل بنیان بود؛ به‌نحوی که تصمیم‌گیری انسانی را نیز درون خود لحاظ کند. این پروتکل در تمامی نسخه‌ها از سه عنصر اصلی (بلوک) شامل (۱) بررسی اجمالی، (۲) مفاهیم طراحی و (۳) جزییات تشکیل شده است؛ ولی در نسخه‌های مختلف از پروتکل ارائه‌شده، المان‌ها (عناصر فرعی) با یکدیگر متفاوت هستند. مزایای بارز استفاده از پروتکل ODD در تحقیقات عامل بنیان، عبارتند از (Grimm et al., 2010): ۱) ترویج فرمولاسیون دقیق از مدل، ۲) تسهیل بررسی و مقایسه مدل‌های عامل بنیان با یکدیگر و ۳) ترویج رویکردهای جامع‌تر به مدل‌سازی و تئوری. لازم به توضیح است که در اینجا صرفاً به شرح مقدمه‌ای از پروتکل ODD که در سال‌های اخیر به‌عنوان استانداردی برای تحقیقات مدل‌سازی عامل بنیان مطرح شده است، اشاره شد. ساختار کامل این پروتکل، شامل شرح مفصلی از المان‌های آن، ارائه مثال‌هایی از کاربرد آن در مقالات و نقد و بررسی نحوه کاربرد آن در تحقیقات گذشته، در مقالات آتی ارائه خواهد شد. همچنین می‌توان با مراجعه به مقالات Burgland (2015)، Koutiva and Makropoulos (2016)، Koutiva and Makropoulos (2017)، Ramsey (2017) و Lin et al. (2020)، نمونه‌های از کاربرد پروتکل ODD را در حوزه مدیریت منابع آب و مدیریت آب شهری که از رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان استفاده کرده و این پروتکل را مبنای استانداردسازی مقالات خود قرار داده‌اند، مشاهده و با نحوه کاربرد این پروتکل در مقالات و تحقیقات معتبر بین‌المللی آشنایی پیدا کرد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به مسئله بحران آب و چالش اصلی در این زمینه طی سالیان گذشته، اهمیت موضوع مصرف آب شهری، چرخه تأمین- تقاضای آب شهری، اهمیت فرآیندهای اجتماعی در حوزه شهری و تعاملاتی که در این حوزه بر اثر اعمال سیاست‌های مدیریت آب شهری بروز می‌کند، پرداخته شد. در ادامه با توجه اینکه مقالاتی که به بررسی جامع در حوزه مدیریت آب شهری پرداخته‌اند، از مفهومی تحت عنوان "سیستم انطباق‌پذیر پیچیده" استفاده کرده‌اند و علت استفاده از این

عنوان در این حوزه را به‌صورت شفاف و برجسته بیان نکرده‌اند، در بخش دوم مقاله به بررسی این موضوع و مفاهیم بنیادی شکل‌گیری آن پرداخته شده است. لذا در این بخش، الزامات و مفاهیمی که پیش‌زمینه پرداختن به این مفهوم هستند از جمله پیچیدگی، سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه به‌عنوان مفاهیمی در ارزیابی‌ها و مدل‌سازی‌های زیست‌محیطی از جمله مدیریت آب شهری شرح داده شدند. در بخش سوم، به بررسی سیستم آب شهری به‌عنوان یک سیستم انطباق‌پذیر پیچیده و علت این نامگذاری پرداخته شد. سپس ساختار چارچوب مفهومی حاصل از چرخه تعاملاتی و فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده محققین پیشین در این حوزه، با مروری بر تعداد زیادی از کتب و تحقیقات گذشته در زمینه مدیریت آب شهری به‌ویژه مدیریت تقاضا، رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان، مفهوم پیچیدگی، سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و یکپارچه‌سازی دانش استخراج و با بررسی‌های عمیق و موشکافانه در حوزه این مفاهیم، شکل گرفت و استخراج شد. در این بخش برای آشنایی بیشتر با مفاهیم ارائه‌شده در این مقاله، به بررسی سیاست‌های مدیریت تقاضای آب شهری با تمرکز بر بخش خانگی، پیچیدگی‌هایی که در این حوزه وجود دارند، گستره تبعات ناشی از اعمال این سیاست‌ها بر جنبه‌های مختلف از جمله اجتماعی، اقتصادی و غیره و نیز رفتارهای نوظهور اجتماعی پرداخته شد. سپس ضرورت مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و مدل‌سازی یکپارچه در این حوزه، با توجه به ماهیت پیچیده سیستم‌های اجتماعی- اکولوژیکی- زیرساختی حاکم بر این حوزه مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نهایتاً در بخش چهارم به معرفی و بررسی رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در مدل‌سازی و ارزیابی سیاست‌های مدیریت آب شهری پرداخته شد.

مطالعات حاکی از دو نوع تبعاتی است که اتخاذ سیاست‌های مدیریت آب شهری، به‌ویژه مدیریت تقاضا می‌توانند درپی داشته باشند: (۱) تبعات مستقیم ناشی از اعمال سیاست‌ها بر جنبه‌های مختلف اجتماعی، زیست‌محیطی و غیره و (۲) تبعات غیرمستقیم ناشی از تأثیر اعمال سیاست‌ها بر سیستم‌های اجتماعی و تشکیل فرآیندهای اجتماعی (میکرو) و بروز پیامدهای ماکرو. همچنین با بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد که در حوزه مدیریت تقاضای آب شهری، سه ذینفع اصلی وجود دارند که عبارتند از: ۱) خانوارها، ۲) شرکت‌های آب و فاضلاب و ۳) زیرساخت‌های شهری. نتایج حاصل از مطالعات انجام‌شده پیرامون ارزیابی و مدل‌سازی جامع در حوزه مدیریت آب شهری، نشان داد که مدل‌سازی در این حوزه شامل دو رویکرد اصلی است: ۱) مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده و ۲) ارزیابی و مدل‌سازی یکپارچه (یکپارچه‌سازی دانش). در نهایت نیز، رویکرد مدل‌سازی عامل بنیان به‌عنوان ابزار قدرتمندی که هم توانایی یکپارچه‌سازی دانش از حوزه‌های مختلف علوم و هم امکان مدل‌سازی سیستم‌های انطباق‌پذیر پیچیده را دارد، معرفی شد و کاربرد آن در حوزه سیاست‌های مدیریت آب شهری و خصوصاً مدیریت تقاضای آب در بخش خانگی بررسی شد و اشاره بسیار مختصری نیز به پروتکل ODD و تنها در حد معرفی، صورت گرفت. در این مقاله با ارائه یک مدل مفهومی و ایجاد ساختاری منسجم از مفاهیم و الزامات در مدل‌سازی و ارزیابی سیاست‌ها در حوزه مدیریت آب شهری و البته به‌طور خاص در حوزه مدیریت تقاضای آب شهری در بخش خانگی، سعی شد تا بینش عمیق و مناسبی برای مدل‌سازان این حوزه ایجاد شود.

پی‌نوشت‌ها

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- Middle East and North Africa
3- Price Policies
4- Non-Price Policies
5- Water Conservation
6- The Urban Water Supply Demand Cycle
7- Stakeholder
8- Complexity
9- Complex Adaptive Systems
10- Integrated Assessment and Modelling
11- Agent-Based Modelling
12- Emergence Behaviors
13- Artificial Intelligence Systems
14- Agent
15- Influence
16- Attribute (Characteristic/Property/Trait)
Aggregation
17- Actor
18- Bottom-up
19- Integrated Treatment of Issues
20- Integration With stakeholders
21- Integration of Disciplines
22- Integration of Processes and Models
23- Integration of Scales of Consideration
24- Analyse Alternatives With Stakeholders
25- Systems Dynamics
26- Bayesian Networks
27- Coupled Component Models
28- Knowledge-Based Models
29- Expert Systems
30- Interactive Cycle and Modeling Process in Urban Water Management
31- Autonomous Entities
32- Geographic Information System
33- Overview, Design Concepts, and Details Protocol

۶- مراجع

Abbaspour F, Jalili Ghazizadeh MR, and Attari J (2017) Impacts of targeted subsidy act on urban water consumption in city of Mashhad. Journal of Water & Wastewater 28(1):65-73 (In Persian)

Alvi MSQ, Mahmood I, Javed F, Malik AW, and Sarjoughian H (2018) Dynamic behavioural modeling, simulation and analysis of household water consumption in an urban area: A hybrid approach. In 2018 Winter Simulation Conference (WSC): 2411-2422

Athanasiadis IN and Mitkas PA (2005) Social influence and water conservation: An agent-based approach. Journal of Computing in Science & Engineering 7(1):65-70

Athanasiadis IN, Mentes AK, Mitkas PA, and Mylopoulos YA (2005) A hybrid agent-based model for estimating residential water demand. Journal of Simulation 81(3):175-187

Auyang SY (1998) Foundations of complex-system theories: in economics, evolutionary biology, and statistical physics. Cambridge University Press

Bach PM, Rauch W, Mikkelsen PS, Mccarthy DT, and Deletic A (2014) A critical review of integrated urban water modeling- Urban drainage and beyond. Environmental Modelling and Software 54:88-107

Baumann DD, Boland JJ, and Hanemann WM (1998) Urban water demand management and planning. McGraw-Hill, Inc., New York

Behboodian M and Kerachian R (2020) Sustainability assessment of basin-wide water supply and demand scenarios using intelligent Decision System (IDS) Model. Journal of Iran-Water Resources Research 15(4):314-327 (In Persian)

Bruch E and Atwell J (2015) Agent-based models in empirical social research. Journal of Sociological Methods & Research 44(2):186-221

Berglund EZ (2015) Using agent-based modeling for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning & Management 141(11):04015025

Chan S (2001) Complex adaptive systems. In ESD. 83 Research Seminar in Engineering Systems 31:1-19

Cheng CL (2002) Study of the inter-relationship between water use and energy conservation for a building. Journal of Energy and Buildings 34(3):261-266

Cheng CL, Peng JJ, Liao WJ, and Chang CW (2016) Relationship between building hot water usage and energy and carbon reduction. Journal of Building Services Engineering Research & Technology 37(6):682–693

Chu J, Wang C, Chen J, and Wang H (2009) Agent-based residential water use behavior simulation and policy implications: A case-study in Beijing City. Journal of Water Resources Management 23(15):3267-3295

Darbandsari P, Kerachian R, and Malakpour-Estalaki S (2017) An agent-based behavioral simulation model for residential water demand management: The case-study of Tehran, Iran. Journal of Simulation Modelling Practice & Theory 78:51-72

Galán JM, López-Paredes A, and Del Olmo R (2009) An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area. Journal of Water Resources Research 45(5)

Giacomoni MH and Berglund EZ (2015) Complex adaptive modeling framework for evaluating adaptive demand management for urban water resources sustainability. Journal of Water Resources Planning and Management 141(11):04015024

Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, Goss-Custard J, Grand T, Heinz SK, Huse G, and Huth A (2006) A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Journal of Ecological Modelling 198(1-2):115-126

Grimm V, Berger U, DeAngelis DL, Polhill JG, Giske J, and Railsback SF (2010) The ODD protocol: A review and first update. Journal of Ecological Modelling 221(23):2760-2768

Hare M and Deadman P (2004) Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management. Journal of Mathematics & Computers in Simulation 64(1):25-40

Heckbert S, Baynes T, and Reeson A (2010) Agent-based modeling in ecological economics. Journal of Annals of the New York Academy of Sciences 1185(1):39-53

Holland JH (2006) Studying complex adaptive systems. Systems Science and Complexity 19(1):1-8

House-Peters LA and Chang H (2011) Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles. Journal of Water Resources Research 47(5)

International Development Research Centre (IDRC) (2010) Water demand management-making the most of the water we have. Available on: https://www.idrc.ca/en/article/water-demand-management-making-most-water-we-have

Kandiah VK, Zechman EM, and Binder AR (2013) An agent-based modeling approach to simulate the

Mashhadi Ali A, Shafiee ME, and Berglund EZ (2017) Agent-based modeling to simulate the dynamics of urban water supply: Climate, population growth, and water shortages. Journal of Sustainable Cities & Society 28:420-434

Miller JH and Page SE (2009) Complex adaptive systems: An introduction to computational models of social life. Princeton University Press

Monroe J, Ramsey E, and Berglund E (2018) Allocating countermeasures to defend water distribution systems against terrorist attack. Journal of Reliability Engineering & System Safety 179:37-51

Müller B, Bohn F, Dreßler G, Groeneveld J, Klassert C, Martin R, Schlüter M, Schulze J, Weise H, and Schwarz N (2013) Describing human decisions in agent-based models–ODD+ D, an extension of the ODD protocol. Journal of Environmental Modelling & Software 48:37-48

Pahl-Wostl C and Hare M (2004) Processes of social learning in integrated resources management. Journal of Community and Applied Social Psychology 14(3):193-206

Parker P, Letcher R, Jakeman A, Beck MB, Harris G, Argent RM, Hare M, Pahl-Wostl C, Voinov A, Janssen M, and Sullivan P (2002) Progress in integrated assessment and modeling. Journal of Environmental Modelling & Software 17(3):209-217

Pouladi P, Afshar A, Afshar MH, Molajou A, and Farahmand H (2019) Agent-based socio-hydrological modeling for restoration of Urmia Lake: Application of theory of planned behavior. Journal of Hydrology 576:736-748

Railsback SF (2001) Concepts from complex adaptive systems as a framework for individual-based modeling. Journal of Ecological Modelling 139(1):47-62

Ramsey E, Berglund EZ, and Goyal R (2017) The impact of demographic factors, beliefs, and social influences on residential water consumption and implications for non-price policies in urban India. Journal of Water 9(11):844

Ramsey EV (2017) Coupling agent-based modeling and a genetic algorithm to simulate adoption of dual-flush toilets using household survey data. M.Sc. Thesis, Raleigh, North Carolina

Sanford Bernhardt KL and McNeil S (2008) Agent-based modeling: Approach for improving infrastructure management. Journal of Infrastructure Systems 14(3):253-261

influence of consumer behavior on infrastructure performance for urban water reclamation management. In World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future, 2299-2306

Kanta L and Zechman E (2013) Complex adaptive systems framework to assess supply-side and demand-side management for urban water resources. Journal of Water Resources Planning & Management 140(1):75-85

Kelly RA, Jakeman AJ, Barreteau O, Borsuk ME, ElSawah S, Hamilton SH, Henriksen HJ, Kuikka S, Maier HR, Rizzoli AE, and van Delden H (2013) Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. Journal of Environmental Modelling & Software 47:159-181

Keshavarzi AR, Sharifzadeh M, Kamgar Haghighi AA, Amin S, Keshtkar S, and Bamdad A (2006) Rural domestic water consumption behavior: A case study in Ramjerd area, Fars province, I.R. Iran. Journal of Water Research 40(6):1173–1178

Koutiva I & Makropoulos C (2016) Modelling domestic water demand: An agent based approach. Journal of Environmental Modelling & Software 79:35-54

Koutiva I & Makropoulos C (2017) Exploring the effects of domestic water management measures to water conservation attitudes using agent based modelling. Water Science and Technology: Water Supply 17(2):552-560

Lin Z, Lim SH, Lin T, & Borders M (2020) Using agent-based modeling for water resources management in the Bakken region. Journal of Water Resources Planning and Management 146(1):05019020

Liu Y, Sun F, Zeng S, Lauzon K, and Dong X (2016) Integrated model driven by agent-based water end-use forecasting to evaluate the performance of water and wastewater pipeline systems. Journal of Water Resources Planning & Management 142(10)

López-Paredes A, Saurí D, & Galán JM (2005) Urban water management with artificial societies of agents: The FIRMABAR simulator. Journal of Simulation 81(3):189-199

Maleki Nasab A, Abrishamchi A, and Tajrishy M (2007) Assessment of residential water conservation due to using low-flow fixtures. Journal of Water & Wastewater 18(2):2-11 (In Persian)

Maleki Nasab A, Tabesh M, and Ghalibaf Sarshoori M (2010) Assessment of household water saving due to using water-efficient fixtures and faucets. Journal of Iran-Water Resources Research 6(2):36-45 (In Persian)

low-flow fixtures for residential water conservation and evaluate energy savings in a Canadian water distribution system. Journal of Water Resources Planning & Management 145(1):04018086

Tsegaye S and Vairavamoorthy K (2009) Agent-based modeling to estimate residential water demand and to explore optimal demand side water management strategies. Work undertaken through WEDC: Water Engineering Development Centre (Funded by the SWITCH: Managing Water for the City of the Future)

Voinov A and Shugart HH (2013) 'Integronsters', integral and integrated modeling. Journal of Environmental Modelling & Software 39:149-158

Xiao Y, Fang L, and Hipel KW (2018) Agent-based modeling approach to investigating the impact of water demand management. Journal of Water Resources Planning and Management 144(3):04018006

Yuan XC, Wei YM, Pan SY, and Jin JL (2014) Urban household water demand in Beijing by 2020: An agent-based model. Journal of Water Resources Management 28(10):2967-2980

Zechman EM (2007) Agent-based modeling to simulate contamination events and to analyze threat management strategies in water distribution systems. In World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat, Tampa, Florida, USA

Zechman EM (2011) Agent-based modeling to simulate contamination events and evaluate threat management strategies in water distribution systems. Journal of Risk Analysis: An International Journal 31(5):758-772

Shafiee M and Zechman EM (2011) An agent-based modeling approach to evaluate protective action strategies in a water distribution contamination event. In World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability, 276-282

Shahangian SA, Tabesh M, Safarpour H, Khashei M, and Abbasi M (2019a) Presentation of the integrated and comprehensive framework in assessment of water demand management policies. 2nd National Conference on Water Consumption Management, Loss Reduction and Reuse, Tehran, Iran (In Persian)

Shahangian SA, Tabesh M, Safarpour H, Khashei M, and Abbasi M (2019b) The review of the water demand management policies impacts in the urban water supply-demand cycle, application of agent-based modelling approach. 2nd National Conference on Water Consumption Management, Loss Reduction and Reuse, Tehran, Iran (In Persian)

Shahangian SA, Tabesh M, and Safarpour H (2020) Agent-based modeling, a powerful approach to evaluating urban water demand management policies in the household sector; investigating the essential requirements and principal concepts in modeling structure. 8th Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems (CFIS2020), Mashhad, Iran (In Persian)

Stavenhagen M, Buurman J, and Tortajada C (2018) Saving water in cities: Assessing policies for residential water demand management in four cities in Europe. Journal of Cities 79:187-195

Tabesh M, Behboudian S, and Beygi S (2015) Long term prediction of drinking water demand: (Case study of neyshabur city, Iran). Journal of Iran-Water Resources Research 10(3):14-25 (In Persian)

Tourigny A and Filion Y (2019) Sensitivity analysis of an agent-based model used to simulate the spread of