Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 5, No. 4, PP. 4-15, Winter 2021
DOI: 10.22112/jwwse.2020.217579.1185

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال پنجم، شماره ۴، صفحات ۴-۱۵، زمستان ۱۳۹۹

Review Paper

Requirements and Roadmap of Smart Water Distribution Network

Shervin Jamshidi*
Assistant Professor of Environmental Engineering-Water Resources, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
* Corresponding author, Email: sh.jamshidi@eng.ui.ac.ir

Received: 15/02/2020
Revised: 23/05/2020
Accepted: 02/06/2020
© IWWA

Abstract

Water Distribution Networks (WDN) are amongst the six pillars of smart urban infrastructures which can be managed without or in connection with other smart grids. This research uses an adaptive study to review and compare the approaches and international experiences of smart WDNs. The comparative results initially verify that smart WDN can relatively reduce bursts, leakage, and the reaction time required for operation in comparison with SCADA. In addition, it improves asset management, social awareness about water consumption, the satisfaction of users, water quality, and the revenues of water companies. This study also outlines that smart WDN is a multidisciplinary issue and requires consecutive steps for implementation as described in the Spiral model. This conceptual model is more like a roadmap. It introduces a methodology for upgrading SCADA to smart WDNs and illuminates practical steps, in addition to the short and long term scopes, toward integrated supply and demand management of urban water. Here, the proposed methodology emphasizes pilot studies in different scales and conditions for the validation of integrated software-hardware system prior to any practice.

Keywords: Adaptive Study, SCADA, Smart Infrastructure, Spiral Model, Water Distribution Network (WDN).

مقاله مروری

الزامات و نقشه راه هوشمندسازی شبکه توزیع آب شهری

شروین جمشیدی*
استادیار مهندسی محیط‌زیست- منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: sh.jamshidi@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۶
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۳
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

شبکه توزیع آب یکی از زیرساخت‌های شش‌گانه در شهرهای هوشمند است که می‌تواند به‌صورت مستقل یا هماهنگ با سایر زیرساخت‌ها مدیریت و بهره‌برداری شود. پژوهش حاضر با انجام مطالعات تطبیقی و بررسی رویکردها و تجربیات بین‌المللی و مقایسه آن با شرایط کنونی در کشور نشان می‌دهد که اولاً شبکه هوشمند توزیع آب شهری نسبت به روش‌های اسکادا از تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار است و می‌تواند ضمن کاهش تلفات آب، زمان عکس‌العمل به وقایع بهره‌برداری را کاهش دهد. به‌علاوه این رویکرد می‌تواند موجب ارتقای بهره‌وری سیستم و کیفیت آب، بهبود مدیریت تجهیزات، افزایش درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب و در بلندمدت موجب افزایش آگاهی‌های عمومی برای کاهش سرانه مصرف و افزایش رضایتمندی مشترکین شود. ثانیاً این مطالعه تأکید دارد که ارتقای شبکه توزیع آب به سامانه‌های هوشمند موضوعی چندوجهی (فنی، بهره‌برداری، اجتماعی) است و لازم است مطابق مدل مفهومی اسپایرال، چندین مرحله به‌صورت متوالی انجام شود تا بتوان ادعا نمود شبکه توزیع آب هوشمند شده است. این مدل مفهومی به‌صورت یک نقشه راه، متدولوژی ارتقای سامانه‌های اسکادا به هوشمند را تبیین نموده و ضمن مرحله‌بندی اقدامات، فرآیند را در راستای مدیریت توأمان عرضه و تقاضای آب شهری به‌صورت کوتاه‌مدت و بلندمدت هدف‌گذاری می‌کند. هم‌چنین، روش پیشنهادی تأکید دارد که سامانه سخت‌افزاری-نرم‌افزاری ابتدا باید تحت شرایط کنترل شده برای سناریوهای مختلف واسنجی شده و پس از چندمرحله مطالعات پایلوت توسعه داده شود.

واژه‌های کلیدی: اسکادا، زیرساخت هوشمند، شبکه توزیع آب، مطالعات تطبیقی، مدل اسپایرال.

۱- مقدمه

شهرهای هوشمند به شهرهایی گفته می‌شود که در آن‌ها بهره‌برداری زیرساخت‌های شهری مانند بزرگراه‌ها، خطوط ریلی و حمل و نقل، مدیریت انرژی و توزیع، جمع‌آوری و تصفیه آب، برمبنای اطلاعات رقومی برخط بوده و فناوری‌های اطلاعاتی و مخابراتی (ICT)[1] برای مدیریت اینگونه داده‌ها استفاده می‌شود. در این شرایط انتظار می‌رود کیفیت و عملکرد خدمات شهری ارتقا یافته و درنتیجه هزینه‌ها و مصرف منابع مالی، طبیعی و نیروی انسانی کاهش یابد. ویژگی سامانه‌های هوشمند، پایش مستمر و واکنش فوری نسبت به حوادث و چالش‌های بهره‌برداری است. در این راستا، اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۰ مجموعه برنامه‌هایی را با تمرکز بر ایجاد خلاقیت و سرمایه‌گذاری در بخش فناوری‌های اطلاعاتی و مخابراتی آغاز نمود. در این برنامه برآورد شده است که هوشمندسازی قادر است بازاری معادل ۴۰۰ میلیارد دلار تا سال ۲۰۲۰ داشته باشد و شهرهایی نظیر آمستردام (هلند)، بارسلونا (اسپانیا)، وین (اتریش) و استکهلم (سوئد) از اروپا به‌همراه سنگاپور به‌عنوان پیشگامان هوشمندسازی قدم در این حوزه نهاده‌اند (Lee et al., 2015). مطابق گزارش (Eden Strategy Institute 2018) و براساس شاخص‌های تعریف شده و امتیازهای اخذ شده در تمامی زمینه‌های فنی- سیاسی- اجتماعی و اقتصادی، در حال‌حاضر شهرها با بالاترین امتیاز هوشمندی در دنیا به‌ترتیب لندن (انگلستان)، سنگاپور، سئول (کره‌جنوبی)، نیویورک (آمریکا) و هلسینکی (فنلاند) هستند و در رده‌های بعدی مونترال (کانادا)، بوستون (آمریکا)، ملبورن (استرالیا)، بارسلونا (اسپانیا) و شانگهای (چین) قرار دارند.

پیش‌زمینه هوشمندسازی در کلیه زیرساخت‌های شهری، وجود ساختارهای نرم‌افزاری و سخت‌افزاری است. به‌طور معمول هوشمندسازی شامل ۵ لایه متوالی است که لازم است به‌ترتیب توسعه یابد (Scolnicov, 2011):

۱- لایه فیزیکی (سخت‌افزاری و تجهیزات)؛
۲- لایه کنترل و پایش آنلاین؛
۳- لایه نصب و راه‌اندازی دستگاه‌های مخابراتی و اطلاعاتی؛
۴- لایه جمع‌آوری، مستندسازی و مدیریت اطلاعات؛
۵- لایه پردازش اطلاعات و ارائه دستور عملیاتی

در شبکه آب شهری، سامانه‌هایی که لایه‌های هوشمندسازی پنج‌گانه فوق را تکمیل کرده باشند قادر خواهند بود به‌محض وقوع یک حادثه در شبکه، مانند ترکیدگی یا انتشار آلودگی، منشأ رویداد را در مدت زمان کوتاه پیدا کنند و باتوجه به بازخوردهای ثبت شده از پردازش سیستم، تدابیر اجرایی و عملیاتی برای رفع و رجوع آن ارائه کنند. در این روش، سامانه هوش مصنوعی (نرم‌افزار) پس از برقراری ارتباط از طریق لاگرها و خطوط ارتباطی با سامانه سخت‌افزاری (شیرآلات در مسیر لوله، شیر فشارشکن، ایستگاه پمپاژ، مخازن و غیره)، به‌صورت مستمر شبکه را از نظر فشار، دبی و کیفیت آب مورد پایش قرار می‌دهد. این اطلاعات پس از قرائت‌های رقومی توسط دستگاه‌های برخط، و از طریق سامانه‌های ارتباطی به مرکز داده منتقل می‌شوند و نرم‌افزار کالیبره‌شده به‌صورت دوره‌ای شبیه‌سازی کمی و کیفی شبکه آبرسانی را انجام می‌دهد. درصورتی‌که وضعیت کیفی یا کمی شبکه از محدوده‌های تعریف‌شده فراتر رود یا نوسانات قابل‌ملاحظه‌ای از خود نشان دهد، نرم‌افزار می‌تواند در مدت‌زمان کوتاه و به‌صورت اتوماتیک، دستوراتی را به سامانه‌های کنترلی نظیر پمپ‌ها، فشار شکن‌ها و یا شیرآلات قطع و وصل جریان ارسال نماید تا با سعی و خطا محل و منشأ بروز حادثه را شناسایی کند. بدیهی است سرعت عمل بیشتر سامانه‌های هوشمند موجب کاهش هدررفت آب و هدفمندشدن عملیات بهره‌برداری خواهد شد، به‌طوری‌که تیم بهره‌برداری از محل تقریبی حادثه و شدت آن آگاهی داشته و برای بازرسی و تعمیرات احتمالی اعزام خواهند شد. این روش می‌تواند با توجه به دشواری‌ها و محدودیت‌های مالی- انسانی مربوط به انواع روش‌های نشت‌یابی، موجب ارتقای بهره‌برداری از تأسیسات شده و به کلیه بخش‌های سامانه آبرسانی، شامل تصفیه‌خانه آب، شبکه توزیع، مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ توسعه داده شود (Hancke et al., 2013; Kashid and Pardeshi, 2014). بنابراین، یک سامانه هوشمند ایده‌آل برای تأمین و تصفیه آب شرب شهری شامل یک ساختار یکپارچه نرم‌افزاری- سخت‌افزاری است که به‌عنوان مثال می‌تواند براساس کیفیت آب در مخازن شهری، میزان دوز ماده منعقدکننده یا زمان شستشوی فیلترها را در تصفیه‌خانه تنظیم نماید، یا براساس نوسانات مصرف شهروندان، برنامه عملکرد پمپ‌ها و زمان ماند آب در مخازن را تنظیم کند.

در حال حاضر در کشور ایران، شرکت‌های آب و فاضلاب از سیستم‌های اسکادا[2] برای کنترل شبکه آبرسانی و اجزای آن استفاده می‌کنند. هم‌چنین، در بخش‌هایی از شهرهای بزرگ مانند تهران و مشهد طی سالیان اخیر سامانه‌های مخابراتی و اطلاعاتی برای ارسال دستورات برای تنظیم فشار و دبی در شبکه در قالب یک نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما توجه به‌این نکته ضروری است که یک سامانه آبرسانی باید بتواند هر پنج لایه فوق را عملیاتی کند تا به اصطلاح هوشمند باشد. به‌عبارت دیگر بین

یک سامانه اسکادا و هوشمند هم‌چنان فاصله بسیار است و لازم است این فاصله برای مجریان تبیین شود. بنابراین، هدف از این پژوهش، تفکیک جایگاه سامانه‌های هوشمند از اسکادا و الزامات اجرایی برای ارتقای سامانه‌های اسکادا به هوشمند است. بدین منظور، این مقاله با استفاده از یک مطالعه تطبیقی[3] تفصیلی و با توجه به رویکردهای جهانی و اقدامات اجرایی در کشور و در قالب یک نقشه راه، برای نخستین بار مدل مفهومی برای تبیین و تعریف سامانه هوشمند ارائه می‌کند که می‌تواند برای هدفگذاری، ترسیم چشم‌انداز و تبیین متدولوژی در این صنعت مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مطالعات تطبیقی

سامانه‌های هوشمند قادر هستند با تعیین ضریب زبری لوله‌ها، ثبت میزان دفعات بروز حوادث و نشت و باتوجه به سابقه اطلاعاتی فشار در شبکه، مناطق آسیب‌پذیر را شناسایی کرده و در اولویت تعویض قطعات (لوله و اتصالات) قرار دهند (Sensus, 2012). هوشمندسازی یک گام فراتر از روش اسکادا است که دارای مزایای زیر خواهد بود:

۱- کاهش هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی و عملیات بهره‌برداری برای شناسایی محل حادثه؛

۲- کاهش زمان شناسایی محل ترکیدگی لوله و درنتیجه کاهش حجم تلفات آب؛

۳- تعیین مقادیر آب بدون درآمد به تفکیک در تمامی مناطق تحت پوشش به‌صورت برخط؛

۴- تعیین شرایط و ضرایب دقیق بهره‌برداری شبکه آبرسانی مانند دبی اوج مصرف و حداقل جریان شبانه، ضریب زبری لوله‌ها، میزان افت‌های طولی و موضعی، زمان ماند آب در شبکه آبرسانی و همبستگی آن با مشخصات کیفی آب؛

۵- مدیریت بحران و پدافند غیرعامل در شبکه و تأسیسات آبرسانی؛

۶- برآورد خطای قرائت کنتورها به تفکیک مشترکین باتوجه به داده‌های قرائت‌شده و شبیه‌سازی‌شده و شناسایی مشترکین پرمصرف؛

۷- پایش کیفیت آب (مانند کدورت، کلر و pH) از خروجی مخزن تا ورودی به کنتور مشترکین؛

۸- تعیین شرایط بهره‌برداری و حجم آب تصفیه‌شده مورد نیاز با توجه به مصرف و شرایط پیش‌بینی‌شده شبکه؛

۹- شفاف‌سازی وضعیت کمی و کیفی آب برای مشترکین و در بلندمدت فرهنگ‌سازی جهت تنظیم الگوی مصرف.

در این خصوص مطالعات انجام شده به‌صورت مصاحبه و نظرسنجی از خبرگان توسط شرکت Sensus (2012) برای ترسیم یک نقشه راه فناوری و تجاری نشان داده است که در حوزه شبکه توزیع آب شهری، بازار سنسورهای پایش برخط و با دقت اندازه‌گیری بازه‌های زمانی کوتاه (مانند ساعتی) برای پارامترهای جریان، فشار، کیفیت و سنجش مصرف آب در افق ۲۰۲۰ نسبت به وضعیت سال ۲۰۰۰ افزایش می‌یابد و بازار سنسورهای اندازه‌گیری حجمی ماهانه (به‌ویژه برای مصرف آب) افت خواهد کرد. این بدان معنی است که بازار زیرساخت‌های سخت‌افزاری با توجه به رویکردهای سنجش آنلاین و هوشمندسازی شبکه حفظ شده و ارتقا خواهد یافت. همین شرکت به‌طور مشابه در یک نظرسنجی و مصاحبه دیگر نشان داده است که رویکردهای آتی در توسعه شبکه‌های توزیع آب شهری و سخت‌افزارهای پایش بیشتر متمرکز بر کاهش نشت، کاهش سرانه مصرف آب و بهبود مدیریت فشار و انرژی خواهد بود که اهداف اصلی هوشمندسازی را شکل می‌دهند (Sensus, 2012). هم‌چنین، مطابق برآورد این شرکت، تلفات شبکه آبرسانی در اروپا در بخش شهری بطور متوسط ۲۰٪ است که سالانه ۱۰ میلیارد دلار خسارت به همراه دارد. کاهش ۵٪ در نشت‌های موجود در شیرآلات و اتصالات[4] و ۱۰٪ در ترکیدگی‌های لوله[5] می‌تواند تا ۴/۵ میلیارد دلار در سال صرفه‌جویی به‌همراه داشته باشد. در این خصوص، استفاده از سامانه‌های اسکادا می‌تواند بخشی از این تلفات را کاهش دهد؛ اما هوشمندسازی قادر است این ۱۵٪ را تقریباً به‌طور کامل حذف نماید. زیرا از این توانایی برخوردار است تا ترکیدگی را به‌سرعت شناسایی کند و دستور بهره‌برداری و تعمیرات را ارسال نماید. هم‌چنین، بخش دیگر هزینه‌های بهره‌برداری شامل مدیریت تجهیزات[6] است که اگر به‌موقع خرید، بازسازی و تعمیر شوند و از تجهیزات اتوماتیک و برخط برای اعمال دستورات بهره‌برداری استفاده شود می‌تواند در مجموع ۵/۲ میلیارد دلار دیگر نیز در سال در منطقه مورد مطالعه صرفه‌جویی داشته باشد (Sensus, 2012).

Suciu et al. (2017) در قالب یک مطالعه مروری و نظرسنجی از خبرگان در کشور رومانی به این نتیجه رسیدند که بهره‌گیری از هوش مصنوعی در مدیریت و توزیع آب مورد نیاز کشور است و باید در سه مرحله: ۱) گردآوری اطلاعات با استفاده از اینترنت اشیا[7] و سنسورها؛ ۲) مخابره و پردازش اطلاعات با استفاده از تجهیزات، اینترنت و ابرهای اطلاعاتی[8] و ۳) تصمیم‌گیری شامل مدیریت تلفات و نشت، مدیریت بهره‌برداری از شبکه، برنامه‌ریزی

برای تأمین و تصفیه آب و مدیریت تقاضا انجام شود. همچنین Fantozzi et al. (2014) از همین ساختار و متدولوژی برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب شهر میلان از نظر مصرف انرژی استفاده کردند. آن‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار توسعه‌یافته و سامانه‌های تصمیم‌گیری پشتیبان[9] گزینه بهینه و برنامه عملکرد ایستگاه‌های پمپاژ و شیرهای فشارشکن را تعیین نمودند.

Hajebi et al. (2013) تأکید دارند که هوشمندسازی مبتنی بر داده‌ها و فناوری ارتباطات یک فرآیند مخابراتی دوطرفه است که باید در آن داده‌ها گردآوری و مخابره شده و پس از پردازش، بازخوردهای آن در قالب پیش‌بینی و فرمان به سامانه مجدداً مخابره شود. این فرآیند باید به‌صورت مداوم انجام شود درحالی‌که در بسیاری از کشورها فناوری‌های مورد استفاده صرفاً محدود به سامانه‌های اسکادا شده است که فرآیند هوشمندسازی را به‌صورت یک سامانه یک‌طرفه و محدود انجام می‌دهد. در این شرایط بهینه‌سازی کیفی و مصرف انرژی نمی‌تواند با کارایی بالا صورت پذیرد. این موضوع به‌طور مشابه در سامانه‌های توزیع برق در مناطق شهری نیز پیشنهاد شده است تا از طریق یک شبکه هوشمند[10] بتوان به‌صورت دوطرفه از نیروگاه به مصرف‌کننده و برعکس توزیع برق داشت. این موضوع باعث افزایش بهره‌وری، کاهش تلفات، کاهش فشار بر منابع تأمین‌کننده انرژی، بهبود رضایت مصرف‌کنندگان، ارتقای عمر تأسیسات و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. به‌علاوه، امکان ایجاد اشتغال و رونق تولید داخلی در زمینه‌های ساخت سنسورها و تجهیزات، مدیریت و امنیت شبکه، بهره‌برداری و ارتقای سامانه‌های مخابراتی فراهم می‌شود (Gungor et al., 2012).

براساس نتایج مطالعه Thompson et al. (2012) در کشور استرالیا مشخص شد که استفاده از سامانه نرم‌افزاری ساخت شرکت TakaDu و سرور آمازون در شهرهای این کشور توانسته است نسبت به روش اسکادا صرفه‌جویی بالغ بر ۳۵٪ در مصرف آب به‌همراه داشته باشد. این در حالی است که هوشمندسازی حتی می‌تواند به‌همین نسبت به درآمدهای ناشی از تبدیل آب بدون درامد به آب قابل فروش کمک نماید. در این مطالعه هم‌چنین برآورد شده است که هرچند راه‌اندازی سامانه‌های هوشمند به‌دلیل نیاز به تجهیزات آنلاین، مخابراتی و نمونه‌برداری بین ۱۰ تا حداکثر ۲۵٪ به هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از تأسیسات آبرسانی می‌افزاید. اما قادر است تا ۳۰٪ از هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی و پرسنل بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری شبکه، مصرف انرژی، مصرف مواد شیمیایی (مانند کلر) و پایش شبکه کم کند. هم‌چنین، هوشمندسازی شبکه توانسته است به‌روش مثلث‌یابی منجر به کاهش زمان شناسایی ترکیدگی، حداقل به میزان ۲ ساعت پیش از شناسایی محلی و میدانی شود. دیگر دستاوردهای فنی و عملیاتی هوشمندسازی نسبت به اسکادا در طی ۱۸ ماه مطالعه در کشور استرالیا برای ۸۷ هزار مشترک شامل موارد زیر است (Thompson et al., 2012):

۱- تعدیل ۱۰٪ فشار شبکه و صرفه‌جویی معادل ۲۰ میلیون دلار ناشی از کاهش نیاز به تأسیس و اجرای زیربناهای جدید برای ۴ سال آتی؛

۲- کنترل نشت و ترکیدگی لوله‌ها تا ۲۵٪ و کاهش ماهانه ۴۰۰ مورد حوادث در شبکه آبرسانی؛

۳- افزایش دقت در قرائت مصرف آب و صدور قبوض بین ۵۰ تا ۹۰٪ (وابسته به منطقه و کیفیت کنتورها) و کاهش زمان قرائت پارامترهای کمی و کیفی شبکه آبرسانی به کمتر از ۱۵ دقیقه و افزایش دقت تا ۹۹٪ در این زمینه.

در همین راستا در شهر ملبورن استرالیا به‌طور خاص با جمعیت ۱/۶ میلیون نفر (بیش از ۶۰۰ هزار مشترک)، پس از گذشت سه ماه از اجرای هوشمندسازی، نسبت به روش اسکادا تا ۱۱٪ صرفه‌جویی در مصرف آب معادل سالانه ۳/۸ میلیون مترمکعب حاصل شده است. هم‌چنین، در طی یک سال، تا ۲۷۰ مورد انتقادات درخصوص قرائت ناصحیح کنتور و صدور قبوض آب کاهش یافته و زمان شناسایی ترکیدگی لوله و تعمیر خطوط که پیشتر توسط اسکادا تا ۱۴ روز گزارش شده بود، در برخی موارد به کمتر از نصف روز می‌رسد. این نکته حائز اهمیت است که مطابق همین نتایج برآورد شد میزان صرفه‌جویی ۱۱٪ در مصرف آب به روش هوشمندسازی می‌تواند نیاز شهر به ارتقای تصفیه‌خانه آب را تا ۷ سال و شبکه آبرسانی را تا ۵ سال آتی رفع نماید و در مجموع ۱۰ میلیون دلار هزینه ساخت و ۳ میلیون دلار هزینه بهره‌برداری سالانه را کاهش دهد.

Kumura et al. (2015) گزارشی از توسعه یک مدل هوشمند با همکاری امپریال کالج لندن ارائه نموده‌اند که در آن پیش‌بینی شده است مجموع هزینه‌های ساخت و بهره‌برداری از شبکه آب آشامیدنی در کشور ژاپن از ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۵ درحدود ۲/۳ برابر رشد می‌کند که درصورت بهره‌گیری از سامانه‌های هوشمند توزیع آب آشامیدنی می‌تواند تا ۱۰ میلیارد دلار (سال ۲۰۲۵) معادل ۲۵٪ هزینه‌های کل ساخت و بهره‌برداری از شبکه و بیش از ۵۰٪ هزینه‌های بهره‌برداری شبکه توزیع آب آشامیدنی در آن کشور را کاهش داد. در این پژوهش مشترک با کشور ژاپن با استفاده از مطالعات سخت‌افزاری (پایلوت) و نرم‌افزاری، پدیده ضربه قوچ ناشی از باز و بسته شدن سریع شیرها در شبکه آبرسانی بصورت

پایلوت تست شده و با استفاده از سنسورهای مکانیکی و براساس تغییرات فشار آب و لرزش‌های ثبت شده، زمان و محل ترکیدگی پیش‌بینی شده و تشخیص داده شده است. در این مطالعات شبکه آبرسانی ابتدا به‌صورت پایلوت آزمایشگاهی بررسی شده و مسائلی هم‌چون ترکیدگی لوله و کیفیت آب به‌عنوان هدف مدنظر قرار گرفته است تا نرم‌افزار فرمان توسعه یابد. این موضوع هم‌چنین به‌طور مشابه در سال‌های قبل در همین کشور توسط شرکت هیتاچی نیز مورد بررسی قرار گرفته بود؛ زیرا بخش قابل‌ملاحظه‌ای از آب شرب شهرهای ژاپن از سامانه‌های نمک‌زدایی تحت مدیریت این شرکت تأمین می‌شود و بهینه‌سازی کمی و کیفی آب و کاهش هدررفت و تلفات در مسیر انتقال می‌تواند برای این شرکت با توجه به هزینه‌های تصفیه و بازچرخانی آب ارزش افزوده به‌همراه داشته باشد (Mizuki et al., 2012).

در طرح هوشمندسازی آبرسانی بخشی از کانزاس آمریکا با جمعیت ۲۸۰۰۰ نفر و ۱۱۰۰۰ مشترک (سال ۲۰۱۰)، این امکان فراهم شد که با سرمایه‌گذاری اولیه معادل تقریباً ۳۰۰ دلار بازای هر مشترک برای تعویض کنتورها و نصب سامانه‌های مخابراتی، بازه قرائت کنتورها از دوره‌های ماهانه به دوره‌های ساعتی کاهش یابد. این ظرفیت به تنهایی توانست زمینه‌ساز تعرفه‌گذاری عادلانه آب در این شهر براساس میزان مصرف نسبت به پیک ساعتی و فشار شبکه شود و موجب بازگشت سرمایه اولیه در طی ۳ سال شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

مطابق مطالعات انجام شده در کشور سنگاپور توسط Whittle et al. (2013)، هوشمندسازی بخشی از شهر سنگاپور با استفاده از تحلیل‌های دوره‌ای نرم‌افزار و ارائه بازخوردها توانست در طی چند ساعت، چندین نشت کوچک و یک ترکیدگی بزرگ را شناسایی کند که در روش متعارف اسکادا شناسایی نشده بود. به‌طور مشابه مطالعات انجام شده در شهر Belo Horizonte برزیل نشان داده است که در محدوده مورد مطالعه با ۶ میلیون نفر جمعیت و ۴۰ هزار کیلومتر شبکه آبرسانی، سامانه هوشمند نسبت به سامانه متعارف اسکادا توانسته است تا ۱۴٪ زمان عکس‌العمل به ترکیدگی لوله‌ها را کاهش دهد. هم‌چنین زمان تعمیرات و اتلاف آب در شبکه تا ۳۳٪ نسبت به روش اسکادا کاهش یافته است (Larrauri, 2011). در برآورد انجام شده در کشور قطر با جمعیت شهری (دوحه) معادل ۱/۴ میلیون نفر و ۲۵۰۰ کیلومتر شبکه آبرسانی، پیش‌بینی شده است پس از هوشمندسازی طی ۴ سال، میزان آب بدون درآمد به نصف کاهش یابد که معادل سالانه صرفه‌جویی مالی در حدود ۱۴ میلیون یورو است. هزینه محاسبه شده معادل مجموع هزینه‌های مربوط به آب‌شیرین‌کن‌ها، میزان مصرف انرژی و پمپاژ آب است (Larrauri, 2011).

هوشمندسازی و بهره‌گیری از سامانه‌های اندازه‌گیری برخط، هم‌چنین این امکان را فراهم می‌سازد تا کارشناسان و محققین با استفاده از داده‌ها و سری زمانی آن‌ها بتوانند با الگوهای مختلف، مانند روش‌های آماری (McKenna et al., 2014)، الگوی مصرف و تقاضای آبی شهروندان را بررسی نموده و طبقه‌بندی نمایند. به‌عنوان مثال، این امکان فراهم می‌شود که الگوی مصرف بخش تجاری و مسکونی از یکدیگر تفکیک شده و در بلندمدت پایداری این الگوی مصرف کنترل شود.

براساس یک نظرسنجی و مصاحبه مفصل انجام شده در دو کشور استرالیا و نیوزیلند با دست‌اندرکاران و خبرگان صنعت آب شامل ۴۸ شرکت ساخت و بهره‌برداری با قابلیت سرویس‌دهی بالغ بر ۶ میلیون مشترک مشخص شد که ۸۰٪ این صنعت در زمان نظرسنجی فعال بوده و ۶۶٪ برای یک‌سال آینده خود پروژه در دست اجرا یا بهره‌برداری دارند. اکثر پروژه‌های مطالعاتی در این بازار با هدف مدیریت و ارتقای عمر تجهیزات آبرسانی از طریق شناسایی زمان حداکثر مصرف و مدیریت تقاضا تعریف شده است و پروژه‌های اجرایی نیز متمرکز بر افزایش دقت تجهیزات و سنجش‌گرها است. بدین منظور پروژه‌های مطالعاتی برای کاهش عدم‌قطعیت ناشی از سنجش و پردازش اطلاعات اکثراً (۵۱٪) به‌صورت دوطرفه، یعنی با استفاده از بازخورد مصرف مشترکین تعریف شده‌اند. اقدامات انجام شده از سال ۲۰۱۴ در این کشورها توانسته است آگاهی عمومی را نسبت به الگوی مصرف آب ارتقا داده و رضایتمندی بیشتر مشترکین را به‌همراه داشته باشد. به‌عنوان نمونه دو شرکت خدماتی در حوزه توزیع آب، میزان کاهش مصرف آب مشترکین در بلندمدت ناشی از افزایش آگاهی و بهبود الگوی مصرف را بیش از ۱۰٪ گزارش کرده‌اند (Beal and Flynn, 2014).

Harou et al. (2014) در قالب پروژه $SmartH_2O$ (۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷) در کشورهای انگلستان و سوئیس امکان بهره‌مندی از یک پلتفرم مخابراتی را بررسی نمودند که در آن با استفاده از شبکه‌های اجتماعی همراه با سامانه‌های اندازه‌گیری و سنسورهای برخط بتوان قیمت‌گذاری و تعرفه‌گذاری هوشمند آب را برای مدیریت بهتر مصرف و تقاضا و تغییر الگوی رفتاری مصرف آب خانوارها عملیاتی نمود. در این پژوهش تأکید شده است که شفاف‌سازی داده‌های آنلاین از میزان مصرف و کیفیت آب می‌تواند در مدیریت خدمات و بالطبع تعرفه‌گذاری خدمات و تغییر الگوی مصرف اثرگذار باشد. به‌طور مشابه، Nguyen et al. (2018)

نشان دادند که چگونه مجموعه اطلاعات و داده‌های مدیریتی را می‌توان از یک نرم‌افزار توسعه‌یافته (©Autoflow) استخراج نمود. به‌عنوان نمونه، با شناسایی ساعات حداکثر مصرف براساس داده‌های برخط و در اختیار مشترکین بودن این‌گونه خروجی‌های نرم‌افزار، می‌توان انتظار داشت برخی فعالیت‌ها از طرف خود مشترکین کنترل شده و الگوی مصرف ارتقا یابد. در این ساختار، هر مشترک از میزان تقریبی مصرف آب در فعالیت‌های مختلف خانگی مطلع شده و فعالیت‌های نیازمند مصرف بالای آب یا غیرضروری را به ساعات دیگر و غیرپیک موکول می‌کند. این موضوع به‌طور مشابه در حوزه برق و انرژی نیز کاربرد دارد.

در طرح اجرایی هوشمندسازی کامل شبکه آبرسانی منطقه Fountain Valley در کالیفرنیا آمریکا (سال ۲۰۱۶) با جمعیتی در حدود ۵۵۰۰۰ نفر، مشاهده شد که استفاده از ظرفیت‌های هوشمندسازی در شفاف‌سازی میزان مصرف مشترکین و آگاهی‌بخشی به آن‌ها به‌صورت برخط به‌همراه ارائه برنامه‌های تشویقی و جرایم توانسته است در ماه‌های اولیه طرح تا ۲۳٪ صرفه‌جویی در مصرف آب در پی داشته باشد و در بلندمدت موجب کاهش سرانه مصرف آب هر شهروند به‌میزان ۶۰ لیتر شود (گزارش وزارت نیرو، ۱۳۹۶). به‌طور مشابه در شهر دوبوک (ایالت آیوا آمریکا) در سال ۲۰۱۰ با جمعیت ۶۰ هزار نفر و ۲۳ هزار مشترک، نتایج پایلوت تحقیقاتی نشان می‌دهد در مدت ۳ ماه، به‌دلیل اطلاع مشترکین از وضعیت آب به‌صورت برخط و تنظیم الگوی مصرف برای آبیاری فضای سبز و شستشو، نیاز آبی تا ۷٪ با هوشمندسازی شبکه کاهش یافت. در سال ۲۰۰۹ در شهر ردوود (ایالت کالیفرنیا آمریکا) با ۸۳ هزار مشترک نیز همین روش پایش برخط و اطلاع از وضعیت موجود توسط مشترکین توانسته است تا ۱۵٪ از نیاز آبی فضای سبز کسر نماید (Veolia, 2013).

سامانه‌های هوشمند در تصفیه‌خانه‌های آب و حتی فاضلاب نیز قابل استفاده هستند و می‌توانند موجب ارتقای کیفی و افزایش بهره‌وری سیستم شوند. در یک پروژه عملیاتی در تصفیه‌خانه فاضلاب در کشور اسپانیا با همکاری شرکت IBM (2014)، هوشمندسازی کامل (شامل نصب و بهره‌برداری از سنسورهای سنجش کمیت و کیفیت پساب همراه با الگوریتم‌های تصمیم‌گیری) توانست با تنظیم اتوماتیک اکسیژن محلول، دما، میزان تزریق ماده شیمیایی و پمپاژ لجن برگشتی، میزان مصرف انرژی و مواد شیمیایی در فرآیند تصفیه را تا ۱۴٪ کاهش دهد و لجن تولیدی نیز ۱۷٪ کاهش یابد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶). در یک پروژه کوچک‌مقیاس در کالیفرنیاس آمریکا در سال ۲۰۱۶ در سطح یک مزرعه برای آبیاری ۹۰۰ درخت آووکادو با سامانه‌های هوشمند نشان داده شده است که استفاده از این سامانه علیرغم هزینه اولیه ۸۰۰۰ دلاری می‌تواند با کاهش حجم آب براساس رطوبت خاک و نیاز آبی، هزینه مورد نیاز برای آبیاری هر واحد درخت را درحدود ۶۰٪ کاهش دهد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶).

در داخل کشور ایران اقدامات بسیاری در راستای هوشمندسازی شبکه‌های توزیع آبرسانی شهری انجام شده است اما نمی‌توان ادعا نمود سامانه‌های ارتقا یافته به مرحله هوشمند رسیده است. بسیاری از مطالعات نشان داده است که تجهیز شبکه به شیرهای مانور برای منطقه‌بندی شبکه[11] و مدیریت فشار با استفاده از سنسورهای برخط و ارسال اطلاعات از طریق دستگاه‌های مخابراتی و تنظیم این پارامتر به‌صورت ساعتی و روزانه توسط بهره‌بردار در اتاق کنترل توانسته است موجب ارتقای قابل‌ملاحظه شرایط بهره‌برداری از تأسیسات موجود شود (جمشیدی و اکبرزاده، ۱۳۹۲). به‌عبارت دیگر اکثر طرح‌های اجرا شده در کشور با سامانه‌های سخت‌افزاری و پایش برخط توسعه یافته است که از جمله بارزترین نمونه‌ها می‌توان به پروژه طرح جامع تله‌متری شهر مشهد اشاره کرد. در این طرح تا سال ۱۳۹۵ (با پیشرفت ۶۵٪) مجموعه‌ای از ۱۷۰ حلقه چاه و ایستگاه پمپاژ به سامانه اسکادا و تصفیه‌خانه آب شماره یک، مخازن شهری و ۱۵۰ نقطه کلیدی شبکه توزیع آب به سامانه‌های پایش سخت‌افزاری مجهز شده‌اند و در مراحل آتی با مدیریت فشار (به‌صورت نیمه‌هوشمند) شبکه مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در این سامانه مؤلفه‌های کمی و کیفی در شبکه مانند فشار، دبی، سطح آب مخازن، کدورت و غلظت کلر به‌صورت برخط پایش می‌شوند (جمشیدی، ۱۳۹۸).

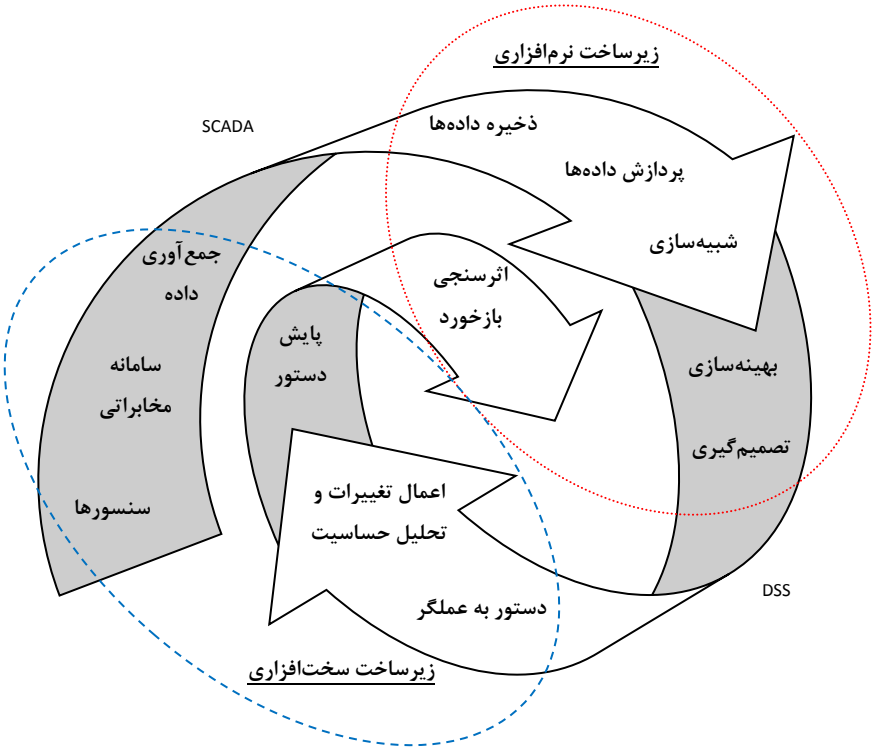
در شهر اصفهان نیز با هدف کنترل و مدیریت فشار و توزیع عادلانه آب در شبکه توزیع بیش از ۶۰ ایستگاه (اصلی و فرعی) از نظر سخت‌افزاری مجهز به تأسیسات پایش و مخابره برخط اطلاعات شده‌اند که در مرکز تله‌متری ضمن نمایش این اطلاعات، مشابه شهر مشهد، می‌توان قابلیت‌هایی نظیر آرشیوگیری، نمایش اخطار، کنترل از راه دور تجهیزات و غیره را در اختیار تیم بهره‌برداری قرار داد. این مورد به‌طور مشابه در شهر قم نیز با تجهیز سخت‌افزاری بیش از ۶ مخزن آب و ۴۴ شیر فشارشکن برای اندازه‌گیری پارامترهای کمی و کیفی (شامل کدورت، کلر، EC و pH) انجام شده است (جمشیدی، ۱۳۹۸). هم‌چنین انجام این‌گونه اقدامات اجرایی در مناطق دو و پنج آب و فاضلاب شهر تهران در سال‌های گذشته توانسته است بخش قابل‌ملاحظه‌ای از نشت شبانه را ردیابی کرده و به کاهش تلفات آب از طریق مدیریت فشار کمک شایانی نماید. به‌عنوان مثال در منطقه پنج، در یک

ناحیه با دو شیر فشارشکن و یک هفته عملیات این امکان فراهم شده است تا ضمن شناسایی نشت شبانه، مقدار آن تا ۲۰٪ (معادل تقریبی ۱۵۰۰ مترمکعب در روز) با یک مانور کاهش یابد (جمشیدی، ۱۳۹۳).

با مقایسه رویکردهای بین‌المللی و توانمندی‌ها و پروژه‌های اجرایی داخل کشور در حوزه هوشمندسازی شبکه آبرسانی شهری، دو جنبه حائز اهمیت است که فاصله وضعیت موجود تا ایده‌آل را ترسیم می‌نماید. اولاً نکته مشترک بین تمامی نمونه‌ها و طرح‌های اجرا شده در کشور این است که این‌گونه سامانه‌ها به‌صورت نیمه‌هوشمند هدایت و کنترل می‌شوند، به‌گونه‌ای که اعضا و پرسنل بهره‌برداری از سامانه بازخورد گرفته و دستور عملیات را به‌صورت دستی[۱۲] وارد می‌کنند. درصورتی‌که سامانه‌های مناسب تصمیم‌گیری پشتیبان به این تأسیسات به‌صورت مناسب اضافه شود، به‌گونه‌ای که خود سیستم بعد از پردازش اطلاعات ورودی و شبیه‌سازی وضعیت کنونی شبکه، بازخورد و دستورات لازم را به تجهیزات ارسال نماید، می‌توان انتظار داشت شبکه توزیع آب شهری هوشمند شده باشد. ثانیاً هوشمندسازی، به‌ویژه در گام‌های نخست آن نیازمند تجهیز شبکه به سخت‌افزارها، انجام مطالعات پایلوت و واسنجی نرم‌افزارها است که هزینه اولیه بالایی را می‌طلبد که با توجه به تعرفه‌های کنونی آب شرب باصرفه به‌نظر نمی‌رسد و ممکن است از اولویت خارج شود. اما این موضوع زمانی اهمیت دوچندان می‌یابد و در اولویت قرار می‌گیرد که شهر با محدودیت شدید منابع آبی مواجه شود و مسائل امنیتی- اجتماعی گریبانگیر آن شود یا منبع تأمین آن از طریق روش‌های پرهزینه‌تر مانند نمک‌زدایی باشد که هزینه‌های به مراتب بالاتری را می‌طلبد.

۳- متدولوژی هوشمندسازی

با توجه به رویکردها و تجربیات بین‌المللی، مراحل هوشمندسازی در قالب یک مدل مفهومی اسپایرال مطابق شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل مشخص است که گام نخست هوشمندسازی، نصب و راه‌اندازی سنسورها و تجهیزات مخابره اطلاعات کمی و کیفی آب است. در مرحله دوم، اطلاعات در پایگاه‌های داده ثبت و ذخیره می‌شود تا براساس روند و سری زمانی پارامترهای سنجش‌شده، پردازش لازم از شرایط موجود و پیش‌بینی احتمالی میسر شود. حسب گزارش‌های موجود، بسیاری از تأسیسات آبرسانی در شهرها توانسته‌اند خود را تا این مرحله هوشمندسازی ارتقا دهند. اما لازم است توجه شود که هوشمندسازی شامل چندین مرحله است که از ویژگی تکرارپذیری برخوردار است و در هر تکرار می‌تواند خود را توسعه داده و تکامل بخشد. برای تشریح این موضوع، مدل مفهومی اسپایرال می‌تواند به‌خوبی یک فرآیند هوشمندسازی شبکه آبرسانی را نشان دهد. براین اساس در مرحله سوم، داده‌ها توسط نرم‌افزارهای مربوطه برای شبیه‌سازی و پردازش استفاده می‌شوند که با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی با سامانه‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان از ظرفیت سامانه‌های تصمیم‌گیری پشتیبان، مشابه مطالعات غیبی و همکاران (۱۳۹۶) و خلیفه و همکاران (۱۳۹۷)، گزینه‌های بهینه را استخراج نمود. در این مرحله اپراتور صرفاً یک جایگاه نظارتی دارد و برعکس روش‌های متعارف نیازی نیست تا خودش تصمیم‌گیری انجام دهد. بنابراین، ساختار هوشمند نسبت به اسکادا می‌تواند سرعت پردازش و تصمیم‌گیری بالاتر و در عین حال بهینه‌سازی دقیق‌تری را با درنظر گرفتن پارامترها و توابع هدف بیشتر به همراه داشته باشد. به‌عنوان مثال، انتخاب گزینه بهینه بهره‌برداری برای دستیابی به: ۱) مصرف انرژی کمتر؛ ۲) فشار مناسب؛ ۳) کیفیت مناسب؛ ۴) حداقل‌سازی تلفات و نشت و غیره می‌تواند صرفاً با استفاده از پردازشگرهای رایانه‌ای انجام پذیرد. به‌عبارتی سامانه هوشمند قادر است در زمان کوتاه‌تر و با سعی و خطای کمتر، شرایط سیستم را به شرایط مطلوب نزدیک‌تر نماید. برای این منظور لازم است در مرحله چهارم، تصمیم اتخاذ شده به عملگرها در تجهیزات کنترلی، مانند شیرآلات و پمپ‌ها، منتقل شود و بازخورد این تصمیم توسط سنسورها و سامانه‌های مخابراتی پایش شود تا بازخورد و تأثیر تصمیم اتخاذ شده ارزیابی شود. در این مرحله همچنین می‌توان اثر میان‌مدت و بلندمدت تصمیمات اخذشده را از طریق بازخورد مشترکین نیز ارزیابی نمود. توسعه نرم‌افزاری این ظرفیت را فراهم می‌کند تا از طریق اپلیکیشن‌ها ضمن ارسال وضعیت کمی و کیفی آب شرب به مشترکین، بازخورد و رضایتمندی آن‌ها را نیز به‌صورت برخط ثبت نماید. این موضوع به‌طور ضمنی مطابق مطالعات بین‌المللی انجام شده می‌تواند موجب آگاهی‌بخشی اجتماعی و در نتیجه مدیریت و کاهش مصرف آب و بهبود الگوی رفتاری مشترکین در بلندمدت شود. زمان موردنیاز برای شناسایی مشکلات شبکه، شبیه‌سازی و مدیریت خودکار آن در قالب مدل مفهومی اسپایرال تابعی از وسعت منطقه، تعداد نقاط پایش، دقت سنسورها، زمان و تواتر پایش، تواتر پردازش و توان پردازنده‌ها است. مطابق مطالعات انجام شده این زمان بین چند دقیقه تا چندساعت گزارش می‌شود که بسیار سریعتر از روش‌های متعارف و یا روش‌های صرفاً مبتنی بر اسکادا است.



شکل ۱- مدل مفهومی اسپایرال هوشمندسازی تأسیسات آبرسانی

با استفاده از مدل اسپایرال و ظرفیت‌های فنی- اجتماعی هوشمندسازی شبکه آبرسانی، می‌توان هدفگذاری طرح‌های مرتبط با این موضوع را مطابق لایه‌بندی ارائه شده در شکل ۲ درنظر گرفت. به‌عنوان مثال، هدف کوتاه‌مدت هوشمندسازی همان کاهش تلفات و آب بدون درآمد در تأسیسات آبرسانی است؛ اما در ادامه این هدف‌گذاری می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی، مدیریت تجهیزات و افزایش عمر آن‌ها، و ارتقای کیفیت آب آشامیدنی توسعه داده شود. نهایتاً با توسعه زیرساخت‌ها و گذار هوشمندسازی از حلقه‌های برونی مدل اسپایرال به حلقه‌های درونی می‌توان هدفگذاری بلندمدت هوشمندسازی را بر اصلاح تعرفه‌گذاری آب، اصلاح الگوی مصرف و کاهش سرانه مصرف آب خانوارها و واحدهای تجاری قرار داد. این رویکرد موجب گذار از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا در توزیع آب می‌شود (شکل ۲).

شکل ۲- اهداف کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت هوشمندسازی برای عبور از مدیریت عرضه به تقاضا

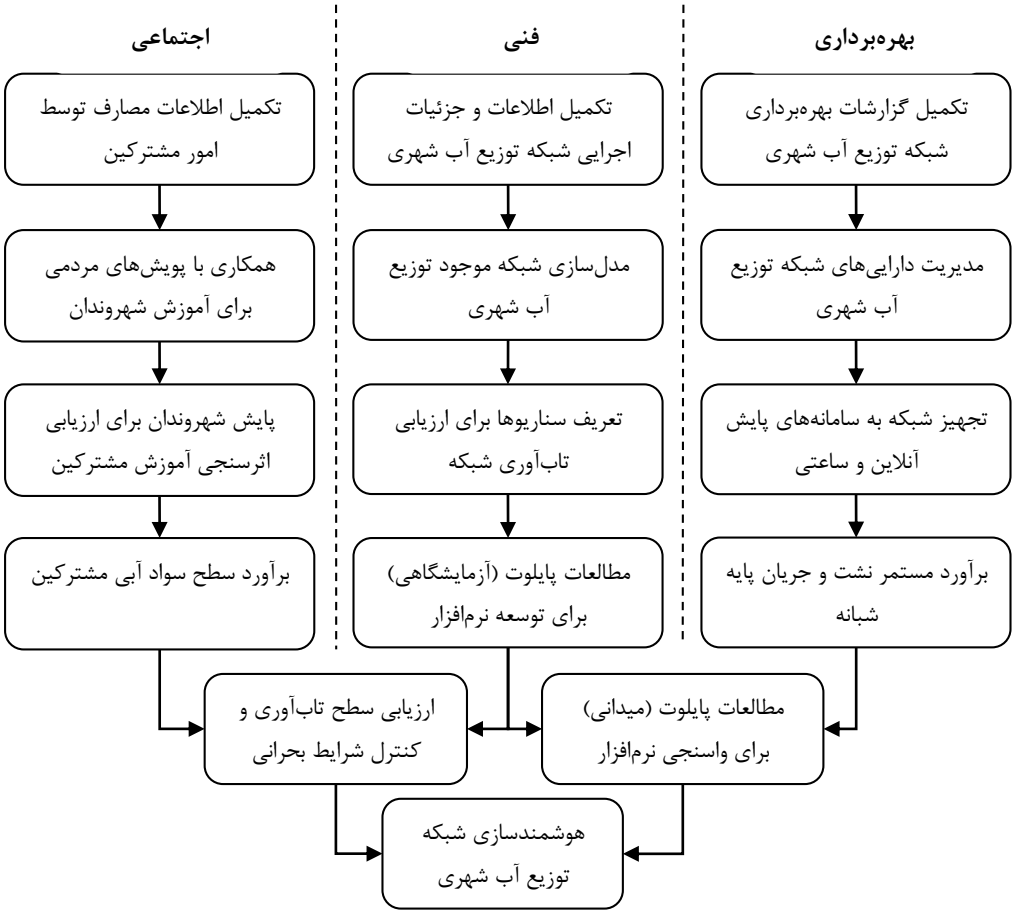
برای دستیابی به این اهداف لازم است در وهله اول سرمایه‌گذاری لازم در بخش تجهیزات و ابزار دقیق صورت پذیرد تا بتوان بر این اساس توسط دستگاه‌های قرائت آنلاین، مجموعه اطلاعات بصورت جامع، پیوسته و دیجیتال از سامانه حاصل شود. ثانیاً نرم‌افزار مدیریت سامانه هوشمند باید با دقت تهیه شود و مشخصاتی از قبیل جامع‌نگری، کاربردوست بودن و کمترین خطا و توقف را به همراه داشته باشد. در ضمن باید این نرم‌افزار پس از عملیاتی شدن به‌صورت پایلوت، مراحل آموزش، تست و واسنجی را سپری کرده باشد و با سامانه سخت‌افزاری موردنظر تطابق پیدا کند. بدین منظور نرم‌افزار توسعه‌یافته باید بتواند از بازخوردهای موجود برای ۱) ارتقای عملکرد خود و ۲) تدقیق نتایج بهره‌برداری از شبکه آبرسانی استفاده نماید. بنابراین، توسعه مدل شبیه‌سازی- تصمیم‌گیری یک فرآیند چند مرحله‌ای است که در نهایت پس از تکمیل بخش سخت‌افزاری، باید در شرایط مختلف بهره‌برداری نرم‌افزار آزمایش شده و نتایج هر دوره آزمایش به‌عنوان سابقه عملکردی به سامانه تزریق شود. بدیهی است پس از انجام سعی و خطا و تعیین بازخوردهای مختلف از سامانه آبرسانی تحت شرایط کنترل‌شده و در قالب مطالعات پایلوت، می‌توان عملکرد نرم‌افزار را بررسی نموده و عدم قطعیت و نقاط ضعف را تحلیل کرد. در این شرایط می‌توان تصمیم گرفت آیا سامانه برای اجرا در محیط واقعی از شرایط اولیه لازم برخوردار است یا خیر.

هوشمندسازی شبکه آبرسانی شهری یک موضوع چندوجهی است. از نظر فنی، توسعه یک سامانه هوشمند سخت‌افزاری- نرم‌افزاری در کشور نیازمند مطالعات پایلوت پیش از اجرای میدانی آن در سطح منطقه است. از آنجایی‌که در این سامانه، به‌طور کلی مسئولیت بهره‌برداری از شبکه و تعیین شرایط بهینه راهبری مطابق یک دستورالعمل توسط فرآیند تصمیم‌گیری نرم‌افزار صورت می‌گیرد، همواره این ریسک وجود دارد که بنابر یک تصمیم اشتباه و نسنجیده این سامانه‌ها ناشی از ضعف نرم‌افزار، واسنجی نادرست و یا برآورد اشتباه، میزان نارضایتی مشترکین و یا مشکلات کیفی آب به‌طور ناخواسته افزایش یابد. استفاده نامناسب از این سامانه‌ها به‌طور مستقیم می‌تواند ضمن تهدید سلامتی مردم، منجر به افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و مصرف انرژی شود. لذا پیشنهاد می‌شود برای ارزیابی سامانه‌های هوشمند و سیستم‌های تصمیم‌گیری، مطالعه به‌صورت پایلوت در دو سطح انجام پذیرد. در سطح اول، در قالب مطالعات کوتاه‌مدت، به‌صورت آزمایشگاهی یک یا چند حلقه شبکه آبرسانی تحت شرایط کنترل شده با تمامی تجهیزات لازم طراحی و اجرا شود. در این سطح، تمامی آیتم‌های لازم برای مدیریت جامع شبکه آبرسانی برای نرم‌افزار تعریف شده و کلیه سناریوهای لازم بصورت کنترل شده آزمایش می‌شود. هدف از این بررسی، توسعه یک مدل شبیه‌سازی- تصمیم‌گیری و واسنجی آن است. در سطح دوم و در قالب مطالعات میان‌مدت، پیشنهاد می‌شود ابتدا به موازات مطالعات سطح اول، یک منطقه شهری به تأسیسات سخت‌افزاری مورد نیاز تجهیز شده تا پس از تأیید نرم‌افزار توسعه‌یافته، در مقیاس واقعی مورد آزمایش قرار گیرد. در این مرحله، اطلاعات رقومی اخذشده از شبکه برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳).

در شرایط پایلوت این امکان میسر خواهد بود که کلیه شرایط بهره‌برداری تست شود. به‌عنوان مثال، موارد زیر تحت سناریوهای مختلف در سامانه هوشمند قابل تعریف بوده و بازخورد سیستم بررسی خواهد شد:

- ✓ استفاده از انواع لوله‌ها و اتصالات با جنس مختلف و عمر و کارکرد متفاوت؛
- ✓ استفاده از پمپ‌های دور متغیر، شیر فشار شکن و شیرآلات برقی برای تنظیم دبی و فشار شبکه؛
- ✓ کنترل شرایط ترکیدگی بزرگ و ترکیدگی‌های کوچک (استفاده از شیر تخلیه)؛
- ✓ درنظر گرفتن نوسانات مصرف آب در طی شبانه‌روز؛
- ✓ وجود خطای قرائت کنتور و تعیین میزان عدم قطعیت مدل شبیه‌سازی.

هم‌چنین، هوشمندسازی شبکه آبرسانی با استفاده از ظرفیت‌های نرم‌افزاری خود می‌تواند نهایتاً بازخوردهای اجتماعی و مردمی از طرح اجرا شده را در اختیار داشته باشد. بدین منظور، رضایتمندی و آگاهی خانوارها نسبت به میزان مصرف و مؤلفه‌های دیگر توزیع آب آشامیدنی (مانند کیفیت و فشار) در شرایط بدون هوشمندسازی و در شرایط اجرای این‌گونه طرح‌ها قابل بررسی و مقایسه است و با ارزیابی مؤلفه‌های کمی، بازخوردها قابل سنجش خواهد بود. بنابراین، متدولوژی توسعه شبکه‌های هوشمند آبرسانی باید مطابق شکل ۳ از سه جنبه بهره‌برداری، فنی و اجتماعی مدنظر قرار گیرد. در نهایت شبکه‌های هوشمند آبرسانی شهری می‌توانند در یک مرکز کنترل و در قالب سامانه‌های مدیریت یکپارچه شهری در کنار دیگر سامانه‌های هوشمند از جمله کنترل ترافیک و مدیریت انرژی تحت نظارت و کنترل قرار گیرند. بدیهی است بهره‌برداری از سامانه‌های هوشمند آبرسانی، کنترل ترافیک یا انرژی کاملاً جدا از یکدیگر بهره‌برداری می‌شوند؛ اما می‌توانند ذیل یک ساختار مدیریتی در مرکز کنترل بصورت واحد نظارت شوند.



شکل ۳- متدولوژی پیشنهادی برای توسعه شبکه‌های هوشمند آبرسانی در کشور

جدول ۱ براساس مباحث مطرح شده ذیل مطالعات تطبیقی (بخش ۲) و متدولوژی (بخش ۳) نشان می‌دهد اولاً توسعه سامانه اسکادا بخشی از فرآیند چندلایه‌ای هوشمندسازی شبکه آبرسانی شهری محسوب می‌شود و برای تحقق اهداف کامل آن لازم است اقداماتی بویژه در بخش نرم‌افزاری در کشور صورت پذیرد که اساساً بر توسعه نرم‌افزار، واسنجی و انجام مطالعات پایلوت وابسته است. ثانیاً این جدول یادآوری می‌کند که ظرفیت‌ها و امکانات لازم برای هوشمندسازی کامل در کشور وجود دارد.

جدول ۱- لایه‌های مختلف هوشمندسازی به همراه ظرفیت‌ها و الزامات آن در کشور

لایه‌های هوشمندسازی		نمونه عملیات	در کشور امکان‌پذیر است؟	در کشور وجود دارد؟	الزامات
سامانه اسکادا	تجهیزات سخت‌افزاری	نصب و بهره‌برداری انواع پمپ‌ها، شیرآلات و فشارشکن‌ها	بله	بله	نیازمند عملیات اجرایی، بهره‌برداری و نگهداری
	کنترل و پایش آنلاین	نصب و بهره‌برداری انواع سنسورها، ابزاردقیق و دیتالاگرها	بله	بله	نیازمند واسنجی دائم و بومی‌سازی فناوری
	دستگاه‌های مخابراتی و اطلاعاتی	نصب آنتن‌های مخابراتی، توسعه شبکه فیبرنوری یا GSM	بله	بله	نیازمند ارتقا و ایمن‌سازی ظرفیت مخابراتی
	مستندسازی و مدیریت اطلاعات	توسعه سرورهای مرکزی و بانک‌های اطلاعاتی	بله	بله	نیازمند افزایش ظرفیت و به‌هنگام‌سازی پدافندی
سامانه نرم‌افزاری	پردازش اطلاعات و ارائه دستور عملیاتی	نرم‌افزار شبیه‌سازی- بهینه‌سازی با امکان تصمیم‌گیری	بله	خیر	نیازمند مطالعات پایلوت (مطابق متدولوژی)
	لایه تکمیلی: بازخوردهای اجتماعی	تولید اپلیکیشن برای آگاهی‌بخشی و اخذ بازخوردها از مشترکین	بله	خیر*	نیازمند تکمیل نسبی لایه‌های هوشمندسازی

* اپلیکیشنی که در راستای اهداف هوشمندسازی مطابق تعاریف ارائه شده باشد در حوزه آب وجود ندارد.

۴- جمع‌بندی

در این پژوهش نشان داده شد که رویکردهای جهانی به مسئله هوشمندسازی توزیع آب، بسیار فراتر از سامانه‌های اسکادا است و این مفهوم نه تنها موجب کاهش هدررفت آب و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات می‌شود بلکه می‌تواند موجب اشتغال‌زایی، توسعه فناوری، آگاهی‌بخشی، تعرفه‌گذاری بهینه و اصلاح الگوی مصرف نیز شود. بدین منظور در قالب مدل اسپایرال تأکید شد که مراحل هوشمندسازی باید به‌ترتیب مطابق متدولوژی پیشنهادی و از جنبه‌های مختلف توسعه یافته و تکمیل شود. در این شرایط استفاده از مطالعات پایلوت در دو مقیاس آزمایشگاهی و میدانی برای توسعه نرم‌افزار هوشمند الزامی است و باید نتایج اثرسنجی و بازخورد طرح‌های پیاده‌شده در خانوارها به سامانه‌های هوشمند ارتباط یابد. تحت این شرایط، هوشمندسازی می‌تواند یک رویکرد فناورانه و چندوجهی برای گذر از مدیریت عرضه آب شهری به مدیریت تقاضا باشد.

۵- پی‌نوشت‌ها

1- Information and Communication Technologies (ICT)
2- SCADA
3- Adaptive Study
4- Leaks
5- Bursts
6- Asset Management
7- Internet of Things (IoT)
8- Clouds
9- Decision Support Systems (DSS)
10- Smart Grid
11- District Metered Area (DMA)
12- Manual

۵- مراجع

جمشیدی، ش.، و اکبرزاده ع.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی پایلوتی میزان تلفات آب با اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه (مطالعه موردی: منطقه نیروی دریایی تهران)"، *اولین همایش محیط‌زیست، انرژی و صنعت پاک*، دانشگاه تهران

جمشیدی، ش.، (۱۳۹۳)، "کاهش تلفات شبکه توزیع آب شهری با استفاده از مدیریت فشار (مطالعه موردی)"، *اولین کنفرانس بین‌المللی مهندسی محیط‌زیست*، مرکز راه‌کارهای دستیابی به توسعه پایدار، تهران.

جمشیدی، ش.، (۱۳۹۸)، "رویکردها و الزامات هوشمندسازی شبکه توزیع آب شهری"، *دومین همایش ملی مدیریت مصرف آب*، دانشگاه تهران.

خلیفه س.، اسماعیلی ک.، و خلیفه ح.، (۱۳۹۷)، "بهینه‌سازی شبکه توزیع آب با رویکرد بیشینه‌سازی سود (مطالعه موردی: هماشهر استان کرمان)"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۳(۲)، ۳۵-۴۳.

غیبی، م.ا.، لطیفی، م.، و امید نائینی س.ت.، (۱۳۹۶)، "بررسی و مقایسه کارایی رویکردهای مختلف تنظیم شیرهای فشارشکن در بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع آب"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۲(۳)، ۴-۱۳.

وزارت نیرو (۱۳۹۶)، *طرح استراتژیک پایش کمی و کیفی منابع و مصارف آب مبتنی بر اینترنت اشیا*.

Beal, C.D., and Flynn, J., (2014) "The 2014 review of smart metering and intelligent water networks in Australia and New Zealand", *Report prepared for WSAA by the Smart Water Research Centre*, Griffith University.

Eden Strategy Institute, (2018), *Top 50 smart city governments*, ONG & ONG Private Limited Company.

Fantozzi, M., Popescu, I., Farnham, T., Archetti, F., Mogre, P., Tsouchnika, E., Chiesa, C., Tsertou, A., Castro Gama, M., and Bimpas, M., (2014), "ICT for efficient water resources management: The ICeWater energy management and control approach", *12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, CCWI2013, *Procedia Engineering*, 70, 633-640.

Gungor, V.C., Sahin, D., Kocak, T., Ergut, S., Buccella, C., et al., (2012), "Smart grid and smart homes", *IEEE Industrial Electronic Magazine*, 6(4), 18-34.

Hajebi, S., Song, H., Barrett, S., Clarke, A., and Clarke, S., (2013), "Towards a reference model for water smart grid", *International Journal of Advances in Engineering Science and Technology*, 2(3), 310-317.

Hancke, G.P., de Carvalho, E., Silva, B., and Hancke Jr, G.P., (2013), "The role of advanced sensing in smart cities", *Sensors*, 13(1), 393-425.

Harou, J.J., Garrone, P., Rizzoli, A.E., Maziotis, A., Castelletti, A., Fraternali, P., Noval, J., Wissmann-Alves, R., and Ceschi, P.A., (2014), "Smart metering, water pricing and social media to stimulate residential water efficiency: Opportunities for the SmartH2O project", *16th Conference on Water Distribution System Analysis*, WDSA 2014, Procedia Engineering 89, 1037-1043.

Kashid, S.G., and Pardeshi, S.A., (2014), "A survey of water distribution system and new approach to intelligent water distribution systems", *IEEE, First International Conference on Networks and Soft Computing*, Guntur, India, 339-344.

Kumura, T., Suzuki, N., Takahashi, M., Tominaga, S., Morioka, S., and Stoianov, I., (2015), "Smart water management technology with intelligent sensing and

ICT for the integrated water systems", *NEC Technical Journal*, 9(1), 103-106.

Larrauri, J., (2011), "Smart water networks, integrated solutions for an optimal utility management", *Esri European User Conference*, Madrid, Spain.

Laspidou, C.S., (2014), "ICT and stakeholder participation for improved urban water management in the cities of the future", *Water Utility Journal*, 8, 79-85.

Lee, S.W., Sarp, S., Jeon, D.J., and Kim, J.H., (2015), "Smart water grid: The future water management platform", *Desalination and Water Treatment*, 55(2), 339-346.

McKenna, S.A., Fusco, F., and Eck, B.J., (2014), "Water demand pattern classification from smart meter data", 12th *International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, CCWI2013, Procedia Engineering, 70, 1121-1130.

Mizuki, F., Mikawa, K., and Kurisu, H., (2012), "Intelligent water systems for smart cities", *Hitachi Review* 61(3), 147-151.

Nguyen, K.A., Stewart, R.A., Zhang, H., Sahin, O., and Siriwardene, N., (2018), "Re-engineering traditional urban water management practices with smart metering and informatics", *Environmental Modelling and Software*, 101, 256-267.

Scolnicov, H., (2011), "How to build a smart water network", *Smart Water Network Conference*, TaKaDu, SWAN Forum, Surrey, UK.

Sensus, (2012), *Smart water global survey*. A Report.

Suciu, G., Bezdedeanu, L., Vasilescu, A., and Suciu, V., (2017), "Unified intelligent water management using cyberinfrastructures based on cloud computing and IoT", *2nd International Conference on Control Systems and Computer Science*, 606-611.

Thompson, K., Sorbello, J., Dang, H., and Snadden, D., (2012), "Approaches to efficiency and intelligent water networks at Yarra Valley Water", *Water*, Intelligent Water Networks, December, 101-107.

Veolia, (2013), *Our proposal for a smart water management pilot*, Veolia's Solutions for Smart Cities, Veolia.

Whittle, A.J., Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., (2013), "Sensor networks for monitoring and control of water distribution systems", *6th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII 2013)*, Hong Kong.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.