

ارائه مدل جدید مکانیابی برای تأسیسات هوشمند تحت پوشش شرکت‌های آب و فاضلاب ایران

(مورد مطالعه: شرکت آب و فاضلاب شهری استان تهران)

مجید کلانتری^۱: دانشجوی دکتری، گروه مدیریت فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
جلال حقیقت منفرد^۲: عضو هیئت علمی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران
محمدعلی کرامتی: عضو هیئت علمی، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

Presenting a new location model for smart facilities covered by water and wastewater companies in Iran (Case study: Tehran Water and Wastewater Company)

Abstract

Despite the focus on smart water management in the water and wastewater sector of Iran, little attention has been paid to the site-selection their implementation. Furthermore, despite the huge investments made, the neglect of this issue has undermined their effectiveness. Therefore, this study seeks to provide a new approach to locating smart facilities under the auspices of Iranian Water and wastewater Companies (with the focus on Tehran Water and Wastewater Company) and to explain the model for their establishment at the national level. Accordingly, after prioritizing risk management in the discussion of locating the establishment of intelligent management systems of water facilities (resulting from Thematic analysis), while examining the uncertainties in the Monte Carlo analysis, the scenario analysis method in the first step, the fault tree method and calculation of Byrnbaum index in the second step and the bow tie model has been used to develop a smart model of water supply process and verify the realization of its implementation in the final step to identify the most basic place for the establishment of smart water management systems.

Key Words: Site selection, Smart water management, SCADA

چکیده

در صنعت آب و فاضلاب ایران، علیرغم توجه به سامانه‌های مبتنی بر مدیریت هوشمند، مکانیابی استقرار آنها، چندان مورد توجه قرار نگرفته و باوجود سرمایه‌گذاری فراوان، عدم توجه به این موضوع، تا حد بسیار زیادی، اثربخشی آنها را با ابهام مواجه کرده است. لذا این تحقیق درصدد است تا رویکردی نوین را به‌منظور مکانیابی استقرار تأسیسات هوشمند تحت پوشش شرکت‌های آب و فاضلاب ایران (با محوریت شرکت آب و فاضلاب شهری استان تهران) ارائه کند و به تبیین مدلی جهت استقرار آنها در سطح ملی بپردازد. بر همین اساس و پس از اولویت‌دهی به مدیریت مخاطره در بحث مکانیابی استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند تأسیسات آبی (حاصل از تحلیل مضمون)، ضمن بررسی عدم قطعیت‌های موجود در قالب تحلیل مونت کارلو، از روش تحلیل سناریو در گام نخست، روش درخت خطا و محاسبه شاخص بیرنباوم در گام دوم و از مدل پایونی جهت طراحی شبکه هوشمند آب و تأیید تحقق هدف استقرار آن در گام نهایی استفاده شده است تا اصولی‌ترین مکان جهت استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند آب شناسایی گردد.

کلید واژه: مکان‌یابی، مدیریت هوشمند آب، اسکادا.

مقدمه:

آب منشأ زندگی و یکی از سه عنصر اصلی اکوسیستم می باشد که خصوصاً در سال های اخیر بیش از سایر منابع حیاتی با بحران جدی و کمبود روبرو است. اهمیت نقش حیاتی آب و دفع بهداشتی فاضلاب در سلامتی و رفاه انسان و نقش آنها در پیشبرد توسعه بر همگان واضح است. بسیاری از کشورها در دنیای امروز، بر اثر تجربه به این باور رسیده اند که تأسیسات مرتبط با فرایندهای آب و فاضلاب به دلیل تأثیرات عمیق بر روی سلامت انسان و محیط زیست باید تحت نظارت و کنترل قرار گیرد تا بدینوسیله مدیران ارشد بهره بردار در هر لحظه و از هر مکان بر اساس درجه اولویت و دسترسی خود بر فرآیند تولید، انتقال و توزیع و تصفیه نظارت داشته باشند و در صورت نیاز و با توجه به سطح دسترسی بتوانند این فرایندها را کنترل و هدایت نمایند. در واقع عدم دسترسی به آب برای مصارف شرب و صنعتی و همچنین عدم دسترسی به تصفیه خانه های مجهز فاضلاب، یک محدودیت عمده برای توسعه پایدار محسوب می شود و این بدان معناست که در کشورهایی مانند کشور ما که با میزان بارندگی کم روبرو هستند و در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار دارند باید از حداقل آب مناسب شرب موجود بیشترین استفاده را کرد (کلانتری، ۱۳۹۳).

ما در جهانی فناوری محور زندگی می کنیم که در آن، فناوری اطلاعات و ارتباطات^۱ برای نیل به اهداف توسعه پایدار اهمیت بسیار دارد. مدیریت آب یکی از حوزه هایی است که این فناوری، نقش کلیدی در پاسخ به چالش هایی مانند تشخیص نشت و بهینه سازی پویا ایفا می کند (نونهالا نهالا انتولی و عدنان ابومحفوظ^۲، ۲۰۱۶). در واقع امروزه شبکه هوشمند آب به عنوان نسل بعدی طرح مدیریت آب پیشنهاد شده است که فناوری اطلاعات و ارتباطات را برای افزایش اثربخشی تمام عناصر ساختار شبکه آب به هم مرتبط می کند. (سئونگ وون لی و همکاران^۳، ۲۰۱۵)

در کشور ما با توسعه صنعت آب و فاضلاب در بیش از ۱۰۵۰ شهر و وجود بالغ بر ۲۳۰۰۰ تأسیسات در این

۱- ICT: Information and Communications Technology

۲- Seung Won Lee et al.

صنعت، لزوم نگرش کلان مدیریتی در این حوزه بسیار مشهود می باشد. در این خصوص شاخص های تعریف شده وزارت نیرو در زمینه مدیریت سیستماتیک منابع آب و تأسیسات آب و فاضلاب در افق سال ۱۴۰۴ لزوم گذر از بهره برداری سنتی به یک سیستم نوین مبتنی بر فناوری روز را دوچندان می نماید. بند هفت و دوازدهم این شاخص ها عبارت است از:

- بهره گیری از سیستم های هوشمند در مدیریت و بهره برداری از شبکه های توزیع
- برنامه ریزی و استفاده بهینه از منابع آب و کاهش عملیاتی ریسک پذیری ناشی از پیش بینی های ضعیف و بعضاً غلط یا غیرواقعی مبتنی بر آمار و اطلاعات نادرست یا با دقت های بسیار اندک

که به صورت مستقیم بر استقرار و پیاده سازی سامانه های مدیریت هوشمند آب تأکید می کند (کنترل سازان فرآیند، ۱۳۹۲).

محدودیت منابع آب شرب کشور و تناوب وقوع بلایای طبیعی خصوصاً خشک سالی از یک سو و افزایش جمعیت شهرها و نیاز روزافزون آنها به آب مناسب شرب از سوی دیگر، ضرورت توجه و رویکرد مناسب به مدیریت کارآمد تأمین آب را بیش از پیش نمایان می سازد. یکی از روش های مناسب برای تحقق مدیریت کارآمد تأمین و توزیع آب، تهیه و اجرای طرح جامع کنترل هوشمند شبکه های آبرسانی به عنوان شریان های حیاتی است. ابزار تحقق کنترل هوشمند شبکه های آبرسانی سامانه های اسکادا هستند که پایش، کنترل و جمع آوری داده^۳ و وظیفه اصلی آنها است (کلانتری، ۱۳۹۳).

در ایران نیز مانند سایر کشورهای دنیا، استقرار اینگونه سامانه های نظارتی به عنوان راه حلی اساسی برای حل مشکلات سامانه های آب و فاضلاب در مدار بهره برداری، مورد توجه مسئولین وزارت نیرو و مدیران ارشد صنعت آب و فاضلاب کشور قرار گرفته است. اما با وجود توجه فراوان به طراحی و اجرای سامانه های مبتنی بر مدیریت هوشمند و تهیه شرح خدمات مشاورین و پیمانکاران ذیصلاح در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور، مکانیابی استقرار آنها چندان مورد توجه قرار نگرفته و علیرغم سرمایه گذاری بسیار، عدم توجه به این

۳- SCADA: Supervisory control and data acquisition

بیشتر به کاهش مصرف انرژی و هدررفت آب پرداخته شده و کمتر از نقش و اهمیت آنها، جهت تحقق سایر اهداف مدیریتی سخن به میان آمده است. (کلانتری، ۱۳۹۳). در بسیاری موارد دیگر و علیرغم هزینه‌های سنگین اجرایی، مشاهده می‌شود که به علت عدم احصاء پیش‌نیازهای لازم، اثربخشی آنها در حاله‌ای از ابهام قرار دارد. تفاوت فاحش اهداف و پیش‌نیازهای استقرار شبکه هوشمند آب در مناطق مختلف، به موازات فقدان تعریفی واحد و منسجم از هوشمندسازی در صنعت آب و فاضلاب، به میزان زیادی اجرای مدیریت هوشمند آب را در کشور با مشکل مواجه کرده است تا حدی که به دلیل فقدان منابع مالی و لزوم رعایت حداکثری الزامات امنیت سایبری مترتب بر استقرار اینگونه سامانه‌های هوشمند، پاره‌ای از شرکت‌های آب و فاضلاب از اجرای شبکه‌های هوشمند آب استنکاف می‌ورزند.

در سطح جهانی و مطابق پژوهش دانشگاه کلرادو، مفهوم شبکه آب هوشمند سال‌ها است که مطرح شده اما اجرای آن بسیار کند پیش رفته است. دلیل این موضوع به فقدان درک مناسب مورد کسب‌وکار آن، بودجه ناکافی، عدم حمایت متولیان امور، دستاوردهای ناملموس و نبود راهکارهای مناسب جهت اجرای آن برمی‌گردد. (الگا مارتیشوا^۱، ۲۰۱۴). یافته‌های گروه سنوس^۲ درخصوص بهترین فرصت‌های ناشی از اجرای شبکه هوشمند آب، نیز نشان از استقرار تک وجهی و در محدوده مکانی مشخص این سامانه‌ها دارد. همچنین مستندات کتابخانه‌ای شرکت آب و فاضلاب مشهد نشان می‌دهد که هزینه کلان پیاده‌سازی منجر به آن شده است که اکثر طرح‌های هوشمندسازی آب در دنیا، صرفاً جهت تحقق و بهبود شاخص‌های مرتبط با یک هدف، نظیر کاهش آب بدون درآمد^۳ و در یک واحد^۴ مشخص طراحی و تا حد امکان از طراحی گسترده و چندمنظوره^۵ آنها پرهیز می‌گردد که این موارد، به‌تنهایی، بیانگر ضرورت تدوین مدل

موضوع، تا حد بسیاری اثربخشی آنها را با ابهام مواجه کرده است. لذا این پژوهش درصدد است تا رویکردی نوین را به‌منظور مکانیابی استقرار تأسیسات هوشمند تحت پوشش شرکت‌های آب و فاضلاب ایران (با محوریت شرکت آب و فاضلاب شهری استان تهران) ارائه کند و به تبیین مدلی جهت استقرار آنها در سطح ملی بپردازد. بر این اساس و پس از اولویت‌دهی به مدیریت مخاطره در بحث مکانیابی استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند تأسیسات آبی (حاصل از تحلیل مضمون^۶)، ضمن بررسی عدم قطعیت‌های موجود در قالب تحلیل مونت کارلو^۷، از روش تحلیل سناریو^۸ در گام نخست، روش درخت خطا^۹ و محاسبه شاخص بیرنباوم^{۱۰} در گام دوم و از مدل پایبونی^{۱۱} به‌منظور طراحی شبکه هوشمند آب و تأیید تحقق هدف استقرار در گام نهایی استفاده شده است تا اصولی‌ترین مکان شناسایی و درنهایت مدلی ارائه گردد که بتواند مبنای توسعه اجرای اینگونه سامانه‌های هوشمند باشد.

بیان مساله:

در اهمیت نقش سامانه‌های کنترل هوشمند باید به این نکته مهم اشاره شود که استفاده از آب آشامیدنی کیفی و دفع و تصفیه اصولی فاضلاب از نیازهای بشر قرن بیست و یک است و کشورهای جهان بسته به شرایط اقلیمی و فراوانی یا کمبود آب، همچنین با توجه به میزان سرانه تولید ناخالص ملی خود از نعمت آب آشامیدنی مناسب، برخوردار یا محرومند و از نظر دسترسی به سیستم فاضلاب مناسب بهداشتی نیز متفاوت هستند و این یعنی اهداف ناشی از استقرار سامانه‌های اسکادا در کشورهای مختلف متفاوت است. (شاه‌حسینی، ۱۳۹۷). نظر به تمرکز این پژوهش بر صنعت آب و فاضلاب، ذکر این نکته ضروری است که علیرغم سابقه بسیار مثبت سامانه‌های اسکادا در جهت مدیریت بهینه و تهیه گزارش‌های مدیریتی متنوع، در طراحی آنها

۱- Thematic analysis

۲- Monte Carlo method

۳- Scenario analysis method

۴- Fault tree method

۵- Birnbaum Index

۶- Bow-tie model

۷- Olga Martyusheva

۸- Sensus Group

۹-NRW: Non-Revenue Water

۱۰- Field

۱۱- Multi objective

مکانیابی مناسب استقرار شبکه‌های آب هوشمند است.

اهمیت مکانیابی استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند آب در ایران، به نوع بنگاه‌داری شرکت‌های آب و فاضلاب نیز برمی‌گردد. اصولاً یکی از مشخصه‌های منحصربه‌فرد صنعت آب و فاضلاب در تمام کشورها سرمایه‌بر بودن آن است. یعنی این صنعت در راستای رسالت سازمانی (تأمین آب و خدمات دفع فاضلاب) به سرمایه اولیه بسیار زیادی نیاز دارد. لذا در بیشتر کشورهای دنیا دولت‌ها در امور آب و فاضلاب دخالت و سرمایه اولیه آن را تأمین می‌کنند ولی بهره‌برداری از آن را به بخش خصوصی یا نهادهای وابسته به دولت واگذار می‌کنند. از منظری دیگر، به دلیل وجود فرض بازده نسبت به مقیاس در صنعت آب و فاضلاب و طولانی بودن مدت سرمایه‌گذاری یا ساخت و تجهیز تأسیسات، بخش خصوصی تمایلی به سرمایه‌گذاری در این صنعت ندارد و صرفاً در برخی فعالیت‌های بهره‌برداری آن دخالت می‌کند. اصولاً بر اساس مفاد قانون اساسی و در کشور ما، اختیار و امتیاز منابع طبیعی از جمله آب و فاضلاب در اختیار دولت است به گونه‌ای که مدیریت نظارت و بهره‌برداری از منابع آب در اختیار شرکت‌های آب منطقه‌ای و بهره‌برداری، تأمین و توزیع آب و خدمات فاضلاب مناطق مختلف کشور توسط شرکت‌های آب و فاضلاب انجام می‌شود. (مستندات کتابخانه‌ای شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، ۱۳۹۹)

در شرایط موجود کشور، اکثر شرکت‌های آب و فاضلاب به دلیل فروش آب و خدمات فاضلاب به بهایی کمتر از قیمت تمام شده، زیانده هستند و از منابع سرمایه‌ای و بودجه دولتی برای ساخت و تجهیز تأسیسات استفاده می‌کنند. لذا با توجه به اهمیت استقرار و مزایای متنوع شبکه هوشمند آب، لزوم مدیریت هزینه‌های بالای اجرای آن و با عنایت به ضرورت اولویت‌دهی به کلیه فعالیت‌ها از جمله اجرای اینگونه سامانه‌های هوشمند و نقش تأثیرگذار تصمیم‌گیری در مورد مکانیابی تسهیلات که عمده‌تأثیر از تصمیم‌گیریه‌ای بلندمدت و استراتژیک شرکت‌های بزرگ است، مکانیابی مناسب استقرار این سامانه‌های نظارتی، به سرمایه‌گذاری‌های بلندمدت شرکت‌های آب و فاضلاب تبدیل شده و با توجه به محدودیت منابع مالی موجود برای آنها،

حائز اهمیت فراوان است، چرا که در شرایط موجود، موفقیت یا شکست استقرار سامانه مدیریت هوشمند آب در ایران، بستگی کامل به مکان‌های انتخابی دارد. از دیگر سوی بدیهی است که شرکت‌های آب و فاضلاب برنامه‌ریزی استقرار تجهیزات هوشمند خود را به گونه‌ای انجام دهند که برای مدت زیادی بتوانند سودآور باقی بمانند و این به آن معنی است که ضروری است تا مکان‌هایی برای استقرار تسهیلات در نظر بگیرند که نه تنها در شرایط فعلی مناسب باشند بلکه در طول عمر تسهیلات نیز سودآور باقی بمانند، لذا به‌عنوان ضرورتی حتمی باید شرایط غیرمطمئن را وارد تحلیل‌های خود در زمینه مکانیابی کنیم.

بنابراین این پژوهش مترصد است تا با لحاظ کردن معیارهای مرتبط با مدیریت مصرف آب و تبعات زیست‌محیطی ناشی از بروز هرگونه مخاطره کمی یا کیفی در فرآیند آبرسانی، به تدوین یک چارچوب اجرایی مناسب جهت استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند آب در ایران بپردازد.

ادبیات پژوهش: شبکه آب هوشمند^۱

شهر، به‌عنوان خاستگاه تمدن بشری همواره مورد توجه نظریه‌پردازان علوم مختلف بوده است. فضای پیچیده شهر، انسان‌های آگاه را برای رهایی از مشکلات و نارسایی‌ها و رسیدن به حد متعالی زندگی به فکر اصلاح و ایجاد ساختارهای جدید شهری وادار کرده است. در طی یک دهه اخیر، شهر هوشمند به‌عنوان راهکار بی‌بدیل حل معضلات شهری، مورد توجه مدیران امور شهری واقع شده است (غلامرضا محمدی، ۱۳۹۵).

می‌توان گفت که هدف اصلی شهرهای هوشمند، دستیابی به وضعیت پایدار در شهر با کمک فناوری‌های مدرن در پارهای ساختارهای (هدف‌گذاری شده و موردنظر) است. شهر هوشمند سعی می‌کند به‌منظور یافتن راه‌حل‌های نوآورانه مؤثر بر ارتقاء پایداری، فناوری‌های دیجیتال پیشرفته را با روش‌های برنامه‌ریزی شهری یکپارچه کند. شهر هوشمند در درجه اول شهر را به‌عنوان سیستمی که دارای زیرسیستم‌های متعدد است بررسی می‌کند (

شده است که آنها، شبکه‌هایی با کارایی بالا هستند که امکان مدیریت بهنگام، بهینه و مطمئن را برای تولید، بهره‌برداری و توزیع منابع آبی فراهم می‌کنند. (بهپویان امین منتظر، ۱۳۹۴)

از دیگر سوی مفهوم اسکادا به عنوان یک ابزار متداول در سطح دنیا، در قالب دسترسی از راه دور به انواع ماژول‌های^۵ کنترل محلی، توسعه یافته است که می‌تواند اجازه دسترسی (به تجهیزات صنعتی) را از طریق پروتکل‌های استاندارد اتوماسیون و از تولیدکنندگان مختلف داشته باشد. سیستم اسکادای غیرمتمرکز (توزیع شده)، از یک مرکز کنترل مرکزی و تعدادی مراکز کنترل محلی که شامل پایانه‌های دور دست^۶ و یا کنترل‌کننده‌های قابل برنامه‌ریزی^۷ هستند تشکیل شده است که از طریق یک شبکه مخابراتی با یکدیگر متصل هستند. (تشیعی و محمدی، ۱۳۹۵)

امروزه اسکادا به‌طور گسترده برای نظارت و کنترل اجزای سخت‌افزاری پراکنده در صنایعی مانند نیروگاه‌ها، شبکه‌های برق و تصفیه آب استفاده می‌شود. اغلب این سامانه نظارتی در زیرساخت‌های بحرانی استفاده می‌شوند که امنیت و ایمنی در آنها جزو عوامل حیاتی است. (آنتونیو ام گریلو و همکاران،^۸ ۲۰۱۴)

شکل یک نشان می‌دهد که داده‌های حاصل از سامانه اسکادا در کنار ورودی‌های سنسورها و اطلاعات عملیاتی فرایند، ورودی‌های اصلی سیستم یکپارچه داده و هشدارهای الکترونیکی و ماژول پشتیبانی از تصمیم شبکه آب هوشمند هستند. ابزارهای بسیار متنوع پیش‌بینی سریع مصرف آب شامل مدل‌سازی با روش‌های معمول رگرسیون، تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی، تکنیک‌های هوش مصنوعی، سیستم‌های خبره، شبکه‌های عصبی مصنوعی و یا تکنیک‌های مدل‌سازی مانند مدل‌های اکتشافی اغلب عملکردی مشابه را در پیش‌بینی ساعت به ساعت فرایند نشان می‌دهند و دقت آنها بستگی به دقت و پیش‌بینی پذیری داده‌های حاصل از سیستم اسکادا، پیچیدگی و همچنین کالیبراسیون و سطح نگهداری تجهیزات نرم‌افزاری دارد.

سی هاف و همکاران^۱، (۲۰۱۲).

بدیهی است که آب منبع حیات انسان است و با افزایش جمعیت و توسعه شهری، کمبود منابع آب مناسب شرب به‌طور فزاینده‌ای برجسته می‌شود و موضوع آلودگی آب نیز بیشتر و بیشتر اهمیت پیدا می‌کند. به دلیل تأثیرات جدی بروز سیل، خشک‌سالی و هوای آلوده در سرتاسر جهان، نظارت و مدیریت منابع آب به مشکلی بزرگ در فرایند توسعه شهری بدل شده است و به‌عنوان بخش مهمی از شهر هوشمند، انتظار می‌رود تا استقرار (فرایند) آب هوشمند به‌عنوان معیاری مهم برای کمک به جوامع، توسط نسلی جدید از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات که می‌تواند مشکلاتی نظیر تغییرات اقلیمی در سطح جهان، کمبود آب به دلیل استفاده بیش از حد توسط مردم و وضعیت بغرنج منابع آبی به واسطه بروز سوانح شدید، خشک‌سالی و تخریب زیست‌بوم‌های محیط‌زیست را حل کند، پذیرفته شود (وانگ یوانوان و همکاران^۲، ۲۰۱۷).

طبق بررسی‌ها، برای حل مشکلات موجود و برای تمام منابع آبی در دسترس، یک روش مدیریت آب یکپارچه بر اساس عرضه و تقاضای منطقه‌ای نیاز است که باید قادر باشد توزیع منابع آبی را متناسب با تعصبات (محلی) موجود بر سر منابع آبی مدیریت کند و منجر به افزایش بهره‌وری عملیاتی و پوشش تقاضاهای نگهداری و تعمیرات از طریق ابزارهای فناوری اطلاعات و ارتباطات و با توجه به طرح کلی موجود برای استفاده از تمام منابع آبی شناسایی شده در سایت هدف شود. لذا اخیراً شبکه آب هوشمند به‌عنوان گزینه‌ای برای تکمیل سیستم مدیریت آبی موجود معرفی شده است. (دونگون کواکا و یون جانگ کیما و ونتایی کیما^۳، ۲۰۱۶) اساساً اهداف مدیریت هوشمند آب را می‌توان در قالب پیش‌بینی تقاضا، نظارت بر کیفیت آب و تشخیص خطا تقسیم کرد. (پراوین ویجیا و باگاواتیسیواکومار^۴، ۲۰۱۶) در واقع شبکه آب هوشمند، مدل جدید توسعه پایدار شهری است و برای افزایش سطح کیفی و کمی خدمات و کاهش هزینه‌های مرتبط، اینگونه تعریف

0- Module

1- RTU: Remote Terminal Unit

2- PLC: programmable Logic Controller

3- António M. Grilo et al.

1- C.Hafedh et al.

2- Wang Yuanyuan et al.

3- Donggeun Kwaka & Yunjung Kima & Wontae Kima

4- Praveen Vijaia & Bagavathi Sivakumar P



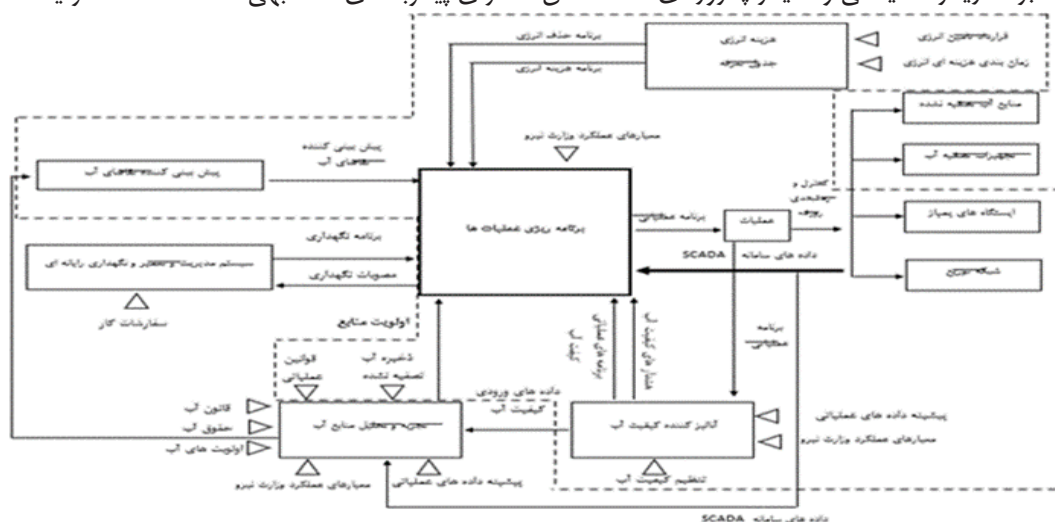
شکل ۱: بررسی اجمالی عملکرد پلت فرم WaterWiSe با کاربردهای فعال شده توسط سیستم یکپارچه داده^۱ و هشدارهای الکترونیکی و ماژول پشتیبانی از تصمیم^۲ و یک مجموعه منتخب از مزایای دیده شده (مایکل الن و همکاران، ۲۰۱۲).

شکل دو، نشانگر شمای ارتباط بین اجزای مختلف یک شبکه هوشمند (مبتنی بر مدیریت انرژی و کیفیت آب) می باشد که مطابق آن، اسکادا یکی از زیرمجموعه های کلیدی شبکه هوشمند آب است. این شکل مثالی مفهومی و نمادین از اجزای یک سیستم مدیریتی یکپارچه انرژی و آب را با لحاظ نمودن قابلیت هایی که معمولاً در نرم افزارهای تجاری تلفیق می شوند و معماری داخلی آنها، نمایش می دهد که مطابق آن، خدمت رسانی توسط یک برنامه ریز عملیاتی و مدیر پروژه ای که نقش

اصلی اش ایجاد و توسعه روزانه برنامه عملیاتی کل سیستم است هماهنگ می شود. نرم افزار با اسکادا مرتبط و یکپارچه می شود به گونه ای که رویکرد آن براساس برآوردهای دقیق و افزایش دقت پیش بینی عملکردهای هیدرولیکی، کارکرد پمپ، ساختار تعرفه برق، تغییرات، تقاضای سیستم (دیماند) و کیفیت آب است. (کارلا چرچی و همکاران، ۲۰۱۵).

در منابع داخلی و مطابق مستندات کتابخانه ای شرکت آب و فاضلاب مشهد، شکل کلی ارتباطات طرح شبکه هوشمند آب، مطابق شکل سه است که دارای پنج لایه فیزیکی، اندازه گیری و دریافت، جمع آوری و ارتباطات، مدیریت داده، تحلیل و برنامه های کاربردی می باشد و لایه امنیت و حفاظت هم، چون چتری بر تمام مراحل سایه افکنده است. مطابق این شکل نیز، جایگاه سامانه اسکادا در لایه جمع آوری اطلاعات کاملاً مشهود به نظر می رسد.

اما علیرغم همه مزایای ممکن، نباید فراموش کرد که پیاده سازی مدیریت یکپارچه انرژی و آب با چالش های بسیاری مواجه است که عمده آنها به زیرساخت، مرزهای مفروض سیستم، انرژی برآورد شده و پیچیدگی جغرافیایی اختصاص دارد. اگرچه تمام اجزاء سامانه مدیریت یکپارچه انرژی و آب دارای پیچیدگی مشابهی هستند اما هر یک نیاز



شکل ۲: رابطه میان اجزای مختلف در یک شبکه هوشمند آبرسانی (کارلا چرچی و همکاران، ۲۰۱۵).

۱- IDEAS: Integrated Data and Electronic Alerts System

۲- DSTM: Decision Support Tools Module



به گونه‌ای که یک برنامه‌ریزی عملیاتی زمان‌بندی شده، بر اساس فرآیندهای سازمانی ذیربط که توسط کاریر تنظیم می‌شد به دست آمد. در نهایت این گزارش، امکان کنترل عملیات روزانه سیستم (مدیریت کیفیت آب و انرژی) را نشان داد. در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴ نرم‌افزار به روز شده و تجاری سیستم (مدیریت کیفیت آب و انرژی) در مناطق مختلف جهان مانند نیوزلند، بریتانیا، استرالیا، کانادا و کره نصب و اجرا شد. در واقع مفهوم سامانه مدیریت یکپارچه انرژی و کیفیت آب در اوایل دهه نود میلادی برای ایجاد یک شرکت آب و فاضلاب، بر پایه یک سامانه مدیریتی مبتنی بر کنترل سیستم و به‌منظور دستیابی همزمان به کارایی در حوزه انرژی و تحقق اهداف کیفی آب طراحی و تبیین شد.

همانگونه که پیشتر، به تفصیل گفته شد، ارتباطات بلادرنگ نرم‌افزار مدیریت یکپارچه انرژی و آب با اسکادا این امکان را فراهم می‌آورد تا به کنترل و صدور توصیه‌های مستمر و پیشنهادات پویا در مورد عملکرد سیستم پردازد. کنترل واقعی فرایندهای آبی و به‌ویژه تأمین آب سیستم‌های توزیع بدون (زیرساخت) تله‌متری^۱ مناسب یا اسکادای کافی امکان‌پذیر نیست. استفاده از زیرساخت مدیریتی یکپارچه انرژی و آب، نیاز به ارتباط با یک سیستم کنترل در دسترس دارد. اگر سیستم اسکادا و تله‌متری موجود دربرگیرنده قابلیت کنترل از راه دور پمپ و شیرآلات، مطابق منطق از پیش تعریف شده نباشد، شرکت آب و فاضلاب نیاز به سرمایه‌گذاری قابل توجه برای توسعه منطق کنترلی دارد تا بتواند ارتباط با سیستم اسکادا را برقرار کند. اصولاً شبکه اسکادا، جز حیاتی پروسه نظارت و کنترل فرایندهای تأسیسات تحت پوشش است و یک خطا در آن می‌تواند عملکرد سیستم را تا آنجا تغییر دهد که تأثیر منفی بر سلامت عمومی و ایمنی بگذارد و یا ضررهای اقتصادی برای شرکت آب و فاضلاب به ارمغان بیاورد. در نتیجه بنگاه‌های خدماتی در حوزه آب، (سرنوشت) زیرساخت‌های اسکادای موجود خود را با اجزاء نرم‌افزار سیستم مدیریت یکپارچه انرژی و

آب جدید پیوند نمی‌زنند (و از آنها به شکل مستقل استفاده می‌کنند). (کارلا چرچی و همکاران^۲، ۲۰۱۵) حضور زیرسامانه اسکادا به‌عنوان جزء کلیدی پلتفرم شبکه هوشمند آب و لزوم استفاده مستقل، به موازات هزینه‌بر بودن اجرای آن، عاملی شد تا با تأیید گروه کانونی، مکانیابی پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند آب از منظر انتخاب محل مناسب جهت جایابی استقرار سامانه اسکادا صورت پذیرد.

در زمینه مکانیابی در صنعت آب و فاضلاب پژوهش‌های زیادی انجام گرفته که غالب آنها، مبتنی بر توانایی‌های نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی^۳ و با هدف یافتن مکان مناسب احداث تصفیه‌خانه فاضلاب است. در خصوص مکانیابی سامانه‌های هوشمند در میان منابع داخلی، می‌توان به دستورالعمل سطح‌بندی و اولویت‌بندی استقرار و پیاده‌سازی سامانه‌های اسکادا اشاره کرد که در سال ۱۳۹۰ به کلیه شرکت‌های آب و فاضلاب ابلاغ شده است. این دستورالعمل بر پایه وضعیت اقلیم، جمعیت، فرایند بهره‌برداری، وجود نیروی انسانی متخصص و قابلیت پشتیبانی از سیستم اجرا شده و... به امتیازدهی و اولویت‌بندی مکانی استقرار سامانه‌های اسکادا در سطح شهرها و روستاهای تحت پوشش می‌پردازد و بر مبنای بودجه عملیاتی موجود، اقدام به ارائه نقشه راه اجرای این سامانه در سطوح مختلف می‌کند. سایر فعالیت‌های پژوهشی مرتبط با موضوع تحقیق، به شرح جدول یک است.

لذا پس از بررسی پیشینه و مبانی علمی مرتبط با جایگاه سامانه اسکادا در بطن شبکه هوشمند آب، مثال‌های عملیاتی استقرار شبکه‌های هوشمند آب و اجرای سامانه‌های اسکادا در کشورهای نظیر استرالیا، آمریکا، کانادا، ایرلند، کره جنوبی، هند و ایران مورد بررسی قرار گرفت، الزامات استقرار آنها متناسب با پهنه مورد مطالعه، استخراج و الگوی مکانیابی موردنظر طراحی و تبیین گردید.

۲- Carla Cherchi et al.

۳- GIS: Geographic Information System

۱- Telemetry & telecontrol

جدول ۱: پیشینه پژوهش در خصوص مکانیابی شبکه آب هوشمند

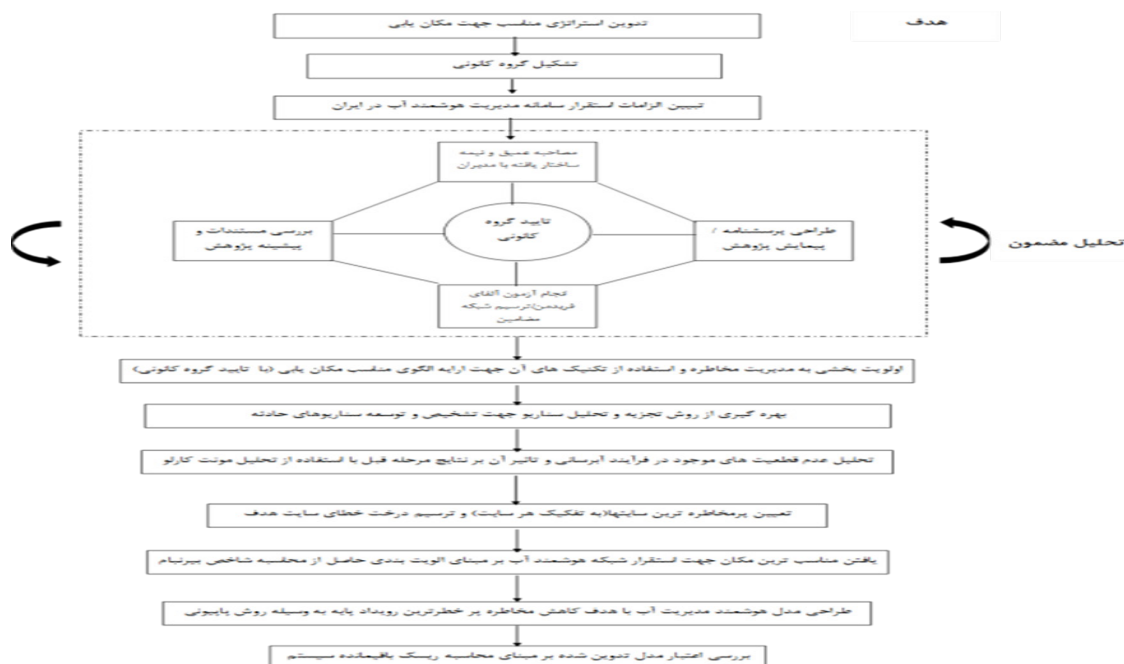
ردیف	نام پژوهشگر	سال	عنوان
۱	امیر آدینی و همکاران	۱۳۹۵	مکانیابی تصفیه‌خانه فاضلاب با استفاده از تکنیک TOPSIS و تصمیم‌گیری چندمتغیره بر پایه ملاحظات پدافند غیرعامل مطالعه موردی شهر مشهد
۲	ابراهیم احمدی شرف و همکاران	۲۰۱۶	لحاظ نمودن خطر سیل در فرایند انتخاب سایت با استفاده از تصمیم‌گیری چند معیاره فضایی
۳	محمدحسین محمدی و همکاران	۱۳۹۶	پیاده‌سازی تابع انتقال HyperbolicTangent شبکه عصبی مصنوعی جهت مکانیابی نصب فشارشکن روی شبکه توزیع آب
۴	الخلیدی و همکاران	۲۰۱۸	انرژی و آب به‌عنوان شاخص‌هایی برای طراحی و انتخاب محل شهر پایدار در اردن با استفاده از شبکه هوشمند
۵	داوود رستم خانی و اکرم آقایی	۱۳۹۸	مکان‌یابی نصب فشارشکن روی شبکه توزیع آب با استفاده از استنتاج فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (منطقه مورد مطالعه: شهرستان زنجان)
۶	علی حقیقی	۱۳۹۸	تهیه طرح نرم‌افزار جامع مکانیابی بهینه سنسورهای فشار جهت هوشمندسازی شبکه توزیع آب

پهنه مورد مطالعه:

محدوده مورد مطالعه، منطقه تحت پوشش مخزن A است که طبق مستندات موجود و مصاحبه به عمل آمده با مدیران ذیربط، شاخص معنی‌داری وضعیت آب شرق شهر تهران است. این مخزن، سیصد و بیست هزار نفر را سیراب می‌کند و دلیل انتخاب آن به نقش کلیدی مخزن مذکور در تأمین فشار آب شبکه و نیز سابقه مخاطره قبلی به واسطه پیامدهای ناشی از سیلاب و همچنین اهمیت آن برای تأمین آب مصرف‌کنندگان برمی‌گردد. حجم این مخزن شصت و پنج هزار مترمکعب است که با نرخ ۱۰۳۹ لیتر بر ثانیه، آب از آن برداشت و مصرف می‌شود.

روش پژوهش:

در این پژوهش از روش تحقیق آمیخته متوالی استفاده شده است. در بخش کیفی از تحلیل مضمون و در بخش کمی از روش‌های ارزیابی ریسک با احتمال^۱ مشتمل بر تحلیل سناریو، درخت خطا و شاخص بیرنهام (جهت اولویت‌بندی رویداد برتر) بهره‌گیری، عدم قطعیت‌های موجود در سناریوهای تدوین شده به کمک تحلیل مونت کارلو بررسی و سپس از مدل پایبونی جهت اعتبارسنجی، استفاده شده است. بر این اساس مدل مفهومی انجام پژوهش به شرح شکل چهار است.



شکل ۴: مدل مفهومی پژوهش

روش نمونه گیری:

به منظور انجام مصاحبه عمیق و نیمه ساختاریافته با خبرگان در بخش کیفی، از ترکیب روش های هدفمند قضاوتی و غیراحتمالاتی گلوله برفی، استفاده شده است. بدین منظور، براساس سابقه فعالیت در حوزه هوشمندسازی آب، افرادی از خبرگان این حوزه شناسایی، بر اساس معیارهای لازم انتخاب و در ادامه بر اساس روش گلوله برفی، خبرگان دیگر شناسایی گردید. در طی انجام فرآیند مصاحبه از خبرگان درخواست گردید تا خبرگان دیگر را معرفی نمایند. اکثر خبرگان علاوه بر دارا بودن معیارهای مربوطه مشتمل بر دارا بودن دانش، تخصص و تجربه بالا در مبحث هوشمندسازی آب، شناسایی شده توسط سایرین، فهم نظری موضوع، تنوع فعالیت در حوزه مربوطه و دارای انگیزه مشارکت در تحقیق، توسط خبرگان دیگر معرفی و تأیید گردیدند.

جمع آوری و تجزیه و تحلیل داده ها تا آنجا ادامه می یابد که محقق در داده ها به مرز اشباع برسد، مفاهیم مرتبط با پدیده مورد نظر که توسط مصاحبه شوندگان مختلف مطرح می شود تکراری شود، هیچ گونه تغییری در جریان مفاهیم و مقولات خاص ایجاد نشود و کفایت نظری حاصل شود. با توجه به نوپایی مفاهیم، پس از مصاحبه با هفت

نفر از مدیران و انجام تحلیل لازم، اشباع نظری حاصل شد. پنج نفر از مصاحبه شوندگان دارای مدرک کارشناسی ارشد، دو نفر کارشناسی و همگی آقا می باشند.

در خصوص گروه کانونی نیز با توجه به پرسش ها، هدف تحقیق و ضرورت انجام مصاحبه گروهی، از نمونه گیری هدفمند سهمیه ای، با لحاظ نمودن حضور متناسب شش نفر از افراد مطلع مرتبط با موضوع مشتمل بر معاونین ارشد شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور و وزارت نیرو (دو نفر)، مشاورین و پیمانکاران فعال در حوزه هوشمندسازی آب (دو نفر) و اساتید دانشگاهی صاحب نظر در این حوزه (دو نفر) استفاده و در نهایت پس از شناسایی مضامین و اولویت دهی به مدیریت مخاطره در بحث مکانیابی استقرار سامانه های مدیریت هوشمند آب، از تکنیک های ارزیابی ریسک بر مبنای احتمال یاری گرفته شد تا بهترین مکان جهت استقرار شبکه هوشمند آب شناسایی گردد.

روایی و پایایی پژوهش:

برای سنجش روایی این تحقیق در بخش کیفی، علاوه بر اینکه مضامین فراگیر، سازمان دهنده و پایه با مطالعه مبانی نظری، پیشینه تحقیق و کلیه منابع و مستندات اجرایی در دسترس انتخاب و تأیید گردید،

یافته‌های پژوهش:

تحلیل مضمون

تحلیل مضمون روشی جهت شناخت، تحلیل و گزارش الگوهای موجود در داده‌های کیفی و فرآیندی برای تحلیل داده‌های متنی است که داده‌های پراکنده و متنوع را به داده‌هایی غنی و تفصیلی بدل می‌کند و زمانی مفید است که پژوهش در زمینه‌ای نامشخص صورت گیرد و یا نظر افراد درباره موضوع مورد پژوهش معلوم نباشد. (حسین خنیفر، ناهید مسلمی، ۱۳۹۷)

در این قسمت، نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها با روش تحلیل تم و با کمک نرم‌افزار Maxqda.10 در قالب تم‌های اصلی، تم‌های فرعی و مفاهیم ارائه گردید. بر اساس رویکرد براون و کلارک، فرایند به کار گرفته شده برای تحلیل مضمون در این پژوهش، شامل شش فاز آشنایی با داده‌ها، ایجاد کدهای اولیه، جستجوی تم‌ها، بازنگری تم‌ها، تعریف و نامگذاری تم‌ها و نهایتاً تهیه گزارش می‌باشد.

نظرات و راهنمایی گروهی از خبرگان نیز لحاظ شد و قبل از کدگذاری، جرح و تعدیل نهایی صورت پذیرفت. در این بخش، ابتدا کدگذاری با مطالعه سطر به سطر کلیه مستندات موجود به شکل دستی صورت گرفت و پس از اتمام کدگذاری دستی و بدون مراجعه مجدد به آن، کدگذاری رایانه‌ای با نرم‌افزار Maxqda.10 به صورت مستقل انجام، نتایج این دو کدگذاری با یکدیگر مقایسه و از روش هولستی^۱ برای محاسبه پایایی استفاده شد. رابطه هولستی جهت تعیین پایایی داده‌های اسمی برحسب «درصد توافق مشاهده‌شده»^۲ و بین صفر (عدم توافق) و یک (توافق کامل) متغیر است و اگر از ۰/۷ بزرگ‌تر باشد، مطلوب می‌باشد که مقدار آن در

$$692 * 2 / (774 + 737) = 0.916$$

این تحقیق برابر است با:

در جدول دو، فهرست روش‌های تأمین اعتمادپذیری پژوهش حاضر در بخش کیفی آمده است.

جدول ۲: روش‌های تأمین اعتمادپذیری پژوهش در بخش کیفی

معیار	زیر معیارها	استراتژی تأمین	اقدام صورت گرفته
قابل قبول بودن	روایی و روایی پژوهش	نمونه‌گیری گلوله‌برفی	معرفی مصاحبه‌شوندگان بعدی توسط مصاحبه‌شوندگان قبلی
	روایی تفسیری	نمونه‌گیری بر مبنای اعتبار	انتخاب مصاحبه‌شوندگان بر اساس توصیه متخصصان
		استفاده از توصیف گره‌های با حداقل مداخله	بهره‌گیری از عبارات توصیفی مانند نقل‌قول‌ها در تفسیرها
انتقال‌پذیری وصف تفصیلی همه جزئیات ارائه یک تصویر مفصل از زمینه‌ای که پژوهش در آن انجام شده است.		استفاده از نمونه‌گیری بر مبنای اعتبار	انتخاب مصاحبه‌شوندگان از میان مدیران ذی‌ربط صنعت آب و فاضلاب
قابلیت اطمینان تشکیل گروه کانونی و در اختیار گذاشتن داده‌ها، روش‌ها و تصمیمات با هدف بازبینی و موشکافی تحقیق توسط دیگر پژوهشگران		ممیزی قابلیت اطمینان	انجام کدگذاری مستقل دستی و رایانه‌ای و مقایسه و تأیید آن بر اساس رابطه هولستی
تأیید پذیری	ارائه جزئیات داده‌های پژوهش		ارائه گزیده مصاحبه‌ها و توضیح روند تحلیل داده‌ها

۱- Holsti's method

۲- Percentage of Agreement Observation

در گام نخست بخش کیفی، با مرور گسترده ادبیات، مطالعه مستندات و مصاحبه با متولیان امر، الزامات استقرار سامانه اسکادا به عنوان جزیی از پلت فرم شبکه هوشمند آب، از منظر صاحب نظران این حوزه تبیین گردید. در گام بعدی، پس از انجام مراحل فوق و تخصیص کلیه مفاهیم به تم های فرعی و دسته بندی تم های فرعی در قالب تم های اصلی، بازنگری فرایند مذکور در چندین نوبت انجام شد و ضمن تفکیک مفاهیم، در قالب فراوانی (بدون تکرار) و مراجع (با تکرار)، نهایتاً یک نقشه تماتیک راضی کننده از داده ها به دست آمد.

جدول ۳: عناوین اهداف استقرار سامانه اسکادای تأسیسات آب و فاضلاب

ردیف	عنوان (مقوله) هدف	مراجع (با تکرار)	فراوانی (بدون تکرار)
۱	هوشمند سازی یک مجموعه در سطح صنعتی	۶۸	۶۵
۲	بهبود شاخص های مرتبط با کارایی فرایندها	۴۸	۴۷
۳	بهبود شاخص های مرتبط با اقتصاد آب از طریق مدیریت هزینه	۴۸	۴۵
۴	مدیریت مخاطره	۴۲	۴۲
۵	بهبود فرایندهای بهره برداری تأسیسات آب و فاضلاب	۴۵	۳۴
۶	مدیریت بحران	۲۴	۲۴
۷	مدیریت مصرف انرژی و کاهش هزینه برق مصرفی	۲۴	۲۱
۸	ایجاد زیرساخت برای سیستم های پشتیبان تصمیم	۹	۹
۹	افزایش رضایتمندی مشتریان	۸	۸
۱۰	افزایش بهره وری منابع انسانی و کاهش هزینه و خطای نیروی انسانی	۵	۵
۱۱	بهبود شاخص های مرتبط با فرآیند نگهداری و تعمیرات	۱	۱

جدول ۴: عناوین پیش نیازهای استقرار سامانه اسکادای تأسیسات آب و فاضلاب

ردیف	عنوان (مقوله) پیش نیاز	مراجع (با تکرار)	فراوانی (بدون تکرار)
۱	لزوم تدوین استراتژی اجرایی مناسب	۶۵	۴۵
۲	لزوم آموزش و جذب نیروی انسانی آگاه و متخصص	۸	۷
۳	لزوم رعایت الزامات امنیت سایبری	۶	۶
۴	تأمین منابع مالی لازم	۵	۵
۵	تحلیل هیدرولیکی شبکه	۲	۲
۶	استقرار سامانه GIS	۳	۳
۷	لزوم خدمات پس از فروش مناسب جهت تجهیزات منصوبه	۲	۲
۸	ضرورت انتقال و بومی سازی فناوری های مرتبط	۲	۲

و دستیابی به بینش منسجم‌تر و آگاهی بیشتر در زمینه الزامات استقرار سامانه‌های اسکادای آب و فاضلاب، بهره گرفته شد. در این گروه، موارد مطروحه در گام‌های قبلی مورد تأیید ضمنی قرار گرفت اما در مبحث اهداف استقرار اسکادا، مقوله مدیریت مصرف انرژی و کاهش هزینه برق مصرفی جزو اهداف کلانتر و در سطح شبکه هوشمند آب لحاظ شد و بر بهبود شاخص‌های اقتصاد آب از طریق مدیریت هزینه و همچنین افزایش بهره‌وری منابع انسانی و کاهش هزینه و خطای نیروی انسانی تأکید و پس از تأیید نهایی، شبکه مضامین در شکل پنج ارائه گردید.

تحلیل سناریو

پس از رسم شبکه مضامین و اولویت‌دهی به مدیریت مخاطره در مکانیابی شبکه هوشمند آب توسط گروه کانونی، در گام نخست بخش کمی از روش تحلیل سناریو استفاده شده است. مجموعه‌ای از سناریوها که (برای مثال) انعکاس‌دهنده بهترین یا بدترین حالت و یا

بر اساس نتایج گام دوم بخش کیفی پژوهش و طبق جدول سه، بر مبنای بیشترین فراوانی (بدون تکرار)، اصلی‌ترین هدف استقرار سامانه اسکادای آب، هوشمندسازی یک مجموعه در سطح صنعتی است و در ادامه، بهبود شاخص‌های مرتبط با کارایی فرایندها و اقتصاد آب (از طریق مدیریت هزینه) و همچنین مقوله مدیریت مخاطره قرار دارد.

جدول چهار نیز مهم‌ترین پیش‌نیاز استقرار سامانه اسکادا در صنعت آب و فاضلاب را لزوم تدوین استراتژی اجرایی مناسب می‌داند و در ادامه، بیشترین تأکیدات بر مبحث لزوم آموزش و جذب نیروی انسانی متخصص، اهمیت رعایت الزامات امنیت سایبری و تأمین منابع مالی لازم است.

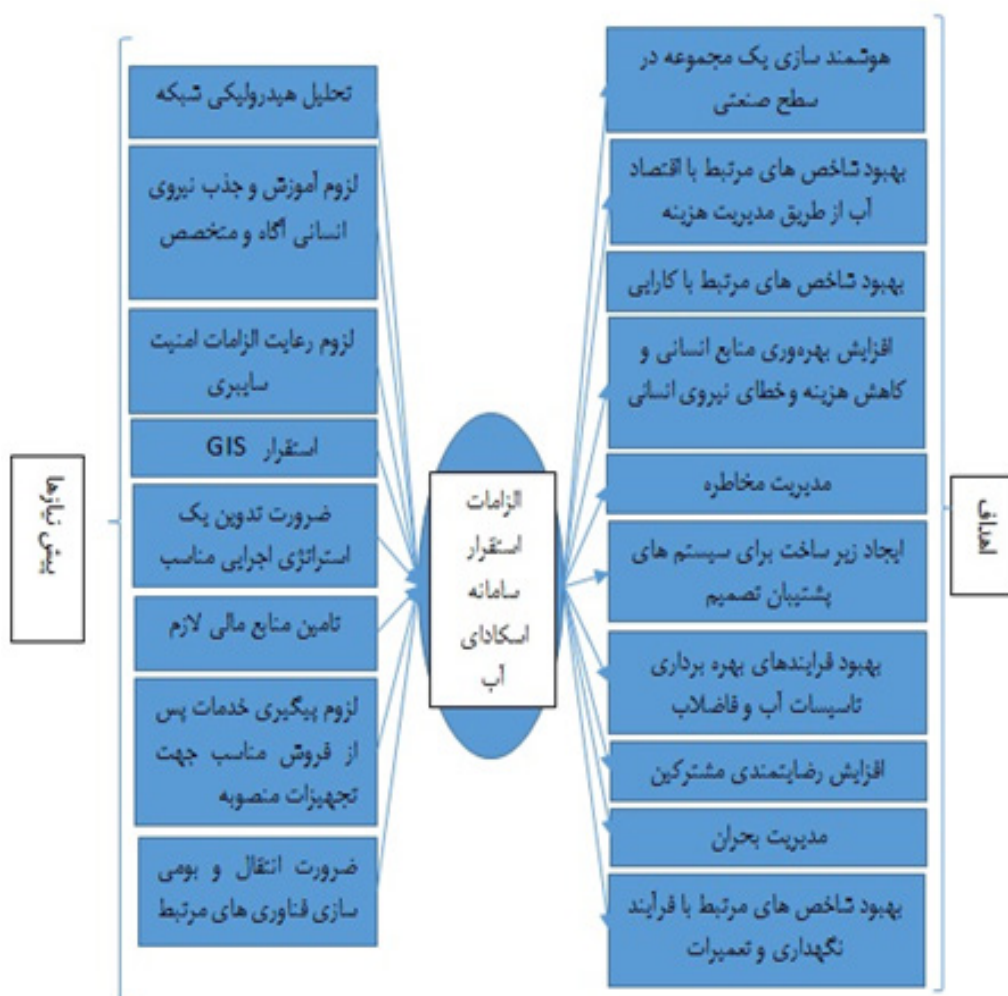
به‌منظور کمک به قضاوت گروه کانونی، اولویت‌بندی تمایزات سامانه اسکادای آب در قیاس با سایر صنایع، پس از انجام مصاحبه و بررسی دقیق پیشینه پژوهش و بر اساس فراوانی (بدون تکرار)، در جدول پنج ذکر شد تا با آن، به تبیین بافت سازمانی استقرار اینگونه ساختارهای هوشمند بپردازیم.

جدول ۵: اولویت‌بندی وجوه افتراق اسکادای آب و فاضلاب با سایر سامانه‌های مشابه کنترل صنعتی

ردیف	عنوان (مقوله) ویژگی متمایز کننده	مراجع (با تکرار)	فراوانی (بدون تکرار)
۱	پراکندگی زیاد تأسیسات تأمین، انتقال، ذخیره و توزیع آب	۳	۳
۲	عدم یکپارچگی و به هم پیوستگی منابع آبی در سطح کشور	۲	۲
۳	ضرورت ایجاد شبکه ارتباطی قوی و مؤثر	۲	۲
۴	لختی فرایندهای آب و فاضلاب در قیاس با صنایع دیگر	۲	۲
۵	عدم اتکای صددرصدی به اسکادا و سایر زیرسیستم‌های مدیریت هوشمند آب و نیاز به قضاوت‌های انسانی در تصمیم گیر یها	۲	۱
۶	ضرورت تحلیل داده‌های عملیاتی حاصل از اسکادای صنعت آب	۱	۱
۷	ضرورت حداکثری جهت بهره‌گیری از سیستم‌های کنترل محلی در صنعت آب	۱	۱
۸	رعایت فوق‌العاده و حداکثری ملاحظات امنیتی	۱	۱

مطابق انتظار است را می‌توان جهت تحلیل پیامدهای بالقوه و احتمال وقوع آنها در هر سناریو محاسبه کرد. این کار به هنگام تحلیل ریسک به‌عنوان شکلی از تحلیل میزان حساسیت استفاده می‌شود. (حسین ابراهیمی و دیگران، ۱۳۹۶) جهت اعتباربخشی به خروجی‌های تحلیل سناریو از قضاوت خبرگان در قالب تشکیل گروه کانونی استفاده شد. گروه کانونی جدید متشکل از

مطابق جدول پنج، آنچه که مشهود است، اهمیت توجه به پراکندگی زیاد تأسیسات تأمین، انتقال، ذخیره و توزیع آب می‌باشد که باید به‌عنوان نقطه تمایز، به هنگام تدوین الزامات عملیاتی استقرار اینگونه سامانه‌های کنترلی در صنعت آب لحاظ گردد. در ادامه با استفاده از نتایج جداول سه تا پنج، از گروه کانونی برای برقراری تعامل بین شرکت‌کنندگان در تحقیق، جهت ایجاد داده‌ها



شکل ۵: شبکه مضامین استقرار سامانه اسکادای آب و فاضلاب (مبتنی بر شبکه هوشمند آب)

پهنه موردنظر تعیین و سپس در صورت از مدار خارج شدن هر یک از ایستگاه‌ها یا پشتیبان‌ها، جایگزین‌های آنها به شکل مجزا و بسته به ماه موردنظر، با نظر گروه کانونی مشخص گردید. سپس احتمال بروز هر یک از این حالات، بر اساس نظرسنجی فازی صورت گرفته از یازده کارشناس خبره بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب شهر تهران که غیرتصادفی و هدفمند انتخاب شده‌اند، لحاظ کردن ضریب اهمیت هر کارشناس و بر اساس رابطه یک حاصل آمده است.

$$\text{اگر } CFP \text{ مخالف صفر باشد } FP = 1/10k \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\text{اگر } CFP \text{ برابر با صفر باشد } FP = 0$$

$$K = \left(\sqrt[3]{(1 - CFP)/CFP} \right) * 2/301$$

مدیران ارشد امور هماهنگی و کنترل آب و فاضلاب شهر تهران است و تمام سناریوهای ممکن و معنی‌دار بر اساس دیدگاه آنها، راستی‌آزمایی شده‌اند. نمونه‌گیری اعضاء این گروه کانونی، براساس سابقه فعالیت در زمینه هوشمندسازی آب و بهره‌برداری از پهنه موجود، از ترکیب روش‌های هدفمند قضاوتی و گلوله‌برفی حاصل شده است.

در این پژوهش، با لحاظ نمودن میزان دقیق آسیب‌پذیری تأسیسات به هنگام وقوع خطر و وجود پشتیبان‌های مناسب برای شرایط مختلف بهره‌برداری و حالت‌های اضطرار شبکه آبرسانی شهر تهران، سه سناریو مشتمل بر از دست رفتن هر سایت (به صورت منفرد)، از دست رفتن سایت و سایت پشتیبان مرتبه اول و در نهایت از دست رفتن سایت و پشتیبان‌های مرتبه اول و دوم تدوین شد. برای محاسبه پیامد و ریسک در هر سناریو، ابتدا نقش هر یک از ۶۹ ایستگاه موجود در فرایند آبرسانی

ریسک خطر نیز در هر سناریو از حاصل ضرب احتمال وقوع یا تکرارپذیری حادثه در پیامد یا شدت حاصله به دست می‌آید.

نظر به پویایی فرآیند آبرسانی و تغییرات شدید و لحظه به لحظه مقادیر حجم آب موجود در مخازن (برحسب m^3/h)، دبی آب جایگزین (برحسب m^3/h) و متفاوت بودن زمان‌های قطعی آب (برحسب h)، با نظر گروه کانونی و در گام نخست، کلیه مقادیر برای بدترین حالت ممکن مشتمل بر حداکثر زمان قطعی آب و با فرض حداکثر بودن آب ذخیره موجود در مخزن A لحاظ و در گام‌های بعدی، عدم قطعیت‌های مقادیر ورودی به صورت پویا در مدل اعمال گردید. لذا کدنویسی انجام شده در متلب، ابتدا مصرف هر ماه را از طریق برآورد انتگرال زیر سطح منحنی مصرف مشترکین محاسبه، سپس پیامد ایجاد مخاطره برای هر ۶۹ ایستگاه را بسته به هر سناریو، اندازه‌گیری و با توجه به احتمال وقوع، ریسک آنها را محاسبه می‌کند.

بین ایستگاه‌ها، کسری آبدی چاه‌ها به راحتی توسط چاه‌های مجاور جبران پذیر است و حذف آنها، پیامد اندکی ایجاد می‌کند. لذا با توجه به دیدگاه گروه کانونی و قضاوت خبرگان، در صورت حذف یک چاه، چاه جایگزین با حداکثر $\pm 20\%$ درصد تغییر در دبی آبدی، جایگزین خواهد شد و نقش پشتیبان را ایفاء می‌کند. در کدنویسی انجام شده نیز در صورت خروج یک چاه، جایگزین آن با $\pm 20\%$ درصد (به صورت کاملاً تصادفی) تغییرات در دبی آبدی، محاسبه می‌گردد. بر این اساس

که در این رابطه:

FP: احتمال شکست^۱ هر رویداد پایانی

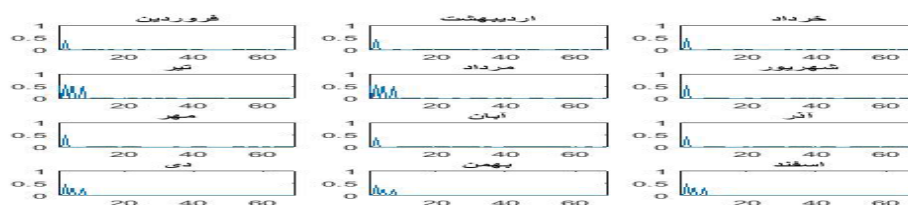
CFP: عدد امکانی^۲ حاصل از مرحله غیر فازی کردن

با توجه به تحلیل بر مبنای رفتار پویای شبکه آبرسانی و وجود سایت‌های پشتیبان متمایز در ماه‌های مختلف سال، پیامد هر مخاطره، با توجه به مصرف متفاوت روزهای هر ماه می‌بایست تا روز به روز و به صورت مجزا حساب گردد. لذا، نظر به الگوهای به شدت متفاوت رفتار مصرف مشترکین در طی روزهای مختلف سال و فقدان اطلاعات چگونگی تغییرات مصرف آب برای هر ۳۶۵ روز سال، اطلاعات مصرف یک روز در هر ماه به صورت تصادفی استخراج شده است که شامل اطلاعات مصرف روزهای عادی، اواخر هفته، تعطیلات و روزهای خاص نظیر عید نوروز یا شب یلدا و یا مراسمات مذهبی نظیر تاسوعا و عاشورا می‌باشد که رفتار مصرف در آنها احتمالاً متفاوت می‌باشد. رابطه محاسبه پیامد عبارت است از:

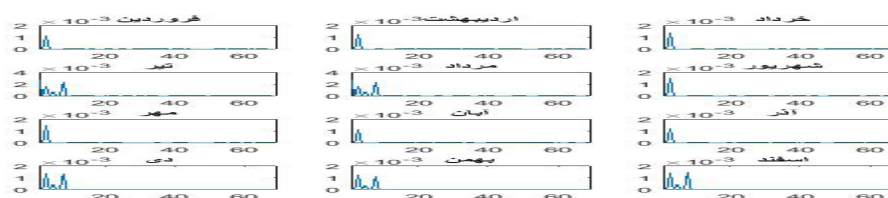
$$\text{پیامد} = \frac{\text{آب کمبود}}{\text{میزان مصرف آب}} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که کمبود برابر است با:

کمبود = (مصرف میزان) - (A) موجود در مخزن آب (حجم) + (جایگزین آب دبی * آب قطعی زمان)



نمودار ۱: پیامد بروز سناریو اول یا خروج تکی هر یک از تأسیسات



نمودار ۲: ریسک بروز سناریو اول یا خروج تکی هر یک از تأسیسات به تفکیک ماه

۱- Failure Probability

۲- Crisp Failure Possibility

نتایج تحلیل سناریو اول، به تفکیک ماه‌های مختلف در نمودارهای یک و دو آمده است که مطابق آن، بیشترین پیامد در ماه چهارم یعنی تیرماه اتفاق می‌افتد. مطابق نمودار دو، بیشترین ریسک سناریو اول، متعلق به تیرماه و از مرتبه 10^{-3} می‌باشد. نکته قابل توجه آن است که برای چاه‌ها میزان پیامد صفر نیست و مقدار کمی دارد.

محاسبه پیامد و ریسک همانند سناریو اول برای سناریوهای دوم و سوم نیز انجام شد. سناریو دوم شامل از مدار خارج شدن هریک از ایستگاه‌ها و تأسیسات پشتیبان مرحله اول آنها و سناریو سوم به معنی از دست رفتن همه تأسیسات پشتیبان است. مقایسه روند تغییرات هنگام گذر از سناریو اول به دوم، نشان می‌دهد که اگرچه تعداد ریسک‌های غیرصفر بیشتر می‌شود اما مرتبه ریسک‌ها 10^{-5} است که در قیاس با سناریو اول کاهش پیدا کرده است.

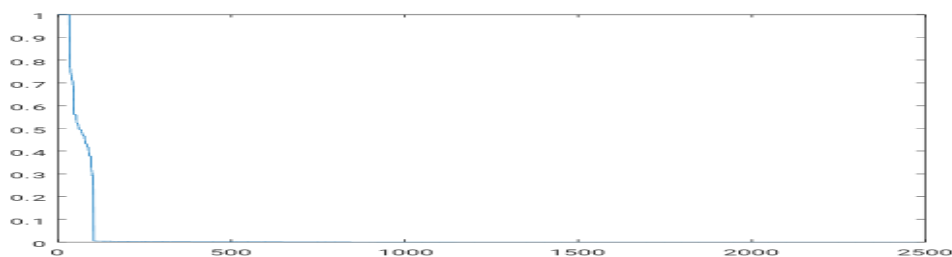
همین روند برای سناریو سوم نیز وجود دارد بدین معنی که پیامدها بیشتر می‌شود و در بعضی ایستگاه‌ها به یک میرسند اما ریسک از مرتبه 10^{-7} است. در این تحلیل، ۶۹ ایستگاه موجود در پهنه هدف، در طی دوازده ماه سال (به تفکیک) و در قالب سه سناریو و ۲۴۸۴ حالت مختلف بررسی شد. این تعداد داده در نمودار سوم به صورت نزولی، به نحوی مرتب شد که همه پیامدهای ممکن قابل توجه به سهولت در کنار هم مشاهده گردد. مطابق این نمودار، اکثر پیامدها بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است

ریسک موجود برای ۲۴۸۴ حالت ممکن در نمودار چهار آمده است. در این نمودار، ریسک‌ها به شکل مستقل و با توجه به مقدار خود و نه میزان پیامد، مرتب شده‌اند. بعد از محاسبه همه پیامدهای ممکن، با کدنویسی دیگری در متلب، پیامدهایی که طبق نظر گروه کانونی، مقدار آنها از یک حد آستانه مشخص یعنی نیم بیشتر باشند، شمارش و خروجی به تفکیک ایستگاه سرمنشاء مخاطره و ماه وقوع در یک فایل اکسل ذخیره می‌شود.

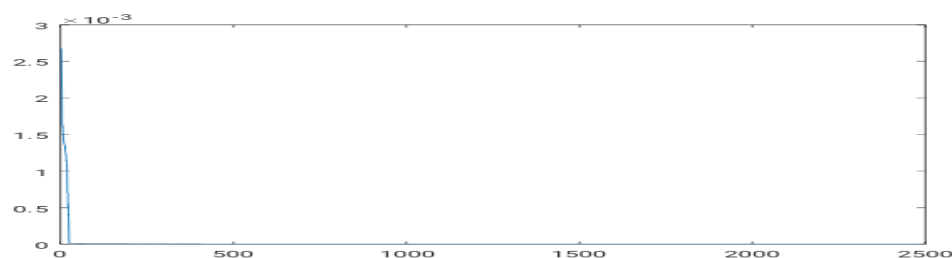
جدول ۶: جدول تجمیع پیامدهای معنی‌دار ناشی از سناریوهای سه‌گانه

نام ایستگاه	جمع همه سناریوهای معنی‌دار
تصفیه‌خانه B	14
تصفیه‌خانه C	0
مخزن A	3
مخزن D	0
مخزن E	15
مخزن F	12
مخزن G	0
ایستگاه پمپاژ E	15

جدول شش، تجمیع پیامدهای معنی‌دار برای همه سناریوهای سه گانه را نشان می‌دهد. بدیهی است که



نمودار ۳: نمودار کلی پیامدها



نمودار ۴: نمودار کلی ریسک‌ها

برای حد آستانه‌های دیگر، اعداد متفاوتی به دست خواهد آمد.

جدول ۷: جدول تجمیع ریسک‌های معنی‌دار ناشی از سناریوهای سه‌گانه

نام ایستگاه	جمع همه سناریوهای معنی‌دار
تصفیه‌خانه B	2
تصفیه‌خانه C	0
مخزن A	12
مخزن D	0
مخزن E	5
مخزن F	0
مخزن G	0
ایستگاه پمپاژ E	15

با برنامه‌ای مشابه می‌توان به شمارش ریسک‌های مهم و معنی‌دار اقدام کرد. حدود ریسک‌های محاسبه شده از 10^{-3} تا 10^{-7} است. با توجه به این اعداد و با نظر گروه کانونی، میانگین هندسی یعنی آستانه 10^{-5} لحاظ، محاسبات انجام و نتایج تجمیع تمام ریسک‌های معنی‌دار مطابق جدول هفت ارائه شد که از آن می‌توان به آسانی، سایت‌های اولویت‌دار حاصل از تحلیل سناریو را مشاهده کرد.

تحلیل مونت کارلو

از آنجا که در مدیریت ریسک سیستم‌های آب شهری و بخش‌های مختلف آن چندین منبع عدم قطعیت اساسی وجود دارد و شبیه‌سازی مونت کارلو نیز از جمله روش‌های احتمالاتی مناسب برای تحلیل عدم قطعیت و ریسک سیستم‌های پیچیده و مبهم است، لذا در این بخش، از آن برای تحلیل ریسک سناریوهای مختلف استفاده و نتایج آن با دستاوردهای بخش قبل مقایسه گردید.

در مسئله موردبحث، چندین پارامتر به صورت غیرقطعی وجود دارد که در محاسبات تجزیه و تحلیل سناریو، همه آنها بر اساس نقشه‌های موجود و دیدگاه گروه کانونی، به صورت ثابت لحاظ گردید. این موارد مشتمل بر میزان مصرف مشترکین، حجم اولیه مخزن، زمان قطعی آب و مقدار دبی آب جایگزین می‌توانند کمتر یا زیاده‌تر از مقدار پیش فرض باشند. ورودی‌های مدل مونت کارلو، عموماً اعداد صریحی هستند که به صورت تصادفی از

توابع احتمالاتی برازش داده شده به پارامترهای دارای عدم قطعیت ورودی انتخاب می‌شوند. لذا منطقی است که در این تحقیق نیز، اعداد ثابت لحاظ شده در مرحله قبل، مبنا قرار گیرد و سپس با برازش تابع احتمالاتی مانند توزیع نرمال به آنها، عمل شبیه‌سازی چندین بار انجام شود. لیکن عملاً تعیین یک توزیع مناسب آماری، برای این کار میسر نیست و حتی برازش تابع نرمال و انتخاب میزان انحراف نیز باعث افزایش عدم قطعیت‌ها خواهد شد. بر این اساس، اعداد مورد استفاده در بخش قبل به شکل بازه‌های یکنواخت (تابع یکنواخت) فرض شد که حد بالا و پایین این بازه‌ها، دارای تلورانس $\pm 20\%$ است. انتخاب اعداد تصادفی از این بازه‌ها، با یک میزان احتمال و به عبارت دیگر با فرض برابر بودن درجه عضویت کلی اعداد درون بازه صورت می‌گیرد. ورود مکرر مقدار صریح چهار پارامتر دارای عدم قطعیت، منجر به راستی‌آزمایی فرایند انتخاب پرمخاطره‌ترین سناریو خواهد شد. لذا به جای یک بار اجرای برنامه با مقادیر پیش‌فرض ثابت، برنامه ۵۰۰ بار با مقادیر تصادفی اجرا می‌شود. این مقادیر، دارای یک توزیع نرمال با میانگین پیش‌فرض و انحراف معیاری است که ۹۵ درصد اعداد انتخاب شده در بازه $\pm 20\%$ مقدار پیش‌فرض قرار گیرند. پرسش ما در این قسمت آن است که آیا جواب تحلیل با مقادیر ثابت در سناریوهای اول و دوم درست است و یا اینکه با اعمال عدم قطعیت بر مقادیر ورودی، پیامد و ریسک به چه میزان تغییر می‌کند.

مطابق جدول هشت، تحلیل مونت کارلو برای سناریو اول و دوم و برای ۲۰ ماه-ایستگاه دارای بیشترین پیامد انجام شد. دلیل عدم استفاده از این تحلیل برای سناریو سوم، به یک رسیدن پیامد در آن است که در نتیجه، تحلیل مونت کارلو در این سناریو چیز بیشتری به ما ارائه نخواهد کرد.

جدول هشت نشان می‌دهد که در اکثر موارد با احتمال بالای هشتاد درصد، عدد محاسبه شده برای پیش‌فرض عدد قابل قبولی است. با تکرار همین فرایند برای ریسک و مطابق جدول نه، نتایج مبین آن است که در اکثر ماه-ایستگاه‌ها با احتمال بالای هفتاد درصد، ریسک محاسبه شده درست است و این یعنی در صورت تغییر در پارامترهای ورودی و اعمال عدم قطعیت، در نتایج مرحله قبل تغییری حاصل نمی‌شود.

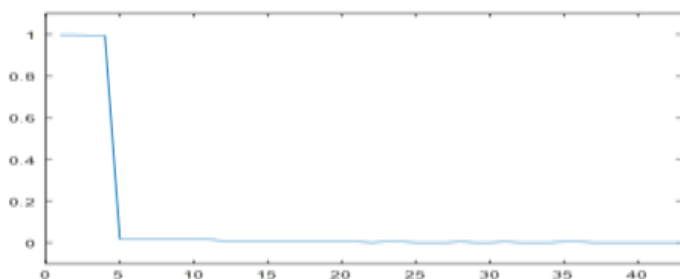
جدول ۸: نتایج محاسبه احتمال (صحت) مقادیر پیامد برای ۲۰ ماه-ایستگاه با پیامد بالا

سناریو	ماه	ایستگاه	پیامد	احتمال قرارگیری در بازه ۲۰ درصد مقدار پیش فرض
2	8	4	0.561	0.658
2	5	4	0.561	0.69
2	1	4	0.561	0.676
1	3	4	0.561	0.944
2	8	5	0.560	0.688
2	5	5	0.560	0.7
2	1	5	0.560	0.696
1	3	5	0.560	0.944
2	8	6	0.523	0.822
2	5	6	0.523	0.794
2	1	6	0.523	0.804
1	3	6	0.523	0.898
1	1	4	0.518	0.89
1	1	5	0.516	0.892
1	8	4	0.496	0.904
1	5	4	0.496	0.9
2	8	7	0.495	0.806
2	5	7	0.495	0.804
2	1	7	0.495	0.82
1	3	7	0.495	0.838

جدول ۹: نتایج محاسبه احتمال (صحت) مقادیر ریسک برای ۲۰ ماه-ایستگاه با ریسک بالا

سناریو	ماه	ایستگاه	ریسک	احتمال قرارگیری در بازه ۲۰ درصد مقدار پیش فرض
1	1	4	0.002677317	0.89
1	1	5	0.002669335	0.892
1	8	4	0.002296649	0.904
1	8	5	0.002289183	0.88
1	3	4	0.001632379	0.944
1	3	5	0.00162829	0.944
1	3	6	0.001522488	0.898
1	8	12	0.001445896	0.5
1	3	7	0.001439609	0.838
1	3	12	0.001403378	0.772
1	3	3	0.001366574	0.794
1	3	10	0.001356615	0.776
1	8	10	0.001347089	0.436
1	3	2	0.001260134	0.712
1	3	11	0.001255773	0.704
1	3	9	0.001215947	0.644
1	8	11	0.001134016	0.362
1	3	1	0.001101435	0.574
1	3	8	0.001101281	0.522
1	5	4	0.000701502	0.9

در این رابطه، $Q(qi=1)$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام به طور کامل رخ دهد و $Q(qi=0)$ تابع فازی احتمال شکست رویداد رأس زمانی است که شکست رویداد پایه i ام اصلاً رخ ندهد.

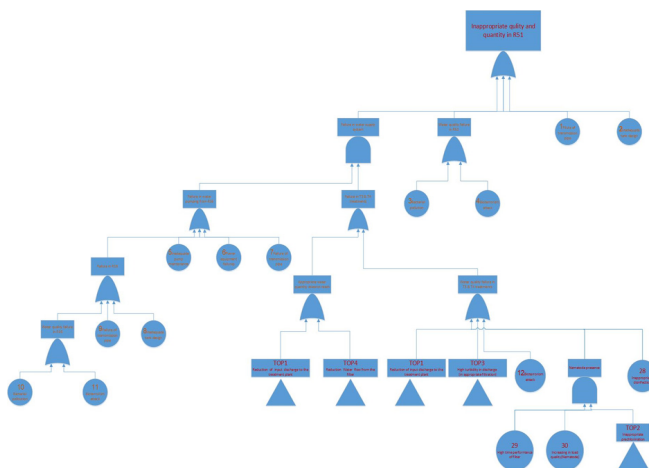


نمودار ۵: تغییرات شاخص بیرنهام برحسب رخداد های اولیه

با توجه به آن که هر چه میزان این شاخص بزرگتر باشد، سهم رویداد پایه در وقوع رویداد رأس بزرگتر است، ساختار درخت خطا در متلب پیاده سازی شد. نمودار پنج، نشانگر اهمیت هر رویداد پایه بر مبنای بزرگی شاخص بیرنهام است. مطابق انتظار رویدادهای یک و دو که به پایان درخت خطا نزدیک تر هستند، در ایجاد رویداد نهایی مؤثرتر هستند. خروجی عددی مقادیر موجود در نمودار پنج برای ده رویداد برتر به شرح زیر است که نتایج آن، مشتمل بر بهترین محل استقرار تأسیسات هوشمند و فرآیند مناسب اولویت دار جهت انجام هوشمندسازی به تأیید گروه کانونی رسیده است.

ترسیم درخت خطا

پس از اعمال تحلیل مونت کارلو، تأیید ضمنی آن در گروه کانونی و بر مبنای محاسبات سناریو محور مرحله قبل، پریسکترین سایت هایی که ایجاد مشکل در آنها منجر به بروز مخاطره جدی در پهنه تحت پوشش مخزن هدف می شود مشتمل بر مخزن A، تصفیه خانه B، مخزن E و ایستگاه پمپاژ آن مشخص گردید. لذا در مرحله بعدی و پس از بررسی مستندات، درخت خطای منتج به بروز مخاطره به وسیله نرم افزار Visio ۲۰۱۶ برای چهل و سه رویداد اولیه ترسیم گردید و پس از اخذ و اعمال نظرات اصلاحی، به تأیید گروه کانونی رسید. از میان یک رویداد اصلی و چهار رویداد فرعی تعریف شده، درخت خطای رویداد اصلی در شکل شش آورده شده است.



شکل ۶: درخت خطای رویداد اصلی

محاسبه شاخص بیرنهام

در گام پیشین، دلیل ترسیم درخت خطا آن بود که پرمخاطره ترین مسیر ممکن شناسایی شود. اما به دلیل فقدان اطلاعات کافی، برآورد دقیق احتمال رویدادهای اساسی مقدور نیست. لذا جهت محاسبه احتمالات وقوع هر یک از درگاه ها، از رویکرد فازی و ترکیب آن با نظر هفت نفر از کارشناسان ذیربط استفاده و سپس اولویت بندی پرمخاطره ترین رویدادهای پایه بر مبنای شاخص بیرنهام، به وسیله کدنویسی انجام شده در نرم افزار متلب صورت پذیرفت. مطابق تعاریف موجود برای رتبه بندی رویدادهای پایه در صورتی که احتمال شکست آنها، اعداد غیر فازی باشد می توان از شاخص بیرنهام استفاده کرد که توسط رابطه زیر تعریف می شود:

$$BI = Q(qi = 1) - Q(qi = 0)$$

(رابطه سه)

The Total Event for Gate 1 is 0.99657
The Total Event for Gate 2 is 0.99617
The Total Event for Gate 3 is 0.99353
The Total Event for Gate 4 is 0.99355
The Total Event for Gate 5 is 0.017988
The Total Event for Gate 6 is 0.017989
The Total Event for Gate 7 is 0.017964
The Total Event for Gate 8 is 0.017949
The Total Event for Gate 9 is 0.017982
The Total Event for Gate 10 is 0.017949

رسم نمودار پایبونی

اصولاً سیستم های تأمین آب را می توان به صورت تعدادی از مراحل در نظر گرفت که در کنار هم موجب تضمین ایمنی آب آشامیدنی می شوند. این مراحل عبارتند از: جلوگیری از آلودگی منابع آبی، استحصال آب از منابع انتخابی، مخازن تحت کنترل، تصفیه قبل از توزیع،

حفاظت حین توزیع و ذخیره سازی ایمن در منازل و نقاط مصرف، هریک از مراحل فوق می توانند به عنوان یک مانع در نظر گرفته شود. در راهکار چند مانعی، هر مانع به کاهش بیشتر ریسکی که موجب غیرایمن شدن آب شده بود منجر می شود، به طوری که اگر ایرادی در یک نقطه پیش آید موانع دیگر موجب فراهم آوردن حفاظت بیشتر می شوند. (نعیمه کاظمیان، ۱۳۹۲).

لذا در نهایت، فرای تأیید گروه کانونی و به منظور حصول اطمینان از انتخاب مکان مناسب و بررسی تحقق هدف اصلی استقرار شبکه آب هوشمند یا همان مدیریت مخاطره در آن، شبکه هوشمند فرضی آب برای درگاه دارای اولویت اول (بروز مشکل یا شکستن لوله های انتقال آب ورودی مخزن A)، بر اساس روش پاپیونی و به وسیله نرم افزار BowTie proTM-LOPA، به شرح شکل هفت طراحی و تأیید گردید.

تجزیه و تحلیل لایه های حفاظتی^۱، تکنیک ارزیابی ریسک ساده ای است که به آسانی از آن می توان در ساخت مدل های پاپیونی استفاده نمود. این روش، شیوه نظام مندی است که از آن می توان در بررسی ریسک های موجود در هر شاخه به تنهایی و یا کل نمودار پاپیونی

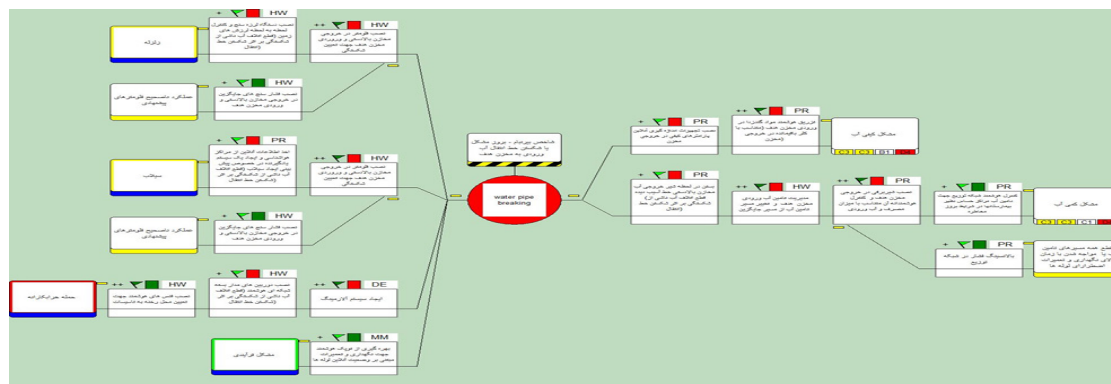
بر همین اساس است که عملکرد سیستم تأیید و یا رد می شود. (زهرا ناصر زاده و دیگران، ۱۳۹۲)

یک روش موجود برای تعریف معیارهای پذیرش، استفاده از جدول SSL برای عملکرد سیستم های ایمنی است. جدول دهم از استاندارد (IEC61511(2003) بر گرفته شده است.

جدول ۱۰: سطوح یکپارچگی ایمنی

Safety integrity (level) (SIL)	Average probability of failure to perform its design function on demand
SIL ₄	$10^{-4} \leq 10^{-5}$
SIL ₃	$10^{-3} \leq 10^{-4}$
SIL ₂	$10^{-2} \leq 10^{-3}$
SIL ₁	$10^{-1} \leq 10^{-2}$

در این مرحله، مطابق شکل نه و در صورت مبنا قرار دادن استاندارد مذکور، ریسک باقیمانده سیستم هوشمند آب فرضی تعریف شده، مشتمل بر رقم نهایی فراوانی پیامدها در حد سطح SSL₄، به عنوان بالاترین سطح ایمنی برای کلیه تهدیدات مورد تأیید قرار گرفت که



شکل ۷: هوشمند سازی فرایند با هدف مدیریت مخاطره ناشی از شکستن لوله های انتقال آب

نشانگر تأیید مدل و خروجی آن در راستای تحقق هدف هوشمندسازی یا کاهش مخاطرات است. لازم به ذکر است که شاخص احتمال شکست در زمان مورد نیاز بر مبنای دیدگاه گروه کانونی و با لحاظ نمودن مستندات موجود، تعیین و در محاسبات لحاظ شده است. این شاخص در شاخه های متفاوت، ممکن است مقادیر متفاوتی داشته باشد.

به صورت یک جا استفاده و نهایتاً سطح یکپارچگی ایمنی^۲ را در سیستم تعیین کرد و برای هر SIL، احتمال شکست در زمان مورد نیاز^۳ را تخمین زد. بر اساس معیار پذیرش است که موفقیت و یا شکست شاخه مورد مطالعه (نمودار LOPA) مشخص می شود. هر معیار پذیرش دارای یک مقدار عددی است که رقم نهایی فراوانی پیامد (مقدار ریسک باقیمانده^۴) با آن مقایسه می شود و

۱- LOPA: Layer of Protection Analysis

۲- SIL: Safety Integrity Level

۳- PFD: Probability of Failure on Demand

۴- Acceptance Details

Location	Default	Event	Threat	Consequence	Result
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4
Location	Default	water pipe breaking	تخلخل	مخاطر آبی	SHL-4

شکل ۹: جدول معیار پذیرش مدل هوشمند طراحی شده

بحث و نتیجه‌گیری:

امروزه شبکه هوشمند آب به‌عنوان نسل بعدی مدیریت آب پیشنهاد شده است که فناوری اطلاعات و ارتباطات را به‌منظور افزایش اثربخشی تمام عناصر ساختار شبکه آب به هم مرتبط می‌کند. در این میان اسکادا، به‌عنوان یکی از اجزاء کلیدی شبکه مذکور، سامانه جمع‌آوری داده مبتنی بر رایانه است که داده‌های عملیاتی مجموعه نقاط پراکنده را از راه دور گردآوری و از طریق لینک‌های ارتباطی برای یک یا چند مرکز کنترل ارسال می‌کند تا عملیات نمایش، کنترل و گزارش‌گیری روی آنها انجام شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نظر به نوپا بودن بحث هوشمندسازی در جوامع پیشرو، هوشمندسازی در کشور ما نیز با چالش‌های مشابهی روبرو خواهد بود و در گام اول ضروری است تا نقشه راه هوشمندسازی در ابعاد مختلف آن ترسیم شود. با چنین رویکردی، اتوماسیون و به تبع آن اسکادا، به‌عنوان پیش‌نیاز شبکه هوشمند از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود و باید سرمایه‌گذاری لازم در آن صورت پذیرد. مطابق مستندات موجود، ضمن استقرار چند پایلوت سامانه مدیریت هوشمند آب در شرکت‌های آب و فاضلاب مشهد و تهران، حجم عظیم سرمایه‌گذاری در زمینه طراحی و اجرای اسکادا در صنعت آب و فاضلاب صورت گرفته است و مطابق برنامه و تا پایان سال ۱۴۰۴ تمامی تأسیسات آب و فاضلاب کشور در تمامی شهرها باید مجهز به اینگونه سامانه‌های نظارتی گردند. لذا این پژوهش درصدد است تا بر پایه روش تحقیق آمیخته متوالی، ضمن تمایز بخشیدن به مفاهیم مدیریت هوشمند آب و اسکادای آب و فاضلاب، به طراحی مدلی نوآورانه جهت استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند آب بر مبنای مکانیابی استقرار سامانه‌های اسکادا بپردازد و از این طریق، ضمن حرکت گام‌به‌گام به سمت محل فرایند موردنظر، به موازات هدایت سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته به مکان مناسب، مانع از اتلاف هزینه، کاهش بهره‌وری و افزایش تاب‌آوری سامانه‌های در مدار بهره‌برداری گردد. لذا در بخش کیفی تحقیق و با استفاده

از مرور گسترده ادبیات، مطالعه مستندات و انجام مصاحبه با متولیان امر، الزامات استقرار سامانه اسکادا به‌عنوان جزئی از پلتفرم شبکه هوشمند آب، از منظر صاحب‌نظران این حوزه تبیین گردید. نتایج این بخش نشان داد که بر مبنای بیشترین فراوانی (بدون تکرار)، مهم‌ترین هدف اجرای اسکادای آب و فاضلاب، هوشمندسازی مجموعه در سطح صنعتی است و در ادامه، بهبود شاخص‌های مرتبط با کارایی فرایندها و معیارهای مرتبط با اقتصاد آب (از طریق مدیریت هزینه) و همچنین مدیریت مخاطره قرار می‌گیرد. این نتایج، مهم‌ترین پیش‌نیاز استقرار سامانه اسکادای آب را لزوم تدوین استراتژی اجرایی مناسب میدانند و در پله‌های بعدی بیشترین تأکیدات بر مبحث لزوم آموزش و جذب نیروی انسانی آگاه و متخصص، اهمیت رعایت الزامات امنیت سایبری و همچنین تأمین منابع مالی لازم است. پس از رسم شبکه مضامین، تأیید ضمنی نتایج بخش کیفی و تأکید بر مکانیابی استقرار شبکه آب هوشمند بر مبنای مدیریت مخاطره توسط گروه کانونی، از تکنیک‌های ارزیابی مخاطره به‌منظور انتخاب مکان مناسب و فرایند اولویت‌دار، در پروسه استقرار سامانه‌های مدیریت هوشمند آب استفاده گردید. بر این اساس و در گام نخست از روش تحلیل سناریو استفاده و ۲۴۸۴ حالت معنی‌دار، ارزیابی کمی و پرمخاطره‌ترین سایت‌ها در پهنه موردنظر شناسایی شد. سپس عدم قطعیت‌های موجود در فرایند آبرسانی در قالب تحلیل مونت‌کارلو بر محاسبات مرحله قبل اعمال و نتایج راستی‌آزمایی گردید. در ادامه درخت خطا در قالب چهل‌وسه رویداد اولیه، برای سایت‌های منتخب ترسیم شد و به تأیید گروه کانونی رسید. سپس با کدنویسی محاسبه شاخص بیرنیم در متلب، رویدادهای اولیه درخت خطا رتبه‌بندی، پرمخاطره‌ترین سایت و فرایند اولویت‌دار شناسایی و درنهایت از روش پاپیونی جهت تأیید مدل استفاده گردید. درنهایت ضمن پیشنهاد به پژوهشگران آتی برای طراحی یک مدل مکانیابی چندهدفه جهت استقرار شبکه هوشمند آب و بر مبنای نتایج حاصل

- از این تحقیق، با توجه به نوین بودن مباحث شبکه هوشمند آب، استفاده از روش‌های کمی ارزیابی ریسک، شناسایی فرآیندهای اولویت‌دار به موازات مکانیابی تأسیسات هوشمند و همچنین تأییدات مرحله به مرحله گروه کانونی در این پژوهش، پیشنهاد می‌شود مدل تدوین شده، به عنوان یک راهبرد عملیاتی در فرآیند مکانیابی تأسیسات هوشمند آبی استفاده گردد.
- منابع**
۱. ابراهیمی، حسین. عابدی، کمال‌الدین. فرجی، مهدی. (۱۳۹۶)، ارزیابی ریسک (صفر تا صد)، تهران، انتشارات فن‌آوران، ۸۸
 ۲. بهپویان امین منتظر. (۱۳۹۴)، هوشمند سازی سیستم آبرسانی شهر مشهد، مستندات کتابخانه‌ای شرکت آب و فاضلاب مشهد، صص ۲-۱۴
 ۳. تشیعی، ح. ر. محمدی، م. (۱۳۹۵)، راهنمای جامع بهره‌برداری از تأسیسات آب و فاضلاب: راه کارهای استقرار سامانه اسکادا در تأسیسات آب و فاضلاب، جلد هفتم، چاپ اول، تهران، انتشارات مکت نظر، صص ۱۷-۲۵
 ۴. خنیفر، ح. مسلمی، ن. (۱۳۹۸)، اصول و مبانی روش‌های پژوهش کیفی، جلد اول، چاپ اول، تهران، انتشارات نگاه دانش، صص ۵۰-۷۳
 ۵. شاه‌حسینی، ن. (۱۳۹۷)، بررسی تأثیر هوشمندسازی کسب و کار بر رضایتمندی مشتریان با تأکید بر سیستم اسکادا شرکت آب و فاضلاب شهری استان تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز، دانشکده مدیریت، صص ۷-۱۰۸
 ۶. کاظمیان، نعیمه. (۱۳۹۲)، پیاده‌سازی برنامه ایمنی آب در سیستم‌های آبرسانی، تبریز: نشر ستوده، صص ۱-۴
 ۷. کلانتری، م. (۱۳۹۳)، تعیین میزان اثر بخشی استفاده از سامانه‌های اسکادا در مدیریت بحران شرکت‌های آب و فاضلاب شهری (مطالعه موردی شرکت آب و فاضلاب شهری استان البرز)، فصلنامه علمی پژوهشی مطالعات مدیریت شهری، دوره ۶، شماره ۱۸، صص ۱-۲۰
 ۸. کنترل سازان فرایند. (۱۳۹۲)، گزارش مطالعات راهبردی و استقرار سیستم اسکادا و دیسپاچینگ ملی آب و فاضلاب کشور، مستندات کتابخانه‌ای شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، صص ۱۲-۹۱
 ۹. محمدی، غ. (۱۳۹۵)، تبیین الگوی شهر هوشمند در کلانشهر مشهد مبتنی بر توسعه پایدار، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده جغرافیا، صص ۱-۲۰
 ۱۰. ناصر زاده، زهرا و دیگران. (۱۳۹۲). آموزش نرم‌افزار ارزیابی ریسک BOWTie Pro TM- LOPA، تهران، انتشارات فن‌آوران، ۱۳
 11. Aawdahl, A. (2017). An Exploratory Study of Smart City Initiatives: Theory, Practice, and Linkage to Sustainability. Lawrence Technological University. College of Management, 40
 12. Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., j. whittle, A. (2012). Case study: a smart water grid in Singapore. IWA Publishing. Water Practice
 - & Technology 7(4), 1-2.
 13. Byeon, S., Choi, G., Maeng, S., Gourbesville, P. (2015). Sustainable Water Distribution Strategy with Smart Water Grid. Sustainability, 7(4), 4243-4245.
 14. Cherchi, C.(et al.). (2015). Energy and water quality management systems for water utility's operations: A review. Journal of Environmental Management, 153, 109.
 15. C.Hafedh, N. (et al.). (2012). Understanding smart cities: An integrative framework. 45th Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE Computer Society, 2.
 16. He, Y. (et al.). (2014). smart city, International Journal of Distributed Sensor Networks, 1.
 17. Kwaka, D. Kima, Y. Kima, W(2016) .). Development of SWG Standard Model by Location Type and Case Study of Inland. Procedia Engineering ,154, 268.
 18. Martyusheva, Olga.(2014)). Smart Water Grid.In Partial Fulfilment of The Requirements For Degree Master Of Science.Colorado State University.27-30
 19. M. Grilo, A. (et al.). (2014). An Integrated WSA and SCADA System for Monitoring a Critical Infrastructure.IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL INFORMATICS, 10 (3), 1.
 20. Ntuli, N & Abu-Mahfouz, A. (2016). A Simple Security Architecture for Smart Water Management System. The 11th International Symposium on Intelligent Techniques for Ad hoc and Wireless Sensor Networks, 1164-1165
 21. Savić, D. Vamvakeridou-lyroudia, I., kapeplan, z. (2014). Smart Meters, Smart Water, Smart Societies: The iWIDGET Project. 16th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA, 1105.
 22. Sensus Group. (2015). Water 20/20, bringing smart water network into focus, 13
 23. Vijai, P & Bagavathi Sivakumar, P. (2016). Design of IoT Systems and Analytics in the Context of Smart City Initiatives in India. Procedia Computer Science, 584.
 24. Won Lee, S. (et al.). (2015). Smart water grid: the future water management platform. Desalination and Water Treatment, 55, ۳۴۰.
 25. Yuanyuan, W. (et al.). (2017). A New Framework on Regional Smart Water. International Congress of Information and Communication Technology (ICICT 2017), 122.