بررسی عوامل مؤثر بر پیدایش و افزایش آب بدون درآمد با استفاده از شبکه‌های بیزین (مطالعه موردی: شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ تهران)

نیوشا راثی فقیهی[۱]، مسعود تابش[۲*]، عباس روزبهانی[۳]، بردیا روغنی[۴]، رضا حیدرزاده[۵]، ستار صالحی[۶]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶-۱۱-۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۱۷ تاریخ چاپ: ۱۳۹۹-۰۲-۲۲

چکیده

شناسایی دقیق عوامل طراحی و عمکردی مؤثر بر پیدایش و افزایش آب بدون درآمد و کاهش میزان تأثیر این عوامل، از جمله راهکارهای کارامد در مدیریت بهینه شبکه توزیع آب شهری و حفظ منابع مالی می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از مراجع و تجربه متخصصین در حوزه شبکه‌های توزیع آب، عواملی که در پیدایش اجزای آب بدون درآمد نقش دارند، شناسایی شدند. سپس برای جمع‌اوری اطلاعات موردنیاز در مورد وضعیت عوامل، از نظر مسئولین و کارشناسان در قالب پرسشنامه استفاده شد. برای درنظرگرفتن عدم‌قطعیت‌های ناشی از فقدان داده کافی و اطلاعات دقیق در مورد وضعیت اجزای آب بدون درآمد و مدل کردن روابط احتمالاتی میان عوامل، از شبکه‌های بیزین به‌عنوان ابزار مدل‌سازی استفاده شد. در نهایت برای تحلیل نتایج مدل بیزین، یک شاخص حساسیت ارائه شد تا عوامل مؤثر شناسایی شده براساس میزان اثرگذاری بر اجزای بالادست خود رتبه‌بندی شوند. برای بررسی کارایی مدل پیشنهادی، منطقه تحت پوشش شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ تهران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. نتایج مدل‌سازی حاکی از آن است که احتمال زیاد بودن تلفات ظاهری، تلفات واقعی و آب بدون درآمد در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۳۷/۴۸ درصد، ۳۵/۰۴ درصد و ۳۲/۲ درصد است.

واژه های کلیدی: آب بدون درآمد؛ شبکه توزیع آب؛ تلفات ظاهری؛ تلفات واقعی؛ شبکه بیزین

[۱] فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران-محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۲] استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۳] استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
[۴] دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۵] دانشجوی دکتری مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران
[۶] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرمسار، گرمسار، ایران
* نویسنده مسئول: mtabesh@ut.ac.ir

مقدمه

آب بدون درآمد میزان تفاوت بین حجم آب ورودی به سیستم و مصرف مجاز با قبض می‌باشد که شامل دو قسمت مصرف مجاز بدون قبض[1] و تلفات آب[2] است (تابش، ۱۳۹۵). مصرف مجاز بدون قبض جزء کوچکی از مصارف آب را تشکیل می‌دهد که خود به دو بخش مصارف عملیاتی شرکت‌های آب و فاضلاب (شامل شستشوی شبکه، انجام عملیات مختلف روی شبکه) و مصارف ارگان‌ها، مؤسسات عمومی و غیره تقسیم می‌شود. تلفات آب نیز شامل دو بخش تلفات واقعی[3] و تلفات ظاهری[4] است. تلفات ظاهری بخشی از آب مصرف شده است که به دلیل انشعابات غیرمجاز، خطای انسانی، خطای ابزار اندازه‌گیری و یا خطای مدیریتی و بهره‌برداری دقیقاً اندازه‌گیری نشده است. تلفات واقعی نیز ناشی از فرار فیزیکی آب از شبکه توزیع و انشعابات مشترکین می‌باشد که در نتیجه آن، بخشی از آب تولید شده به دست مصرف کننده نمی‌رسد.

براساس دستورالعمل شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، شرکت‌های آب و فاضلاب موظف‌اند سالانه مؤلفه‌های جدول بالانس سالانه آب را تکمیل نمایند تا فعالیت‌هایی از جمله اختصاص بودجه، تعیین مقدار اجزای آب بدون درآمد، راهکارهای کاهش درصدی از آب بدون درآمد و غیره براساس جداول بالانس صورت گیرد. اما به‌دلیل عدم دقت، عدم قطعیت و همچنین عدم وجود ابزارهای کافی مثل کنتور دقیق، سیستم‌های کنترل از راه دور و غیره، اعداد جداول بالانس دقیق نیستند و حتی در بعضی موارد نیز از اعداد ساختگی در این جداول استفاده می‌شود. در نتیجه، جمع‌بندی انجام شده از وضعیت آب بدون درآمد در هر منطقه با خطای زیادی همراه خواهد بود. براساس آمار رسمی منتشر شده، متوسط آب بدون درآمد در ایران ۲۶ درصد در سال ۱۳۹۴ گزارش شده است، که ۱۳/۸ درصد مربوط به تلفات واقعی، ۱۰/۸ درصد مربوط به تلفات ظاهری و ۱/۶ درصد مربوط به مصارف مجاز بدون قبض می‌باشد (پایگاه اطلاع رسانی وزارت نیرو، ۱۳۹۵). شرکت‌های آب و فاضلاب حدوداً ۱/۲ هزار میلیارد تومان در سال متحمل ضرر و زیان‌های ناشی از هدررفت آب به صورت ظاهری و واقعی می‌شوند (خبرگزاری صدا و سیما، ۱۳۹۴). یقیناً بودجه کلان اختصاص یافته به بخش آب بدون درآمد باید به‌طور بهینه و در عواملی که بیشترین اثربخشی را دارند، صرف شود. بنابراین، اطلاعات همه‌جانبه از وضعیت اجزای آب بدون درآمد و توسعه ابزاری مناسب برای مدل‌سازی روابط احتمالاتی این اجزا، به تصمیم‌گیرندگان شرکت‌های آب و فاضلاب کمک می‌کند تا برای مدیریت و کاهش ریسک هدررفت آب راهکارهای مؤثر و با قابلیت اطمینان بالا ارائه نمایند.

در چند دهه اخیر مطالعات بسیار محدود و پراکنده‌ای در زمینه بررسی و رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر اجزای آب بدون درآمد انجام شده است. آدامز و لودزلی (2012) به کمک آنالیز رگرسیون[5] عوامل مؤثر بر تلفات آب در مکزیک را بررسی نمودند. نتایج بررسی حاکی از آن است که تلفات آب با افزایش هزینه‌های تولید، مصرف سرانه، تعداد افراد در هر اتصال و افزایش جمعیت کاهش می‌یابد و با افزایش تعداد کارکنان بر هر مصرف کننده نیز افزایش می‌یابد. تابش و روغنی (۱۳۹۳) وضعیت آب بدون درآمد در شرکت‌های آب و فاضلاب شهری و روستایی استان‌های تهران، البرز و قزوین را مورد بررسی قرار دادند. برای این امر اطلاعات وضعیت موجود آب بدون درآمد در این سه استان جمع‌اوری و بررسی و همچنین راهکارهای اجرا شده در سطح این سه استان برای مدیریت آب بدون درآمد مورد ارزیابی قرار گرفت. ون دن برگ (2015) به بررسی علل پیدایش آب بدون درآمد پرداخت. در این تحقیق با ارزیابی اطلاعات، تابعی برای تلفات آب ارائه شده است که به مشخصات شرکت‌های آب، عوامل مدیریتی، سایر عوامل مؤثر، تأثیر کشورهای مختلف و خطا وابسته است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که تراکم جمعیت و نوع شبکه توزیع آب (نوبتی و یا تحت فشار) بیشترین اثر را بر آب بدون درآمد دارند. همچنین خسارت مالی در اثر هدررفت آب و هزینه زیاد تعمیرات از جمله عوامل تشدید کننده آب بدون درآمد هستند. زیود و همکاران (2016) گزینه‌های ممکن برای کاهش آب بدون درآمد را رتبه‌بندی نمودند. با توجه به وجود معیارهای مختلف برای انتخاب روش مناسب، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره[6] برای مدیریت تلفات آب استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد

1 Unbilled authorized consumption
2 Water losses
3 Real losses
4 Apparent losses
5 Regression analysis
6 Multi-criteria decision analysis

که به‌ترتیب مدیریت فشار، استراتژی کنترل فشار، به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته و ایجاد مناطق ایزوله (DMA) مهمترین اقدامات در مدیریت تلفات آب هستند که به موقعیت منطقه مورد مطالعه بسیار وابسته است. لی و همکاران (2017) به بررسی شناخت و درک مردم عادی از مدیریت آب بدون درآمد پرداختند تا بتوانند روش‌هایی برای افزایش این درک عمومی نسبت به کاهش آب بدون درآمد مشخص نمایند. در این تحقیق، از پرسشنامه برای جمع‌اوری اطلاعات استفاده شد. نتایج تحلیل پرسشنامه‌ها نشان داد که درک پایینی نسبت به مفهوم آب بدون درآمد و بحران آن در میان مردم وجود دارد و بیشتر آن‌ها برای حل مشکل تأمین آب، توسعه منابع آب جدید را نسبت به مدیریت مشکلات کنونی تأمین آب ترجیح می‌دهند.

مسائل مربوط به حوزه تحلیل ریسک شبکه‌های توزیع آب، به‌خصوص تلفات ظاهری و واقعی آب، به‌دلیل پیچیدگی‌ها و گستردگی ابعاد مسئله، اغلب شامل رویدادهایی است که داده‌های تجربی در زمینه مربوطه وجود ندارد و یا با کمبود اطلاعات و داده روبرو است. علاوه‌براین، با توجه به شرایط شبکه توزیع آب در مناطق مختلف، عوامل مؤثر بر اجزای آب بدون درآمد از تنوع بسیاری برخوردارند و درک و دانش ناقصی نسبت به این عوامل در میان مسئولین و مردم عادی وجود دارد. در بسیاری از تحقیقات انجام شده در حوزه کاهش آب بدون درآمد، از روش‌های متداول اندازه‌گیری آب بدون درآمد و روش‌های رتبه‌بندی راهکارهای ممکن مانند آنالیز رگرسیون، تصمیم‌گیری چندمعیاره، قواعد فازی و غیره برای بررسی راهکارهای کاهش تلفات آب استفاده شده است. با توجه به ماهیت مسئله آب بدون درآمد و کاستی‌های داده‌های موجود در این زمینه، اطلاعات موردنیاز برای مدل‌سازی را می‌توان از نظر کارشناسان و مسئولین این حوزه اخذ نمود. در این صورت برای درنظرگرفتن عدم قطعیت حاکم بر نظرات لازم است از ابزاری استفاده شود که بتواند با استناد بر نظر افراد و وجود سری داده‌های ناقص، به درستی شرایط فعلی را مدل کند. از این‌رو استفاده از مدل‌های خبره از جمله شبکه‌های بیزین[1] در این زمینه بسیار راهگشا خواهد بود. امروزه شبکه شبکه‌های بیزین به عنوان یک ابزار مناسب برای مدل کردن عدم قطعیت در سیستم‌های خبره محسوب می‌شود و شامل یک ساختار گرافیکی و شرح احتمالاتی از روابط بین متغیرها در یک سیستم می‌باشد. از آنجایی که شبکه بیزین با استفاده از قوانین بیزی و بر پایه محاسبات ریاضی، استنتاج را انجام می‌دهد، بنابراین قادر است با استفاده از داده‌های مشاهداتی مدل‌سازی را انجام دهد و نتایج دقیقی را گزارش کند. بنابراین در شرایطی که اطلاعات کمی در دسترس باشد و عدم قطعیت بر مسئله حاکم باشد می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه دهد. همچنین این ابزار قادر است عوامل و احتمالات شرطی بین آن‌ها را به‌روزرسانی کند و با استفاده از اطلاعات گذشته وضعیت آینده را پیش‌بینی کند.

استفاده از شبکه‌های بیزین در زمینه‌های مختلف افزایش یافته است، اما به‌کارگیری آن در شبکه توزیع آب شهری به‌ویژه در بررسی و شناسایی اجزا آب بدون درآمد را می‌توان جزء موضوعات جدید دانست. بررسی مطالعات انجام شده در حوزه شبکه آب با استفاده از شبکه بیزین نشان می‌دهد که از این ابزار احتمالاتی غالباً برای بررسی شکست لوله در شبکه توزیع آب استفاده شده است (روزبهانی، ۱۳۹۱؛ کبیر و همکاران، 2014a؛ کبیر و همکاران، 2014b؛ فرانسیس و همکاران، 2015). تنها در چند مورد اندک برای پیش‌بینی تقاضا روزانه آب (فرولیچ، 2015؛ ماگیرا و فلوریچ، 2015) شبکه بیزین برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است.

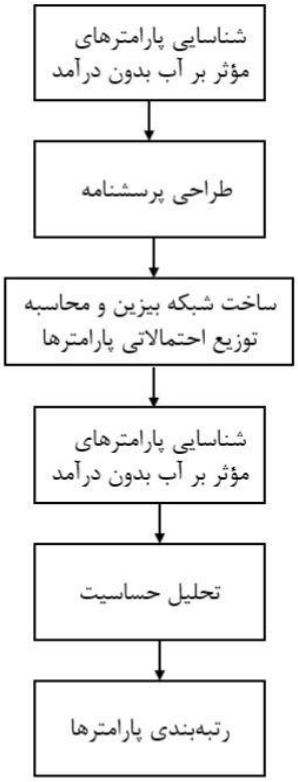
علی‌رغم مطالعات انجام شده با هدف کاهش آب بدون درآمد، مهمترین عوامل مؤثر بر پیدایش و افزایش اجزای آب بدون درآمد و وضعیت آن‌ها در مناطق مختلف شناسایی و بررسی نشده است. همچنین، تاکنون از ابزار احتمالاتی مناسب برای درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود استفاده نشده است. بنابراین در این تحقیق برای شناخت عدم قطعیت‌ها، یک پرسشنامه طراحی می‌شود تا از نظر کارشناسان برای کسب اطلاعات و داده‌های موردنیاز در مورد عوامل مؤثر شناخته شده، استفاده شود. سپس برای مدل‌سازی عوامل مؤثر بر آب بدون درآمد از شبکه‌های بیزین استفاده می‌شود. متدلوژی ارائه شده در محدوده تحت پوشش مخزن ۲ واقع در شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ تهران به‌کارگرفته می‌شود. در انتها راهکارهای کاهش حجم آب بدون درآمد براساس میزان اثر بخشی هریک از آن‌ها به تفکیک تلفات ظاهری و واقعی

[1] Bayesian Networks

براساس نظرات افرادی که به پرسشنامه پاسخ دادند، رتبه‌بندی می‌شوند. مدیران و مسئولین نه تنها می‌توانند برای کاهش تلفات آب از میزان اثرگذاری هریک از عوامل مؤثر آگاهی لازم را کسب نمایند، بلکه با تعریف سناریوهای کاهش آب بدون درآمد و اعمال آن‌ها در شبکه بیزین، می‌توانند آب بدون درآمد را به‌صورت بهینه کاهش دهند.

مواد و روش‌ها

روش انجام این تحقیق براساس روند ارائه شده در شکل ۱ به شرح زیر است:



شکل ۱- فلوچارت کلی از روند انجام کار

شناسایی عوامل مؤثر در پیدایش و افزایش اجزای آب بدون درآمد

عوامل مؤثر بر پیدایش و افزایش اجزای آب بدون درآمد طی سه مرحله شناسایی و پالایش می‌شوند. در مرحله اول، با تجمیع مفاهیم و اطلاعات موجود در نشریه ۵۵۶ (۱۳۹۱)، تابش (۱۳۹۵)، استاندارد جهانی IWA و همچنین بهره‌گیری از تجارب محققین و افراد باتجربه در زمینه عوامل مؤثر بر پیدایش و گسترش تلفات ظاهری و واقعی در شبکه‌های توزیع آب شهری، عوامل مؤثر محتمل شناسایی و جمع‌اوری می‌شوند.

اجزای تلفات ظاهری و واقعی مطابق با آنچه در نشریه ۵۵۶ (۱۳۹۱)، تابش (۱۳۹۵) آمده است، به‌طور بدیهی از ماهیت کیفی برخوردارند و برای ارزیابی درصد وجودی این عوامل در منطقه مورد مطالعه و میزان تأثیر آن‌ها بر عوامل بالادست خود (شامل اجزای تلفات ظاهری و واقعی) نمی‌توان از متغیرهای کمّی استفاده کرد. همچنین هیچ‌یک از مطالعات آب بدون درآمد تاکنون به جمع‌اوری اطلاعات در مورد میزان وجود عوامل مؤثر بر اجزای آب بدون درآمد در یک منطقه نپرداخته است. بنابراین در مرحله دوم، برای شناخت از وضعیت عوامل مؤثر شناسایی شده و برطرف کردن خلاء اطلاعاتی موجود، از نظر کارشناسان استفاده می‌شود. بدین ترتیب، مهمترین عوامل مؤثر بر اجزای تلفات ظاهری و واقعی که در مرحله اول گرداوری شد، طی فرایندی خلاصه‌سازی شده و در قالب پرسشنامه تدوین می‌شود.

در این تحقیق از میان دو بخش تشکیل دهنده مصارف مجاز بدون قبض، از بررسی مصارف عملیاتی شرکت‌های آب و فاضلاب که از جمله مصارف اجتناب‌ناپذیر در شبکه‌های توزیع آب هستند، صرف‌نظر شده است. بنابراین با تغییر نام مصارف مجاز بدون قبض به مشترکین مجاز بدون قبض، تنها مصارف ارگان‌ها و مؤسساتی که طبق قانون مجاز است اما هزینه‌ای پرداخت نمی‌کنند، بررسی می‌شود. لذا با توجه به شباهت ماهیت مشترکین مجاز بدون قبض به ماهیت تلفات ظاهری و همچنین با استناد بر نشریه ۵۵۶، این جزء آب بدون درآمد از جمله اجزای تلفات ظاهری درنظر گرفته می‌شود. همچنین تلفات واقعی به دو دسته نشت مرئی و نشت نامرئی تقسیم شده است. در این تقسیم‌بندی، علاوه‌بر حوادثی که بر روی تمامی اجزاء شبکه شامل لوله‌ها، شیرها، پمپ‌ها، مخازن اتفاق می‌افتد و قابل رؤیت هستند، سرریز از مخازن نیز در دسته نشت مرئی قرار می‌گیرد. لذا سایر نشت‌هایی که در شبکه توزیع آب رخ می‌دهد اما قابل مشاهده نیستند به‌عنوان نشت نامرئی درنظر گرفته می‌شود. رویکرد اصلی در این تقسیم‌بندی، نوع برخورد متفاوت با نشت مرئی و نشت نامرئی است.

بنابراین پرسشنامه طراحی شده شامل دو بخش تلفات ظاهری و تلفات واقعی می‌باشد. در بخش تلفات ظاهری پنج عامل مؤثر شامل انشعابات غیر مجاز، خطای مدیریتی و بهره‌برداری، خطای پرسنلی، خطای کنتورها و

مشترکین مجاز بدون قبض به صورت جداگانه و همراه با عوامل اثرگذار بر هریک آورده می‌شوند. در تلفات واقعی نیز دو عامل مؤثر نشت مرئی و نشت نامرئی همراه با عوامل اثرگذار بر هریک ذکر می‌شوند. برای هریک از عوامل مؤثر، درصد وجودی هر عامل در محدوده مورد مطالعه به صورت "زیاد"، "کم" و یا "وجود ندارد" از فرد پاسخ‌گو پرسیده شده است. دسته‌بندی انتخاب شده برای درصد وجودی هر عامل در محدوده مورد مطالعه، از فاکتورهای بسیاری از جمله مطابقت با شرایط نرم‌افزار و در نظر گرفتن سهولت درک و پاسخ به پرسش‌ها متأثر است. وضعیت "کم" نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه، عامل مورد نظر با احتمال کمتر از ۵۰ درصد اثرگذار است. به‌همین ترتیب، وضعیت "زیاد" نشان دهنده اثرگذاری یک عامل با احتمال بیش از ۵۰ درصد است. وضعیت "وجود ندارد" نیز نمایانگر آن است که عامل مذکور در منطقه مورد مطالعه موجب پیدایش و یا افزایش عامل بالادست خود نمی‌شود.

برای افزایش اطمینان‌پذیری پاسخ‌ها و برای رسیدن به دقت کافی لازم است، حداقل تعداد پرسشنامه‌ای که باید تکمیل شود، مشخص شود. دانیل (1999) فرمول ساده‌ای برای محاسبه تعداد نمونه‌ای[1] که در یک تحقیق باید مورد مطالعه قرار گیرد، ارائه کرد (رابطه ۱).

$$n = \frac{Z^2 P(1-P)}{d^2} \qquad (۱)$$

در این رابطه، n: تعداد نمونه، Z: میزان اطمینان از پاسخ‌ها[2]، P: نسبت مورد انتظار[3] و d: دقت[4] و یا حاشیه اطمینان است.

در مرحله سوم پس از طراحی و تکمیل پرسشنامه‌ها، نتایج آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. ضمن این بررسی تعدادی از عوامل که از لحاظ مفهومی به یکدیگر مرتبط بوده و نتایج نزدیک به هم داشته‌اند با یکدیگر ترکیب شده و به صورت یک عامل درمی‌آیند. پس از مشخص شدن عوامل نهایی، با استفاده از شبکه‌های بیزین عوامل مؤثر بر عوامل و اجزای آب بدون درآمد مدل‌سازی می‌شود.

یک آزمون خوب باید روایی و پایایی داشته باشد. روایی و یا اعتبار یک ابزار بدین معناست که محتوای آن ابزار یا سوالات مندرج در آن تا چه حد، موضوع مورد مطالعه را می‌سنجد. پایایی و یا قابلیت اعتماد یک ابزار، خاصیت تکرارپذیری آن را می‌سنجد. در این تحقیق پایایی با استفاده از روش آلفا کرونباخ بررسی شده و ضریب آلفا از فرمول زیر محاسبه شد:

$$r_\alpha = \frac{J}{1-J}\left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} S_j^2}{S^2}\right) \qquad (۲)$$

که J: تعداد زیرمجموعه‌های سوال‌های پرسشنامه یا آزمون، S_j^2: واریانس زیرآزمون jام و S^2: واریانس کل پرسشنامه یا آزمون هستند.

برای تعیین روایی محتوایی یک آزمون با استناد برلاشه (1975) از ضریب نسبی روایی محتوا (CVR) استفاده شده است. برای تعیین CVR از متخصصان درخواست می‌شود تا هر جزء را براساس طیف سه قسمتی «ضروری است»، «مفید است ولی ضرورتی ندارد» و «ضرورتی ندارد» بررسی نماید. سپس پاسخ‌ها مطابق فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$CVR = \frac{n_e - \frac{n}{2}}{\frac{n}{2}} \qquad (۳)$$

در این فرمول n: تعداد کل متخصصین و n_e: تعداد متخصصینی هستند که گزینه ضروری را انتخاب کرده‌اند.

شبکه‌های بیزین

شبکه بیزین مدلی گرافیکی برای بیان روابط احتمالاتی بین متغیرها است. با استفاده از شبکه‌های بیزین می‌توان به مدل‌سازی روابط علت و معلولی یک فرایند و آنالیز وضعیت فعلی و آینده یک سیستم یا فرایند پرداخت. امروزه شبکه‌های بیزین به عنوان یک ابزار مناسب برای مدل کردن عدم قطعیت در سیستم‌های خبره محسوب می‌شود و شامل یک ساختار گرافیکی و شرح احتمالاتی از روابط بین متغیرها در یک سیستم می‌باشد. این روش‌ها کارایی خود را در تعدادی از مسائل تحلیل داده به خوبی نشان داده‌اند. مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های بیزین شامل امکان توسعه شبکه در صورت وجود داده‌های ناقص، امکان ترکیب مناسب نظرات کارشناسی و داده‌های موجود، امکان و سهولت به‌روزرسانی عوامل واحتمالات شرطی بین عواملی مختلف، امکان محاسبات رو به جلو و رو به عقب

[1] Sample size
[2] Confidence level
[3] Expected proportion
[4] Precision

(پی بردن از وضعیت علت به معلول و برعکس)، نمایش متغیرها در یک مدل به‌صورت گره و روابط علت و معلولی به‌صورت ارتباطات میان این گره‌ها، استفاده از اطلاعات گذشته به‌منظور پیش‌بینی وضعیت آینده، تشخیص موقعیت فعلی یک مجموعه براساس موقعیت گذشته آن و تحلیل مسائل با اطلاعات مبهم، ناکافی، متضاد و غیرقطعی هم در گذشته و هم در حال حاضر است (هکرمن، 1996):

تئوری بیز[1]

برای سال‌های متمادی، احتمالات شرطی رویدادهای مورد نظر با استفاده از تئوری بیز محاسبه می‌شد. این تئوری به‌صورت زیر بیان می‌شود (نیپولیتان، 2004).

اگر E و F دو رویداد مفروض باشند به گونه‌ای که P(E)≠0 و P(F)≠0، آنگاه:

$$P(E|F) = \frac{P(F|E)\,P(E)}{P(F)} \qquad (۴)$$

همچنین برای n رویداد E1, E2, … En که P(Ei)≠0 باشد، برای $1 \le i \le n$:

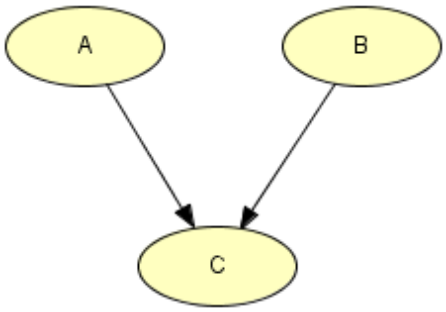
$$P(E_i|F) = \frac{P(F|E_i)\,P(E_i)}{P(F|E_1)\,P(E_1) + P(F|E_2)\,P(E_2) + \ldots P(F|E_n)\,P(E_n)} \qquad (۵)$$

در واقع در مواردی از تئوری بیز استفاده می‌شود که نمی‌توان احتمال شرطی مورد نظر را به‌طور مستقیم محاسبه کرد، اما می‌توان با محاسبه احتمالات موجود در طرف راست روابط (۴) و (۵) احتمال مورد نظر را تعیین نمود. اما دلیل عدم توانایی محاسبه مستقیم احتمال شرطی مورد نظر این است که در این حالت متغیرهای تصادفی به‌طور مستقیم به‌دست آمده و روابط احتمالاتی موجود بین متغیرهای تصادفی تعیین می‌شوند (بر خلاف حالت معمول که ابتدا فضای نمونه تعیین می‌شوند).

مفاهیم احتمالاتی

یک مفهوم مهم در شبکه‌های بیزین، مفهوم استقلال شرطی است. دو متغیر A و B مستقل شرطی نامیده می‌شوند، هرگاه اگر متغیر C به متغیرهای A و B وابسته باشد (شکل ۲) و مقدار متغیر C معلوم باشد، وجود اطلاعات در مورد متغیر B، هیچ‌گونه اطلاعات اضافی در مورد متغیر A ارائه ندهد. این مفهوم را می‌توان به‌صورت رابطه زیر بیان نمود.

$$P(A|B,C) = P(A|C) \qquad (۶)$$



شکل ۲- مثال ساده از گره‌ها و روابط میان آن‌ها در شبکه بیزین.

توزیع احتمالاتی توام مجموعه‌ای از متغیرهای $x_1, x_2, \ldots x_n$ با فرض مستقل بودن آنها، از حاصل‌ضرب توزیع احتمالات شرطی آن‌ها به‌دست می‌آید:

$$P(x_1, x_2, \ldots x_n) = \prod_{i=1}^{n} P(x_i|p(x_i)) \qquad (۷)$$

در معادله (۷)، $P(x_1, x_2, \ldots x_n)$: احتمال توام مقادیر متغیرها و $\pi(x_i)$: مقادیر کمّی مجموعه علت‌های x_i است. برای مثال اگر متغیر B وابسته به A و متغیر C وابسته به A و B باشد، آنگاه احتمال توام آن‌ها مطابق رابطه (۸) خواهد بود (هاگین اکسپرت، 2016).

$$P(A,B,C) = P(A).P(B|A).P(C|A,B) \qquad (۸)$$

ساختار مدل پیشنهادی

آماده‌سازی اطلاعات ورودی

در مواقعی که هیچ‌گونه داده و اطلاعاتی از وضعیت گره‌های شبکه بیزین وجود ندارد، می‌توان از نظرات کارشناسان به عنوان داده ورودی به مدل استفاده نمود (سانتا اولالا و همکاران، 2005؛ بروملی و همکاران، 2005). بنابراین، داده‌های هریک از پرسشنامه‌های تکمیل شده که نشان‌دهنده وضعیت وجودی هر عامل در منطقه پایلوت است، به عنوان داده مورد نیاز مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین لازم است دسته‌بندی مناسب برای عوامل ورودی به مدل تعیین شود. دسته‌بندی گره‌های شبکه بیزین می‌تواند به صورت داده عددی، داده زمانی،

[1] Bayes theorem

توزیع احتمالاتی و یا یک تعریف ساده باشد (سانتا اولالا و همکاران، 2005).

آموزش شبکه‌های بیزین

آموزش شبکه شامل آموزش ساختار و آموزش عوامل می‌شود. آموزش ساختار شبکه به معنای تعیین متغیرهای وابسته و مستقل و یافتن ارتباط‌های ممکن بین متغیرهایی است که روابط علّت و معلولی آن‌ها براساس داده‌های مشاهداتی قابل تشخیص است. با توجه به شمای کلّی شبکه‌های بیزین که از تلفات ظاهری و واقعی به همراه عوامل مؤثر بر هریک تشکیل شده است، با شناخت عوامل اثرگذار بر اجزای تلفات ظاهری و واقعی، طرح اولیه شبکه مشخص می‌شود و نیازی به آموزش ساختار شبکه نیست. بنابراین به‌طور مستقیم می‌توان وارد مرحله آموزش عوامل مدل شد.

در شبکه‌های بیزین هر گره فرزند دارای یک جدول احتمالات شرطی[1] است، که تعداد سلول‌های آن برابر با دو به توان تعداد گره‌های والد آن گره فرزند است. لذا پس از آموزش شبکه با داده‌های ورودی، سلول‌های جداول احتمالات شرطی گره‌ها تکمیل می‌شود. در نهایت، پس از اجرای شبکه، با استفاده از اعداد این جداول، احتمالات در دسته‌بندی مربوط به هر گره مشخص می‌شود.

با توجه به اینکه توزیع احتمالاتی تمامی عوامل نامعلوم است و از داده‌های مشاهداتی برای آموزش عوامل استفاده می‌شود، بنابراین الگوریتم تخمین-حداکثرسازی (EM)[2] برای آموزش عوامل بسیار کارامد است (هاگین اکسپرت، 2016). با استفاده از این الگوریتم سلول‌های جداول احتمالات شرطی گره‌های فرزند که احتمال شرطی گره فرزند در هر حالت[3] در یک حالت خاص از وضعیت‌های والدین است، مشخص می‌شود. در این الگوریتم فرایند آموزش احتمالات شرطی بین متغیرها با استفاده از داده‌های ورودی مشاهداتی انجام می‌گیرد و در صورت عدم وجود داده مشاهداتی عبارت N/A[4] و یا جای خالی به جای داده قرار می‌گیرد. الگوریتم تخمین-حداکثرسازی در صورت وجود سری داده‌های ناقص طی دو مرحله سلول‌های جداول احتمالات شرطی گره‌های فرزند را تکمیل می‌کند؛ مرحله اول، گام تخمین[5] و مرحله دوم، گام حداکثرسازی[6] نام دارد (پرسچر، 2003). در گام تخمین الگوریتم تخمین-حداکثرسازی داده‌های مشاهداتی نامعلوم را تخمین می‌زند. سپس در گام حداکثرسازی، لگاریتم احتمال داده مشاهداتی ورودی مربوط به توزیع احتمالاتی مفروض محاسبه می‌شود. با انجام این دو گام در هر تکرار، سعی می‌شود لگاریتم به‌دست آمده حداکثر شود.

لازم به ذکر است، از آنجایی که داده ورودی به مدل بیزین نظرات کارشناسان است که ماهیت کیفی دارد و همچنین هیچ‌گونه اطلاعاتی در مطالعات پیشین در مورد وضعیت عوامل مؤثر موجود نیست بنابراین در تحقیق حاضر بدون انجام کالیبراسیون، داده‌های پرسشنامه در مدل بیزین مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دریافت خروجی و تحلیل حساسیت

مرحله آخر برای تحلیل عوامل مؤثر بر آب بدون درآمد، دریافت خروجی مدل که همان احتمال وقوع هر دسته برای هریک از عوامل مؤثر است، می‌باشد. در گام بعدی برای آنکه بتوان از این نتایج برای مشخص شدن میزان تأثیر هر عامل مؤثر بر عوامل بالادست خود، رتبه‌بندی عوامل مؤثر شناخته شده و مشخص نمودن مؤثرترین و کم‌اثرترین آن‌ها استفاده نمود، از تحلیل حساسیت استفاده می‌شود. بنابراین معیار اصلی در اولویت‌بندی عوامل مؤثر، نظرات افرادی است که پرسشنامه را تکمیل می‌نمایند.

برای این منظور در ابتدا لازم است برای تمامی گره‌ها به صورت جداگانه یک حالت مشخص در دسته‌بندی انتخاب شده، به یک میزان افزایش یابد. (انجام این فرض در نرم‌افزار هاگین لایت نسخه ۸/۴ با تغییر درصدهای حالت‌ها در جداول احتمال هر گره به صورت دستی امکان‌پذیر است). با انجام این‌کار برای هر گره، گره‌های فرزند آن دستخوش تغییر می‌شوند. هرچه میزان تغییرات درصد یک حالت گره والد بیشتر باشد، درصد تغییرات در گره فرزند بیشتر بوده و تفکیک عوامل در فرایند تحلیل حساسیت با دقت بالاتری انجام می‌شود. بنابراین میزان افزایش یک حالت در تمامی گره‌ها باید با توجه به حداکثر

1 Conditinal Probability Table (CPT)
2 Estimation Maximization algorithm
3 State
4 Not available
5 E-step
6 M-step

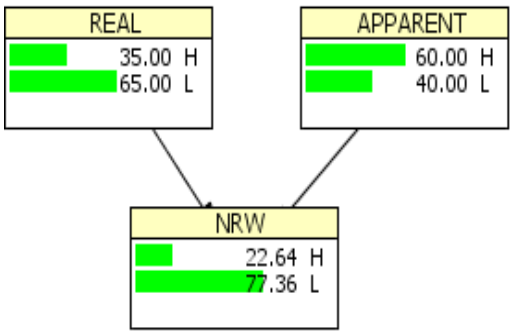
درصد اختصاص یافته به آن حالت از میان تمام گره‌ها تعیین شود تا درصد یک حالت در هیچ‌یک از گره‌ها بیش از ۱۰۰ نشود.

پس از اعمال تغییر بر تمامی گره‌ها برای آنکه بتوان آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد، لازم است یک شاخص حساسیت تعریف شود. شاخص حساسیت یک عامل فرزند نسبت به یک عامل والد باید تغییرات درصد عامل فرزند را به ازای میزان تغییرات آن عامل والد نشان دهد. این شاخص را می‌توان به صورت رابطه (۹) بیان نمود.

$$SI = \frac{\Delta C_i}{\Delta P_i} \qquad (۹)$$

در این رابطه، SI: شاخص حساسیت، ΔC_i: تغییرات درصد عوامل فرزند شامل تلفات ظاهری، تلفات واقعی، اجزای هریک از آن‌ها و یا آب بدون درآمد است و ΔP_i: تغییرات درصد عامل والد پس از افزایش یک حالت به یک میزان مشخص است. براساس رابطه (۹) هرچه SI یک عامل برای یک عامل والد بیشتر باشد، میزان حساسیت عامل فرزند نسبت به آن عامل والد بیشتر است.

برای فهم بهتر موضوع، تحلیل حساسیت یک مدل فرضی شرح داده می‌شود. این مدل از گره‌های والد تلفات ظاهری (APPARENT)، تلفات واقعی (REAL) و گره فرزند آب بدون درآمد (NRW) تشکیل شده است. هر سه گره در دو دسته کم (L[1]) و زیاد (H[2]) دسته‌بندی شده‌اند. شکل ۳ شبکه بیزین فرضی را در حالت اجرا شده[3] نشان می‌دهد.



شکل ۳- مثال شبکه بیزین آب بدون درآمد در حالت اجرا.

برای مشخص کردن حساسیت گره آب بدون درآمد نسبت به گره‌های تلفات ظاهری و واقعی باید در این دو گره یک حالت را به یک میزان مشخص تغییر داد. در این مثال می‌توان حالت H را برای دو گره والد به اندازه ۶۰ درصد افزایش داد. با افزایش حالت زیاد گره تلفات ظاهری به اندازه ۶۰ درصد، این دسته به ۹۶ درصد و دسته دوم (حالت کم) به ۴ درصد تغییر می‌یابد. ضمن این تغییر، حالت‌های زیاد و کم در گره فرزند (آب بدون درآمد) نیز تغییر می‌کند، به‌طوریکه حالت زیاد از ۲۲/۶۴ درصد به ۲۹/۹۲ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین طبق رابطه ۷، ΔP_i برابر با ۳۶ (۳۶ = ۶۰ – ۹۶) می‌شود. برای گره آب بدون درآمد نیز مقدار ΔC_i برابر با ۷/۲۸ (۷/۲۸ = ۲۲/۶۴ – ۲۹/۹۲) می‌شود. درنهایت با تقسیم مقدار بدست آمده برای ΔC_i بر مقدار بدست آمده برای ΔP_i شاخص حساسیت تلفات ظاهری برابر با ۰/۲ بدست می‌آید. با انجام این فرایند برای گره تلفات واقعی، شاخص حساسیت تلفات واقعی برابر با ۰/۴۷۵ می‌شود. با مقایسه این دو عدد می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت آب بدون درآمد نسبت به تلفات واقعی بیشتر است.

نتایج

مطالعه موردی

محدوده تحت پوشش مخزن ۲ واقع در محدوده شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ به‌عنوان پایلوت انتخاب شده است. محدوده تحت با قدمت لوله‌گذاری آب شرب در این منطقه بیش از ۴۰ سال و شامل قدیمی‌ترین محله‌های تهران می‌باشد که بنا به دلایلی همچون بافت شهرسازی قدیمی، وجود بازار تهران، بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی، وجود تأسیسات سایر شرکت‌ها و ارگان‌های خدماتی و وجود محدوده طرح ترافیک از شرکت‌های آب و فاضلاب سایر مناطق مستثنی است. اطلاعات مربوط به جداول بالانس از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ نشان می‌دهد که به‌طور میانگین در محدوده تحت پوشش شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴، آب بدون درآمد ۲۳/۰۵ درصد، تلفات ظاهری ۱۳/۳۴ درصد، تلفات واقعی ۸/۹۸ درصد و مشترکین مجاز بدون قبض ۰/۸۸ درصد می‌باشد (شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ تهران، ۱۳۹۴).

[1] Low
[2] High
[3] Run mode

عوامل مؤثر بر اجزای آب بدون درآمد

پس از شناسایی مهمترین عوامل مؤثر بر آب بدون درآمد در اولین گام و تدوین پرسشنامه، با مراجعه حضوری به سه ناحیه منطقه مورد مطالعه؛ بهارستان، سلیمانیه و افسریه، کارشناسان و مدیران بخش‌های مختلف با توجه به اطلاعات و تخصص خود در زمینه عوامل مؤثر بر تلفات ظاهری و واقعی آب بدون درآمد پرسشنامه را تکمیل کردند. همچنین با هدف افزایش کیفیت ارزیابی پاسخ‌ها، از مدیران و مسئولین باتجربه در شرکت آب و فاضلاب استان تهران و اساتید دانشگاه تهران که اطلاعات کافی در مورد شرایط حاکم بر منطقه مورد مطالعه و همچنین عوامل مؤثر بر آب بدون درآمد دارند تقاضا شد پرسشنامه را تکمیل کنند.

برای تعیین حداقل تعداد پرسشنامه‌ای که باید تکمیل شود، از رابطه توصیه شده توسط دنیل (1999) (رابطه ۱) استفاده می‌شود. مطابق با دنیل (1999) و ناینگ (2006)، فرض شده است که میزان اطمینان از پاسخ‌ها، ۹۵ درصد باشد، پس Z برابر با ۱/۹۶ می‌شود. همچنین، نسبت مورد انتظار برابر با ۳۰ درصد تخمین زده می‌شود و دقت که نشان‌دهنده حاشیه اطمینان است برابر با ۱۵ درصد لحاظ می‌شود. در نهایت با جایگذاری مقادیر فرض شده در رابطه (۱)، حداقل تعداد ۳۶ پرسشنامه لازم است تکمیل شود.

در مجموع تعداد ۴۷ پرسشنامه از محل‌های ذکر شده جمع‌اوری شد. با توجه به آنکه از پاسخ‌دهندگان تقاضا شد براساس تخصص و تجربه خود به سوالات پاسخ دهند، از تعداد کل، ۷۲ درصد از افراد به تمامی پرسش‌ها، ۲۴ درصد فقط به اجزای تلفات ظاهری و ۴ درصد نیز فقط به اجزای تلفات واقعی پاسخ داده‌اند. پس از حذف و یا ترکیب برخی از عوامل ترکیب نهایی عوامل مؤثر بر عوامل و اجزای آب بدون درآمد برای مدل‌سازی با استفاده از شبکه‌های بیزین مشخص می‌شود. ترکیب نهایی عوامل به همراه مخفف به‌کار رفته برای هریک در مدل بیزین در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- عوامل نهایی مؤثر بر اجزای آب بدون درآمد در محدوده مورد مطالعه.

اجزای آب بدون درآمد	اجزای تلفات ظاهری و واقعی	عوامل مؤثر
تلفات ظاهری (APPARENT)	انشعابات غیر مجاز (UA)	فقر فرهنگی (مشترکین) (PC)
		فقر اقتصادی (مشترکین)، زیاده‌خواهی اقتصادی (PEC)
		ضعف مدیریتی (PM)
		ضعف قانونی (مشکلات ثبتی و خدمات شهری در حاشیه شهرها، ضعف در آیین‌نامه‌های عملیاتی آبفا) (PL1)
	خطای مدیریتی و بهره‌برداری (MOE)	عدم ثبت، نصب و قرائت به‌موقع اطلاعات انشعابات و کنتور جدید (L1)
		عدم شناسایی کنتورهای خراب (L2)
	خطای پرسنلی (PE)	ضعف آموزش (PT)
		ضعف برنامه‌ریزی و نبود مسیر بهینه برای کنتورخوان (PP)
		ضعف نظارت (PO)
		عدم استفاده از فناوری‌های جدید (LU)
	خطای کنتورها (FME)	ضعف در ساخت کنتورها (PS)
		انتخاب نادرست سایز و کلاس (دقت) کنتورها (WS)
		جانمایی و نصب غلط کنتورها (WP)
		عدم نگهداری صحیح کنتورها (LM)
		عدم تست و تعویض به موقع کنتورها (LT)
		مشکلات مالی(MPR)
		عدم توجیه اقتصادی تعویض کنتورها بدلیل قیمت کم آب (LJ)

اجزای آب بدون درآمد	اجزای تلفات ظاهری و واقعی	عوامل مؤثر
	مشترکین مجاز بدون قبض (UBA)	ضعف قانونی (PL2)
		ضعف مدیریتی (PM)
		ضعف نظارت (PO)
		عدم آگاهی مؤسسات و ارگان‌ها از اهمیت اندازه‌گیری مصارف (LK)
	نشت مرئی (VisiL)	انتخاب جنس نامناسب برای لوله‌ها، شیرها و متعلقات (PS)
		اجرای غلط و غیر استاندارد (عدم بسترسازی، پوشش و تراکم) (WP)
		ضعف در سیستم ۱۲۲ و عدم جمع‌اوری و ثبت کامل اطلاعات حوادث (P122)
		کم بودن سرعت و کیفیت تعمیرات (LS)
		عدم پیمایش و بازرسی مستمر شبکه، شیرالات، پمپ‌ها و مخازن (LO)
		بی‌دقتی در حمل لوله و متعلقات (PT)
		کیفیت نامناسب در ساخت لوله و متعلقات (PSt)
		طراحی غلط شبکه (WD)
		عدم به‌سازی و نوسازی به‌موقع اجزای شبکه (LF)
		عدم مدیریت فشار در شبکه (LP)
		عدم بررسی و تحلیل علل وقوق حادثه (LFR)
		ضعف در مدیریت سرریز مخازن (PRM)
		عدم استفاده از سیستم‌های مدیریت از راه دور (پمپ و مخزن)، تله‌متری و اسکادا (LSca)
		عدم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) (LPM)
		کمبود منابع مالی در شرکت آبفا (LBud)
		ضعف شرکت در آموزش کارگران و کارشناسان (LPT)
تلفات واقعی (REAL)		ضعف مدیریتی (عدم وجود نقشه‌های بهنگام، وجود سیستم GIS، شروع به موقع نشت‌یابی و استمرار آن) (LMng)
	نشت نامرئی (inVisiL)	عدم وجود و اجرای DMA (عدم انجام تست گام‌به‌گام و تشخیص مناطق با ریسک بالا در مناطق ایزوله) (LDMA)
		ضعف مدیریتی (عدم وجود نقشه‌های بهنگام، وجود سیستم GIS، شروع به موقع نشت‌یابی و استمرار آن) (LMng))
		عدم خرید و استفاده از ابزار اندازه‌گیری کالیبره شده و دستگاه‌های نشت‌یاب و روش‌های مدرن مدیریت نشت (LBU)
		انتخاب جنس نامناسب برای لوله‌ها، شیرها و متعلقات (PS)
		اجرای غلط و غیر استاندارد (عدم بسترسازی، پوشش و تراکم) (WP)
		عدم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM) (LPM)
		عدم توجیه اقتصادی نشت یابی بدلیل قیمت کم آب (LJ)
		بی‌دقتی در حمل لوله و متعلقات (PT)
		کیفیت نامناسب در ساخت لوله و متعلقات (PSt)
		طراحی غلط شبکه (WD)
		عدم به‌سازی و نوسازی به‌موقع اجزای شبکه (LF)
		عدم مدیریت فشار در شبکه (LP)
		کمبود منابع مالی در شرکت آبفا (LBud)
		ضعف شرکت در آموزش کارگران و کارشناسان (LPT)

اجزای آب بدون درآمد	اجزای تلفات ظاهری و واقعی	عوامل مؤثر
		ضعف در آیین نامه‌های عملیاتی و قراردادهای نشت‌یابی (PSC)

برای محاسبه پایایی پرسشنامه با به کارگیری روش آلفا کرونباخ و استفاده از نرم‌افزار SPSS ضریب آلفا مقدار ۰/۸۸۴ بدست می‌آید که با استناد به جورج و مالری (2003)، پرسشنامه از پایایی عالی برخوردار است. همچنین با بررسی روایی از روش ضریب نسبی روایی محتوا، عدد CVR برای سوالات پرسشنامه ۰/۵ الی ۰/۹ محاسبه شد. بنابراین با استناد به لاشه (1975)، سوالات پرسشنامه از روایی قابل قبولی برخوردارند.

ساختار مدل بیزین

مطابق با جدول ۱ عوامل نهایی مؤثر بر اجزای آب بدون درآمد ۵۱ عدد می‌باشد که برای مدل کردن آن‌ها، یک شبکه با ۵۱ گره باید تشکیل شود. اما با توجه به ساختار و خصوصیات نرم‌افزار به‌کار رفته در این تحقیق (هاگین[1] لایت نسخه ۸/۴)، در هر مدل شبکه‌های بیزین، ۲۵ گره با دو دسته‌بندی را می‌توان مدل‌سازی نمود. بنابراین عوامل ورودی در ابتدا به دو بخش تلفات ظاهری و تلفات واقعی تقسیم شده و در دو مدل مجزا همراه با عوامل اثرگذار بر هریک مدل می‌شوند. سپس در شبکه‌ای دیگر؛ شامل گره‌های تلفات ظاهری، تلفات واقعی و آب بدون درآمد، نتایج حاصل از تحلیل دو شبکه نخست ترکیب و بر گره آب بدون درآمد اعمال می‌شود. بنابراین در مجموع، تمامی عوامل اثرگذار بر اجزای آب بدون درآمد در سه شبکه با نام‌های تلفات ظاهری، تلفات واقعی و آب بدون درآمد مدل‌سازی می‌شوند. در هر شبکه، برای هریک از عوامل شناخته شده دو دسته‌بندی زیاد (H) و کم (L) در نظر گرفته می‌شود که این دسته‌بندی براساس تقسیم‌بندی موجود در پرسشنامه اتخاذ شده است. بدین ترتیب، برای هر گره احتمال آن‌که اثرگذاری آن در منطقه مورد مطالعه بیش از ۵۰ درصد و یا کمتر از ۵۰ درصد باشد، مشخص می‌شود.

برای آموزش عوامل هریک از سه مدل، از داده‌های پرسشنامه که در واقع نظرات کارشناسان و صاحب‌نظران است، استفاده می‌شود. فایل ورودی به نرم‌افزار برای هریک از سه مدل شامل یک جدول است، که هر سطر آن نشان دهنده داده‌های یک پرسشنامه، یا به بیان دیگر نظر یک فرد است و هر ستون نیز مربوط به یکی از عوامل مؤثر است. داده‌های این جدول وضعیت هر عامل (زیاد، کم و یا وجود ندارد) از دیدگاه هریک از پرسشنامه‌ها است. به عنوان مثال چند سطر از فایل ورودی به مدل تلفات واقعی که دارای ۳۶ سطر (تعداد پرسشنامه‌های تکمیل شده در بخش تلفات واقعی) است، در شکل ۴ نشان داده شده است. در مواردی که در پرسشنامه وضعیت "وجود ندارد" برای یک عامل مؤثر انتخاب شده باشد، در نرم‌افزار حالت آن گره به‌صورت جای‌خالی قرار داده می‌شود.

VisiL	PS	WP	P122	LS	LO	PT	PSt	WD	LF	LP	LFR	PRM	Lsca	LPM	Lbud	LPT	LMng	inVisiL	LDMA	LIn	LBU	LJ	PSC	REAL
H	H	H	H	H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	L	L	H
H	H	H	H	H	H	L	H	L	H	H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H	L	H
H	H	H	H	L	H	L	H	L	H	H	H	L	H	H	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
L	H	L	L	L	L	L	L	L	H	L	L		L	H	H	L	H	L	H	H	L	L	L	L
H	H	H	L	L	H	H	H	L	H	H	H	L	L	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	H
L	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	H				H	H	H	L	L	L	H	H	L	L

شکل ۴- بخشی از داده ورودی به مدل بیزین تلفات واقعی.

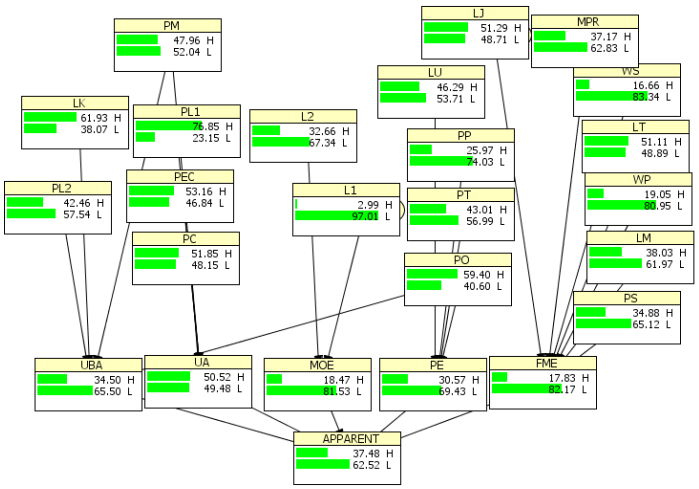
پس از انجام آموزش عوامل شبکه بیزین، سلول‌های جداول احتمالات شرطی تکمیل می‌شوند. پس از آن، به‌منظور دریافت خروجی مدل، شبکه اجرا می‌شود. نتایج اجرای شبکه برای سه مدل تلفات ظاهری، تلفات واقعی و آب بدون درآمد در شکل‌های ۵ الی ۷ نشان داده شده است. درصدهای نشان داده شده در شکل ۵ برای هریک از متغیرهای ورودی، نشان‌دهنده حالت "زیاد" یا "کم" مربوط به آن متغیر در محدوده تحت پوشش شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ از لحاظ تعداد داده‌های آن دسته در سری داده‌های پرسشنامه است. به عنوان مثال، برای گره

[1] Hugin

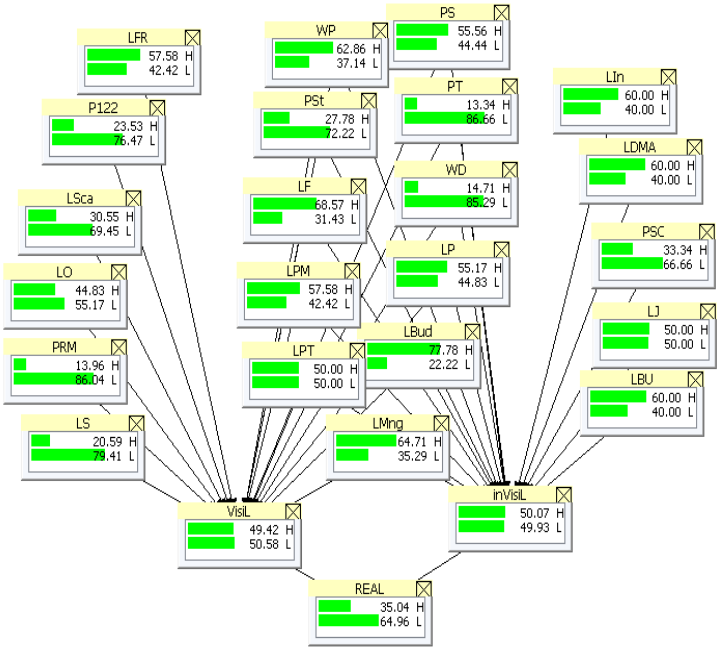
"ضعف مدیریتی" (PM)، درصدهای نمایش داده شده در جدول حاکی از آن است که طبق نظر کارشناسان در محدوده مورد مطالعه، ضعف مدیریتی به میزان ۴۷/۹۶ درصد زیاد و به میزان ۵۲/۰۴ درصد کم است. جداول احتمالاتی گره‌های فرزند نیز با استفاده از استنباط شرطی شبکه‌های بیزین مشخص شده‌اند. همچنین از آنجایی‌که یکی از ویژگی‌های مهم شبکه‌های بیزین امکان محاسبات رو به عقب است، در هریک از سه مدل توسعه یافته درصورت معلوم بودن احتمالات گره فرزند، می‌توان سهم هر یک از عوامل مؤثر را مشخص کرد.

با توجه به اشکال ۵ الی ۷، احتمال آنکه اثرگذاری تلفات ظاهری در منطقه مورد مطالعه بیش از ۵۰ درصد باشد، ۳۷/۴۸ درصد است. به همین ترتیب، احتمال زیاد بودن تلفات واقعی ۳۵/۰۴ درصد و احتمال زیاد بودن آب بدون درآمد ۳۲/۲ درصد است. پس از دریافت خروجی سه مدل شبکه‌های بیزین می‌توان تأثیر هر یک از عوامل مؤثر را بر عوامل فرزند خود بررسی و اولویت‌بندی نمود. برای این منظور در ابتدا لازم است برای تمامی گره‌ها به صورت جداگانه دسته "زیاد" به حداکثر میزان ممکن افزایش یابد. از میان تمامی عوامل شناخته شده مؤثر بر آب بدون درآمد در مدل‌های تلفات ظاهری و تلفات واقعی، بیشترین میزان درصد دسته "زیاد" ۷۷/۷۸ درصد و متعلق به گره LBud (کمبود منابع مالی در شرکت آبفا) است. بنابراین برای آن‌که در بررسی نهایی مدل آب بدون درآمد بر تمامی گره‌ها به یک میزان تغییرات اعمال شود، حداکثر می‌توان برای تمامی گره‌ها دسته‌بندی "زیاد" را به اندازه ۲۵ درصد افزایش داد تا در هیچ‌یک از گره‌ها، حالت "زیاد" به بیش از ۱۰۰ درصد نرسد.

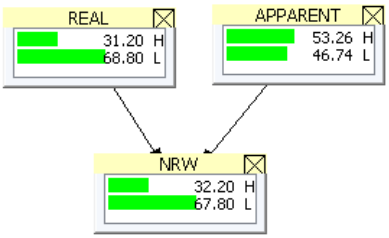
برای تحلیل حساسیت آب بدون درآمد نسبت به تمامی عوامل شناخته شده مؤثر بر تلفات ظاهری و واقعی لازم است در ابتدا شاخص‌های SI در یک دامنه مشابه قرار گیرند تا بتوان عوامل تلفات ظاهری و واقعی را با هم مقایسه کرد. برای این منظور با نرمال‌سازی شاخص‌های SI، اعدادی بین صفر و یک به آن‌ها نسبت داده می‌شود و پس از آن عوامل از لحاظ میزان اثرگذاری رتبه‌بندی می‌شوند.



شکل ۵- شبکه آموزش دیده مدل تلفات ظاهری.



شکل ۶- شبکه آموزش دیده مدل تلفات واقعی.



شکل ۷- شبکه آموزش دیده برای مدل آب بدون درآمد.

رتبه بندی عوامل

در جدول ۲ نتایج تحلیل حساسیت تلفات ظاهری نسبت به عوامل مؤثر بر آن که در شکل ۵ مشخص شده‌اند، نشان داده شده است. در این جدول عوامل مؤثر براساس شاخص SI به صورت نزولی اولویت‌بندی شده‌اند. به عنوان مثال، "ضعف مدیریتی" از میان سایر عوامل بیشترین تأثیر را بر پیدایش و افزایش تلفات ظاهری دارد، به‌طوریکه با بهبود وضعیت آن نسبت به سایر عوامل، می‌توان تلفات ظاهری را با درصد بیشتری کاهش داد. پس از آن به ترتیب "ضعف قانونی (مشکلات ثبتی و خدمات شهری در حاشیه شهرها، ضعف در آیین‌نامه‌های عملیاتی شرکت آبفا)" و "فقر فرهنگی" بیشترین اولویت را دارند. همچنین "ضعف برنامه‌ریزی و نبود مسیر بهینه برای کنتورخوان" نیز از کمترین اولویت برای کاهش تلفات ظاهری برخوردار است. نتایج بررسی نشان می‌دهد که به ترتیب "انشعابات غیر مجاز"، "مشترکین مجاز بدون قبض"، "خطای کنتورها"، "خطای مدیریتی و بهره‌برداری" و "خطای پرسنلی" به ترتیب بیشترین اولویت را برای کاهش تلفات ظاهری دارند.

جدول ۲- نتایج تحلیل حساسیت تلفات ظاهری نسبت به عوامل مؤثر ورودی.

رتبه	عوامل مؤثر بر تلفات ظاهری	شاخص حساسیت (٪)
۱	ضعف مدیریتی	۳۸/۹۵
۲	ضعف قانونی (مشکلات ثبتی و خدمات شهری در حاشیه شهرها، ضعف در آیین‌نامه‌های عملیاتی آبفا)	۲۳/۷۹
۳	فقر فرهنگی	۱۷/۵۹

رتبه	عوامل مؤثر بر تلفات ظاهری	شاخص حساسیت (٪)
۴	ضعف قانونی در ایجاد مشترکین مجاز بدون قبض	۱۳/۸۵
۵	عدم آگاهی مؤسسات و ارگان‌ها از اهمیت اندازه‌گیری مصارف	۱۱/۳۷
۶	عدم شناسایی کنتورهای خراب	۸/۲۱
۷	جانمایی و نصب غلط کنتورها	۵/۲۵
۸	فقر اقتصادی	۵/۱۹
۹	ضعف در ساخت کنتورها	۴/۹۳
۱۰	ضعف نظارت	۴/۵۱
۱۱	عدم استفاده از فناوری‌های جدید	۴/۰۶
۱۲	ضعف آموزش پرسنل	۳/۶۳
۱۳	عدم نگهداری صحیح کنتورها	۳/۴۷
۱۴	مشکلات مالی	۲/۶۹
۱۵	عدم ثبت، نصب و قرائت به‌موقع اطلاعات انشعابات و کنتور جدید	۲/۶۸
۱۶	عدم تست و تعویض به موقع کنتورها	۲/۲۷
۱۷	انتخاب نادرست سایز و دقت مناسب کنتور	۱/۴۴
۱۸	عدم توجیه اقتصادی تعویض بدلیل قیمت کم آب	۱/۳۳
۱۹	ضعف برنامه‌ریزی و نبود مسیر بهینه برای کنتورخوان	۰/۴۶

در جدول ۳ نتایج تحلیل حساسیت تلفات واقعی نسبت به تمامی عوامل مؤثر بر آن نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، "اجرای غلط و غیر استاندارد" و "ضعف شرکت در آموزش کارگران و کارشناسان" به ترتیب بیشترین تأثیر را بر تلفات واقعی دارد. عوامل "ضعف در مدیریت سرریز مخازن"، "عدم استفاده از سیستم‌های مدیریت از راه دور (برای پمپ و مخزن) – تله متری و اسکادا"، "ضعف در آیین نامه های عملیاتی و قراردادهای نشت‌یابی" و "عدم توجیه اقتصادی نشت یابی بدلیل قیمت کم آب" که در ردیف آخر قرار گرفته‌اند هم‌ارزش بوده و بهبود آن‌ها کمترین اثر را بر کاهش تلفات واقعی خواهد داشت. در نهایت در بررسی اجمالی انجام شده نشان می‌دهد که نشت مرئی نسبت به نشت نامرئی از اولویت بالاتری برخوردار است.

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت تلفات واقعی نسبت به عوامل مؤثر ورودی.

رتبه	عوامل مؤثر بر تلفات واقعی	شاخص حساسیت (٪)
۱	اجرای غلط و غیر استاندارد (عدم بسترسازی، پوشش و تراکم)	۰/۸۹۱
۲	ضعف شرکت در آموزش کارگران و کارشناسان	۰/۸۸
۳	عدم به‌سازی و نوسازی به‌موقع اجزای شبکه	۰/۸۷۵
۴	انتخاب جنس نامناسب برای لوله‌ها، شیرها و متعلقات	۰/۸۶۴
۵	ضعف مدیریتی (عدم وجود نقشه‌های بهنگام، وجود سیستم GIS، شروع به موقع نشت‌یابی و استمرار آن)	۰/۴۳۳
۶	کیفیت نامناسب در ساخت لوله و متعلقات	۰/۴۳۲
۷	ضعف در سیستم ۱۲۲ و عدم جمع آوری و ثبت کامل اطلاعات حوادث	۰/۳۴
۸	بی‌دقتی در حمل لوله و متعلقات	۰/۳
۹	عدم تعمیر و نگهداری پیشگیرانه (PM)	۰/۲۷۸
۱۰	طراحی غلط شبکه	۰/۲۷۲
۱۱	عدم پیمایش و بازرسی مستمر شبکه، شیرالات، پمپ‌ها و مخازن	۰/۲۶۸
۱۲	عدم مدیریت فشار در شبکه	۰/۲۱۸

رتبه	عوامل مؤثر بر تلفات واقعی	شاخص حساسیت (٪)
۱۳	عدم بررسی و تحلیل علل وقوع حادثه	۰/۲۰۸
۱۴	کم بودن سرعت و کیفیت تعمیرات	۰/۱۹۴
۱۵	کمبود منابع مالی در شرکت آبفا	۰/۱۰۳
۱۶	عدم ریشه‌یابی علل وقوع نشت در شبکه عدم وجود و اجرای DMA (عدم انجام تست گام به گام و تشخیص مناطق با ریسک بالا در مناطق ایزوله)	۰/۰۶۷
۱۷	عدم خرید و استفاده از ابزار اندازه‌گیری کالیبره شده و دستگاه‌های نشت‌یاب و روش‌های مدرن مدیریت نشت ضعف در مدیریت سرریز مخازن عدم استفاده از سیستم‌های مدیریت از راه دور (برای پمپ و مخزن) – تله متری و اسکادا ضعف در آیین نامه های عملیاتی و قراردادهای نشت‌یابی عدم توجیه اقتصادی نشت یابی بدلیل قیمت کم آب	۰

پس از بررسی حساسیت مدل‌های تلفات ظاهری و واقعی نسبت به عوامل ورودی هریک، برای بررسی اجمالی مدل آب بدون درآمد و مشخص نمودن نقش هریک از عوامل مؤثر شناسایی شده در پیدایش و افزایش آب بدون درآمد ، تحلیل حساسیت آب بدون درآمد نسبت به تمامی عوامل مؤثر بر آن انجام شده است (جدول ۴).

جدول ۴- نتایج تحلیل حساسیت آب بدون درآمد نسبت به عوامل مؤثر ورودی.

رتبه	عوامل مؤثر	اجزای آب بدون درآمد	شاخص حساسیت نرمال شده
۱	ضعف مدیریتی	تلفات ظاهری	۱
۲	ضعف شرکت در آموزش کارگران و کارشناسان	تلفات واقعی	۱
۳	عدم به‌سازی و نوسازی به‌موقع اجزای شبکه	تلفات واقعی	۰/۹۱
۴	انتخاب جنس نامناسب برای لوله‌ها، شیرها و متعلقات	تلفات واقعی	۰/۹
۵	اجرای غلط و غیر استاندارد (عدم بسترسازی، پوشش و تراکم)	تلفات واقعی	۰/۸
۶	ضعف قانونی (مشکلات ثبتی و خدمات شهری در حاشیه شهرها، ضعف در آیین‌نامه‌های عملیاتی آبفا)	تلفات ظاهری	۰/۶۱
۷	فقر فرهنگی	تلفات ظاهری	۰/۴۵
۸	کیفیت نامناسب در ساخت لوله و متعلقات	تلفات واقعی	۰/۴۳
۹	ضعف مدیریتی (عدم وجود نقشه‌های بهنگام، وجود سیستم GIS، شروع به موقع نشت‌یابی و استمرار آن)	تلفات واقعی	۰/۳۹
۱۰	ضعف قانونی در ایجاد مشترکین مجاز بدون قبض	تلفات ظاهری	۰/۳۵
۳۴	عدم ثبت، نصب و قرائت به‌موقع اطلاعات انشعابات و کنتور جدید ضعف برنامه‌ریزی و نبود مسیر بهینه برای کنتورخوان ضعف در مدیریت سرریز مخازن	تلفات ظاهری	۰
۳۵	عدم استفاده از سیستم‌های مدیریت از راه دور (برای پمپ و مخزن) – تله متری و اسکادا ضعف در آیین نامه‌های عملیاتی و قراردادهای نشت‌یابی عدم توجیه اقتصادی نشت‌یابی بدلیل قیمت کم آب	تلفات واقعی	۰

در ستون سوم جدول ۴ مشخص شده است که هر عامل مربوط به کدام یک از اجزای آب بدون درآمد است. نتایج این بررسی حاکی از آن است که از میان ۴۱ عامل مؤثر بر آب بدون درآمد به ترتیب چهار عامل "ضعف مدیریتی"، "ضعف شرکت در آموزش کارگران و کارشناسان"، "عدم به‌سازی و نوسازی به‌موقع اجزای شبکه" و "انتخاب جنس نامناسب برای لوله‌ها، شیرها و متعلقات" از اولویت بیشتری در مدیریت ریسک و کاهش حجم آب بدون درآمد برخوردارند. در ردیف‌های ۳۴ و ۳۵ عواملی قرار دارند که با شاخص SI صفر، کمترین اولویت را برای کاهش آب بدون درآمد دارند. در نهایت نتایج مدل بیزین تدوین شده نشان می‌دهد که برای کاهش آب بدون درآمد ابتدا باید در بخش تلفات ظاهری اصلاحات و تغییراتی صورت گیرد و در قدم دوم به تلفات واقعی آب پرداخته شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش در ابتدا با استفاده از مراجع و استانداردهای موجود در حوزه آب بدون درآمد، مهمترین عوامل مؤثر بر اجزای آن، مشخص شدند. سپس با توجه کمبود اطلاعات در مورد میزان وجود هر عامل در منطقه مورد مطالعه و همچنین ماهیت کیفی عوامل، پرسشنامه طراحی شد تا اطلاعات موردنیاز از کارشناسان و مسئولین پرسش شود. در گام بعدی برای مشخص نمودن روابط احتمالاتی میان عوامل از شبکه بیزین استفاده شد. شبکه آب بدون درآمد به دو قسمت تلفات ظاهری و تلفات واقعی تقسیم شد و نتایج آن‌ها بر آب بدون درآمد اعمال شد. با استفاده از داده‌های پرسشنامه، سه شبکه تلفات ظاهری، تلفات واقعی و آب بدون درآمد آموزش دیده و خروجی آن‌ها استخراج شد. خروجی سه مدل نشان داد که احتمال اثرگذاری بیش از ۵۰ درصدی تلفات ظاهری، تلفات واقعی و آب بدون درآمد در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۳۷/۴۸ درصد، ۳۵/۰۴ درصد و ۳۲/۲ درصد است. سپس نتایج به‌دست آمده دو مدل تلفات ظاهری و تلفات واقعی با تحلیل حساسیت و به‌کارگیری شاخص حساسیت به صورت کاربردی درآمده و عوامل مؤثر شناسایی شده براساس میزان اثربخشی بر عامل بالادست خود رتبه‌بندی شدند. معیار رتبه‌بندی عوامل مؤثر شناخته شده، نظرات کارشناسان، مسئولین و اساتیدی بود که پرسشنامه را تکمیل نمودند. نتایج تحلیل حساسیت تلفات ظاهری نسبت به اجزای اصلی تشکیل دهنده آن نشان داد که "انشعابات غیر مجاز" و "خطای پرسنلی" به ترتیب بیشترین و کمترین اولویت را برای کاهش تلفات ظاهری دارند. نتایج تحلیل حساسیت تلفات واقعی نیز اهمیت بیشتر "نشت مرئی" نسبت به "نشت نامرئی" را در کاهش تلفات واقعی نشان داد. با ترکیب نتایج مدل‌های بیزین تلفات ظاهری و تلفات واقعی و نرمال‌سازی شاخص‌های حساسیت عوامل آن‌ها، عوامل این دو شبکه هم‌عرض شدند و در نهایت مؤثرترین و کم‌اثرترین عوامل تشدیدکننده آب بدون درآمد مشخص شدند. ضمناً نتایج مدل‌سازی، اولویت بالاتر تلفات ظاهری نسبت به تلفات واقعی برای کاهش آب بدون درآمد را نشان داد. لازم است به این نکته توجه شود که رتبه‌بندی بدست آمده از تحلیل حساسیت برای آب بدون درآمد و اجزای اصلی آن کاملاً متأثر از داده‌های پرسشنامه است و تغییر در پاسخ به حالت تنها یک عامل در پایلوت می‌تواند نتایج رتبه‌بندی را تا حد زیادی تغییر دهد. نوآوری این تحقیق در آن است که علاوه بر مشخص شدن احتمال اثرگذاری و وجود یک عامل، بیش از ۵۰ درصد و یا کمتر از ۵۰ درصد در یک پایلوت، مهمترین عوامل مؤثر بر آب بدون درآمد شناسایی و اولویت آن‌ها برای مدیریت آب بدون درآمد و کاهش آن مشخص شده است. علاوه‌براین، مدل‌های بیزین توسعه یافته در این تحقیق را می‌توان با داده‌های کمی و کیفی موجود در پایلوت‌های مختلف آموزش داد. با استفاده از مدل توسعه یافته، نه تنها می‌توان عوامل مؤثر را بر اساس احتمال بیزین رتبه‌بندی کرد، بلکه می‌توان با تعریف سناریوهای کاهش آب بدون درآمد و از طریق اعمال اثر این سناریوها در گره های شبکه بیزین، اثر عوامل را در آب بدون درآمد مشاهده نمود. در مطالعات تکمیلی بررسی عوامل مؤثر بر آب بدون درآمد پیشنهاد می‌شود از نتایج به‌دست آمده در این تحقیق برای تحلیل و مدیریت ریسک آب بدون درآمد استفاده شود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از شرکت آب و فاضلاب استان تهران برای حمایت مالی از این تحقیق تقدیر و تشکر می‌شود. همچنین از شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ تهران نیز برای در اختیار قراردادن اطلاعات و داده‌های مورد نیاز این تحقیق قدردانی می‌شود.

مراجع

۱) امور نظام فنی و اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری ۱۳۹۱. راهنمای شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب به حساب نیامده و راهکارهای کاهش آن، نشریه شماره ۵۵۶. امور نظام فنی و اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری. تهران. ایران. ۱۷۹ ص.

۲) پایگاه اطلاع رسانی وزارت نیرو ۱۳۹۵. تجهیز ۱۰۰۰ شهر به سامانه بالانس آب.http://news.moe.gov.ir/Detail?anwid=38816 بهمن ۱۳۹۵.

۳) تابش م ۱۳۹۵. مدل‌سازی پیشرفته شبکه‌های توزیع آب. انتشارات دانشگاه تهران. تهران. ایران. ۵۸۵ ص.

۴) تابش م، روغنی ب ۱۳۹۳. مدیریت آب بدون درآمد در استان‌های منطقه البرز جنوبی. کنفرانس مدیریت منابع و مصارف آب با تکیه بر توسعه پایدار منطقه البرز مرکزی:چالش‌ها، راهبردها و رویکردهای نو. تهران. ایران.

۵) خبرگزاری صدا و سیما ۱۳۹۴. ۱۲۰۰ تومان؛ قیمت تمام شده آب بها. http://www.iribnews.ir/fa/news/94809/-۱۲۰۰-تومان-قیمت-تمام-شده-آب-بها. بهمن ۱۳۹۵.

۶) روزبهانی ع ۱۳۹۱. مدل تصمیم‌گیری مبتنی بر ریسک برای مدیریت سیستم‌های آب شهری. رساله دکتری. دانشکده مهندسی عمران. پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران. تهران. ایران.

۷) شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ تهران ۱۳۹۴. فرم بالانس آب برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ در محدوده شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴. تهران. ایران.

8) Adams A S, LutzLey A N 2012. An empirical study of factors affecting water loss in Mexican cities. Journal of Water Sustainability. 2(3):167-178

9) Bromley J, Jackson N A, Clymer O J, Giacomello A M, Jensen F V 2005. The use of Hugin® to develop Bayesian networks as an aid to integrated water resource planning. Environmental Modelling & Software. 20(2):231-242.

10) Daniel WW 1999. Biostatistics: A foundation for analysis in the health sciences. 7th edition. Wiley. USA.

11) de Santa Olalla F M, Domínguez A, Artigao A, Fabeiro C, Ortega, J F 2005. Integrated water resources management of the hydrogeological unit Eastern Mancha using Bayesian belief networks. Agricultural Water Management. 77(1): 21-36.

12) Francis R A, Guikema S D, Henneman L 2014. Bayesian belief networks for predicting drinking water distribution system pipe breaks. Reliability Engineering & System Safety. 130:1-11.

13) Froelich W 2015. Forecasting daily urban water demand using dynamic gaussian Bayesian network. In: International Conference: Beyond Databases, Architectures and Structures. Springer nternational publishing. 26 May. New York City. USA. 333-342.

14) George D & Mallery P 2003. SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference, 11.0 update (4th ed.). Boston: Allyn & Bacon.

15) Heckerman D 1996. A tutorial on learning with Bayesian networks, microsoft research advanced technology division. microsoft corporation. Redmond. Washington. USA.

16) HUGIN EXPERT A/S 2016. Hugin researcher userguide, version 7.8. HUGIN EXPERT A/S. Denmark.

17) International Water Association 2000. Performance indicators for water supply services, manual of best practice. IWA publishing. London. UK.

18) Kabir G, Tesfamariam S, Francisque A, Sadiq R 2015a. Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model. European Journal of Operational Research. 240(1):220-234.

19) Kabir G, Tesfamariam S, Sadiq R 2015b. Predicting water main failures using Bayesian model averaging and survival modelling approach. Reliability Engineering & System Safety. 142:498-514.

20) Lai C H, Chan N W, Roy R 2017. Understanding public perception of and participation in non-revenue water management in Malaysia to support urban water policy. Water. 9(1):26.

21) Lawshe C H 1975. A quantitative approach to content validity. Personnel Psychology. 28(4):563-575.

22) Magiera E, Froelich W 2015. Application of Bayesian networks to the forecasting of daily water demand. In: Intelligent Decision Technologies. Springer international publishing. New York City. USA. 385-393.

23) Naing L, Winn T, Rusli B N 2006. Practical issues in calculating the sample size for prevalence studies. Archives of Orofacial Sciences. 1(1):9-14

24) Neapolitan R E 2004. Learning Bayesian networks. Prentice Hall. New Jersey. USA.

25) Prescher D 2003. A short tutorial on the expectation-maximization algorithm. Institute of logic, language and computation. University of Amsterdam. Netherlands.

26) van den Berg C 2015. Drivers of non-revenue water: A cross-national analysis. Utilities policy. 36:71-78.

27) Zyoud S H, Kaufmann L G, Shaheen H, Samhan S, Fuchs-Hanusch D 2016. A framework

for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of fuzzy AHP with fuzzy TOPSIS. Expert Systems with Applications. 61:86-105.