Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸
Volume 15, No.4, Winter 2020 (IR-WRR)
۳۵-۵۴

تعیین سطح اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب

ایمان مصلحی[۱]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۲*] و احسان یوسفی خوش‌قلب[۳]

چکیده

یکی از وظایف اصلی شرکت‌های آب و فاضلاب در حوزه بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع آب، مدیریت و کنترل نشت از شبکه می‌باشد. در این راستا کنترل فعال نشت یکی از استراتژی‌های اصلی در کاهش نشت و دستیابی به سطح اقتصادی نشت می‌باشد. در این مقاله، یک متدولوژی کاربردی به منظور تعیین سطح اقتصادی نشت توسعه داده شد که شامل مراحل تعیین نقاط اندازه‌گیری فشار و نرخ جریان، جمع‌آوری داده‌های میدانی و داده‌های هزینه‌ای مورد نیاز، تخمین سطح نشت شبکه و تعیین سطح اقتصادی نشت شبکه مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت می‌باشد. با استفاده از سطح اقتصادی نشت تعیین شده، شاخص‌های عملکرد اقتصادی نظیر شاخص نشت اقتصادی و بازده اقتصادی شبکه نیز بدست می‌آید. متدولوژی توسعه داده شده برای یک ناحیه از شبکه توزیع آب مشهد به کار رفت. نتایج نشان داد که سطح اقتصادی نشت ناحیه مورد مطالعه ۲۷/۵ مترمکعب بر انشعاب در سال می‌باشد؛ در حالیکه سطح نشت موجود شبکه بر اساس تحلیل جریان حداقل شبانه، ۴۹/۲ مترمکعب بر انشعاب در سال تخمین زده شد. علاوه بر این شاخص نشت اقتصادی ۱/۷۹ و بازده اقتصادی شبکه حدود ۵۶ درصد محاسبه گردید. متدولوژی توسعه داده شده در این مقاله می‌تواند به متخصصان و مدیران شرکت‌های آب و فاضلاب در هدف‌گذاری سطح نشت شبکه و تعیین سطح نشت اقتصادی مبتنی بر آن کمک کند.

کلمات کلیدی: سطح اقتصادی نشت، مدیریت نشت، شاخص نشت زیربنائی، شبکه‌های توزیع آب، تحلیل اقتصادی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۴

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

Determination of Economic Level of Leakage in Water Distribution Networks

I. Moslehi[1], M.R. Jalili Ghazizadeh[2], and E. Yousefi Khoshgalb[3]*

Abstract

One of the main responsibilities of water and wastewater companies in the field of operating of water distribution networks (WDNs) is the management and control of leakage from these networks. In this regard, active leakage control is one of the main strategies in reducing leakage and achieving economic level of leakage (ELL). In this paper, a practical methodology was developed to determine the economic level of leakage which is included the steps determining the points of pressure and flow rate measurements, collecting of required field data and cost data, the estimation of leakage level in the network and the determination of the economic level of leakage of the network based on the active leakage control strategy. Economic performance indicators such as the economic leakage index (ELI) and the economic network efficiency (ENE) are also obtained using the determined ELL. The developed methodology was applied for a district of the WDN of Mashhad. The results showed that the economic level of leakage in the study area is 27.5 m3/connection/year. While the current level of leakage was estimated to be around 49.2 m3/connection/year, based on the minimum night flow (MNF) analysis. Moreover, the ELI and ENE were calculated 1.79 and 56% respectively. The developed methodology in this paper can assist practitioners and managers of water and wastewater companies for target-setting of the level of leakage and determining of the ELL based on it.

Keywords: Economic Level of Leakage, Leakage Management, Infrastructure Leakage Index, Water Distribution Networks, Economic Analysis.

Received: February 17, 2019
Accepted: May 25, 2019

1- Ph.D. Student in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Associate Professor, Department of Water and Wastewater, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_jalili@sbu.ac.ir
3- M.Sc. Student in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

نشت، یکی از معضلات اصلی شبکه‌های توزیع آب در سرتاسر جهان است؛ بطوری‌که سالیانه مقادیر قابل توجهی از آب تصفیه شده از طریق نشت موجود در شبکه از دست می‌رود. مقدار نشت در شبکه‌های توزیع آب در کشورهای مختلف بسیار متفاوت بوده و از ۳ تا ۷ درصد آب ورودی به شبکه برای بعضی کشورهای توسعه‌یافته و در مواردی تا بیش از ۵۰ درصد بـرای کشورهای در حال توسعه تغییر می‌کند (Puust et al., 2010). طبق مطالعه بانک جهانی در سال ۲۰۰۶، در کشورهای در حال توسعه روزانه حدود ۴۵ میلیون مترمکعب آب از طریق نشت در شبکه‌های تـوزیع آب به هدر می‌رود کـه ایـن میزان بـرای تأمین آب حـدود ۲۰۰ میلیون نفر کافی است (Kingdom et al., 2006). در ایران نیز میزان متوسط نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری حدود ۱۴ درصد گزارش شده است (Mazaheri and Abdolmanafi, 2014). علاوه بر ضررهای اقتصادی و مالی، نشت در شبکه می‌تواند منجر به قطع جریان آب، هدررفت انرژی و ورود آلودگی به شبکه شود (Mutikanga et al., 2012). از این رو شرکت‌های آب‌رسانی در سرتاسر جهان همواره به دنبال کنترل و کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب هستند و این مسأله به یکی از وظایف اصلی این شرکت‌ها در حوزه بهره‌برداری از تأسیسات زیربنایی تبدیل شده است. نشت‌های گزارش‌شده، نشت‌های گزارش‌نشده و نشت زمینه مؤلفه‌های اصلی نشت در شبکه‌های توزیع آب هستند که در خطوط اصلی، انشعابات، اتصالات، مخازن ذخیره و همچنین شیرها و پمپ‌های شبکه رخ می‌دهند (Lambert, 2002; Tabesh et al., 2009; Thornton et al., 2008).

مدیریت تلفات واقعی آب که عموماً از آن به عنوان مدیریت نشت نام برده می‌شود، یک فرآیند پیوسته و مداوم به منظور کنترل و کاهش نشت در شبکه‌های توزیع آب می‌باشد که به طور کلی روش‌های مرتبط با مدیریت نشت را می‌توان به سه دسته اصلی شامل: ۱- روش‌های ارزیابی و پایش نشت، ۲- روش‌های تشخیص، کشف و تعیین محل نشت و ۳- روش‌ها و مدل‌های کنترل نشت طبقه‌بندی نمود (Puust et al., 2010). روش‌های ارزیابی و پایش نشت بر تعیین مقدار و حجم نشت متمرکزند و خود مشتمل بر: ۱- روش بالا به پایین[1] یا جدول بالانسینگ، ۲- روش آنالیز مؤلفه[2] و ۳- روش پایین به بالا[3] یا آنالیز جریان شبانه هستند (AL-Washali et al., 2016; Thornton et al., 2008). از بین روش‌های ذکر شده، روش آنالیز جریان شبانه به عنوان یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی نشت شناخته شده و پرکاربردترین روشِ ارزیابی نشت در عمل می‌باشد (Farley and Trow, 2003; Hamilton and McKenzie, 2014). علاوه بر این تنها روشی است که از طریق اندازه‌گیری‌های میدانی (اندازه‌گیری نرخ جریان و فشار) در زون‌های مجزا یا نواحی ایزوله شده (DMA) انجام می‌گیرد (Mutikanga et al., 2013). هدف از پایش نشت در این روش، اندازه‌گیری پیوسته و منظم جریان ورودی به یک زون یا ناحیه ایزوله به منظور تحلیل جریان شبانه و تعیین میزان نشت شبکه در ساعات حداقل جریان شبانه است که معمولاً بین ۲ تا ۴ صبح اتفاق می‌افتد. در طول این ساعات، مصارف مجاز[4] (LNC) مشتریان حداقل بوده، فشار شبکه بالا و در نتیجه نشت بیشترین میزان از جریان ورودی به ناحیه ایزوله را به خود اختصاص می‌دهد.

کاهش و کنترل مؤثر سطح نشت موجود و سطح نشت در آینده، هدف اصلی روش‌ها و مدل‌های مدیریت و کنترل نشت است. این روش‌ها شامل سرعت و کیفیت تعمیرات (کنترل نشت غیرفعال یا واکنشی)، کنترل فعال نشت، مدیریت فشار، بخش‌بندی یا ناحیه‌بندی شبکه و مدیریت دارایی‌ها می‌شوند (Gupta and Kulat, 2018; Haider et al., 2019; Pearson and Trow, 2005). ترکیب و انتخاب نهایی بین روش‌های مختلف مدیریت نشت اغلب بر مبنای ملاحظات اقتصادی است. در عمل، یک شرکت آب‌رسانی تلاش می‌کند تا یک استراتژی کنترل نشت را بر اساس تعادل اقتصادی بین تمامی روش‌های ذکر شده توسعه دهد. در واقع مهم‌ترین مؤلفهٔ یک استراتژی کنترل نشت، هدف‌گذاری آن بر حسب سطح اقتصادی نشت می‌باشد (Islam and Babel, 2013)؛ چراکه تصمیم‌گیری در مورد کاهش میزان نشت و آن که به چه میزان مقدار نشت کاهش یابد، در نهایت یک تصمیم اقتصادی است.

سطح اقتصادی نشت، سطحی از نشت است که در آن هزینه حاشیه‌ای[5] کاهش نشت با هزینه حاشیه‌ای آب ذخیره شده برابر می‌شود و از سرمایه‌گذاری اضافی برای کاهش بیشتر نشت که اقتصادی نیست جلوگیری می‌کند (Fanner et al., 2007; Farley and Trow, 2003). در یک شبکهٔ توزیع آب یا یک ناحیه ایزوله، سطح اقتصادی نشت اغلب بین تلفات واقعی سالیانه موجود[6] (CARL) و تلفات اجتناب‌ناپذیر سالیانه[7] (UARL) قرا می‌گیرد (Farley and Trow, 2005; Lambert and Fantozzi, 2005; Lambert and Lalonde, 2005; Thornton et al., 2008).

تعیین سطح اقتصادی نشت برای یک شرکت آب و فاضلاب مهم است؛ زیرا شرکت را قادر می‌سازد تا بازده بهره‌برداری خود را از طریق کاهش هزینه‌های غیرضروری بهره‌برداری بهبود بخشد و مهم‌تر از همه، یک تحلیل اقتصادی شرکت آب و فاضلاب را مجاب می‌کند تا درک کند که سرمایه کافی برای کاهش نشت چقدر است و یا در حالت

www.SID.ir

Archive of SID

بهره‌برداری، اقتصادی‌ترین واکنش کاهشی نشت چقدر باید باشد. تحلیل سطح اقتصادی نشت دربرگیرنده ارزیابی هزینه‌ها و مزایای پیاده‌سازی گزینه‌های دیگر مدیریت مناسب نشت است و بدین ترتیب اقتصادی‌ترین یا بهینه‌ترین استراتژی مدیریت نشت برای شرکت تعیین می‌گردد.

محاسبات مربوط به سطح اقتصادی نشت در دو قالب زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت با هزینه‌های حاشیه‌ای متفاوت انجام می‌گیرد (AWWA, 2007). هزینه حاشیه‌ای کوتاه‌مدت[8] (SRMC) را می‌توان به صورت موقعیتی تعریف کرد که در آن هزینه‌های بهره‌برداری (نظیر هزینه‌های پمپاژ و هزینه‌های پرسنلی) متغیر و دیگر هزینه‌های تأمین آب (اغلب هزینه‌های سرمایه‌ای نظیر ظرفیت مخازن و تصفیه‌خانه آب) ثابت باشند. در چنین شرایطی، روش‌ها و مؤلفه‌های مدیریت نشت که با توجه به بودجه موجود می‌توانند سریعاً تغییر نموده و بر سطح نشت شبکه تأثیرگذار باشند، شاملِ افزایش سرعت و کیفیت تعمیرات، افزایش تواتر انجام عملیات نشت‌یابی و اجرای برخی طرح‌های مدیریت فشار هستند. هنگامی‌که هزینه حاشیه‌ای کوتاه‌مدت آب (فقط شامل هزینه‌های بهره‌برداری تولید و توزیع آب مثل هزینه انرژی و مواد شیمیایی) با هزینه حاشیه‌ای روش‌های ذکر شده به تعادل رسید، سطح نشت اقتصادی کوتاه‌مدت[9] (SR-ELL) به دست می‌آید (Kanakoudis and Gonelas, 2016; Pearson and Trow, 2005). در مقابل، هزینه حاشیه‌ای بلندمدت[10] (LRMC) در یک دوره زمانی بلندمدت که تمامی هزینه‌های تأمین آب شامل هزینه‌های سرمایه‌ای و بهره‌برداری متغیرند، تخمین زده می‌شود. روش‌های مدیریت نشت در این حالت شامل فعالیت‌های بازسازی و نوسازی لوله‌ها (مدیریت دارایی)، سرمایه‌گذاری در طرح‌های مدیریت فشار و اقداماتی برای بهبود کارایی کنترل فعال نشت مثل بخش‌بندی یا ناحیه‌بندی شبکه می‌باشند. سطح اقتصادی نشت بلندمدت[11] (LR-ELL) را می‌توان با استفاده از یک تحلیل اقتصادی مثل ارزش خالص فعلی[12] (NPV) و در نظر گرفتن سودها و هزینه‌های مربوط به کاهش سطح نشت محاسبه نمود (Gonelas and Kanakoudis, 2015; Thornton et al., 2008). علاوه بر این با اضافه کردن هزینه‌ها و مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی به هزینه‌های تأمین آب می‌توان سطح اقتصادی نشت پایدار[13] (SELL) را محاسبه نمود (Howarth, 1998; UKWIR, 2011).

دو روش اصلی تعیین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت شامل روش منحنی هزینه کل[14] یا روش BABE و روش نرخ افزایش نشت[15] (RR) می‌باشد (AWWA, 2007). روش نرخ افزایش نشت توسط کارگروه تلفات آب انجمن بین‌المللی آب[16] (IWA-WLTF) به عنوان یک روش کاربردی و ساده برای تعیین تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی توسعه داده شد؛ این روش برای شرکت‌هایی طراحی شد که عملیات نشت‌یابی فعال را انجام نداده یا خیلی کم انجام داده‌اند و در شرایط پایدار[17] بهره‌برداری نمی‌باشند (Lambert and Fantozzi, 2005; Lambert and Lalonde, 2005). در این روش نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده از طریق روش‌های مختلفی نظیر داده‌های جدول بالانسینگ در دو سال مختلف یا تحلیل جریان حداقل شبانه[18] (MNF) تخمین زده می‌شود و حجم آب تلف‌شده بر اساس آن محاسبه می‌گردد. در نهایت تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی با برابر قراردادن هزینه عملیات نشت‌یابی با ارزش آب تلف‌شده محاسبه می‌گردد. چالش اصلی در این روش عدم قطعیت در تخمین نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده می‌باشد. در مطالعه دیگری Fantozzi and Lambert (2007) تأثیر مدیریت فشار بر روی سطح اقتصادی کوتاه‌مدت را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدیریت فشار مؤثر منجر به کاهش نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده و در نتیجه تواتر اقتصادی و هزینهٔ عملیات نشت‌یابی می‌شود. در روش منحنی هزینه کل که با نام روش بیب (BABE) هم شناخته می‌شود، منحنی هزینهٔ عملیات نشت‌یابی در مقابل هزینهٔ آب تلف‌شده ترسیم گردیده و از جمع آنها منحنی هزینهٔ کل حاصل می‌شود. نقطه کمینه بر روی این منحنی نشان دهنده سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت می‌باشد. در این روش فرض می‌گردد که شبکه در حالت پایدار قرار دارد و نشت‌های تجمع‌یافته‌ای در شبکه وجود ندارد؛ به جز آنهایی که از آخرین عملیات نشت‌یابی رخ داده‌اند. نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که تخمین سطح اقتصادی نشت با استفاده از روش منحنی هزینه کل اگرچه به داده‌ها و تحلیل‌های مختلفی احتیاج دارد، اما از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار است.

هدف مقاله حاضر ارائه یک متدولوژی مبتنی بر داده‌های میدانی (داده‌های اندازه‌گیری شده جریان و فشار) جهت تخمین سطح اقتصادی نشت است. یکی از چالش‌های اصلی تخمین نشت توسط مدل هیدرولیکی در کشورهای در حال توسعه، عدم توانایی در ایجاد و توسعه مدل هیدرولیکی شبکه به علت نبود اطلاعات کافی لوله‌ها (ضعف در برداشت داده‌های زیربنایی) و نیز عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهایی نظیر نیاز آبی گره‌ها و زبری لوله‌ها می‌باشد. در این متدولوژی، تعیین پارامترهای منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی و منحنی هزینهٔ کل، به منظور توسعه و تخمین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت با کمترین داده مورد نیاز انجام می‌گیرد. همچنین در این مقاله، سطح نشت زمینه هدف[19] (TBL) به عنوان یک پارامتر مهم و کلیدی در تخمین صحیح و نزدیک به واقعیت سطح اقتصادی نشت با استفاده از کمترین داده و با توجه به شرایط زیرساخت شبکه تعیین

www.SID.ir

Archive of SID

گردیده و روشی جهت اصلاح آن ارائه می‌شود. تعیین سطح اقتصادی نشت به تصمیم‌گیری شرکت‌های آب و فاضلاب در خصوص هدف‌گذاری سطح نشت شبکه‌ها و اولویت‌بندی در تخصیص بودجه‌ها کمک شایانی می‌کند. در نهایت کارایی و کاربردپذیری متدولوژی توسعه داده شده در عمل، با به کارگیری آن برای یک ناحیه ایزوله واقع در شهر مشهد نشان داده می‌شود.

۲- متدولوژی

متدولوژی پیشنهادی در این مطالعه به منظور تعیین سطح اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب بر مبنای استراتژی کنترل فعال نشت[۲۰] (ALC) از چند مرحله اصلی شامل تعیین نقطه میانگین ناحیه، جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز، تخمین نشت، تحلیل اقتصادی نشت و تعیین شاخص‌های عملکرد نشت تشکیل می‌گردد که فلوچارت متدولوژی توسعه داده شده در شکل ۱ ارائه شده است. در مرحله اول نقطه میانگین ناحیه[۲۱] (AZP) جهت جمع‌آوری داده‌های فشاری با استفاده از ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و خصوصیات شبکه، تعیین می‌شود. در مرحله بعدی داده‌های میدانی فشار و نرخ جریان، داده‌های مربوط به مشخصات و خصوصیات شبکه و داده‌های هزینه‌ای مربوط به هزینه عملیات نشت‌یابی و هزینه آب جمع‌آوری می‌گردند. در مرحله سوم با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده و از طریق روش ارزیابی نشت مبتنی بر جریان حداقل شبانه، مقدار نشت از شبکه تخمین زده می‌شود. در این مرحله همچنین نشت زمینه واقعی یا هدف گذاری شده (TBL) از طریق تخمین فاکتور زیربنایی نشت[۲۲] (ICF) و نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر[۲۳] (UBL) محاسبه می‌گردد. در مرحله بعدی سطح اقتصادی نشت کوتاه مدت بر مبنای استراتژی کنترل فعال نشت (ALC) با استفاده از روش منحنی هزینه کل (BABE) تعیین می‌شود.

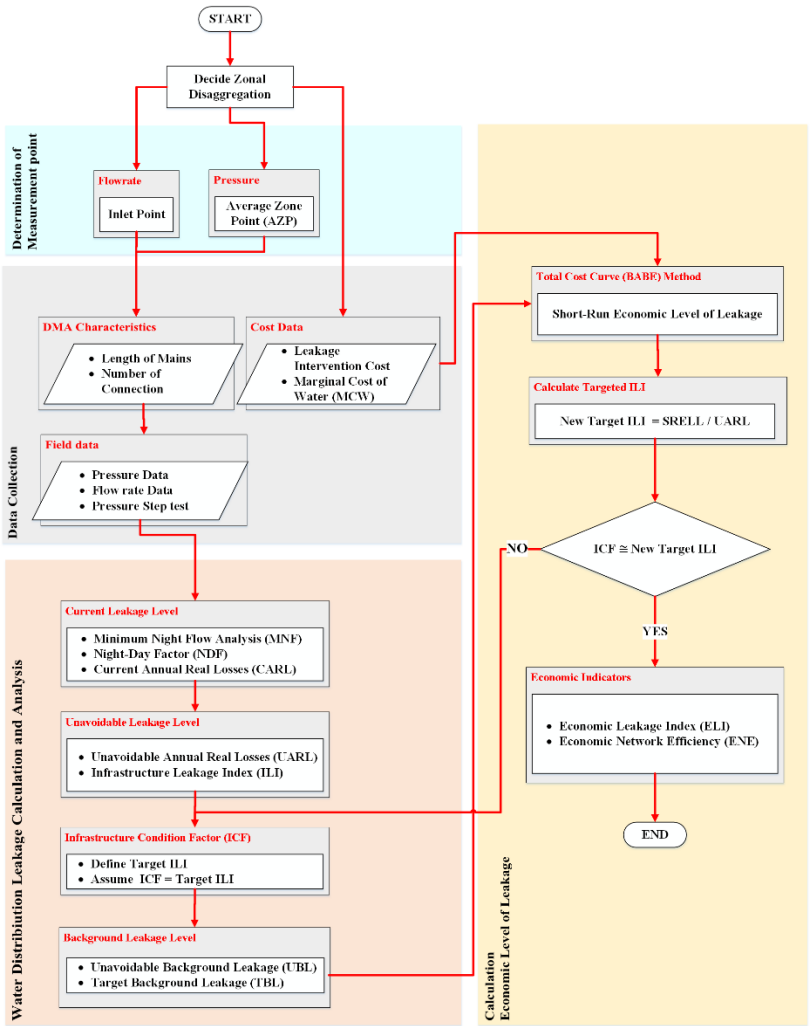

Fig. 1- Flowchart of the proposed methodology for determining SR-ELL in WDNs

شکل ۱- فلوچارت متدولوژی پیشنهادی برای تعیین سطح اقتصادی نشت کوتاه مدت در شبکه‌های توزیع آب

www.SID.ir

Archive of SID

در مرحله نهایی شاخص‌های عملکرد نشت[۲۴] (PIs)، شامل شاخص نشت زیربنایی[۲۵] (ILI)، شاخص نشت اقتصادی[۲۶] (ELI) و بازده اقتصادی شبکه[۲۷] (ENE) با استفاده از مقادیر نشت تخمین‌زده شده و سطح اقتصادی نشت تعیین شده در مراحل قبل به منظور هدف‌گذاری سطح نشت محاسبه می‌گردند.

۲-۱- جمع‌آوری داده‌های فشار و جریان

جمع‌آوری داده‌های میدانی قابل اعتماد مربوط به فشار و دبی جریان یک مرحله مهم و مورد نیاز در محاسبه سطح اقتصادی نشت می‌باشد. تغییرات فشار در شبکه با توجه به مفهوم فاواد[۲۸] (FAVAD) بر روی نرخ نشت تأثیر می‌گذارند (Lambert, 2001). از این رو باید داده‌های فشار در نقاط مناسب در ناحیه و با فاصله زمانی مناسب و دقت بالا برداشت شود. در نواحی مدیریت فشار[۲۹] (PMA) یا نواحی ایزوله[۳۰] (DMA) اندازه‌گیری فشار باید در نقطه میانگین ناحیه (AZP) انجام شود؛ چراکه تغییرات فشار در این نقطه معرف فشار متوسط ناحیه است (Tajabadi et al., 2017). با استفاده از داده‌های فشار لحظه‌ای جمع‌آوری شده می‌توان شاخص‌های مختلف فشار نظیر فشار متوسط ناحیه (P_{avg})، تغییرات فشار در طول شبانه‌روز و فشار متوسط شبانه ناحیه[۳۱] (AZNP) را محاسبه نمود. فشار متوسط ناحیه در محاسبه‌ی نشت سالیانه اجتناب‌ناپذیر (UARL) استفاده می‌شود که بوسیله آن می‌توان شاخص نشت زیر بنایی (ILI) را به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی کلیدی مدیریت نشت محاسبه نمود. فشار متوسط شبانه ناحیه (AZNP) که در ساعات وقوع حداقل جریان شبانه (عموماً ۲ تا ۴ صبح) و در محل نقطه میانگین ناحیه (AZP) اندازه‌گیری می‌شود، در تخمین نشت مبتنی بر جریان حداقل شبانه استفاده می‌شود. تغییرات فشار در طول شبانه‌روز نیز در محاسبه فاکتور روز- شب[۳۲] (NDF) به منظور در نظر گرفتن تأثیر تغییرات فشار طی شبانه‌روز در تخمین نشت مورد نیاز است (ILMSS Ltd, 2013; Lambert and Taylor, 2010; Tajabadi et al., 2017). در این مقاله از یک رویکرد سیستماتیک جهت تعیین گام به گام نقطه میانگین ناحیه استفاده می‌شود. در این رویکرد ابتدا تراز ارتفاعی متوسط وزنی[۳۳] (WAGL) ناحیه با استفاده از ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و بر مبنای وزن‌دهی به یک پارامتر زیربنایی مناسب از شبکه نظیر طول خطوط اصلی، تعداد انشعابات و یا تعداد شیرهای آتش‌نشانی محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است؛ اگر ناحیه مورد مطالعه به اندازه کافی بزرگ بوده و بیش از ۱۰۰ شیر آتش‌نشانی در آن وجود داشته باشد، آنگاه پارامتر شیرهای آتش‌نشانی می‌تواند در محاسبات مربوط به AZP مورد استفاده قرار گیرد (ILMSS Ltd, 2013). در گام بعدی با استفاده از تراز ارتفاعی محاسبه شده، نقطه میانگین ناحیه در محلی در مرکز ناحیه و ترجیحاً بر روی لوله‌ای با قطر متوسط انتخاب می‌گردد، بطوری‌که افت هد اصطکاکی تا نقطه میانگین ناحیه (AZP) به طور منطقی بیانگر شرایط متوسط ناحیه باشد. در پایان، مقادیر فشار لحظه‌ای در نقطه میانگین ناحیه بصورت پیوسته و با گام‌های زمانی منظم (عموماً هر ۱۵ دقیقه) و با استفاده از لاگرهای ثبت‌کننده فشار اندازه‌گیری می‌شوند.

به منظور تعیین توان رابطه فشار- نشت (N_1) سه روش اصلی شامل: ۱- روش‌های مبتنی بر داده‌های میدانی، ۲- روش‌های تئوریک یا نظری و ۳- روشهای مبتنی بر تست‌های آزمایشگاهی وجود دارد (Lambert and Lalonde, 2005; Van Zyl, 2014). در روش‌های مبتنی بر داده‌های میدانی می‌توان با استفاده از یک سری نمودارها و روابط آماده یا انجام آزمون مرحله‌ای فشار[۳۴]، این توان را تخمین زد (Lambert et al., 2014, 2017). در آزمون مرحله‌ای فشار، فشار در نقطه میانگین ناحیه در این آزمون از طریق شیر ورودی، شیر کاهنده فشار یا کنترل پمپ، بصورت مرحله‌ای (در دو یا سه مرحله) در ساعات وقوع جریان حداقل شبانه کاهش داده می‌شود و سپس مقادیر فشار و جریان در هر مرحله ثبت می‌شوند؛ با استفاده از مقادیر فشار و دبی ثبت‌شده، توان رابطه فشار- نشت (N_1) ناحیه توسط رابطه FAVAD تعیین می‌گردد (AWWA, 2016).

داده‌های جریان به منظور تخمین نشت ناحیه با استفاده از روش تحلیل جریان حداقل شبانه (MNF)، در نقاط اصلی (نقاط ورودی و خروجی ناحیه و نیز مصرف‌کنندگان بزرگ در صورت وجود) و با فاصله زمانی مناسب (عموماً هر ۱۵ دقیقه) بطور پیوسته اندازه‌گیری و جمع‌آوری می‌گردند. این داده‌ها را اغلب می‌توان از سامانه‌های اسکادا یا تله‌متری شرکت‌های آب و فاضلاب اخذ نمود. سپس، داده‌های جمع‌آوری شده برای یک گام زمانی معین، اعتبارسنجی، پاک‌سازی و نرمال‌سازی خواهند شد. منظور از اعتبارسنجی داده‌ها در این مرحله، شناسایی و تصحیح داده‌های غیرعادی یا پرت به علت مشکلات مربوط به سیستم تله‌متری یا کنتورها می‌باشد (Loureiro et al., 2016). این مشکلات می‌تواند مربوط به انتقال ناقص داده‌ها (نظیر خرابی باتری دیتالاگرها)، ورود داده‌های نامناسب (نظیر جریان بالاتر یا کمتر از دامنه اندازه‌گیری کنتورها) یا محدودیت‌های مربوط به ذخیره داده باشد. در این مرحله داده‌های بدون مقدار، مقدار منفی، مقدار صفر و داده‌های با مقادیر کمتر یا بیشتر از آستانه کمینه و بیشنه کنتورها حذف می‌شوند. نرمال‌سازی داده‌ها در ایجاد یک سری داده با یک گام زمانی منظم کمک خواهد کرد. در این مرحله یک گام زمانی مناسب (۱۵ دقیقه‌ای) و یک ماکزیمم فاصله داده‌ای مجاز (۶۰ دقیقه) تعریف می‌گردد که بیشتر از این فاصله زمانی درون‌یابی انجام نمی‌گیرد. در مورد داده‌های مفقود

www.SID.ir

Archive of SID

در فاصله زمانی کمتر از یک ساعت، مقادیر داده جریان شروع و پایان در هر گام زمانی بوسیله درون‌یابی بدست آمده و مقدار جریان متوسط از روی آن محاسبه شده و قرار داده خواهد شد. در مورد داده‌های مفقود با گام زمانی بیش از یک ساعت، یک رکورد خالی در سری زمانی داده‌ها اضافه می‌شود. اگر چندین کنتور ورودی برای یک ناحیه وجود داشته باشد، داده‌های نرمال شده کنتورها با یکدیگر جمع می‌شوند.

علاوه بر داده‌های فشار و جریان، مشخصات و خصوصیات ناحیه شامل طول خطوط اصلی، تعداد انشعابات، جنس و قطر لوله‌ها جهت تخمین نشت سالیانه اجتناب‌ناپذیر (UARL) و نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL) از داده‌های موجود در پایگاه داده شرکت اخذ و جمع‌آوری می‌گردند.

۲-۲- جمع‌آوری داده‌های هزینه

داده‌های مربوط به هزینه عملیات نشت‌یابی فعال برای مدل‌سازی منحنی هزینه نشت‌یابی فعال (ALC) در روش منحنی هزینه کل مورد نیاز است. این هزینه‌ها شامل هزینه پایش نشت، هـزینه پیمایش، کشف و تعیین محل دقیق نشت و هزینه تعمیرات نشت می‌گردد (Farley and Trow, 2003). هزینه‌های پایش نشت[۳۵] شامل هزینه‌هایی است که به طور کامل به عملیات کنترل فعال نشت (ALC) مربوط بوده و به عنوان هزینه‌های ثابت برای سطح نشت هدف‌گذاری شده در نظرگرفته می‌شود (یعنی با تواتر عملیات‌های نشت‌یابی فعال تغییر نمی‌کند). هزینه‌های پیمایش[۳۶] و تشخیص نشت[۳۷] نیز کاملاً در ارتباط با به عملیات نشت‌یابی فعال هستند، اما به عنوان هزینه‌های متغیر با توجه به سطح نشت هدف‌گذاری شده در نظرگرفته می‌شوند (یعنی دستیابی به سطح نشت پایین‌تر هزینه بیشتری دارد). هزینه‌های تعمیر نشت[۳۸] شامل هزینه‌های تعمیرات مربوط به نشت‌های گزارش‌نشده (عملیات نشت‌یابی فعال) و نیز نشت‌های گزارش‌شده یا شکستگی‌ها است. هزینه تعمیر نشت می‌تواند نسبت به سطح نشت هدفگذاری شده، متغیر در نظرگرفته شود. بدیهی است که تنها هزینه تعمیرات نشت‌های گزارش‌نشده برای داده‌های هزینه عملیات نشت‌یابی جمع‌آوری می‌گردند. راهنمای بهترین توصیه‌های عملکردی[۳۹] پیشنهاد می‌کند که هزینه‌های عملیات نشت‌یابی بر اساس آخرین دوره زمانی تعیین گردد که در آن تغییری در سیاست‌های کنترل نشت در شبکه ایجاد نگردیده و محدودیت در تأمین تقاضا وجود نداشته باشد (UKWIR, 2011). هزینه‌های ثابت و متغیر عملیات نشت‌یابی فعال را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ تعیین نمود. در این رابطه هزینه ثابت شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از سامانه پایش نشت و هزینه‌های متغیر شامل هزینه پیمایش شبکه و هزینه‌های کشف و تعمیر نشت‌های گزارش‌نشده هستند (Moslehi et al., 2018).

$$C_{CAL} = C_{CAL_{Cons}} + C_{CAL_{Var}} \quad (۱)$$

$$C_{CAL_{Cons}} = C_{Cap} \times (CRF + OMC) \quad (۲)$$

$$C_{CAL_{Var}} = (C_{L_M} \times L_M + C_{N_C} \times N_C) + (C_{Det} + C_{Rp}) \times (Num_M + Num_C) \quad (۳)$$

در روابط فوق C_{CAL}: هزینه سالیانه عملیات نشت‌یابی (ریال بر سال)؛ $C_{CAL_{Cons}}$: هزینه ثابت عملیات نشت‌یابی فعال (ریال بر سال)؛ $C_{CAL_{Var}}$: هزینه متـغیر عملیات نشت‌یابی فعال (ریال بر سال)؛ C_{Cap}: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه جهت پایش نشت (ریال)؛ $CRF = i(1+i)^n / (1+i)^n - 1$ ضریب بازگشت سرمایه برای تخمین هزینه‌های سالیانه بر اساس نرخ بهره سالیانه (i) و طول عمر مفید (n) سامانه‌های پایش نشت؛ OMC: درصد هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری (O & M) سامانه پایش نشت؛ C_{L_M}: هزینه پیمایش لوله‌ها در عملیات نشت‌یابی (ریال بر هر کیلومتر)؛ L_M: طول کل شبکه (کیلومتر)؛ C_{N_C}: هزینه پیمایش انشعابات در عملیات نشت‌یابی (ریال بر هر انشعاب)؛ N_C: تعداد انشعابات شبکه؛ C_{Det}: هزینه کشف هر نشت (ریال بر نشت)، C_{Rp}: هزینه تعمیر هر نشت (ریال بر نشت)؛ Num_M: تعداد نشت کشف‌شده روی خطوط اصلی؛ Num_C: تعداد نشت کشف‌شده روی انشعابات شبکه. منظور از هزینه کشف نشت، کلیه هزینه‌های نیروی انسانی، تجهیزات کشف هر نشت و تعیین محل دقیق آن را شامل می‌شود و به عنوان هزینه متغیر در عملیات نشت‌یابی لحاظ می‌شود.

هنگامی که منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال تولید شد، باید آن را با هزینه حاشیه‌ای آب تلف‌شده در افق زمانی کوتاه‌مدت برای تعیین سطح اقتصادی نشت مقایسه کرد. منظور از هزینه حاشیه‌ای آب، تغییر در هـزینه بـرای تـولید یک واحد بیشتر یـا کمتر آب بـر حسب انـرژی مصرفی، مـواد شیمیایی و نیروی انسانی می‌بـاشد (Fanner et al., 2007). هزینهٔ حاشیه‌ای آب می‌تواند ثابت یا متغیر باشد. در این مقاله سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت بر اساس هزینه‌های حاشیه‌ای آب از منابع آب موجود محاسبه می‌گردد. به عبارت دیگر فرض می‌شود که منابع آب موجود تنها منابع تأمین کننده آب بوده و منابع جدیدی برای تأمین آب اضافه نخواهند شد.

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۳- تحلیل و تخمین نشت شبکه

در متدولوژی توسعه داده شده، سطح نشت موجود شبکه بر اساس روش تحلیل جریان حداقل شبانه تعیین می‌گردد که به عنوان ابزاری قدرتمند در روش‌های ارزیابی نشت پایین به بالا شناخته می‌شود. جریان حداقل شبانه، کمترین جریان ورودی به یک ناحیه ایزوله شده از نظر هیدرولیکی در طول بازه زمانی شبانه می‌باشد که در مناطق شهری معمولاً بین ساعات ۲ تا ۴ بامداد رخ می‌دهد (AL-Washali et al., 2016; Gupta and Kulat, 2018; Puust et al., 2010). مقادیر این جریان مهم‌ترین بخش از داده‌های جریان بوده که به میزان نشت شبکه مربوط می‌شود. در طول این مدت، مصارف مجاز مشترکان (LNC) حداقل بوده و نشت موجود، حداکثر مقدار از جریان کل ورودی را تشکیل می‌دهد. تخمین میزان نشت از حداقل جریان شبانه از طریق کم کردن مقادیر مصارف شبانه مجاز مشترکان در آن ناحیه از جریان حداقل شبانه (MNF) انجام می‌گیرد که به عنوان جریان شبانه خالص[۴۰] (NNF) شناخته می‌شود. این مقدار تخمینی از مقدار نشت در طول دوره جریان حداقل شبانه را نشان می‌دهد. جریان خالص شبانه (NNF) عمدتاً حاصل نشت از خطوط اصلی شبکه توزیع و خطوط انشعابات بوده که شامل نشت‌های گزارش‌شده (شکستگی‌ها)، نشت‌های گزارش‌نشده و نشت زمینه می‌گردد و معمولاً بخش بزرگی از آن مربوط به نشت زمینه است (Hamilton and McKenzie, 2014; Thornton et al., 2008).

با توجه به تغییرات فشار در طول شبانه روز و مفهوم فاواد (FAVAD)، برای تبدیل نرخ نشت شبانه (مترمکعب بر ساعت) به نرخ متوسط نشت شبانه‌روز (مترمکعب در روز) باید فاکتور روز- شب (NDF) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه گردد. برای محاسبه NDF از مقادیر فشار لحظه‌ای ثبت شده در نقطه میانگین ناحیه (AZP) در دوره وقوع جریان حداقل شبانه استفاده می‌گردد (AL-Washali et al., 2016; Amoatey et al., 2014, 2018).

$$NDF = \sum_{i=0}^{i=23}\left(\frac{AZP_{i,i+1}}{AZNP}\right)^{N_1} = \sum_{i=0}^{i=23}\left(\frac{AZP_{i,i+1}}{AZP_{3-4}}\right)^{N_1} \qquad (۴)$$

که در این رابطه؛ N_1 : توان رابطه فشار- نشت است که از طریق یکی از روش‌های ذکر شده تخمین زده می‌شود. مقدار فشار متوسط شبانه ناحیه (AZNP) در نقطه میانگین ناحیه اندازه‌گیری می‌شود و $AZP_{i,i+1}$: مقدار فشار متوسط در هر ساعت در نقطه میانگین ناحیه می‌باشد. مقدار نشت سالیانه موجود (CARL) نیز با استفاده از متوسط نشت شبانه‌روز محاسبه گردیده، بدست می‌آید.

متخصصان حوزه نشت معتقدند که حذف کامل نشت از شبکه‌های توزیع آب غیر ممکن است. بنابراین حد پایینی برای نشت در یک شبکه و در هر فشار عملیاتی وجود دارد که که به آن نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه (UARL) گفته می‌شود. در واقع این نشت، کمترین مقدار نشت سالیانه قابل دستیابی بـه لحاظ فنی برای یک شبکه با مدیریت و نگهداری خوب و مناسب است (Lambert et al., 2002). Lambert et al. (1999) بر اساس تحقیقات بین المللی صورت‌گرفته در چند کشور مختلف و در نظر گرفتن شرایط زیربنایی مناسب، یک رابطه تجربی برای محاسبه نشت اجتناب‌ناپذیر ارائه کردند که در آن، رابطه بین فشار و نشت، خطی درنظرگرفته شده است. در سال‌های بعد با در نظرگرفتن تأثیر فشارهای مختلف و روابط جریان برای انواع نشت و جنس مختلف لوله‌ها، با اضافه کردن فاکتور تصحیح فشار Cp، رابطه‌ی ارائه شده برای نشت اجتناب‌ناپذیر به صورت رابطه ۵ اصلاح گردید (Lambert et al., 2014):

(۵)

$$UARL(Liters/day) = (18\times L_m + 0.8\times N_C + 25\times L_P)\times P\times C_P$$

که در آن L_m : طول لوله‌های اصلی شبکه برحسب کیلومتر، N_C : تعداد انشعابات، L_P : طول کل لوله‌های خصوصی انشعاب از مرز ملک تا محل کنتور مشترک برحسب کیلومتر، P : متوسط فشار شبکه برحسب متر در نقطه میانگین ناحیه (AZP) و C_P : فاکتور تصحیح فشار می‌باشد که با استفاده از شکل ۲ بدست می‌آید. در این شکل بر اساس فشار متوسط اندازه‌گیری شده در نقطه میانگین ناحیه و درصد شکستگی‌های گزارش‌شده یا حوادث شبکه در لوله‌های صلب با منافذ نشت با سطوح ثابت نظیر لوله‌های فلزی، می‌توان فاکتور تصحیح فشار را تخمین زد (طبق خطوط راهنما). برای مثال اگر فشار متوسط شبکه ۴۵ متر و ۱۰۰ درصد از حوادث بر روی لوله‌های صلب شبکه رخ دهد، فاکتور تصحیح فشار، حدود ۱ بدست می‌آید.

نسبت نشت سالیانه موجود (CARL) به نشت سالیانه اجتناب‌ناپذیر (UARL) شاخص نشت زیربنائی (ILI) نام دارد (رابطه ۶)؛ که به عنوان کاربردی‌ترین شاخص عملکردی برای توصیف کارایی و بهره‌وری شرکت‌های آب و فاضلاب در حوزه مدیریت نشت شناخته می‌شود. این شاخص به عنوان معیار سنجش و نیز بـه منظور ارزیـابی و مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با دیگر شبکه‌ها در زمینه مدیریت و کنترل نشت به‌کار می‌رود (Liemberger, 2002; VPSPS, 2012).

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} \qquad (۶)$$

www.SID.ir

Archive of SID

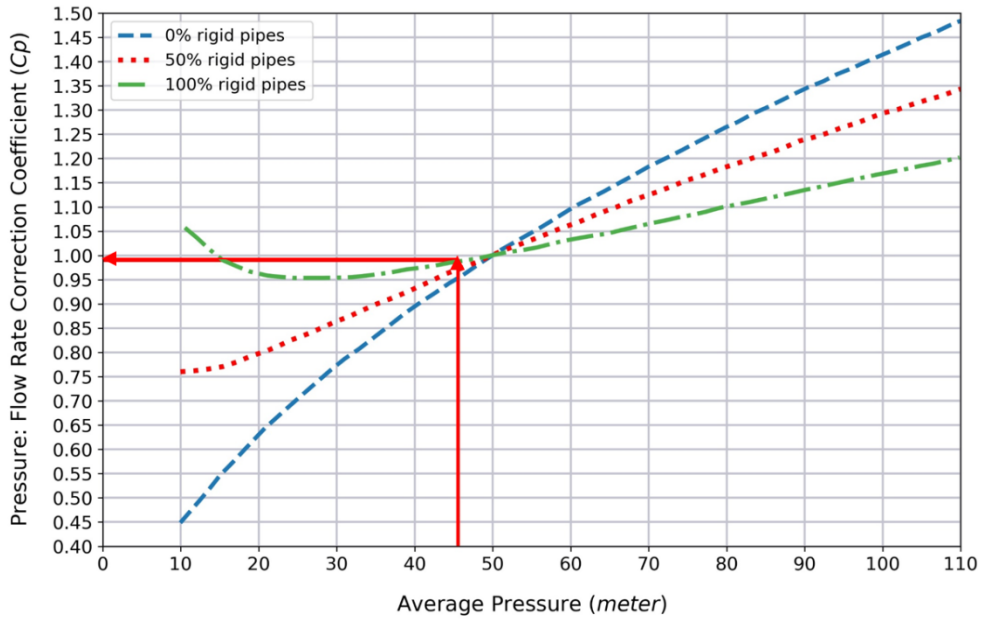

Fig. 2- Provisional relationship between pressure and Cp, for systems with different % of rigid pipes (source: (Lambert et al., 2014))

شکل ۲- رابطه شرطی فشار با ضریب Cp برای شبکه‌های با درصد صلبیت مختلف لوله‌ها (Lambert et al., 2014)

توجه به این نکته ضروری است که اختلاف بین سطح نشت سالیانه موجود (CARL) و سطح نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه (UARL)، پتانسیل نشت قابل بازیافت (PRL) را در یک شبکه نشان می‌دهد.

از عوامل مؤثر مهم دیگر بر مقدار نشت در یک شبکه توزیع آب، وضعیت و شرایط کلی لوله‌های اصلی و انشعابات شبکه است. شرایط زیرساخت شبکه (لوله‌ها و انشعابات) از لحاظ تأثیر آن بر سطح نشت زمینه به عنوان فاکتور شرایط زیربنایی (ICF) شناخته می‌شود که نسبت نشت زمینه واقعی یا هدف‌گذاری شده (TBL) به مقدار نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL) را نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌گردد (Farley and Trow, 2003). فاکتور شرایط زیربنایی حجم نشت زمینه یک شبکه را تعیین می‌کند و از این رو فاکتوری کلیدی در تعیین پایین‌ترین سطح نشت است که می‌توان از طریق عملیات نشت‌یابی فعال به آن دست یافت (Fanner et al., 2007).

$$ICF = \frac{TBL}{UBL} \qquad (۷)$$

حداقل مقدار نشت اجتناب‌ناپذیر در جریان شبانه را نشت زمینه اجتناب ناپذیر (UBL) می‌گویند، که شامل نشت‌های کوچک پنهانی است که از طریق بصری یا نشت‌یابی آکوستیک قابل مشاهده نباشند. در حقیقت نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه (UARL) شامل نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL) به علاوه نشت‌ها و شکستگی‌های گزارش‌شده و گزارش‌نشده می‌باشد که در آن نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر مؤلفه غالب است. از آنجا که تخمین سطح نشت زمینه هدف‌گذاری‌شده (TBL) در شبکه کار پیچیده‌ای است، می‌توان از طریق محاسبه نشت اجتناب‌ناپذیر زمینه (UBL) و فاکتور شرایط زیربنایی (ICF)، مقدار آن را تخمین زد. رابطه ۸ مقدار نشت اجتناب‌ناپذیر زمینه (UBL) بر روی خطوط اصلی و انشعابات شبکه را تخمین می‌زند (Lambert, 2009):

$$UBL(liters/hour) = (20\times L_M + 1.25\times N_C)\times(\frac{AZNP}{50})^{1.5} \qquad (۸)$$

روش‌های مختلفی برای تعیین فاکتور شرایط زیربنائی وجود دارد. در روش مبتنی بر اندازه‌گیری داده‌های میدانی می‌توان این فاکتور را با ارزیابی سطح نشت زمینه در یک ناحیه ایزوله از طریق عملیات نشت‌یابی و تشخیص و تعمیر کامل نشت‌ها و حذف تمامی شکستگی‌های گزارش‌نشده محاسبه نمود. بعد از اینکه همه شکستگی‌ها حذف و تعمیر شوند، تلفات باقی‌مانده در ناحیه به عنوان نشت زمینه شناخته می‌شود که از تقسیم آن بر نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر، مقدار فاکتور شرایط زیربنایی بدست می‌آید. علاوه بر این از طریق آزمایش مرحله‌ای فشار در نواحی که جنس غالب لوله‌ها صلب یا فلزی هستند، می‌توان مقدار فاکتور شرایط زیربنایی را برآورد نمود. روش‌های دیگر برآورد ICF شامل تخمین این فاکتور از طریق تحلیل

www.SID.ir

Archive of SID

حساسیت و یا تخمین بر اساس مقادیر ICF به‌دست آمده برای دیگر نواحی مشابه می‌باشد (Fanner et al., 2007). روش کاربردی دیگر آن است که مقدار فاکتور شرایط زیربنایی (ICF) با شاخص نشت زیربنایی هدف (یعنی زمانی‌که سطح نشت هدف‌گذاری حاصل شد)، برابر قرار داده شود. شاخص نشت زیربنایی هدف را می‌توان با استفاده از جدول ۱ که راهنمای اولیه هدف‌گذاری مدیریت نشت در شبکه‌های آب‌رسانی است و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به منابع آب، ملاحظات اجرایی و بهره‌برداری و ملاحظات مالی تعیین نمود (AWWA, 2016).

Table 1- Guidelines for Use of the Infrastructure Leakage Index as a preliminary leakage target-setting (Source: (AWWA, 2016))

جدول ۱- راهنمای اولیه هدف‌گذاری مدیریت نشت در شبکه‌های آب‌رسانی توسط شاخص نشت زیربنایی (AWWA, 2016)

Target ILI Range	Water Resources Considerations	Operational Considerations	Financial Considerations
1.0–3.0	Available resources are greatly limited and are very difficult and/or environmentally unsound to develop.	Operating with system leakage above this level would require expansion of existing infrastructure and/or additional water resources to meet the demand.	Water resources are costly to develop or purchase. Ability to increase revenues via water rates is greatly limited due to regulation or low ratepayer affordability.
3.0–5.0	Water resources are believed to be sufficient to meet long- term needs, but demand management interventions (leakage management, water conservation) are included in the long-term planning.	Existing water supply infrastructure capability is sufficient to meet long-term demand as long as reasonable leakage management controls are in place.	Water resources can be developed or purchased at reasonable expense. Periodic water rate increases can be feasibly effected and are tolerated by the customer population.
5.0–8.0	Water resources are plentiful, reliable, and easily extracted.	Superior reliability, capacity, and integrity of the water supply infrastructure make it relatively immune to supply shortages.	Cost to purchase or obtain/ treat water is low, as are rates charged to customers.
Greater than 8.0	While operational and financial considerations may allow a long-term ILI greater than 8.0, such a level of leakage is not an effective utilization of water as a resource. Setting a target level greater than 8.0—other than as an incremental goal to a smaller long-term target—is discouraged.		
Less than 1.0	In theory, an ILI value less than 1.0 is not possible for most systems. If the calculated ILI is just under 1.0, excellent leakage control is indicated. If the water utility is consistently applying comprehensive leakage management controls, this ILI value validates the program's effectiveness. However, if strict leakage management controls are not in place, the low ILI value might be attributed to error in a portion of the water audit data, which is causing the real losses to be understated. If the calculated ILI value is less than 1.0 and only cursory leakage management controls are used, the low ILI value should be considered preliminary until it is validated by field measurements utilizing the bottom-up approach.		

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۴- تحلیل اقتصادی نشت

در متدولوژی پیشنهادی برای تعیین سطح اقتصادی نشت مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت (ALC) از روش منحنی هزینه کل استفاده می‌گردد. فرض اصلی در این روش آن است که شبکه در حالت پایدار[۴۱] باشد. این بدان معنی است که در شبکه نشت‌های گزارش‌نشده تجمع یافته، به جز آنهایی که از زمان اجرای آخرین عملیات نشت‌یابی رخ داده‌اند، وجود نداشته باشد (Fanner et al., 2007). در روش منحنی هزینه کل، ابتدا منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال تعیین می‌گردد که اغلب به صورت یک منحنی هایپربولیک مجانب‌دار مدل‌سازی می‌شود (Pearson and Trow, 2005). مجانب قائم منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال (ALC Curve)، سطح نشت زمینه هدف‌گذاری شده یا واقعی (TBL) می‌باشد که به عنوان حد عملی و کاربردی نشت‌های قابل کشف با استفاده از روش‌های مرسوم عملیات نشت‌یابی فعال تعریف می‌گردد (UKWIR, 2011). این حد نشت همان سطح نشت هدف‌گذاری شده است که شامل نشت‌هایی بسیار کوچکی می‌شوند که بوسیله تکنولوژی‌های معمول نشت‌یابی قابل شناسایی نیستند. در این حالت اگر هزینه عملیات نشت‌یابی همواره در حال افزایش باشد، آنگاه سطح نشت به سطح نشت زمینه هدف‌گذاری شده خواهد رسید. پارامتر مهم دیگر در تعیین منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال، سطح نشت منفعل یا واکنشی[۴۲] می‌باشد که سطحی از نشت است که در آن عملیات نشت‌یابی فعال انجام نشده و شرکت تنها شکستگی‌های گزارش‌شده را تعمیر می‌کند. سطح نشت منفعل را می‌توان با استفاده از داده‌های تحلیل جریان حداقل شبانه در طول یکسال تخمین زد (Islam and Babel, 2013; UKWIR, 1994). منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال در سطح نشت منفعل به مجانب افقی می‌رسد که فقط شامل هزینه عملیات پایش نشت می‌باشد.

معادله منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال، جهت مدل‌سازی متغیر هزینه نشت‌یابی فعال در حالت پایدار (C) برای دامنه‌ای از مقادیر نشت (L) طبق رابطه ۹ می‌باشد (UKWIR, 2011). در این فرم از شکل منحنی، هزینه عملیات نشت‌یابی فعال یک لگاریتم طبیعی از سطح نشت اضافی یعنی بالاتر از سطح نشت زمینه هدف یا حداقل سیاست‌گذاری شده می‌باشد.

$$C = C_a \frac{\mathrm{Ln}\left\{\frac{L - L_b}{L_p - L_b}\right\}}{\mathrm{Ln}\left\{\frac{L_a - L_b}{L_p - L_b}\right\}} \qquad (۹)$$

در رابطه فوق؛ L : سطح تلفات واقعی یا نشت (مترمکعب بر هر انشعاب در سال)، L_a : سطح تلفات واقعی (نشت) سالیانه موجود (CARL) در نقطهٔ (L_a ، C_a) (مترمکعب بر هر انشعاب در سال)، L_b : سطح نشت زمینه واقعی یا هدف‌گذاری شده (TBL) (مترمکعب بر هر انشعاب در سال)، L_p : سطح نشت منفعل یا غیرفعال (مترمکعب بر هر انشعاب در سال)، C : هزینه عملیات نشت‌یابی فعال (ریال بر هر انشعاب بر سال)، C_a : هزینه عملیات نشت‌یابی متغیر در نقطه (L_a ، C_a) (ریال بر هر انشعاب بر سال) است که با استفاده از داده‌های هزینه‌ای جمع‌آوری شده و تعیین می‌گردد.

در مرحله بعدی، منحنی هزینه آب تلف‌شده تعیین می‌گردد که عموماً یک خط مستقیم است و از مبدأ افزایش می‌یابد. برای تعیین این منحنی به هزینهٔ حاشیه‌ای آب نیاز است که با استفاده از داده‌های هزینه جمع‌آوری شده در مرحله جمع‌آوری داده‌ها تعیین می‌گردد. در نهایت، منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال به همراه هزینه آب تلف‌شده در یک نمودار ترسیم شده و منحنی هزینه کل از جمع این دو منحنی به دست می‌آید. شکل ۳، یک منحنی هزینه کل را نشان می‌دهد که مقدار نقطه کمینه روی منحنی، مقدار نشت اقتصادی کوتاه مدت (SR-ELL) را نشان می‌دهد. نقاط دیگری در این منحنی حائز اهمیت است که می‌توان به سطح اقدام[۴۳] و سطح خروج[۴۴] اشاره کرد. منظور از سطح اقدام، سطحی از نشت است که در آن عملیات نشت‌یابی فعال بر اساس سطح نشت اضافی موجود توسط شرکت شروع گردیده و به بازبینی و تعمیر مجدد نشت‌های شبکه توزیع اقدام می‌گردد. سطح خروج نیز نشان‌دهنده سطحی از نشت است که در آن عملیات نشت‌یابی فعال برای کاهش نشت بیشتر را می‌توان متوقف نمود (Islam and Babel, 2013; Yousefi Khoshqalb et al., 2018).

همانگونه که بیان شد، شاخص ILI نشان می‌دهد که یک شرکت تا چه اندازه به طور مؤثر و کارآمد سطح نشت را با استفاده از استراتژی‌های مختلف مدیریت نشت، کنترل می‌کند. اگرچه شبکه‌ای که به خوبی مدیریت و نگهداری شود، می‌تواند شاخص نشت زیربنایی برابر با یک داشته باشد؛ اما نباید آن را لزوماً به عنوان یک هدف قرار داد چرا که آن، یک شاخص عملکردی کاملاً فنی است که در آن ملاحظات اقتصادی در نظرگرفته نشده است (Fanner et al., 2007; Lambert, 2001; Liemberger, 2002). بنابراین برای هر شبکه ابتدا باید سطح اقتصادی نشت تعیین گردد و بر اساس آن، اقتصادی‌ترین شاخص نشت زیربنایی محاسبه گردد. بر این اساس شاخص نشت اقتصادی (ELI) شبیه به شاخص ILI معرفی گردید که در آن مقدار نشت سالیانه اجتناب‌ناپذیر (UARL) با سطح نشت اقتصادی سالیانه (EARL) جایگذاری می‌گردد (رابطه ۱۰) (Pearson and Trow, 2005; Thornton et al., 2008; VPSPS, 2012).

www.SID.ir

Archive of SID

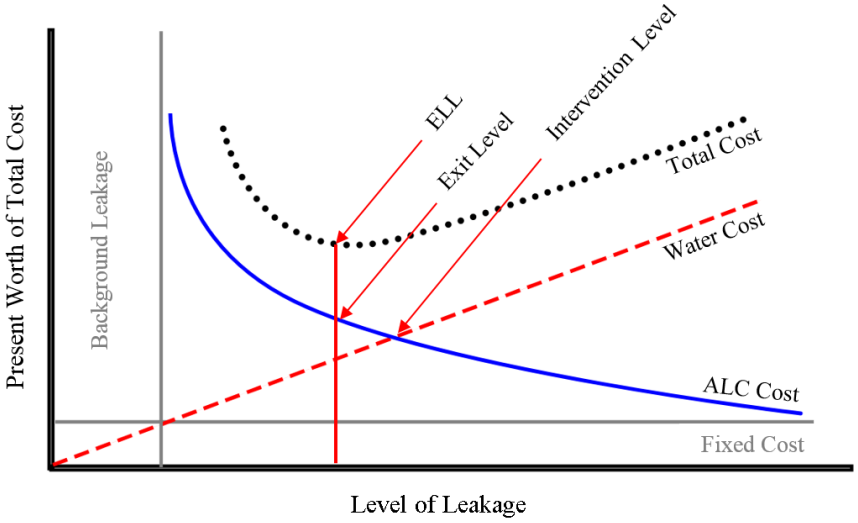

Fig. 3- Calculation of economic level of leakage using total cost curve method (Islam and Babel, 2013)
شکل ۳- محاسبه سطح اقتصادی نشت با استفاده از روش منحنی هزینه کل (Islam and Babel, 2013)

$$ELI = \frac{CARL}{EARL} \qquad (۱۰)$$

علاوه بر این با استفاده از رابطه ۱۱ می‌توان بازده اقتصادی شبکه (ENE) را با توجه به شاخص نشت اقتصادی محاسبه‌شده بدست آورد (Liemberger, 2002). این شاخص بیانگر توانایی یک شرکت در مدیریت و کنترل نشت شبکه بـــه لحاظ اقتصادی می‌بـاشد (VPSPS, 2012).

$$ENE(\%) = \frac{1}{ELI} \qquad (۱۱)$$

۳- مطالعه موردی

متدولوژی پیشنهادی در این مقاله برای یک ناحیه (ناحیه J) از شبکه توزیع آب شهر مشهد به کار رفت. این ناحیه از دو زیرناحیه J1 و J2 تشکیل شده که در شکل ۴ نمایش داده شده است. علاوه بر این، مشخصات و خصوصیات کلی ناحیه مورد مطالعه توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی استخراج گردید که در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که طول خطوط اصلی شبکه حدود ۱۱۲/۵ کیلومتر است. جنس غالب لوله‌های اصلی در دو زیرناحیه به ترتیب آزبست سیمان، پلی‌اتین و چدن داکتیل می‌باشد. بطوری‌که بیش از ۹۷ درصد از لوله‌های ناحیه از این سه جنس تشکیل شده است. علاوه بر این تعداد انشعابات شبکه ۲۶۵۶۶ انشعاب و شبکه به‌صورت ثقلی تغذیه می‌شود.

۴- نتایج و بحث

اولین مرحله در متدولوژی توسعه داده شده، تعیین نقطه میانگین ناحیه (AZP) جهت جمع‌آوری داده‌های فشار لحظه‌ای بود. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به انشعابات ناحیه J در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) در دسترس نبود، از خطوط اصلی ناحیه به عنوان پارامتر زیربنایی جهت محاسبه تراز ارتفاعی متوسط وزنی (WAGL) استفاده گردید. بدین منظور با استفاده از ابزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) طول خطوط اصلی بین هر دو تراز ارتفاعی با اختلاف ۵ متر بدست آمد و در ارتفاع متوسط دو تراز ارتفاعی ضرب گردید. در نهایت مقدار تراز ارتفاعی متوسط وزنی (WAGL) از تقسیم حاصل مجموع طول خطوط اصلی در ارتفاع متوسط بین هر دو تراز بر مجموع طول لوله‌ها بدست آمد، که مقدار آن ۱۱۲۵/۷ متر برای زیرناحیه J1 و ۱۱۱۵/۵ متر برای زیرناحیه J2 حاصل شد. در نهایت با توجه به ترازهای محاسبه شده، دو نقطه در مرکز زیرناحیه J1 و J2 به عنوان نقطه میانگین ناحیه (AZP) انتخاب گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری فشار، دو عدد دیتالاگر در نقاط میانگین ناحیه تعیین شده نصب و مقادیر فشار لحظه‌ای با فاصله زمانی هر ۱۵ دقیقه برداشت گردید. داده‌های نرخ جریان لحظه‌ای به منظور تخمین نشت با استفاده از تحلیل جریان حداقل شبانه از سامانه تله‌متری شرکت اخذ گردید. این داده‌ها در سه ورودی ناحیه J و با تواتر زمانی ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری گردید (شکل ۴). مراحل مربوط به پاک‌سازی، اعتبارسنجی و نرمال‌سازی داده‌ها با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون[۴۵] انجام گرفت و داده‌های پرت و خطاها حذف گردید تا از این

www.SID.ir

Archive of SID

طریق یک مجموعه داده معتبر به‌دست آید. شکل ۵ نمودار متوسط جریان ورودی کل (مجموع دبی ثبت‌شده برای سه ورودی) به ناحیه J را به تفکیک ماه برای سال ۱۳۹۶ نمایش می‌دهد. متوسط جریان ورودی به ناحیه J حدود ۷۴۸ مترمکعب در ساعت بود. آزمون مرحله‌ای فشار به منظور تعیین توان رابطه فشار- نشت (N_1) در ناحیه مورد مطالعه در یک شب بین ساعات ۲ تا ۵ صبح انجام گرفت و توان رابطه فشار- نشت $N_1 = 1.14$ به‌دست آمد.

در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، اطلاعات و داده‌های مربوط به هزینه عملیات نشت‌یابی فعال و داده‌های مربوط به هزینه حاشیه‌ای آب به منظور توسعه منحنی‌های هزینه نشت‌یابی فعال و منحنی هزینه حاشیه‌ای آب تلف‌شده از شرکت آب و فاضلاب مشهد اخذ گردید. هزینه عملیات نشت‌یابی فعال شامل هزینه ثابت (هزینه پایش نشت) و هزینه متغیر (هزینه پیمایش، کشف و تعمیر نشت) می‌باشد. هزینه پایش نشت با استفاده از داده‌های اخذ شده از شرکت آب و فاضلاب مشهد و رابطه ۲، مقدار ۱۳/۱۸ هزار ریال بر انشعاب در سال تخمین زده شد. هزینه‌های متغیر عملیات نشت‌یابی فعال در جدول ۳ خلاصه شده است.

با توجه به این جدول می‌توان مشاهده نمود که هزینه‌های متغیر عملیات نشت‌یابی ۵۲/۴۵ هزار ریال بر انشعاب در سال به‌دست آمده است. بنابراین هزینه‌های کل عملیات نشت‌یابی در ناحیه J شبکه توزیع آب مشهد ۶۵/۶۳ هزار ریال بر انشعاب در سال تخمین زده شد، که معادل ۱۵/۵ میلیون ریال بر کیلومتر خط اصلی در سال می‌باشد. هزینه حاشیه‌ای آب نیز با توجه به اطلاعات اخذ شده از شرکت، ۵۰۰۰ ریال تخمین زده شد که شیب خط هزینه آب تلف‌شده در شکل ۳ می‌باشد.

در مرحله دوم متدولوژی پیشنهادی در این مقاله، نشت سالیانه موجود (CARL) با استفاده از تحلیل جریان حداقل شبانه و محاسبه فاکتور روز- شب تخمین زده شد. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، در ناحیه J مصارف غیرنرمال یا استثنایی وجود نداشت.

از طرفی، مصرف شبانه مشترکین خانگی به فرهنگ و رفتار اجتماعی، ویژگی‌های جمعیتی یک منطقه (نوع املاک، عادات روزانه و زندگی مصرف‌کنندگان)، شرایط آب و هوایی و فصلی و برنامه‌ریزی‌های ذخیره آب، بستگی دارد (Loureiro et al., 2012). مطالعات قبلی، مقادیر مختلفی برای مصارف شبانه مشترکین ارائه داده‌اند؛ به عنوان مثال برای کشورهایی مانند مالزی و ایالات متحده، مصارف شبانه نسبتاً بالا و در حدود ۵ لیتر به ازاء هر انشعاب در ساعت و برای کشورهایی نظیر انگلستان و استرالیا مقادیر نسبتاً پایین بین ۱ تا ۲ لیتر به ازاء هر انشعاب در ساعت گزارش شده است (Amoatey et al., 2014; Fantozzi and Lambert, 2012).

Table 2- General characteristics of water distribution network of J district

جدول ۲- مشخصات کلی شبکه توزیع آب در ناحیه J

	Length By Pipe Material			Length By Pipe Diameter			Length By Pipe Age		
	Material	Long (km)	٪	Diameter (mm)	Long (Km)	٪	Age (years)	Long (Km)	٪
Sub Zone J1 Long (Km)=59.9, Area (Km²)=7.70	5L	0.013	0.02	>100	30.191	50.34	12	0.380	0.63
	ACC	28.184	46.99	100-150	17.012	28.36	11	0.000	0.00
	CI	0.006	0.01	200-250	3.000	5.00	10	0.264	0.44
	DCI	14.284	23.81	300-350	0.552	0.92	9	38.703	64.53
	GRP	0.776	1.29	400-450	8.159	13.60	8	1.334	2.22
	NP	0.018	0.03	500-550	0.000	0.00	7	0.204	0.34
	PE	16.094	26.83	600-650	0.420	0.70	6	2.200	3.67
	PP	0.028	0.05	700-750	0.477	0.80	5	2.560	4.27
	PVC	0.152	0.25	<750	0.085	0.14	4	0.429	0.72
	ST	0.424	0.71	unknown	0.069	0.12	3	0.413	0.69
	unknown	0.009	0.01				2	0.018	0.03
							unknown	13.481	22.48
Sub Zone J2 Long (Km)=52.6, Area (Km²)=4.54	AC	0.115	0.22	>100	11.403	21.68	33	0.042	0.08
	ACC	37.139	70.60	100-150	27.652	52.57	18	0.268	0.51
	DCI	5.521	10.50	200-250	8.074	15.35	11	0.279	0.53
	PE	9.471	18.00	300-350	0.025	0.05	10	0.694	1.32
	ST	0.252	0.48	400-450	2.773	5.27	9	45.432	86.37
	unknown	0.104	0.20	500-550	0.892	1.70	8	0.032	0.06
				<600	1.620	3.08	7	0.054	0.10
				UNK	0.058	0.11	6	0.716	1.36
				unknown	0.104	0.20	5	0.030	0.06
							4	0.074	0.14
							unknown	4.979	9.47

www.SID.ir

Archive of SID

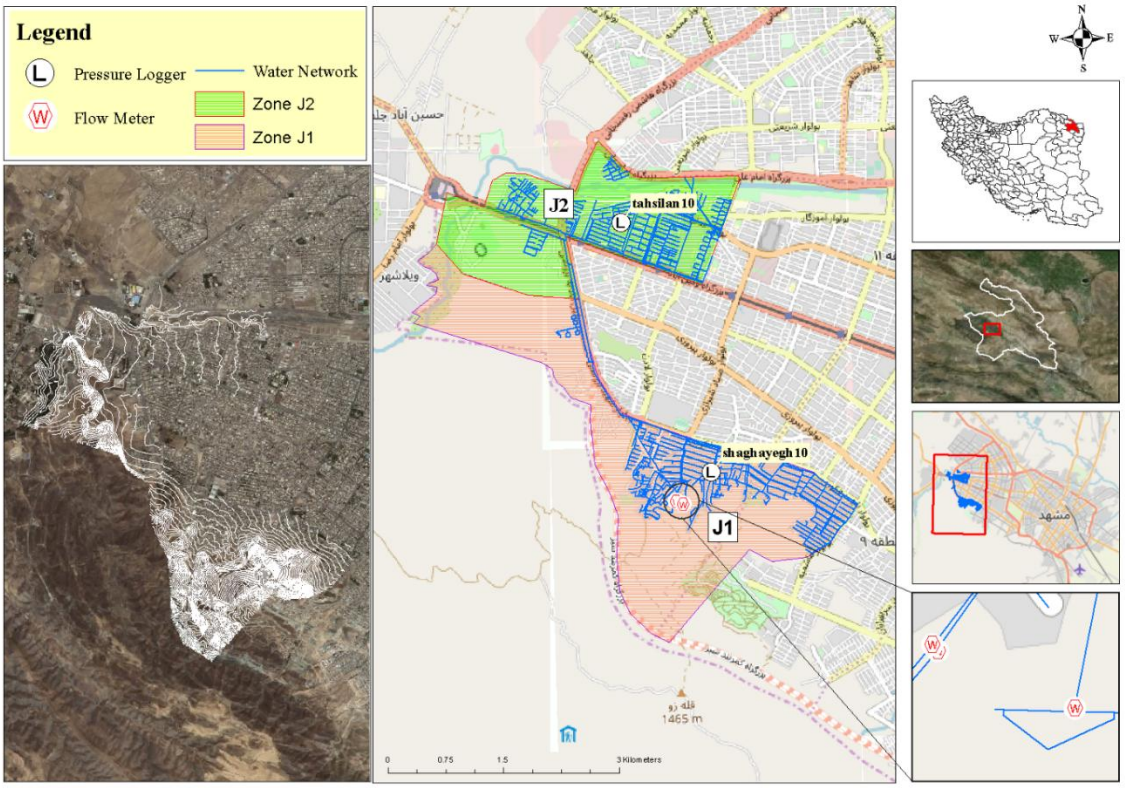

Fig. 4- Representation of the Study area (District J) and J1 and J2 subzones of the WDN of Mashhad (Image © 2018 Digital Globe, © 2018 Google Earth; Map data © 2018 Google.)

شکل ۴- نمایی از ناحیه مطالعاتی (زون J) و زیرناحیه‌های J1 و J2 در شبکه توزیع آب شهر مشهد

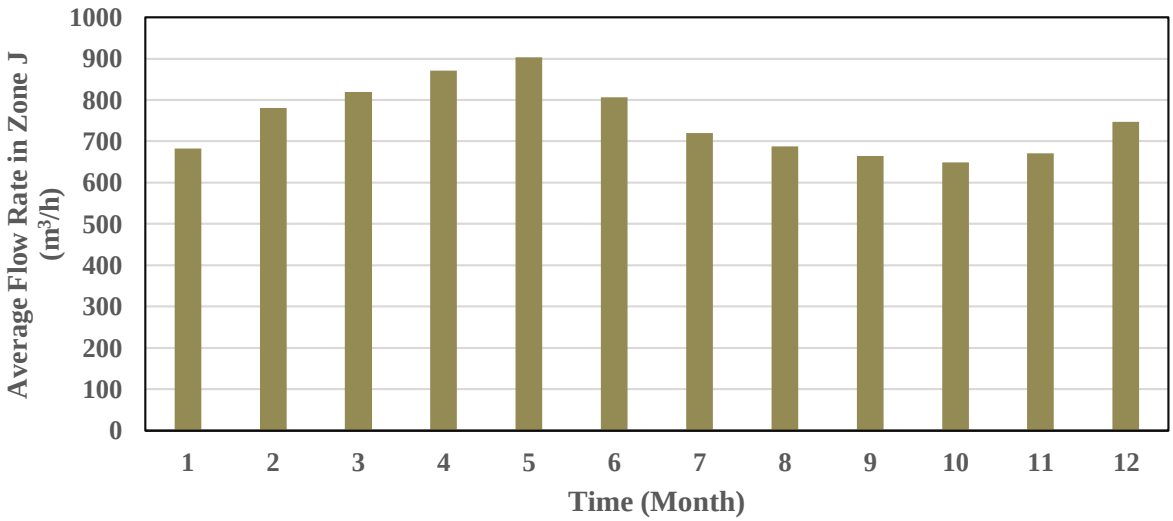

Fig. 5- Average daily water inflow for district J by month in 1396

شکل ۵- متوسط جریان ورودی روزانه به ناحیه J به تفکیک ماه در سال ۱۳۹۶

در مالزی که یک کشور اسلامی و توریستی است، مقادیر بالای سرانه مصرف شبانه مشترکین به احتمال زیاد می‌تواند به دلیل رفتارها و عادات مذهبی مردم آن باشد. بنابراین، با توجه به اینکه آمار و اطلاعاتی در خصوص مقدار مصرف شبانه مشترکین در کشور وجود ندارد، مقدار متوسط مصرف شبانه مشترکین در شهر مشهد با توجه به مطالعات انجام‌گرفته در دیگر کشورها لحاظ گردید و مقدار آن ۵ لیتر به ازای هر انشعاب در ساعت یعنی برابر با مقادیر گزارش‌شده در کشور مالزی در نظر گرفته شد.

www.SID.ir

Archive of SID

Table 3- Variable costs of leakage intervention
جدول ۳- هزینه‌های متغیر عملیات نشت‌یابی

Cost	Symbol	Value
Leakage survey cost of mains (Thousands IR Rials/Km length of mains)	C_{L_M}	4000
Length of Mains (Km)	L_M	112.5
Leakage survey cost of connections (Thousands IR Rials / connection)	C_{N_C}	20
Number of connection	N_C	26566
Leakage detection cost of mains (Thousands IR Rials / leakage)	C_{Det_M}	2300
Leakage repair cost of mains (Thousands IR Rials / repair)	C_{Rp_M}	8800
Leakage detection cost of connections (Thousands IR Rials / leakage)	C_{Det_C}	1800
Leakage repair cost of connections (Thousands IR Rials / repair)	C_{Rp_C}	2500
Number of leakage detections and repairs on mains	Num_M	44
Number of leakage detections and repairs on connections	Num_C	20
Total variable Costs (Thousands IR Rials / connection / year)		**52.45**

علت انتخاب چنین مقداری برای مصرف شبانه مشترکین آن است که شهر مشهد یک شهر زیارتی- توریستی بوده و رفتارها و عادات مذهبی مردم آن می‌تواند شبیه به کشور مالزی باشد. در ادامه، با انجام تحلیل جریان شبانه و در نظر گرفتن مصرف شبانه (۵ لیتر به ازاء هر انشعاب در ساعت)، میزان نشت شبکه در ناحیه J حدود ۲۰/۲ درصد تخمین زده شد.

علاوه بر این فرض شد که میزان مصرف شبانه در طول سال ثابت و یکنواخت می‌باشد. با بررسی داده‌های جمع‌آوری شده جریان، مشخص گردید که جریان حداقل شبانه با توجه به شرایط بهره‌برداری موجود در بازه ۲ تا ۵ صبح اتفاق می‌افتد که مقدار آن برای یک دوره زمانی مشخص (به‌صورت هفتگی) در سال ۱۳۹۶ به‌دست آمد. شکل ۶ نمودار جریان حداقل شبانه را برای هر هفته در ناحیه J برای سال ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد که متوسط جریان حداقل شبانه در این سال حدود ۲۹۹/۹ مترمکعب در ساعت محاسبه شد. در ادامه جریان خالص شبانه (NNF) برای هر هفته با کسر مصرف شبانه از جریان حداقل شبانه محاسبه‌شده، به‌دست‌آمد؛ مقدار متوسط جریان خالص شبانه در ناحیه مورد مطالعه برای سال ۱۳۹۶ حدود ۱۶۷/۱ مترمکعب بر ساعت محاسبه گردید.

همانگونه که قبلاً بیان گردید، عمده حجم جریان خالص شبانه را نشت تشکیل می‌دهد. از آنجائیکه داده‌های جریان در نقطه ورودی به ناحیه و شبکه توزیع جمع‌آوری می‌گردند، در این مطالعه فرض می‌گردد که کل جریان خالص شبانه شامل نشت می‌شود. علاوه بر این، عملیات نشت‌یابی فعال بصورت منظم در این ناحیه انجام گردیده است که از این رو نشت گزارش‌نشده تجمع‌یافته‌ای در ناحیه وجود نداشته و شبکه در حالت پایدار قرار داشت. بنابراین متوسط نشت شبانه در ناحیه J شبکه توزیع آب مشهد برای سال ۱۳۹۶ حدود ۱۶۷/۱ مترمکعب در ساعت برآورد شد. متوسط نشت کل شبانه‌روز برای هر هفته در سال ۱۳۹۶، با ضرب نشت شبانه تخمین زده شده برای هر هفته در فاکتور روز- شب (NDF) به‌دست آمد.

فاکتور روز- شب با استفاده از داده‌های فشار جمع‌آوری شده در نقطه میانگین ناحیه در روزی از هفته که در آن جریان حداقل شبانه رخ می‌دهد و همچنین توان رابطه فشار- نشت (N_1) که توسط آزمایش مرحله‌ای فشار تخمین زده شده است، محاسبه می‌شود. با این وجود، مقدار متوسط فاکتور روز- شب برای سال ۱۳۹۶ در ناحیه J تقریباً ۲۱/۴۳ محاسبه شد و مقدار متوسط نشت کل شبانه روز برای سال ۱۳۹۶ در ناحیه J نیز ۳۵۸۲ مترمکعب در روز به‌دست آمد. در نهایت متوسط نشت سالیانه از جمع متوسط نشت کل شبانه روز محاسبه گردیده برای هر هفته حاصل می‌گردد که مقدار ان برای ناحیه J حدود ۱/۳۱ میلیون مترمکعب در سال به‌دست آمد که معادل ۴۹/۲ مترمکعب بر انشعاب در سال است. جدول ۴، مقادیر متوسط مربوط به تحلیل جریان حداقل شبانه و تخمین نشت سالیانه موجود (CARL) را برای ناحیه J در سال ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول ۴ می‌توان مشاهده نمود، میزان جریان ورودی به ناحیه J در سال ۱۳۹۶ حدود ۶/۴۹ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. بنابراین درصد نشت در ناحیه J شبکه توزیع آب مشهد در حدود ۲۰/۲ درصد برآورد می‌شود.

محاسبات سطح نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه برای ناحیه J در جدول ۵ خلاصه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

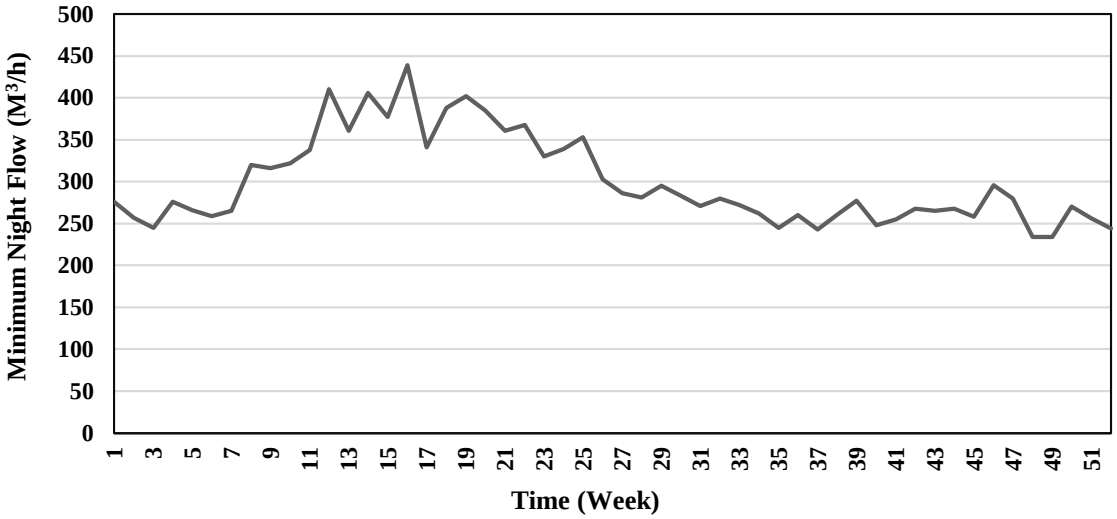

Fig. 6- Average minimum night flow for district J by week in 1396
شکل ۶- جریان حدقل شبانه را به تفکیک هفته در سال ۱۳۹۶ برای ناحیه J

همانگونه که جدول نشان می‌دهد، سطح نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه (UARL) برای ناحیه J، حدود ۰/۳۸۳ میلیون مترمکعب در سال معادل ۱۴/۴ مترمکعب بر انشعاب در سال تخمین زده شد. با استفاده از سطح نشت موجود و اجتناب‌ناپذیر، شاخص نشت زیربنایی برای این ناحیه $ILI = 3.42$ محاسبه گردید که طبق ماتریس ارزیابی نشت ارائه شده توسط بانک جهانی (Liemberger, 2010)، از نظر ارزیابی عملکرد مدیریت نشت در گروه A2 قرار می‌گیرد. توصیه بانک جهانی برای این گروه به منظور بهبود مدیریت و کنترل نشت، تجزیه و تحلیل دقیق شبکه و تعیین سطح اقتصادی نشت می‌باشد.

با افزایش تواتر و انجام منظم عملیات نشت‌یابی، سطح نشت شبکه در نهایت به سطح نشت زمینه هدف (TBL) خواهد رسید؛ که در منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال، سطح نشت شبکه به نشت زمینه هدف (TBL) مجانب می‌گردد. در این مقاله نشت زمینه هدف با تخمین نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL) و فاکتور شرایط زیربنایی (ICF) برای ناحیه J به‌دست آمد. جدول ۶، پارامترهای مورد استفاده و مقدار نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر تخمین زده شده برای ناحیه J را نشان می‌دهد. همانگونه که در جدول۶ مشخص است، مقدار نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر ۰/۲۷ میلیون مترمکعب در سال یا ۱۰/۱۷ مترمکعب بر انشعاب در سال است. این مقدار نشان می‌دهد که در بهترین حالت مدیریت نشت توسط شرکت، سطح نشت موجود از نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر و نشت‌های قابل بازیافت تشکیل شده‌اند که با شرایط زیربنایی مناسب و مدیریت بهینه می‌توان به سطح نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر دست یافت (Thornton et al., 2008).

همانگونه که قبلاً بیان شد، روش‌های مختلفی برای تعیین فاکتور شرایط زیربنایی وجود دارد. در این مقاله از روش تعیین فاکتور شرایط زیربنایی بر مبنای تخمین شاخص نشت زیربنایی هدف‌گذاری شده استفاده گردید (AWWA, 2016; Thornton et al., 2008). این شاخص هنگامی حاصل می‌شود که سطح نشت موجود به سطح نشت هدف‌گذاری شده دست یابد. با توجه به شاخص نشت زیربنایی محاسبه شده ($ILI = 3.42$) برای ناحیه J و در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به منابع آب، ملاحظات بهره‌برداری و مالی، شاخص نشت زیربنایی هدف‌گذاری شده (ILI_{Target}) این ناحیه بر مبنای راهنمای هدف‌گذاری اولیه مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب (جدول ۱) در گروه اول یعنی ($1 \le ILI \le 3$) قرار گرفت.

از این‌رو تخمین اولیه برای فاکتور شرایط زیربنائی برای ناحیه J میانگین شاخص نشت زیربنایی هدف‌گذاری شده (ILI_{Target}) در گروه اول یعنی ($ICF = 2$) قرار داده شد.

Table 4- The results of MNF analysis and estimation of current level of leakage in district J in 1396
جدول ۴- نتایج تحلیل جریان شبانه و تخمین سطح نشت موجود در ناحیه J در سال ۱۳۹۶

NNF(m^3/h)	NDF	Daily Leakage Level (m^3/day)	Annual Leakage Level (MCM/year)	Annual Inflow Rate (MCM/year)	Average Leakage (%)
167.1	21.43	3582	1.31	6.49	20.2

www.SID.ir

Archive of SID

Table 5- Calculation of UARL for district J
جدول ۵- محاسبه سطح نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه برای ناحیه J

L_M (km)	N_C	L_p (km)	Average Zone Pressure (m)	C_P	UARL (MCM/year)
112.5	26566	39.85	44.56	0.97	0.383

Table 6- Calculation of UBL for district J
جدول ۶- محاسبه سطح نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر برای ناحیه J

L_M (Km)	N_C	AZNP (m)	UBL (m^3/h)	UBL (MCM/year)
112.5	26566	49.15	34.56	0.27

با استفاده از مقادیر نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر و شاخص شرایط زیربنایی تخمین زده شده، مقدار نشت زمینه هدف (TBL) برابر ۰/۵۴ میلیون مترمکعب در سال یا ۲۰/۳۵ مترمکعب بر انشعاب در سال برآورد گردید. علاوه بر این، در صورتی‌که عملیات کنترل فعال نشت در شبکه انجام نشود و تنها شکستگی‌های گزارش‌شده تعمیر گردند (کنترل منفعل یا واکنشی نشت)، سطح نشت شبکه به سطح نشت منفعل یا واکنشی (L_p) خواهد رسید. جهت تخمین سطح نشت منفعل از داده‌های جریان حداقل شبانه (MNF) و تخمین جریان خالص شبانه (NNF) برای یک دوره زمانی یکساله استفاده گردید و مقدار آن ۱۲۹/۳ مترمکعب بر انشعاب بر سال تخمین زده شد.

با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده در مراحل قبلی، منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال (ALC) و منحنی هزینه حاشیه‌ای آب با استفاده از یک کد توسعه داده شده توسط زبان برنامه‌نویسی پایتون ترسیم گردید و منحنی هزینه کل از جمع آن دو بدست آمد. شکل ۷ منحنی هزینه کل را برای ناحیه J نشان می‌دهد که نقطه کمینه روی این منحنی، سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت (SR-ELL) را برای شرایط بهره‌برداری موجود و سیاست‌های کنترل فعال نشت اخذ شده توسط شرکت نشان می‌دهد. همانگونه که در این نمودار مشخص است، مقدار سطح اقتصادی نشت کوتاه مدت ۲۷/۵ مترمکعب بر انشعاب در سال یا ۷۷۵/۳ لیتر بر انشعاب در روز به‌دست آمد که معادل ۰/۷۳ میلیون مترمکعب در سال است. این سطح از نشت را می‌توان به عنوان سطح نشت هدف‌گذاری شده در نظر گرفت که می‌توان به آن دست یافت. با تقسیم سطح اقتصادی نشت بر سطح نشت اجتناب‌ناپذیر، مقدار شاخص زیربنایی نشت هدف‌گذاری شده $ILI_{Target} = 1.91$ به‌دست می‌آید که بسیار نزدیک به فرض اولیه برای انتخاب شاخص نشت زیر بنایی هدف‌گذاری شده است و تخمین اولیه فاکتور شرایط زیربنایی بر مبنای آن تأیید می‌گردد. در صورت وجود اختلاف بین تخمین اولیه شاخص نشت زیربنایی هدف‌گذاری شده و مقدار محاسبه شده برای آن، باید مقادیر تخمین اولیه را آنقدر تغییر داد تا این دو مقدار برابر یا بسیار نزدیک به هم درآیند.

منحنی هزینه کل در شکل ۷ همچنین نشان می‌دهد که برای دستیابی به سطح اقتصادی نشت کوتاه مدت در ناحیه J، شرکت باید سالیانه هزینه‌ای حدود ۲۵۸ هزار ریال بر انشعاب در سال معادل ۶/۸۵ میلیارد ریال در سال داشته باشد. به عبارت دیگر هزینه‌های عملیات کنترل فعال نشت نسبت به حالت موجود باید حدود ۴ برابر افزایش یابد؛ این افزایش هزینه عملیات نشت‌یابی با توجه به ارزش آب به هدررفته منطقی و اقتصادی است. پتانسیل نشت قابل بازیافت به لحاظ اقتصادی با کسر سطح نشت موجود از سطح نشت اقتصادی به‌دست می‌آید که برای ناحیه J حدود ۲۱/۷ مترمکعب بر انشعاب در سال یا ۰/۵۷۶ میلیون مترمکعب در سال محاسبه گردید. این سطح از نشت حدود ۴۴ درصد سطح نشت موجود ناحیه را تشکیل می‌دهد. علاوه بر این با فرض سرانه مصرف آب ۱۵۰ لیتر در شبانه‌روز به ازای هر نفر، دستیابی به سطح اقتصادی نشت و کاهش نشت قابل بازیافت به لحاظ اقتصادی، آب مورد نیاز برای حدود ۱۰۵۰۰ نفز در سال را می‌توان تأمین نمود که حدود یک‌سوم جمعیت ناحیه J را شامل می‌شود.

از طرف دیگر با کسر سطح نشت زمینه هدف از سطح نشت موجود، پتانسیل کل نشت قابل بازیافت شبکه را می‌توان محاسبه نمود. البته کاهش این مقدار تنها به لحاظ فنی امکان‌پذیر بوده و ملاحظات اقتصادی در آن مد نظر قرار نگرفته است. به عبارت دیگر در بهترین حالت از مدیریت نشت می‌توان به آن دست یافت. برای ناحیه J پتانسیل کل نشت قابل بازیافت حدود ۲۸/۸۵ مترمکعب بر انشعاب در سال یا ۰/۷۶۶ میلیون مترمکعب در سال به‌دست می‌آید.

شاخص نشت اقتصادی و بازده اقتصادی شبکه برای ناحیه J با استفاده از سطح نشت اقتصادی تعیین شده به ترتیب، $ELI = 1.79$ و $ENE(\%) = 56$ بدست می‌آیند. شکل ۸ نمایشی مفهومی از شاخص‌های عملکرد نشت محاسبه شده در این مقاله را نشان می‌دهد. این شاخص‌ها وضعیت شبکه را از نظر مدیریت نشت مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت به لحاظ فنی و اقتصادی نشان می‌دهند.

www.SID.ir

Archive of SID

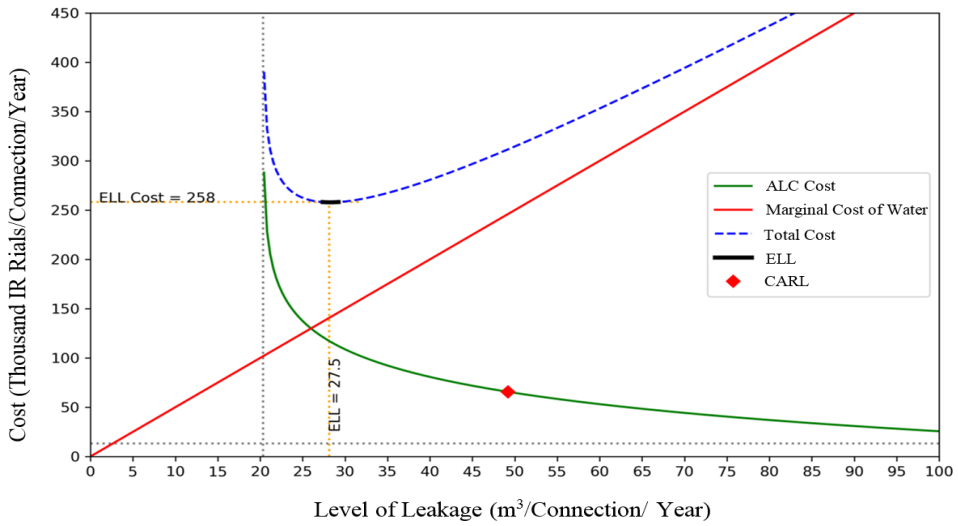

Fig. 7- Analysis of economic level of leakage for district J

شکل ۷- تحلیل سطح اقتصادی نشت برای ناحیه J

با توجه به شکل، در حالی‌که شاخص نشت زیربنایی $ILI = 3.42$ به‌دست آمده، مقدار شاخص نشت اقتصادی تقریباً نصف آن و $ELI = 1.79$ محاسبه شده است. علت این اختلاف آن است که در شاخص نشت زیربنایی ملاحظات اقتصادی در نظر گرفته نشده و این شاخص یک شاخص فنی بوده که تنها، میزان کارایی شرکت در کنترل نشت را در فشار بهره‌برداری شبکه نشان می‌دهد؛ درحالی‌که در شاخص نشت اقتصادی، ارزش آب تلف‌شده و هزینه‌های کنترل فعال نشت مد نظر قرار گرفته است. بازده اقتصادی شبکه نیز نشان می‌دهد که اگر سیاست‌های مدیریت نشت در این شرکت به همین منوال ادامه یابد، کارایی شبکه در کنترل نشت فعال حدود ۵۶ درصد بوده و در نتیجه پتانسیل کاهش نشتی در حدود ۴۴ درصد در آن وجود دارد. در پایان ذکر این نکته ضروری است که سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت و شاخص‌های اقتصادی محاسبه شده در این مطالعه مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت در شبکه‌های توزیع آب بوده و با تغییر استراتژی‌ها مقادیر آن می‌تواند تغییر نماید.

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب یک مرحله اساسی به منظور اولویت‌بندی اقدامات و استراتژی‌های مختلف مدیریت نشت می‌باشد. بدین منظور یک متدولوژی کاربردی با استفاده از داده‌های میدانی جهت تعیین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت توسعه داده شد که در آن سطح نشت موجود با استفاده از تحلیل جریان شبانه محاسبه گردید. منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال و منحنی هزینه آب تلف‌شده با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده و داده‌های هزینه‌ای جمع‌آوری شده، تخمین زده شد و در نهایت سطح اقتصادی نشت کوتاه مدت نیز با استفاده از روش منحنی هزینه کل بدست آمد. متدولوژی توسعه داده شده برای یک ناحیه در شبکه توزیع آب شهر مشهد به کار رفت. نتایج نشان داد که سطح نشت اقتصادی برای ناحیه مورد مطالعه ۲۷/۵ مترمکعب بر انشعاب در سال است و سطح نشت قابل بازیافت اقتصادی در حدود ۲۱/۷ مترمکعب بر انشعاب در سال به‌دست آمد که می‌تواند آب مورد نیاز حدود یک‌سوم جمعیت تحت پوشش این ناحیه را تأمین نماید. علاوه بر این بازده اقتصادی شبکه در ارتباط با مدیریت نشت حدود ۵۶ درصد محاسبه گردید که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این ناحیه برای کاهش نشت‌های گزارش‌نشده با استفاده از اجرای عملیات نشت‌یابی فعال است. متدولوژی توسعه داده شده در این مقاله می‌تواند در هدف‌گذاری سطح نشت و توجیه اقتصادی عملیات نشت‌یابی فعال توسط مدیران و کارشناسان شرکت‌های آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گیرد. تعیین سطح اقتصادی نشت، به افزایش کارآیی و عملکرد شبکه‌های توزیع آب، شناخت بهتر و ارتقاء آگاهی فنی در ارتباط با مدیریت نشت، افزایش درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب و کاهش هزینه‌های اجرایی آنها کمک خواهد نمود.

۶- تشکر

این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی مصوب با عنوان "ارزیابی و تعیین سطح اقتصادی نشت در شبکه آب‌رسانی شرکت آب و فاضلاب مشهد" و با حمایت مالی و معنوی شرکت آب و فاضلاب مشهد انجام گرفت. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی صمیمانه خود را از مدیران و کارشناسان محترم آن شرکت اعلام دارند.

www.SID.ir

Archive of SID

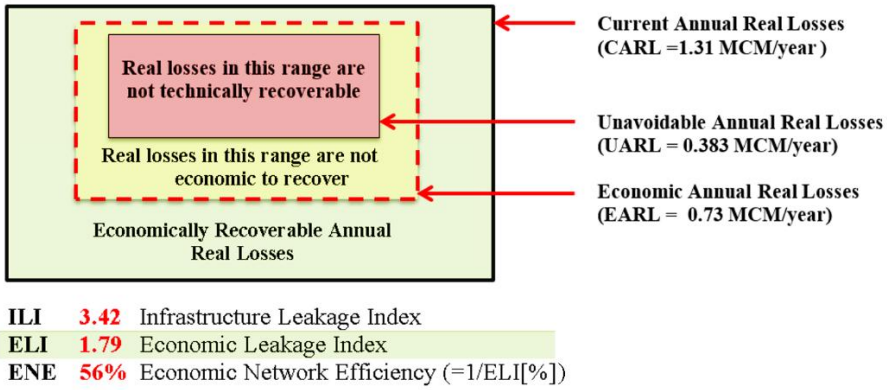

Fig. 8- Conceptual representation of the calculated leakage performance indicators in district J

شکل ۸- نمایشی مفهومی از شاخص‌های عملکرد نشت محاسبه شده برای ناحیه J

پی‌نوشت‌ها

1- Top-Down Method
2- BABE Method
3- Bottom-Up Method
4- Legitimate Night-Time Consumption (LNC)
5- Marginal Cost (MC)
6- Current Annual Real Losses (CARL)
7- Unavoidable Annual Real Losses (UARL)
8- Short-Run Marginal Cost (SRMC)
9- Short-Run Economic Level of Leakage (SR-ELL)
10- Long-Run Marginal Cost (LRMC)
11- Long-Run Economic Level of Leakage (LR-ELL)
12- Net Present Value (NPV)
13- Sustainable Economic Level (SELL)
14- Total Cost Curve (BABE) Method
15- Rate of Rise (RR)
16- International Water Association – Water Loss Task Force (IWA-WLTF)
17- Steady State
18- Minimum Night Flow (MNF)
19- Target Background Leakage (TBL)
20- Active Leakage Control (ALC)
21- Average Zone Point (AZP)
22- Infrastructure Condition Factor (ICF)
23- Unavoidable Background Leakage (UBL)
24- Performance Indicator (PI)
25- Infrastructure Leakage Index (ILI)
26- Economic Leakage Index (ELI)
27- Economic Network Efficiency (ENF)
28- Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD)
29- Pressure Management Area (PMA)
30- District Metered Area (DMA)
31- Average Zone Night Pressure (AZNP)
32- Night-Day Factor (NDF)
33- Weighted Average Ground Level (WAGL)
34- Pressure Step Test
35- Leakage Monitoring Cost
36- Leakage Survey Cost
37- Leakage Detection Cost
38- Leakage Repair Cost
39- Best Practice Guidance
40- Net Night Flow (NNF)
41- Steady-State
42- Passive Level of Leakage
43- Intervention Level
44- Exit Level
45- Python

۷- مراجع

AL-Washali T, Sharma S and Kennedy M (2016) Methods of assessment of water losses in water supply systems: A review. Journal of Water Resources Management 30(14):4985-5001

Amoatey PK, Minke R, and Steinmetz H (2014) Leakage estimation in water networks based on two categories of night-time users: A case study of a developing country network. Journal of Water Science and Technology: Water Supply 14(2):329-336

Amoatey PK, Minke R and Steinmetz H (2018) Leakage estimation in developing country water networks based on water balance, minimum night fl ow and component analysis methods. Journal of Water Practice and Technology 13(1):96-105

AWWA (2016) Water audits and loss control programs. American Water Works Association, 423p

Fanner P V, Strum R, Thornton J, Liemberger R, Davis SE, and Hoogerwerf T (2007) Leakage management technologies. Awwa Research Foundation, 380p

Fantozzi M and Lambert A (2007) Including the effects of pressure management in calculations of short-run economic leakage levels. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2007." Bucharest, Romania, 256-267

Fantozzi M and Lambert A (2012) Residential night consumption–assessment, choice of scaling units and

www.SID.ir

Archive of SID

Leakage Control and Water Distribution System Management, 1-8

Lambert A (2002) International report: Water losses management and techniques. Journal of Water Science and Technology: Water Supply 2(4):1-20

Lambert A (2009) Ten years experience in using the UARL formula to calculate infrastructure leakage index. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2009," 189-196

Lambert A, Brown TG, Takizawa M, and Weimer D (1999) A review of performance indicators for real losses from water supply systems. Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua 48(6):pp 227-237

Lambert A, Charalambous B, Fantozzi M, Kovac J, Rizzo A, and Galea St. John S (2014) 14 Years experience of using IWA best practice water balance and water loss performance indicators in Europe. In: Proc. of IWA Conference "WaterLoss 2014," 1-31

Lambert A and Fantozzi M (2005) Recent advances in calculating economic intervention frequency for active leakage control, and implications for calculation of economic leakage levels. Journal of Water Science and Technology: Water Supply 5(6):263-271

Lambert A, Fantozzi M, and Shepherd M (2017) Pressure: Leak flow rates using FAVAD: An improved fast-track practitioner ' s approach. Journal of Computing and Control for the Water Industry (September):1-9

Lambert A and Lalonde A (2005) Using practical predictions of Economic Intervention Frequency to calculate short-run economic leakage level , with or without pressure management. In: Proc. of IWA Specialised Conference "Leakage" (Ili):1-12

Lambert A, McKenzie RD, Water I, Comparisons D, and Water G (2002) Practical experience in using the infrastructure leakage index. In: Proc. of IWA Conference "Leakage Management: A Practical Approach." Lemesos, Cyprus, 1-16

Lambert A and Taylor R (2010) Water loss guidelines. The New Zealand Water & Wastes Association Wairoa Aotearoa, 102p

Liemberger R (2002) Do you know how misleading the use of wrong performance indicators can be? In: Proc. of IWA Specialised Conference "Leakage Management-A Practical Approach." Lemesos, Cyprus, 1-17

Liemberger R (2010) Recommendation for initial non revenue water assessment. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2010," 1-13

calculation of variability. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2012." Manila, Philippines, 1-10

Farley M and Trow S (2003) Losses in water distribution networks. IWA Publishing, 298p

Farley M and Trow S (2005) Losses in water distribution networks: a practitioner's guide to assessment, monitoring and control. London: IWA Publishing, 296p

Gonelas K and Kanakoudis V (2015) The economic impact of pressure management in Kozani city's water distribution system. in: Proc. of IWA Balkan Young Water Professionals. Thessaloniki, Greece, 182-190

Gupta A and Kulat KD (2018) A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. Journal of Water Resources Management 32(10):3247-3269

Haider H, Al-salamah IS, Ghazaw YM, Abdel-maguid RH, and Ghumman AR (2019) Framework to establish economic level of leakage for intermittent water supplies in arid environments. Journal of Water Resources Planning and Management 145(2):1-12

Hamilton S and McKenzie R (2014) Water management and water loss. IWA Publishing, 250p

Howarth DA (1998) Arriving at the economic level of leakage: Environmental aspects. Water and Environment Journal 12(3):197-201

ILMSS Ltd (2013) Zones, guidelines relating to the assesment and calculation of average pressure in water distribiution systems and zones. Leakssuite, 11p

Islam MS and Babel MS (2013) Economic analysis of leakage in the Bangkok water distribution system. Journal of Water Resources Planning and Management 139(2):209-216

Kanakoudis V and Gonelas K (2016) Analysis and calculation of the short and long run economic leakage level in a water distribution system. Journal of Water utility Journal 12(July):57-66

Kingdom B, Liemberger R, and Marin P (2006) The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries- how the private sector can help: a look at performance-based service contracting. Water Supply and Sanitation Sector Board Disucssion Paper Series. Washington, DC, 52p

Lambert A (2001) What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. In: Proc. of IWA Conference. Systems Approach to

www.SID.ir

Archive of SID

networks. Journal of Urban Water Journal 7(1):25-45

Tabesh M, Asadiyami Yekta AH, and Burrows R (2009) An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. Journal of Water Resources Management 23(3):477-492 (In Persian)

Tajabadi Y, Jalili Ghazizadeh MR, and Moslehi I (2017) Calculation of average zone point in water distribiution networks. In: Proc. of International Conference on Enviromental Planning and Management. Tehran, 1-11 (In Persian)

Thornton J, Sturm R, and Kunkel G (2008) Water loss control. McGraw Hill Professional, 700p

UKWIR (1994) Managing leakage (Report C): Setting Economic Leakage Targets. UK Water Industry Research, 126p

UKWIR (2011) Best practice for the derivation of cost curves in economic level of leakage analysis. UK Water Industry Research, 96p

Van Zyl JE (2014) Theoretical modeling of pressure and leakage in water distribution systems. Journal of Procedia Engineering 89:273-277

VPSPS (2012) Guideline for determining effective parameters on unaccounted for water (UFW) and water losses reduction schemes (No: 556). Tehran: Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, 194 (In Persian)

Yousefi Khoshqalb E, Jalili Ghazizade M and Moslehi I (2018) Calculate economic level of leakage in water distribution networks. In: proc. of 2nd biennial conference on water economics. Tehran, 1-10 (In Persian)

Loureiro D, Alegre H, Coelho ST, and Borba R (2012) A new approach to estimating household night consumption at DMA level. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2012." Manila, Philippines, 1-5

Loureiro D, Amado C, Martins A, Vitorino D, Mamade A, and Coelho ST (2016) Water distribution systems flow monitoring and anomalous event detection: A practical approach. Journal of Urban Water Journal 13(3):242-252

Mazaheri M and Abdolmanafi N (2014) Detailed analysis of water losses in urban water distribution networks. Tehran ,39p (In Persian)

Moslehi I, Jalili Ghazizade M, and Yousefi Khoshqalb E (2018) Development of A comprehensive economic model for pressure management in WDS. 2nd biennial conference on water economics. Tehran, 1-10 (In Persian)

Mutikanga H, Sharma SK, and Vairavamoorthy K (2013) Methods and tools for managing losses in water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management (April):166-174

Mutikanga HE, Sharma SK, and Vairavamoorthy K (2012) Methods and tools for managing losses in water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management. American Society of Civil Engineers 139(2):166-174

Pearson D and Trow SW (2005) Calculating the economic levels of leakage. In: Proc. of Leakage 2005. Portugal, 1-16

Puust R, Kapelan Z, Savic DA, and Koppel T (2010) A review of methods for leakage management in pipe

www.SID.ir