Archive of SID

نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی، دوره ۴۴، شماره ۱، فروردین ماه ۱۳۸۹، از صفحه ۱ تا ۱۲

# یک مدل تلفیقی جامع برای محاسبه و مدیریت نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری

**امیرحسین اسدیانی‌یکتا[۱] و مسعود تابش*[۲]**

[۱]دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی همدان

[۲]دانشیار دانشکده مهندسی عمران و عضو قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌ها
پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۶/۱۰/۱۵ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۶/۱۱، تاریخ تصویب ۸۸/۹/۱۷)

## چکیده

نشت در شبکه‌های توزیع آب شهری، عامل اتلاف آب و خسارت‌های اقتصادی زیادی است. در این مقاله با استفاده از قابلیت‌های مدل تحلیل هیدرولیکی Epanet2.10، روش جدیدی در محاسبه میزان نشت گره‌ها و لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب شهری ارائه شده است. در این روش با اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه در یک منطقه، نشت کلی شبکه بر اساس استانداردهای انجمن بین المللی آب (IWA)[۱] مشخص می‌شود. سپس با تقسیم مصرف هر گره به دو بخش مصارف غیر وابسته و وابسته به فشار (نشت) و شبیه‌سازی هیدرولیکی شبکه به وسیله مدل تحلیل هیدرولیکی Epanet 2.10، مقدار نشت کل شبکه با توجه به میزان فشار گرهی، در هر گره توزیع و سپس نشت مربوط به هر لوله محاسبه می‌شود. آنگاه با استفاده از نرم‌افزار تهیه شده به بررسی اثرات مدیریت نشت در شبکه پرداخته شده و در نهایت شاخص‌های نشت تعیین می‌شود. در ادامه با استفاده از نتایج به دست آمده در یکی از پایلوت های آب به حساب نیامده کشور (واقع در استان ایلام)، قابلیت‌های مدل ارائه شده ارزیابی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با ترکیب نرم‌افزار تهیه شده و مدل‌های تحلیل هیدرولیکی می‌توان به درستی نسبت به شبیه سازی سیستم و برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی شبکه اقدام و میزان نشت در هر گره و لوله را به طور واقعی مدل‌سازی و کالیبره کرد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از شاخص‌های عملکرد نقش بسیار مهمی در زمینه مدیریت نشت و تعیین اولویت های مبارزه با تلفات آب ومؤلفه‌های آن داشته و می‌تواند باعث جهت دهی مناسب در صرف هزینه محدود شرکت‌های آب و فاضلاب در این امر شود از طرفی این شاخص‌ها میزان موفقیت اقدامات کنترل نشت را در شبکه مورد بررسی مشخص می‌کنند که شاخص نشت زیر ساخت (ILI) که بیشترین میزان فاکتور های مؤثر بر نشت را در خود جای داده است به عنوان کامل‌ترین و دقیق ترین شاخص عملکرد نشت در اولویت قرار دارد.

**واژه های کلیدی:** آب به حساب نیامده، نشت، مدل تحلیل هیدرولیکی، شاخص عمل کرد نشت، مدیریت نشت، تعدیل فشار

## مقدمه

آب به حساب نیامده (UFW)[۲] یا آب غیردرآمدزا (NRW)[۳] در شبکه‌های توزیع آب، عبارت است از جریان ورودی به شبکه منهای مصارف مجاز (اندازه‌گیری شده و اندازه‌گیری نشده). آب به حساب نیامده به دو گروه هدررفت ظاهری و هدررفت حقیقی (نشت) تقسیم‌بندی می‌شود. هدررفت ظاهری ناشی از خطاهای اندازه‌گیری، انسانی، بهره‌برداری و مدیریتی بوده و موجب مصرف آب بدون پرداخت بهای آب‌بها می‌شود. در حالی که در هدررفت حقیقی آب تلف شده به مصرف مشترکین نخواهد رسید و هزینه‌های آن نیز قابل وصول نیست. این گونه هدررفت شامل نشت از شبکه لوله‌ها و انشعابات، نشت و سرریز از مخازن و نشت از پمپ‌ها و شیرآلات است.

میزان کل نشت از شبکه توزیع و مؤلفه‌های آن می‌تواند به وسیله چند روش از جمله روش بالانس سالانه[۴] آب و روش جریان حداقل شبانه (MNF)[۵] در ترکیب با نظریه تخمین شکستگی‌ها و نشت زمینه (BABE)[۶] تعیین شود [۱و۲]. مهم‌ترین نقطه ضعف این روش‌ها در آن است که نمی‌توانند موقعیت محل نشت‌های گزارش نشده را بدون استفاده از عملیات میدانی پردردسر و گران قیمت و استفاده از تجهیزات پیشرفته نشت‌یابی تعیین کنند.

برای شناسایی مقدار و محل نشت، علاوه بر روش‌های تجربی از مدل‌های هیدرولیکی هم استفاده می‌شود. به دلیل ماهیت وابسته به فشار نشت، بهترین نوع مدل‌های

www.SID.ir

* نویسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۲۵۸ ، فاکس : ۶۶۴۰۳۸۰۸ ، Email: mtabesh@ut.ac.ir

Archive of SID


تحلیل نشت مدل‌های تحلیل هیدرولیکی مبتنی بر فشار[۷] هستند که همه مصارف گرهی از جمله نشت را با فشار گره مرتبط می‌کنند [۳و۴و۵]. متأسفانه به دلیل تجاری نبودن این نرم‌افزارها، دسترسی عمومی به آنها وجود ندارد، بنابراین باید با در نظرگرفتن تقریب‌هایی از مدل‌های تحلیل هیدرولیکی موجود که مبتنی بر تقاضا[۸] هستند استفاده کرد.

یک روش مفید و قابل انجام برای توزیع مقادیر نشت در کل شبکه، استفاده از روش های بالانس آب و MNF در ترکیب با مدل‌های تحلیل هیدرولیکی از قبیل EPANET است. به هر حال بیشتر مدل‌های تحلیل هیدرولیکی موجود از جمله EPANET که از روش‌های مبتنی بر تقاضا استفاده می‌کنند، قادر به برقرای ارتباط واقعی بین مقادیر دبی خروجی از گره و تغییرات فشار نیستند [۳و۴و۵]. این نرم‌افزارها به طور مستقیم برای محاسبه نشت ایجاد نشده‌اند و باید با استفاده از تمهیداتی نسبت به تقریب زدن مقدار نشت اقدام کرد. لازم به یادآوری است که نرم‌افزارهای تحلیل هیدرولیکی قادر به تعیین محل و مقدار دقیق نشت در یک نقطه نیستند، بلکه فقط نسبت به توزیع نشت در طول شبکه و یافتن نقاط و خطوط پرخطر نشت به تصمیم گیرندگان کمک می‌کنند. لذا باید ابتدا با ترکیب مقادیر عملی به دست آمده از روش بالانس سالانه آب و یا روش MNF با مدل تحلیلی هیدرولیکی نسبت به کالیبره کردن مدل اقدام کرد و به دنبال شناسایی نقاط و خطوط با احتمال بالای نشت به وسیله مدل، با استفاده از روش‌های عملی همچون صداسنجی و کاربرد دستگاه‌های پیشرفته نسبت به یافتن نقاط دقیق نشت و محاسبه مقدار آن در هر نقطه اقدام کرد. بعضی از محققان از گزینه آبفشان موجود در نرم‌افزار EPANET برای شبیه‌سازی نشت شبکه‌های آب استفاده نموده‌اند [۶]. در آبفشان‌ها از رابطه ساده بین دبی و فشار به صورت زیر استفاده می‌شود

$$Q_i = C_i P_i^N \qquad (۱)$$

در این رابطه $Q_i$ دبی نشت، $P_i$ فشار و $C_i$ ضریب مربوط به مشخصات گره و $N$ توان فشار (عددی بین ۰/۵ تا ۲/۵) [۷] هستند.

Germanopoulos مدلی را برای در نظر گرفتن رابطه فشار – نشت در شبکه پیشنهاد کرد [۸]. او فرض کرد نشت در طول لوله‌ها به طور یکنواخت توزیع می‌شود و مقدار نشت هر لوله به این ترتیب بیان می شود:

$$Q_{L,ij} = C \times L_{ij} \times \left(P_{ij}^{av}\right)^{1.18} \qquad (۲)$$

که $Q_{L,ij}$ جریان آب خروجی از محل نشت از هر لوله، $C$ ضریب ثابتی که به خصوصیات شبکه بستگی داشته و رابطه مستقیم با جنس و عمر لوله دارد، $L_{ij}$ طول لوله و $P_{ij}^{av}$ فشار متوسط در طول لوله است.

Vela et al فرمول پیچیده‌تری برای معادله نشت ارائه دادند [۹] که به صورت زیر است:

$$Q_{L,ij} = CL_{ij} \times D_{ij}^{d} \times e^{a\tau} \left(P_{ij}^{av}\right)^{1.18} \qquad (۳)$$

که $d$ توانی است که مقدار آن برای قطرهای کوچک (تا ۱۲۵ میلیمتر) برابر یک و برای قطرهای بزرگ‌تر برابر ۱- است، $a$ پارامتر تعدیل تغییر شکل موقتی در اثر شکست، $D_{ij}$ قطر لوله و $\tau$ سن لوله است.

Burrows et al با استفاده از خاصیت آبفشان‌ها[۹] در نرم‌افزار تحلیل هیدرولیکی EPANET رابطه زیر را ارائه دادند [۶].

$$Q_{L,MNF} = C_u \left[\sum_{i=1}^{NJ} Nc_i . P_i^N\right] \qquad (۴)$$

$Q_{L,MNF}$ میزان نشت در زمان وقوع جریان حداقل شبانه، $C_u$ نرخ نشت در هر گره تحت فشار ۱ متر، $N_{ci}$ تعداد انشعابات وارد شده به گره $i$ و $N$ توان فشار است. در این روش $C_u$ به وسیله آزمون و خطا تعیین می‌شود.

از آنجا که انشعاب های ورودی به گره‌ها طول یکسانی ندارند، استفاده از فاکتور تعداد انشعابات به عنوان یکی از نقاط ضعف این روش محسوب می‌شود. از طرفی در این روش تنها نشت به گره‌ها اختصاص داده می‌شود و از مؤلفه دبی مستقل از فشار، استفاده به عمل نیامده است. هر چند که این مؤلفه جزء کوچکی از دبی کل سیستم در زمان اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه را تشکیل می‌دهد، اما همین مقدار بر فشار و به دنبال آن نشت شبکه اثر گذار است. این روش همچنین مربوط به محاسبه نشت گره‌ها می‌باشد و در زمینه نشت لوله‌ها رابطه‌ای را ارائه نمی‌دهد. از جمله نقاط ضعف مدل‌های بررسی شده می‌توان به دو مورد اشاره کرد. اول اینکه این مدل‌ها همه مؤلفه‌های نشت را محاسبه نمی‌کنند وتنها قادر به تعیین نشت شبکه هستند. دوم، این مدل‌ها جریان را به دو مؤلفه وابسته و مستقل از فشار تقسیم نمی‌کنند.

Araujo et al روابط زیر را برای مدل سازی نشت شبکه‌ها با استفاده از مدل تحلیلی هیدرولیکی ارائه دادند [۱۰]:

www.SID.ir

Archive of SID


$$Q_{L,MNF}=\sum_{i=1}^{NJ} q_{L_{MNF,i}}=\sum_{i=1}^{NJ}\left(p_i^{1.18}\times C\times\sum_{j=1}^{NK}0.5\times L_{ji}\right) \quad (۵)$$

$C$ ضریب ثابتی است که به وسیله روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شود، $NK$ مجموع انشعابات متصل بـه گـره، $Q_{L,MNF,i}$ نشت در گره $i$ در زمان $MNF$، $NJ$ تعداد کل گره‌هـا در شبکه، $L_{ji}$ طول لوله های متصل از گره $j$به گره $i$، $P_i$ فشار در گره $MNF$،$i$ حداقل جریان شبانه و $Q_{L,MNF}$ دبـی نشـت در زمان جریان حداقل شبانه است.

در این روش نشت در زمان جریان حداقل شبانه به عنوان درصدی از دبی کل سیستم در این زمان در نظر گرفته شـده، که نمی‌تواند بیانگر میزان واقعی نشت سیستم باشـد. در ایـن روش نیز تنها نشت گره‌ها محاسبه می‌شـود و نشـت لولـه‌هـا مشخص نیست. همچنین اثر دبی مستقل از فشار در محاسبات منظور نشده است.

تابش و دلاور [۶] روشی برای محاسبه نشت به وسـیله ترکیب مدل‌های تحلیل هیـدرولیکی و GIS ارائـه کردنـد. آنها با استفاده از رابطـه بـین نشـت و فشـار و محاسـبات MNF، مقـدار ضـریب C را بـرای هـر گـره بـا اسـتفاده از نرم‌افـزار ArcView محاسـبه کردنـد. سـپس بـا محاسـبه فشارهای گرهی به وسـیله نـرم‌افـزار تحلیـل هیـدرولیکی مقادیر نشت در لوله‌ها را مشخص کردند.

هـدف از تحقیـق حاضـر اول ایجـاد یـک مـدل نشـت کاربردوست و تعیین همـه مؤلفـه‌هـای آن بـا اسـتفاده از داده‌های جمع‌آوری شـده از بررسـی‌هـای میـدانی بـوده و سپس ارائه روشی برای ارزیابی تلفات حقیقی (نشت) با در نظر گرفتن هر دو قسـمت مصـارف مسـتقل و وابسـته بـه فشار است. در این راستا با برقراری ارتباط بین مدل نشـت با مـدل تحلیـل هیـدرولیکی EPANET، نشـت گـره‌هـا و لوله‌ها تعیین می‌شود. مدل ارائه شـده همچنـین قـادر بـه ارزیابی شاخص‌های عملکرد نشت (مدیریت نشت) و نشان دادن اثرات مدیریت فشار بر نشت شبکه است [۱۲].

## روش تحقیق

در این تحقیق با تهیه یک نرم‌افزار، در ابتدا هـدررفت کـل سیستم، از روش بالانس سالانه آب بر اساس استاندارد IWA محاسبه می‌شود. نشت شبکه، در اولین گام با استفاده از میزان هدررفت کل به دست آمده از روش بالانس سالانه آب و کسر مقدار هدررفت ظاهری سیستم از این میزان، محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، برای محاسبه دقیـق‌تـر نشـت، از روش آنـالیز جریان شبانه استفاده می‌شود. بر اساس این روش، نرم‌افزار بـا استفاده از داده‌های مربوط به اندازه‌گیری دبی و فشار سیستم، اقدام به محاسبه میزان نشت (سـاعتی و روزانـه) و همچنـین نشت سالانه می کند. سپس اجزای تشکیل دهنـده نشـت بـه صورت جزئی‌تری محاسبه می‌شوند. در این تحقیق با استفاده از نتایج تحقیقات گذشته و استفاده از فرضیه های جدید، نشت محاسبه شده از روش آنالیز جریان حداقل شبانه به تمام لوله‌ها تخصیص می‌یابد. مراحل کار به این شرح است:

ابتدا فرض می‌شود که روی هر لوله به فواصل مساوی یـک روزنه وجود دارد که باعث خروج آب از شبکه مـی‌شـود. دبـی جریان خروجی از هر روزنه (نشت) از فرمـول ذیـل محاسـبه می‌شود.

$$Q_k = C_k P_k^N \quad (۶)$$

$C_k$ ضریب ثابت، $P_k$ فشار روزنـه و $N$ تـوان فشـار در روزنـه $k$ است.

سپس دبی نشت ناشی از این روزنه‌ها کـه در طـول لولـه پخش شده‌اند به دو گره موجود در دو سر لوله اختصاص می‌یابد. نشت هر گره از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۲].

$$Leak_j = C_j \sum_{i=1}^{M}\frac{L_{ij}}{2}\sum_{k=1}^{NK}P_k^N \quad (۷)$$

$M$ تعداد لوله‌های متصل به گره $j$ ، $NK$ تعداد روزنه‌ها قرار گرفته روی نصف طول لوله ($L/2$)، $L_{ij}$ طول لوله، $Leak_j$ نشت گره $j$و $C_i$ ضریب ثابت مربوط به گره j است.

نشت در شبکه برابر مجموع نشت تمام گره‌ها بوده و با در نظر گرفتن فشار هر گره، از فرمول زیر به دست می‌آید:

$$Leak_{S,th} = \sum_{j=1}^{NJ} Leak_j = \sum_{j=1}^{NJ} C_{uj}.P_j^N \quad (۸)$$

$Leak_{S,th}$ نشت تئوریک کل شـبکه، $P_j$ فشـار در گـره $j$ و $C_{uj}$ ضریب ثابت نشت در گره $j$ و $NJ$ تعداد گره‌ها است.

از طرف دیگر در مطالعـات میـدانی، پـس از انـدازه‌گیـری جریان حداقل شبانه و تخمین مصارف معقـول شـبانه، نشـت شبکه در زمان اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه بـا اسـتفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Leak_{MNF} = MNF - (\sum LNU + \sum MNU) \quad (۹)$$

$Leak_{MNF}$ نشت در زمان حداقل جریان شبانه، $LNU$ مصـارف شـبانه نرمـال انـدازه‌گیـری نشـده و$MNU$ مصـارف شـبانه اندازه‌گیری شده است.

با اسـتفاده از فشـار متوسـط شـبکه در سـاعات مختلـف شبانه‌روز، نشت در هر ساعت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

www.SID.ir

Archive of SID


$$Leak_{m,t} = Leak_{MNF} \times (P_t / P_{MNF})^N \qquad (۱۰)$$

$Leak_{m,t}$ نشت متوسط در زمان $t$، $P_t$ فشار متوسط شبکه در زمان $t$ و $P_{MNF}$ فشار متوسط شبکه در زمان MNF است.

در روش ها و شبکه‌های مختلف مقادیر متفاوتی برای N به دست آورده شده بود تا اینکه در اواخر سال ۱۹۹۴، May نظریهٔ خود را با عنوان منافذ نشت با سطح مقطع ثابت و متغیر (FAVAD)[۱۰] ارائه کرد [۷].طبق این نظریه، سطح مقطع منافذ نشت با تغییرات فشار در شبکه تغییر می‌کند و میزان این تغییرات برای منافذ مختلف متفاوت است. Lambert منافذ نشت را براساس نحوهٔ تغییرات آنها با فشار در سه گروه تقسیم بندی کرده و مقدار N را برای هر یک محاسبه نمود [۷]. برای مثال در نشت از یک سوراخ ناشی از خوردگی، سطح مقطع به شکل سوراخ بوده و سطح مقطع نشت با تغییر فشار سیستم ثابت خواهد ماند. در این گونه نشت ها که به نشت با سطوح ثابت معروفند، طبق قانون اریفیس توان فشار برابر ۰/۵ است. اما اگر نشت از ترک‌ها و اتصالاتی رخ دهدکه سطح مقطع آنها با تغییرات فشار تغییر می‌یابد، توان فشار ۱/۵ در نظر گرفته می شود. به این گونه نشت‌ها، نشت با سطح مقطع متغیر گفته می شود. بررسی‌های تکمیلی نشان داد که با استفاده از نسبت سطح مقطع منافذ نشت با سطح مقطع ثابت به منافذ نشت با سطح مقطع متغیر ($R_{FVL}$) نیز می‌توان مقدار N را محاسبه کرد [۷].

$$R_{FVL}= \frac{\text{(منافذ نشت با سطح مقطع ثابت)}}{\text{(منافذ نشت با سطح مقطع متغیر)}} \qquad (۱۱)$$

در این روش، در صورتی که فشار از $P_0$ به $P_1$ تغییر یابد، با داشتن مقادیر $(P_1 / P_0)$ و نیز مقدار $R_{FVL}$ در فشار $P_0$، می‌توان با استفاده شکل ۱ مقدار N را محاسبه کرد.

سپس از تفاضل میزان نشت محاسبه شده، از مقدار آب ورودی به سیستم در هر ساعت، میزان مصرف- مؤلفه مستقل از فشار- در تمام ساعات به دست می‌آید.

$$Q_{ind,t} = Q_{total,t} - Leak_{m,t} \qquad (۱۲)$$

$Q_{ind,t}$ مصارف مستقل از فشار در زمان $t$ و $Q_{total,t}$ کل دبی ورودی به شبکه در زمان $t$ است.

برای توزیع نشت در هر گره، ابتدا با توجه به جمعیت تحت پوشش هر گره، فقط دبی مستقل از فشار در هر ساعت به همه گره‌های شبکه اختصاص می‌یابد. پس از انجام تحلیل هیدرولیکی، فشار همه گره‌ها محاسبه شده و با استفاده از میزان نشت اندازه‌گیری شده در زمان جریان حداقل شبانه، ضریب C برای کل شبکه از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{Leak_{MNF}}{\sum_{j=1}^{NJ}\left(\sum_{i=1}^{M} L_{i,j} / 2 \times P_j^N\right)} \qquad (۱۳)$$

آنگاه با استفاده از رابطه (۶)، دبی وابسته به فشار هر گره محاسبه و به مصرف هر گره افزوده می‌شود. با اضافه شدن دبی وابسته به فشار به دبی مستقل از فشار در هر گره لازم است تا بار دیگر تحلیل هیدرولیکی انجام گیرد، زیرا فشار گره‌ها تغییر خواهد یافت. این روند تا زمانی که فشار در گره‌ها ثابت شود، ادامه می‌یابد. پس از دست یافتن به دبی وابسته به فشار گره‌ها، باید مجموع دبی‌های تئوریک وابسته به فشار شبکه، برابر با نشت کلی محاسبه شده سیستم در زمان اندازه‌گیری جریان حداقل شبانه باشد تا مدل کالیبره شود. بدین منظور به ناچار ضریب C گره‌ها باید اندکی تغییر کند که به دنبال آن، دبی وابسته به فشار آنها و در نتیجه، فشار سیستم نیز تغییر خواهد کرد. تمام فرآیندهای ذکر شده تا رسیدن به ضریب C ثابت ادامه می‌یابد. فلوچارت این روش در شکل (۲) نمایش داده شده است.

پس از ثابت شدن ضریب C گره‌ها، مقدار نشت در هر گره نیز توسط مدل محاسبه می‌شود. در نهایت میزان نشت هر لوله از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$Leak_{ij} = Leak_i \times \frac{L_{ij}}{\sum L_i} + Leak_j \frac{L_{ij}}{\sum L_j} \qquad (۱۴)$$

$Leak_{ij}$ نشت لوله $ij$، $L_{ij}$ طول هر یک از لوله‌های متصل به گره $i$ و $L_j$ طول هر یک از لوله‌های متصل به گره j است.

از مجموع نشت لوله‌ها یا گره‌ها در هر ساعت خاص، نشت کل سیستم در آن ساعت محاسبه شده و نشت متوسط در یک شبانه روز یا در یک سال تعیین می‌شود.

## شاخص‌های عملکرد

شاخص‌های عملکرد برای ارزیابی شبکه، مقایسه عملکرد چند شبکه با یکدیگر و یا تعیین یک هدف اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در زمینه کاهش نشت به کار می‌روند. یکی از اهداف IWA در مقوله نشت، معرفی یک شاخص عملکرد مناسب برای انجام مقایسات بین‌المللی نشت در شبکه‌های آب است [۱۳]. در کشور ایران تا چند سال اخیر تنها شاخص نشت، بیان آن به صورت درصدی از حجم آب ورودی به

www.SID.ir

Archive of SID


سیستم بوده که به دلایلی از جمله اینکه تغییر در میزان مصرف، میزان نشت بیان شده در قالب درصد را متاثر می‌کند و همچنین این موضوع که این شاخص فاکتورهای محلی متاثر در نشت را مورد استفاده قرار نمی‌دهد [۱۴]، بیانگر وضعیت نشت و بحران موجود در شبکه نیست. بدین لحاظ لازم است عوامل مؤثر و شاخص های جدیدی تعریف شوند. انجمن بین المللی آب شاخص‌های عملکرد را از نظر تقدم انجام به سه دسته زیر تقسیم می‌کند [۱۳و ۱۵].

## شاخص‌های عملکرد پایه مرسوم[۱۱]

شاخص‌های عملکرد مرسوم برای نشت که بیشترین دامنه استفاده در قسمت‌های مختلف جهان را برای مقایسه حجم سالانه هدررفت واقعی (نشت) دارند عبارتند از [۱۳]:

- حجم هدررفت برحسب درصد حجم آب ورودی به سیستم
- حجم هدررفت بر طول خط اصلی بر واحد زمان
- حجم هدررفت بر تعداد اشتراک بر واحد زمان
- حجم هدررفت بر تعداد انشعابات سرویس بر واحد زمان
- حجم هدررفت بر طول سیستم بر واحد زمان (طول سیستم = طول خط اصلی + طول انشعابات سرویس تا کنتور)

بیان نشت به صورت درصدی از حجم آب ورودی به سیستم، تنها می‌تواند در تعریف جنبه‌های مالی و اقتصادی نشت مناسب باشد و به طور کامل روشن است که این شاخص برای ارزیابی کارایی مدیریت نشت در سیستم‌های توزیع آب به علل زیر مناسب نیست:

- تغییر در میزان مصرف، میزان نشت بیان شده در قالب درصد را تحت تأثیر قرار می‌دهد.
- این شاخص عملکرد، فاکتورهای محلی متأثر در نشت را استفاده نمی‌کند.

## شاخص عملکرد تکنیکی هدررفت حقیقی[۱۲] (TIRL)

از آن جا که قسمت عمده نشت و شکستگی‌ها در یک شبکه (به غیر از شبکه هایی با تراکم انشعابات سرویس کمتر از ۲۰ انشعاب در هر کیلومتر خط اصلی) در انشعابات رخ می‌دهند و نه در خطوط اصلی، IWA شاخص تکنیکی نشت را به شکل زیر پیشنهاد می‌کند [۱۵]:

Lit / service connection / day  w.s.p

w.s.p: زمانی که سیستم تحت فشار است[۱۳]

برای شبکه‌های با تراکم انشعاب‌های کمتر از ۲۰ انشعاب در هر کیلومتر خط اصلی که به عنوان شبکه‌های روستایی مطرح هستند، بهترین شاخص عملکرد به صورت زیر پیشنهاد شده است:

$m^3$ / km mains / day  w.s.p

شاخص عملکرد تکنیکی نشت، مدت زمانی که سیستم تحت فشار است را در نظر گرفته و بدین ترتیب، هم می‌تواند برای سیستم‌های با تأمین آب مداوم و هم برای سیستم‌های با تأمین آب متناوب به کار رود. این شاخص هنوز نتوانسته است تعدادی از فاکتورهای محلی مهم از جمله موقعیت کنتور مشترکین (فاصله کنتور تا ساختمان مشترک) و فشار متوسط شبکه را در خود بگنجاند که این مطلب به عنوان نقطه ضعف شاخص مذکور شناخته می‌شود.

## شاخص جامع عملکرد نشت

شاخص‌های عملکرد قبلی به عنوان یک معیار اولیه برای تعیین کارآیی سیستم هستند. شاخص جامع عملکرد، شاخص نشت زیرساخت[۱۴] است که به صورت نرخ نشت موجود سالانه[۱۵] به نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر تعریف می‌شوند.

$$ILI=CARL/UARL \qquad (۱۵)$$

ILI شاخص نشت زیرساخت، CARL نشت سالانه موجود و UARL نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر است.

تحقیقات نشان داده است که حذف تمام نشت از شبکه‌های توزیع آب در عمل غیرممکن است و حتی در یک سیستم با شرایط زیر بنایی خوب و مدیریت کارآمد نشت، مقداری هدررفت سالانه غیرقابل اجتناب وجود خواهد داشت که به فاکتورهای محلی بستگی دارد. نشت اجتناب‌ناپذیر، مقداری است که از نظر فنی، بدون در نظر گرفتن ملاحظه‌های اقتصادی و مالی می‌توان بدان دست یافت. به طور خلاصه نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر را می‌توان با دو معادله زیر نمایش داد [۱و۱۳] که در آنها روابط رابطه بین فشار و نشت به صورت خطی در نظر گرفته شده است.

$$UARL=(18\times L_m+0.8\times Nc+25\times L_P)\times P \qquad (۱۶)$$

$$UARL=(18\times \frac{L_m}{N_c}+0.8+25\times L_P/N_c)\times P \qquad (۱۷)$$

$L_m$ طول خط اصلی بر حسب km، $N_c$ تعداد انشعاب ها، $L_p$ طول لولهٔ موجود از مرز اشتراک تا کنتور مشترک برحسب km و $P$ فشار متوسط سیستم بر حسب متر است. در رابطه (۱۶)، UARL برحسب Lit/day و در رابطه (۱۷) برحسب *Lit / service conn. / day* است.

www.SID.ir

Archive of SID


سطح حداقل نشت به طور معمول پایین‌تر از سطح اقتصادی نشت، که در آن صرفه‌جویی صورت گرفته ناشی از کنترل نشت با هزینه‌های صرف شده برای کنترل نشت برابر می‌شود، قرار دارد. نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر به عنوان یک هدف برای کنترل نشت در هر شبکه‌ای مناسب نیست، چرا که باعث صرف قسمت عمده ای از سرمایه های شرکت های آب و فاضلاب برای کاهش نشت می‌شود، بدون اینکه نرخ بازگشت سرمایه مثبتی وجود داشته باشد. سطح نشت اقتصادی، سطحی است که در آن صرفه‌جویی صورت گرفته مساوی یا بیشتر از هزینه‌های کنترل نشت است. با توجه به این مطالب ، یک راه برای تعیین سطح واقعی و منطقی کنترل نشت، استفاده از فاکتوری است که نشت سالانه اجتناب پذیر را به یک نسبت ثابت افزایش می‌دهد، سطح کنترل نشت منتج شده به این شیوه، همان نشت سالانه اقتصادی است که با رابطه زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$EARL = UARL \times Sf \qquad (۱۸)$$

$EARL$ نشت سالانه اقتصادی، $UARL$ نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر و $Sf$ فاکتور تبدیل است. انتخاب مقدار فاکتورSf دلخواه بوده و به طور معمول بر پایه تجربه های به دست آمده از آنالیز مناطق مختلف بسیاری با مشخصات مشابه منطقه با مطالعه به دست می‌آید. به عنوان یک تخمین اولیه، فاکتور برابر ۲ می‌تواند در مناطقی با مدیریت بسیار خوب، منابع مالی کافی و سطح نشت پایین استفاده شود برای مناطق با سطح درآمد پایین، سطح نشت بالا و مدیریت ضعیف، فاکتور استفاده شده برای محاسبه سطح نشت اقتصادی می‌تواند بیشتر از ۱۰ برابر حداقل سطح نشت سالانه اجتناب ناپذیر باشد.

شاخص نشت اقتصادی[۱۶] همانند شاخص نشت زیربنا است، با این تفاوت که عامل نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر به وسیله نشت سالانه اقتصادی جایگزین و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$ELI = CARL / EARL \qquad (۱۹)$$

$ELI$ شاخص نشت اقتصادی، $CARL$ نشت سالانه موجود و $EARL$ نشت سالانه اقتصادی است.

شاخص مذکور برای متخصصان به اندازه کافی واضح است. اما برای افراد غیرمتخصص پیشنهاد می‌شود که از اصطلاح کارایی اقتصادی شبکه[۱۷] که به صورت درصد بیان می‌شود و دارای مفهوم قابل فهم‌تری برای عموم است، استفاده شود:

$$ENE\ (\%) = (1 / ELI) \times 100 \qquad (۲۰)$$

که در آن $ENE$ کارایی اقتصادی شبکه و $ELI$ شاخص نشت اقتصادی است.

در این تحقیق، یک نرم‌افزار کامپیوتری به زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک که قادر به محاسبه هدررفت آب و نشت شبکه‌های توزیع آب به دو روش بالانس سالانه آب و آنالیز جریان شبانه است و همچنین می‌تواند با استفاده از داده‌های واقعی و تخمینی مؤلفه‌های اصلی نشت از جمله نشت زمینه، نشت ناشی از شکستگی‌های گزارش شده و شکستگی‌های گزارش نشده را محاسبه کند ارائه شده است. از دیگر توانایی‌های نرم‌افزار مذکور می‌توان به محاسبه شاخص‌های عملکرد نشت اشاره کرد.

## ارزیابی مدل

در این بخش عملکرد نرم‌افزار تهیه شده در این تحقیق برای محاسبه هدررفت آب و مؤلفه‌های آن و شاخص‌های عملکرد نشت با استفاده از داده‌های یک پایلوت مطالعاتی واقعی ارزیابی می شود. بر روی خط اصلی ۳۰۰ میلی‌متری فولادی شهر مورد مطالعه، یک دستگاه جریان سنج ثبات به مدت دو شبانه روز و به فواصل زمانی ۵ و ۱۵ دقیقه اقدام به اندازه‌گیری و ثبت دبی ورودی به شبکه کرده است. در بین ساعات ۳ تا ۴ صبح دبی شبکه به حداقل مقدار خود که ۶۲/۷۲ لیتر بر ثانیه است، می‌رسد که به عنوان جریان حداقل شبانه معرفی می‌شود. فشار شبکه در زمان جریان حداقل شبانه ۵۷/۸۴ متر است، که بیشترین فشار سیستم در طول شبانه روز است. همچنین فشار متوسط سیستم در شبانه روز ۵۴/۳۱ متر است. با فرض جمعیت فعال در شب به میزان ۶٪ و سرانه مصرف ۱۰ لیتر در ساعت برای هر نفر در طول شب [۱۶]، مصرف شبانه خانگی ۴/۳۷ لیتر بر ثانیه تخمین زده شده است. مصرف غیرخانگی کوچک در شهر وجود نداشته و مصارف شبانه بزرگ نیز در مجموع ۰/۵۴۶ لیتر در ثانیه بوده که با پیمایش محلی مشخص شده است. در نهایت کل مصرف شبانه، ۴/۹۲ لیتر در ثانیه به دست می‌آید. محاسبه نشت به وسیله آنالیز جریان شبانه با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری دبی شبکه، داده‌های اصلاح شده فشار به وسیله مدل تحلیل هیدرولیکی و مصرف معقول شبانه محاسبه شده انجام می‌گیرد. از جمع این مقادیر میزان نشت شبکه در طی یک شبانه روز برابر ۴۶۳۸/۳۸ مترمکعب و در نهایت حجم کل نشت در طی سال برابر ۱۶۹۳۰۱۰ متر مکعب برآورد شده است. شکل (۳) نیز نمودار فشار و دبی کل شبکه و

www.SID.ir

Archive of SID


همچنین اجزای مستقل و وابسته به فشار آن در هر ساعت نشان داده شده است.

## مدیریت نشت به وسیله تعدیل فشار

برای انجام مدیریت نشت در شبکه مطالعاتی، گزینه‌ای شامل نصب شش عدد شیر فشارشکن برای کاهش فشار شبکه به کمترین حد مجاز (۲۰متر) در ساعت ۱۱ که سیستم به علت مصرف زیاد، کمترین فشار را دارد، پیشنهاد شد. پس از کاهش فشار با استفاده از ضریب C محاسبه شده برای شبکه و نتایج تحلیل هیدرولیکی شبکه پس از نصب فشارشکن، مصرف وابسته به فشار یا همان نشت هر گره محاسبه می‌شود. سپس از مجموع نشت گره‌ها در هر ساعت، نشت متوسط سیستم در آن ساعت خاص به دست می‌آید. در جدول (۱) نشت و فشار شبکه در هر ساعت، قبل و بعد از کاهش فشار مشاهده می‌شود. میزان کاهش نشت ناشی از تعدیل فشار در شبکه مورد مطالعه ۵۸۴۷۰۶ مترمکعب در سال است که معادل ۶۵٪ کاهش نسبت به وضعیت قبل از مدیریت نشت را نشان می‌دهد. در شکل۴، نمودار نشت و فشار، در هر ساعت قبل و بعد از کاهش فشار مشاهده می‌شود. از این نمودار اثر کنترل فشار بر کاهش نشت به طور کامل مشخص است. شکل (۵) نمودار، فشار و دبی مستقل از فشار (مصرف) شبکه مورد مطالعه را در هر ساعت قبل و بعد از کاهش فشار نمایش می‌دهد. در این شکل منحنی‌های مصرف قبل و بعد از کاهش فشار شبکه به طور دقیق منطبق بر هم هستند. این موضوع نشان دهنده این مطلب است که کاهش فشار، اثری بر مصارف حجمی (مستقل از فشار) نداشته است. در شکل (۶) نیز نمودار فشار و دبی کل شبکه در هر ساعت قبل و بعد از کاهش فشار نشان داده شده است. در این نمودار می‌توان مشاهده کرد که کاهش نشت به دلیل اقدام های کنترل فشار در شبکه، میزان دبی کل ورودی به سیستم بعد از کاهش فشار را کاهش داده است.

شکل (۷) نمودار هزینه‌های آب تلف شده، هزینه‌های کنترل نشت و هزینه‌های کل را در سال ۱۳۸۲ در شبکه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود، با افزایش هزینه‌های کنترل نشت، حجم آب صرفه جویی شده بیشتر شده و با افزایش میزان نشت، هزینه آب هدر رفته افزایش می‌یابد.

در این شبکه کنترل نشت تنها تا سطح ۶۷۰ هزار مترمکعب در سال از نظر اقتصادی با صرفه است و صرف هزینه‌های بیشتر برای مقابله با نشت در این شبکه اقتصادی نیست.

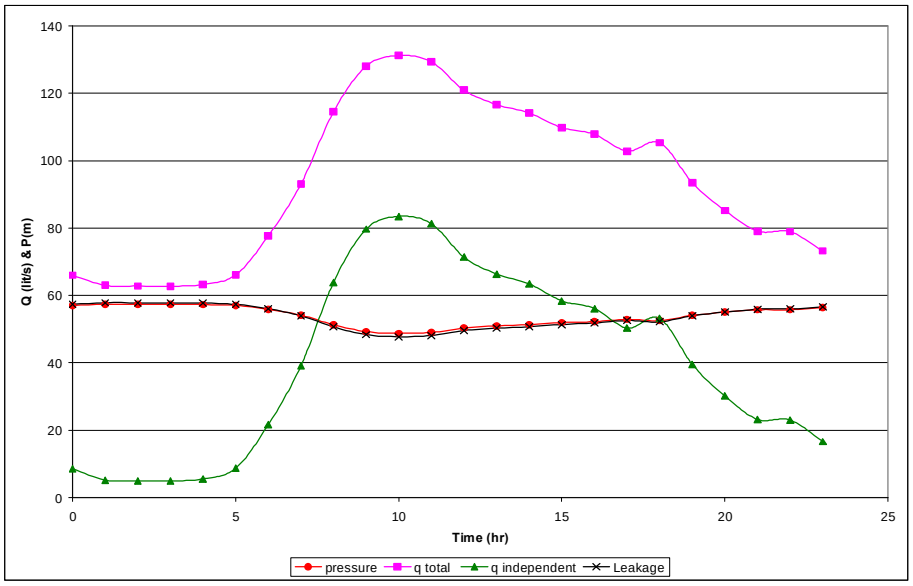
شکل (۸) نشان دهنده پنجره مربوط به شاخص‌های عملکرد محاسبه شده با استفاده از اطلاعات روش آنالیز جریان شبانه توسط نرم‌افزارتهیه شده در این تحقیق است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، آب تلف شده کل سیستم برابر ۱۶۹۳۰۱۰ مترمکعب در سال است. نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر شبکه بر اساس روابط (۱۵) یا (۱۶) تنها معادل ۱۱۳۲۲۹ متر مکعب در سال معادل با ۵۴/۲۱ لیتر در هر انشعاب در هر روز می‌باشد که معادل ۶/۷٪ نشت کل است. این میزان نشان دهنده حداقل میزان نشتی است که بر اساس فشار متوسط، تعداد انشعاب‌ها و طول خطوط اصلی شبکه از نظر استانداردهای جهانی در بهترین شرایط مدیریتی و بهترین شرایط زیر بنائی می‌تواند در سیستم وجود داشته باشد و رسیدن به مقدار کمتر از آن از دیدگاه فنی و تکنیکی امکان پذیر نیست. پس حداکثر میزان نشت پتانسیل قابل بازیافت از دیدگاه فنی که می‌تواند با انجام اقدامات کنترل نشت به دست آید برابر ۱۵۷۹۷۸۱ مترمکعب در سال است. شاخص عملکرد زیرساخت شبکه ۱۴/۹۵ است، که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب شبکه از نظر نشت است. این عدد بیان می‌کند که نشت شبکه مورد مطالعه حدوداً ۱۵ برابر کمترین میزان نشتی است که در سیستم در حالت شرایط ایده آل از لحاظ فنی می‌تواند وجود داشته باشد. بنابراین از دیدگاه فنی، مدیریت نشت شبکه ای در اولویت اقدامات کنترل نشت است که شاخص عملکرد زیر ساخت بزرگ‌تری داشته باشد. برای مثال شاخص نشت زیر ساخت در شهر دوشنبه کشور تاجیکستان، ۲۷۷/۹ در بریستول انگلستان ۱/۹ و در مکه عربستان سعودی ۸۷/۹ گزارش شده است [۱۴].

به وسیله شاخص (ILI) از لحاظ اقتصادی نمی‌توان اولویت کنترل نشت را مشخص کرد. با فرض ضریب اقتصادی برابر دو برای شبکه، شاخص عملکرد اقتصادی شبکه ۷/۴۷ است. همان گونه که ذکر شد از دیدگاه تئوری این امکان وجود دارد که حدود ۱۵۷۹۷۸۱ مترمکعب از نشت سیستم را کاهش داد، اما از دیدگاه اقتصادی رسیدن به این حجم از کاهش تلفات بستگی به توانایی های اقتصادی شرکت آب و فاضلاب منطقه مورد مطالعه دارد. به طور مثال برای شبکه مورد مطالعه در این تحقیق با فرض امکانات مالی نسبتاً مناسب و انتخاب ضریب دو به عنوان ضریب اقتصادی، میزان صرفه جویی پتانسیل از دیدگاه اقتصادی ۱۴۶۶۵۵۲ مترمکعب در سال است. استفاده

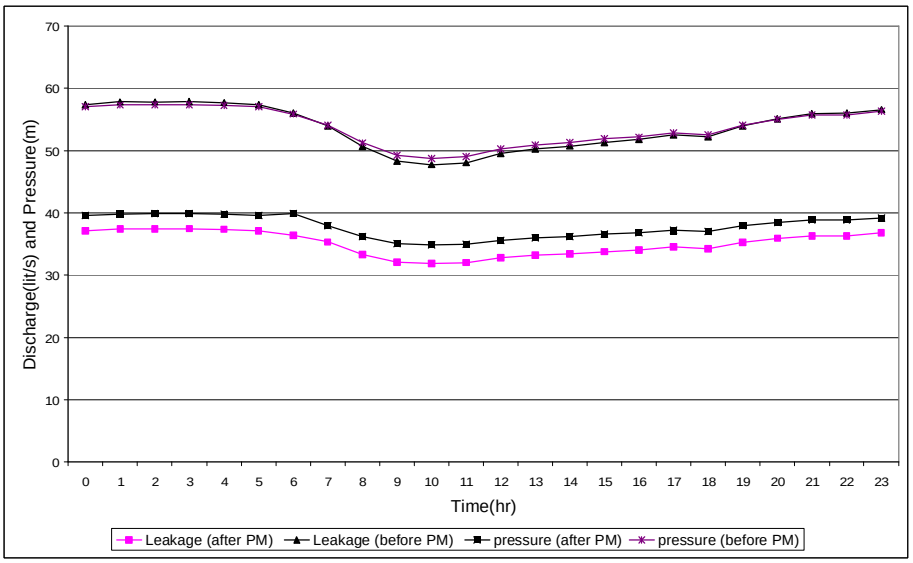
www.SID.ir

Archive of SID


از این شاخص می‌تواند اولویت کنترل نشت در شبکه‌های مختلف را از دیدگاه اقتصادی مشخص نماید. به طور حتم سیستمی که شاخص عملکرد اقتصادی بزرگ‌تری دارد از دیدگاه اقتصادی اولویت بالاتری جهت کنترل نشت دارد. کارایی اقتصادی این شبکه ۱۳/۳۳ درصد است که نشان دهنده این موضوع است که شبکه مورد مطالعه از دیدگاه اقتصادی تنها حدود ۱۳ درصد در کنترل نشت موفق بوده و این امکان وجود دارد تا با انجام فعالیت های منسجم تر مدیریت نشت، ۸۳ درصد دیگر در میزان نشت صرفه جویی کرد. با فرض اینکه وضعیت اقتصادی شبکه‌ای دیگر که نشت و سایر مشخصات اصلی آن به طور دقیق مشابه شبکه مورد مطالعه است، در سطح پایین‌تری نسبت به این شبکه قرار داشته باشد و فاکتور اقتصادی (Sf) حدود ۱۰ برای آن در نظر گرفته شود، محاسبات نشان می‌دهد که شاخص اقتصادی نشت شبکه مذکور حدود عدد ۱/۵ خواهد بود و کارایی اقتصادی آن حدود ۶۶/۸۸٪ است. به روشنی قابل تشخیص است که با وجود اینکه هر دو شبکه نشت برابری دارند، اما کنترل نشت شبکه مورد مطالعه نسبت به شبکه دوم در اولویت قرار دارد.




**شکل ۳ : نمودار فشار، دبی کل، مستقل و وابسته به فشار شبکه در شبانه روز.**



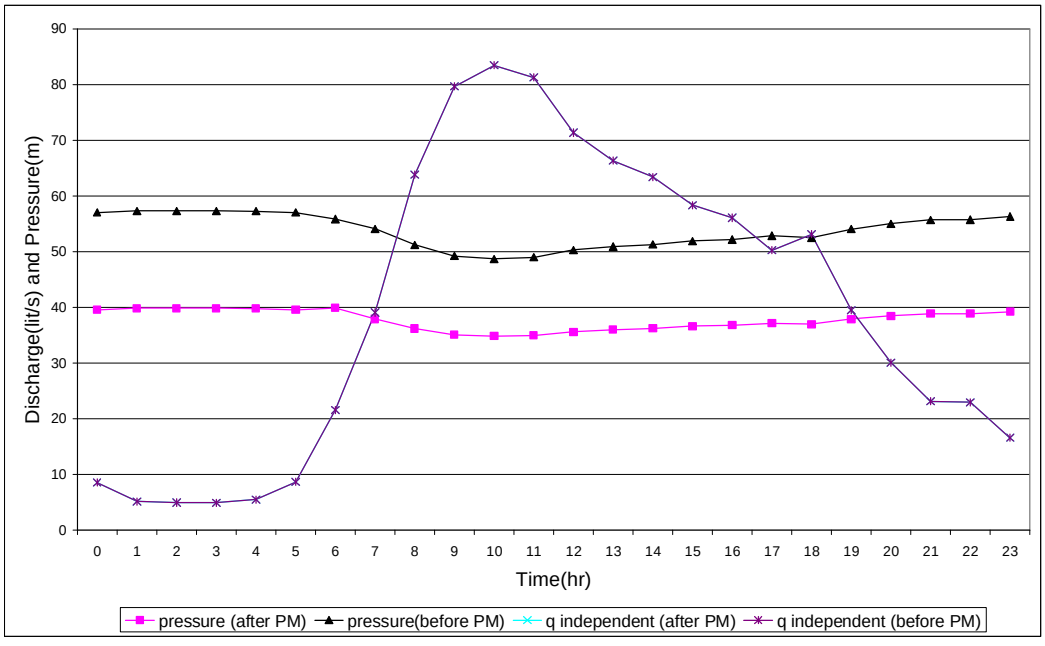

**شکل ۴ : نمودار نشت و فشار شبکه در هر ساعت، قبل و بعد از تعدیل فشار** (PM)

www.SID.ir

Archive of SID


جدول۱: نشت شبکه در هر ساعت، قبل و بعد از تعدیل فشار (PM).

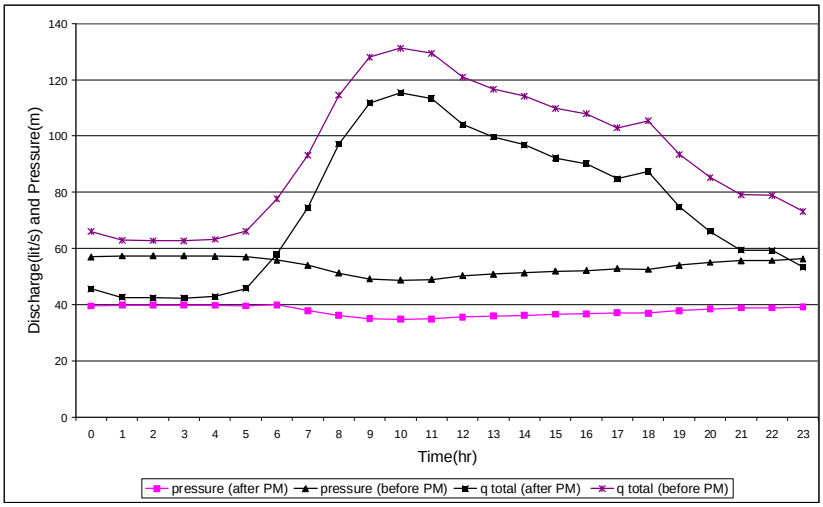
| Time (hr) | Leakage (after PM) (lit/sec) | Leakage (before PM) (lit/sec) | Pressure (after PM) (m) | Pressure (before PM) (m) |
|---|---|---|---|---|
| | 37.10 | 57.35 | 39.57 | 57.03 |
| 1 | 37.45 | 57.82 | 39.84 | 57.31 |
| 2 | 37.44 | 57.81 | 39.86 | 57.33 |
| 3 | 37.46 | 57.83 | 39.86 | 57.33 |
| 4 | 37.37 | 57.71 | 39.80 | 57.28 |
| 5 | 37.12 | 57.32 | 39.56 | 57.02 |
| 6 | 36.41 | 56.04 | 39.94 | 55.86 |
| 7 | 35.32 | 53.97 | 37.93 | 54.10 |
| 8 | 33.31 | 50.68 | 36.21 | 51.25 |
| 9 | 32.07 | 48.33 | 35.08 | 49.22 |
| 10 | 31.90 | 47.74 | 34.83 | 48.71 |
| 11 | 32.03 | 48.06 | 34.98 | 49.00 |
| 12 | 32.78 | 49.53 | 35.61 | 50.30 |
| 13 | 33.25 | 50.28 | 36.01 | 50.93 |
| 14 | 33.41 | 50.72 | 36.24 | 51.30 |
| 15 | 33.78 | 51.34 | 36.62 | 51.91 |
| 16 | 34.02 | 51.79 | 36.78 | 52.18 |
| 17 | 34.54 | 52.55 | 37.19 | 52.86 |
| 18 | 34.21 | 52.17 | 36.99 | 52.53 |
| 19 | 35.26 | 53.99 | 37.91 | 54.05 |
| 20 | 35.93 | 55.07 | 38.48 | 55.03 |
| 21 | 36.30 | 55.88 | 38.86 | 55.71 |
| 22 | 36.31 | 55.98 | 38.87 | 55.73 |
| 23 | 36.79 | 56.58 | 39.20 | 56.33 |



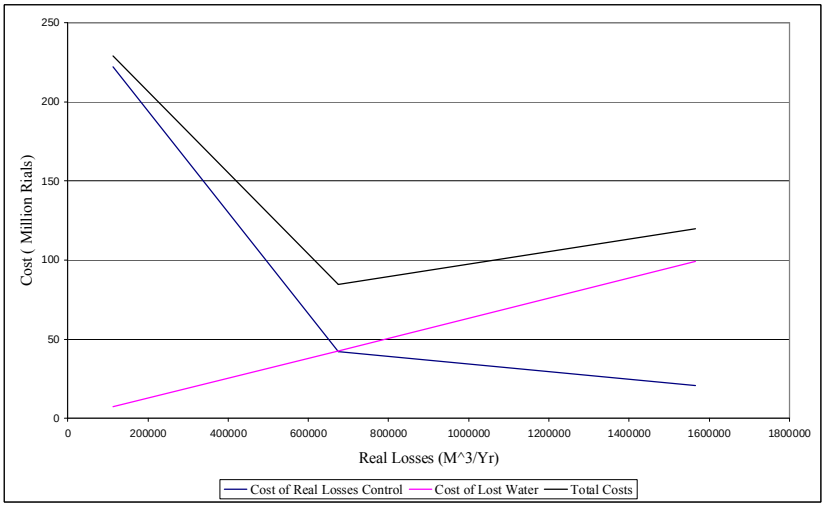

شکل ۵ : نمودار فشار و دبی مستقل از فشار شبکه در هر ساعت قبل و بعد از تعدیل فشار (PM).

www.SID.ir

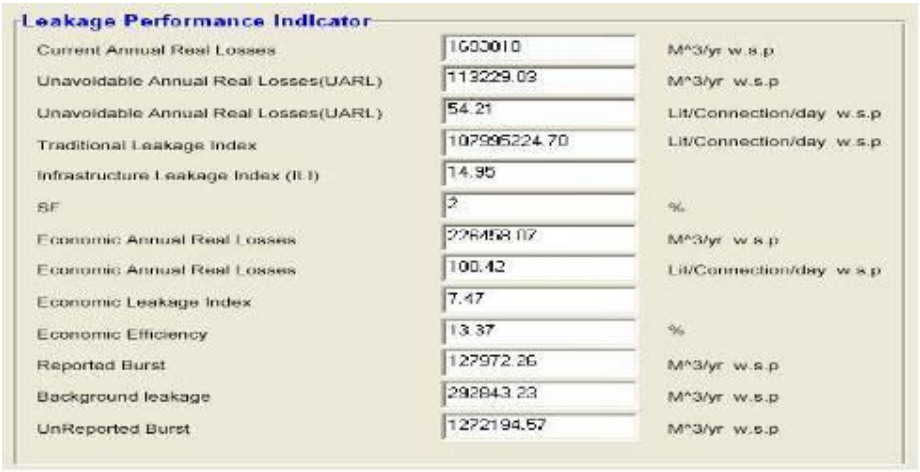
Archive of SID


**شکل ۶ : نمودار فشار و دبی کل شبکه در هر ساعت قبل و بعد از تعدیل فشار (PM).**




**شکل ۷: نمودار هزینه‌های آب هدررفته، هزینه‌های کنترل نشت و هزینه‌های کل در سال ۱۳۸۲ در شبکه مطالعاتی.**




**شکل ۸ : پنجره مربوط به محاسبه شاخص‌های عملکرد با استفاده از اطلاعات بالانس سالانه آب.**

www.SID.ir

Archive of SID


## نتیجه‌گیری

شناسایی نشت لوله‌ها در شبکه‌های توزیع آب نقش قابل توجهی در مدیریت نشت در شبکه‌ها دارد. در این تحقیق مدل جدیدی برای محاسبه نشت اجزای شبکه‌های توزیع آب ارائه شده است. با ترکیب نرم‌افزار تهیه شده و مدل‌های تحلیل هیدرولیکی می‌توان به درستی نسبت به شبیه سازی سیستم و برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی شبکه اقدام و میزان نشت در هر گره و لوله را به طور واقعی مدل‌سازی و کالیبره کرد. کارائی بیشتر این تحقیقات در گام‌های آتی بسیار مفید خواهد بود.

ایـن تحقیـق همچنـین نشـان مـی‌دهـد اسـتفاده از شاخص‌های عملکرد، نقش بسیار مهمـی در زمینـه مـدیریت نشت و تعیین اولویت های مبارزه با تلفات آب و مؤلفه‌های آن داشته و می‌تواند باعث جهت دهی مناسـب در صـرف هزینـه محدود شرکت‌های آب و فاضلاب در این امر شود.

از طرفی، این شاخص‌ها میزان موفقیت اقدام‌های کنترل نشت را درشبکه مورد بررسی مشخص می‌کنند. مسلماً در این زمینه استفاده از شاخص نشت زیر ساخت (ILI) که بیشترین میزان فاکتور های مؤثر بر نشت را در خود جای داده است به عنوان کامل‌ترین و دقیق ترین شاخص عملکرد نشت در اولویت قرار دارد. با توجه به جدید بودن تحقیقات انجام گرفته در این زمینه، در انجام مطالعات میدانی و اصلاح روابط موجود با شریط کشورمان برای حصول کارآئی بیشتر این تحقیقات در گام‌های آتی بسیار مفید خواهد بود.

## مراجع

1 - Farley, M. and Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*, IWA Publishing.

2 - Thornton, J. (2002). *Water losses manual*, McGraw Hill.

3 - Tabesh, M. (1998). *Implications of the pressure dependency of outflows on data management, mathematical modelling and reliability assessment of water distribution systems*, Ph.D. Thesis, University of Liverpool, UK.

4 - Tanyimboh, T. T., Tabesh, M. and Burrows, R. (2001). "An appraisal of the source head method for calculating the reliability of water distribution networks." *ASCE J Water Resources Planning and Management*, Vol. 127, No. 4, PP. 206-213.

5 - Tabesh, M., Tanyimboh, T. T. and Burrows, R. (2002). "Head driven simulation of water supply networks." *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, Vol. 15, No. 1, PP. 11-22.

6 - Burrows, R., Mulreid, G. and Hayuti, M. (2003). "Introduction of a fully dynamic representation of leakage into network modelling studies using EPANET." *In: Maksimovic, Butler & Memon (eds) Proceedings of the international conference on advances in water supply management*, Swets & Zeitlinger, Lisses, PP. 109-118.

7 - Lambert, A. (1997). "Pressure management / leakage relationships: theory, concepts and practical applications." *In: Proceedings of minimizing leakage in water supply / distribution systems,* IQPC Seminar, London, April.

8 - Germanopoulos, G. (1985). "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models", *Civil Engineering Systems*, Vol. 2, September, PP. 171-179.

9 - Vela, A., Perez, R. and Espert, V. (1991). "Incorporation of leakage in the mathematical model of a water distribution network." *In: Proceedings of the 2nd international conference on computing methods in water resources,* Computational Mechanics Publication, PP. 245-257.

10 - Araujo, L. S., Coelho, S. T. and Ramos, H. M. (2003). "Estimation of distributed pressure-dependent leakage and consumer demand in water supply networks." *In: Maksimovic, Butler & Memon (eds) The International Conference on Advances in Water Supply Management,* Swets & Zeitlinger, Lisses; PP. 119 128.

11 - Tabesh, M. and Delavar, M. R. (2003). "Application of integrated GIS and hydraulic models for unaccounted for water studies in water distribution systems." *In: Maksimovic, Butler and Memon (eds) Proceedings of the international conference on advances in water supply management*, Swets & Zeitlinger, Lisses, PP. 129-135.

www.SID.ir

Archive of SID


12 - Asadiyani Yekta, A. H. (2004). *A software tool to calculate unaccounted for water in water distribution networks in conjunction with hydraulic and GIS models*, MSc. Theses, Civil Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran, (in Farsi).

13 - Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M. and Weimer, D. (2000). "A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems." *International Water Data Comparisons Ltd, AWWA North American Representative To Water Losses Task Force, Tokyo Metropolitan Waterworks,* Japan, Neckarwerke Stuttgart AG, Germany.

14 - Liemberger, R. (2002). "Do you know how misleading the use of wrong performance." *In: Proceedings of the IWA Managing Leakage Conference*, Cyprus, PP. 17.

15 - Lambert, A. O. and McKenzie, R. D. (2002). "Practical experience in using the infrastructure leakage index." *International Water Data Comparisons Ltd,* UK and Global Water Resources Ltd, Republic of South Africa.

16 - Mckenzie, R. D. (1999). *SANFLOW,User Guide*, South Africa Water Research Commission ,WRC Report TT 109/99.

## واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- International water association
2- Unaccounted for water
3- Non-Revenue water
4- Annual Water balance
5- Minimum night flow method
6- Burst and background burst estimation
7- Pressure dependence analysis
8- Demand driven simulation method
9- Emitter
10- Fixed and variable area discharge
11- The Basic Traditional Performance Indicators
12- Technical Indicator Real Losses
13- when system pressurised
14- Infrastructure Leakage Index
15- Current Annual Real Losses
16- Economic Leakage Index
17- Economic Network Efficiency

www.SID.ir