تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰
Volume 17, No. 1, Spring 2021 (IR-WRR)
۶۸-۱۰۱

مروری بر روش‌های تحلیل اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب

احسان یوسفی خوش‌قلب[۱]، ایمان مصلحی[۲]، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده[۳*] و هانی غمخوار[۴]

چکیده

نشت به عنوان یکی از ارکان اصلی هدررفتِ واقعی آب، جزو لاینفک شبکه‌های توزیع آب شهری محسوب می‌شود؛ به طوری که حتی بهترین شبکه‌های توزیع آب نیز از مقداری نشت در زیرساخت خود برخوردار هستند. جهت کاهش نشت و بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع آب، روش‌ها و رویکردهای متعددی ارائه شده است. اقدامات و استراتژی‌های اصلی جهت کنترل و مدیریت نشت توسط شرکت‌های آب و فاضلاب، شامل چهار استراتژی اصلی عملیات کنترل فعال نشت (نشت‌یابی فعال)، مدیریت حوادث و شکستگی‌ها (کنترل منفعل نشت)، مدیریت فشار و مدیریت دارایی (بازسازی و نوسازی زیرساخت شبکه) می‌باشد. سوال حائز اهمیت این است که، کدام یک از این رویکردها برای یک شبکه توزیع آب مناسب‌تر است؟ پاسخ این سؤال با انجام تحلیل سطح اقتصادی نشت به دست می‌آید. لذا مهمترین جزءِ یک استراتژی کنترل و مدیریت نشت، هدف‌گذاری آن بر اساس سطح اقتصادی نشت است. این مقاله، مروری جامع بر روش‌های برآورد سطح اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب، در قالب دوره‌های زمانی مختلف از جمله کوتاه‌مدت، بلندمدت و پایدار دارد. علاوه بر این رویکردی جهت تخمین سطح اقتصادی نشت با توجه به شرایط حاکم در هر شبکه و یا شرکت آب و فاضلاب مربوطه پیشنهاد می‌شود. نتایج این مقاله برای متخصصان و محققانِ حوزه آب بدون درآمد که در شبکه‌های توزیع آب فعالیت دارند مرجعی مفید و کاربردی محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: سطح اقتصادی نشت، مدیریت نشت، کنترل فعال نشت، مدیریت فشار، تحلیل اقتصادی، شبکه توزیع آب شهری.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۳/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۲۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی.
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خوارزمی.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

A Review on Methods for Economic Analysis of Leakage in Water Distribution Networks

E. Yousefi-Khoshqalb [1], I. Moslehi [2], M.R. Jalili-Ghazizadeh[3], and H. Ghamkhar [4]*

Abstract

As the main component of real water losses, leakage afflicts most water networks worldwide; even the best Water Distribution Networks (WDNs) have leakage in their network infrastructure. Several methods and strategies have been developed for leakage reduction and performance improvement in WDNs. In practice, leakage control strategies, including active leakage control, passive leakage control, pressure management, and infrastructure asset management, are performed by water utilities to reduce leakage. The main question is, which of these leakage management strategies are the most appropriate for a specific WDN? The answer to this question is obtained by analyzing the economic level of leakage (ELL). In fact, the essential component of a leakage control strategy is that its target is set in terms of the economic level of leakage (ELL). This paper provides a comprehensive review of the estimation of the ELL at different time frames, including short-run, long-run, and sustainable in WDNs. In addition, a procedure to estimate the ELL is proposed according to the conditions in each network or the relevant water utilities. Results of this review could be a valuable reference resource for practitioners and researchers dealing with non-revenue water in WDNs.

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

Received: June 2, 2020
Accepted: April 10, 2021

1- M.Sc. in Civil Engineering, Tehran, Iran. Email: khoshqalb@gmail.com
2- Ph.D. Student in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: i_moslehi@sbu.ac.ir
3- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_jalili@sbu.ac.ir
4- M.Sc. Student in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran. Email: hani.ghamkhar@gmail.com
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.1.5.6

۱- مقدمه

از چالش‌های مهم شرکت‌های آب و فاضلاب، به خصوص در کشورهای در حال توسعه، سطح بالای آب بدون درآمد است که بخش اعظمی از آن را هدررفت آب تشکیل می‌دهد؛ هدررفت آب در شبکه‌های آب به دو صورت هدررفت ظاهری و هدررفت واقعی رخ می‌دهد. هدررفت واقعی به طور کلی ناشی از نشت در شبکه توزیع، خطوط انتقال و یا نشت و سرریز آب از مخازن ذخیره است (Karadirek et al., 2012). با این حال در غالب شبکه‌های توزیع آب شهری، حجم قابل توجهی از هدررفت واقعی را نشت از خطوط اصلی و انشعابات تشکیل می‌دهد، از این رو عمدتاً مطالعات مربوط به حوزه‌ی هدررفت واقعی، بر نشت از لوله‌ها و انشعابات و روش‌های کنترل آن متمرکز است. به طورکلی نشت در شبکه‌های توزیع به سه مؤلفه‌ی اصلی، یعنی: نشت‌های زمینه، نشت و شکستگی‌های گزارش‌شده و نشت و شکستگی‌های گزارش‌نشده طبقه‌بندی می‌شود، که اولین بار این تقسیم‌بندی در روش "تحلیل مؤلفه‌های نشت مبتنی بر مفهوم تخمین نشت زمینه و شکستگی‌ها[۱]" (BABE) معرفی شد (Lambert, 2002; Tabesh et al., 2009). این سه مؤلفه نشت در سه محل از هر شبکه توزیع آب ممکن است رخ دهد: ۱- خطوط اصلی شبکه توزیع؛ ۲- خطوط انشعاب و اتصالات شبکه و ۳- خطوط مشترکین بعد از کنتور (Wyatt, 2010). در غالب شبکه‌های توزیع آب، درصد نشت در انشعابات نسبت به خطوط اصلی بیشتر است؛ به جز شبکه‌هایی که تعداد انشعابات کمی دارند. ارزیابی و پایش نشت در شبکه‌های توزیع آب را می‌توان از طریق سه روش اصلی انجام داد؛ ۱- روش بالا به پایین یا جدول تعادل آبی[۲]؛ ۲- روش تحلیل مؤلفه‌های نشت[۳] که مبتنی بر مفهوم BABE است و ۳- روش پایین به بالا یا تحلیل جریان شبانه[۴] (Thornton et al., 2008; AL-Washali et al., 2016).

فعالیت‌های مرتبط با مدیریت هدررفت را می‌توان در قالب سه مرحله اصلی طبقه‌بندی نمود؛ ۱- ارزیابی و پایش هدررفت آب؛ ۲- هدف‌گذاری و برنامه‌ریزی اقدامات مؤثر و مقرون به‌صرفه و ۳- پیاده‌سازی و اجرای اقدامات واکنشی و فعال (AL-Washali et al., 2016). در یک طبقه‌بندی دیگر، روش‌های مرتبط با مدیریت نشت در سه دسته متفاوت طبقه‌بندی می‌شود: ۱- روش‌های ارزیابی نشت، جهت تعیین مقدار نشت؛ ۲- روش‌های کشف نشت، جهت شناسایی تعیین محل نشت و ۳- روش‌ها و مدل‌های کنترل نشت، جهت کنترل مؤثر سطح نشت موجود و سطح نشت در آینده (Puust et al., 2010). هر دو طبقه‌بندی ذکر شده، کنترل گام به گام نشت را نشان می‌دهد، که باید مدیریت و کنترل نشت در شبکه‌های توزیع آب به صورت پیوسته و تکراری انجام شود.

چهار راهکار و استراتژی اصلی مدیریت نشت تا به حال معرفی شده است؛ کنترل فعال نشت (یا عملیات نشت‌یابی فعال)، مدیریت فشار، مدیریت حوادث شبکه (یا سرعت و کیفیت تعمیرات[۵])، بازسازی و نوسازی شبکه (یا مدیریت دارایی‌ها)[۶] (Puust et al., 2010)، که می‌توان روش‌ها و مدل‌های کنترل نشت و شکستگی‌ها را از دیدگاه اجرایی به دو گروه اصلی نیز تقسیم نمود: ۱- روش‌های مدیریت منفعل (واکنشی) نشت[۷] (PLC) و روش‌های کنترل فعال (پیش‌گیرانه) نشت[۸] (ALC). در روش کنترل منفعل نشت، مدیریت حوادث و شکستگی‌ها در مواقعی مورد توجه قرار می‌گیرد که توسط مردم یا کارکنان شرکت اطلاعی مبنی بر وجود نشت یا شکستگی داده شود (Alkasseh et al., 2015). اما در کنترل فعال یا پیشگیرانه نشت، رویکردی مدیریتی نسبت به شناسایی نشت‌های گزارش‌نشده در شبکه‌های توزیع و شبکه خانگی مصرف‌کنندگان مورد توجه است (Pearson and Trow, 2005).

در هر شبکه توزیع آب، سطحی اقتصادی از نشت در محدوده بین هدررفت واقعی سالانه موجود[۹] (CARL) و هدررفت اجتناب‌ناپذیر سالانه[۱۰] (UARL) وجود دارد (Lambert and Lalonde, 2005). با در نظر گرفتن کل هزینه‌های عملیاتی سالانه (هزینه تلفات و نشت موجود آب به علاوه‌ی هزینه‌های کنترل فعال نشت)، در مقادیر مختلف نشت، می‌توان سطح اقتصادی نشت را تخمین زد (شکل ۱)؛ در این سطح از نشت، مجموع هزینه‌های عملیاتی یاد شده حداقل است و تعادل اقتصادی بین هزینه آب ناشی از نشت و هزینه استراتژی‌های مدیریت نشت وجود دارد. به همین علت، چهار راهکار و استراتژی اصلی مدیریت نشت یاد شده، جهت مدیریت اقتصادی نشت توصیه شده است (Lambert, 2002). بنابراین سطح اقتصادی نشت[۱۱] برای یک شبکه توزیع مورد مطالعه، زمانی حاصل می‌شود که چهار استراتژی مدیریت نشت به طور مؤثری جهت کاهش نشت به کار گرفته شود (شکل ۱) (Lambert and Lalonde, 2005; Smout et al., 2010). در این راستا سود حاصل از مدیریت نشت می‌تواند از طریق هزینه سرمایه‌گذاری[۱۲] (کاهش شکستگی‌ها و غیره) به هزینه‌های عملیاتی (حفظ سطحی از نشت) تبدیل شود (Crowder et al., 2012).

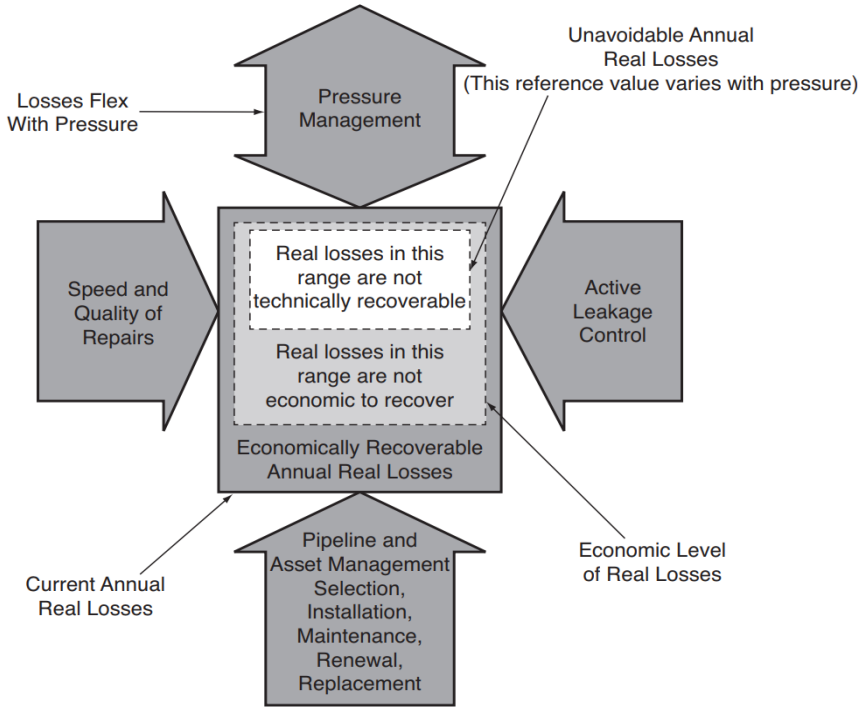


Fig. 1- The four components for leakage management approach (AWWA, 2016)

شکل ۱- چهار مؤلفه رویکرد مدیریت نشت (AWWA, 2016)

برای محاسبه سطح اقتصادی نشت، ابتدا باید نشت زمینه، نشت و شکستگی‌های گزارش‌شده، نشت و شکستگی‌های گزارش‌نشده، با استفاده از یکی از روش‌های ارزیابی نشت برآورد شود (Lambert and Fantozzi, 2005; Lambert and Lalonde, 2005; Pearson and Trow, 2005; Thornton et al., 2008). سطح اقتصادی نشت زمانی به دست می‌آید که هزینه حاشیه‌ای[۱۳] آب ذخیره شده (در طول فعالیت کاهش نشت)، برابر هزینه حاشیه‌ای استراتژی کاهش نشت شود. مطلوب‌ترین سطح اقتصادی نشت نیز، از ترکیب بهینه استراتژی‌های مدیریت نشت حاصل می‌شود. در تعریفی دیگر، سطح اقتصادی نشت مقداری از نشت است که با اختصاص هزینه بیشتر جهت کاهشِ نشت، نیاز به تامین آب از یک منبع جدید را برطرف سازد؛ یعنی هزینه کل جهت تامین آب به حداقل رسیده و شرکت‌ها را در بهترین سطح عملکردی خود قرار دهد (Stephens, 2003).

هدف این مقاله، نقد و بررسی مطالعاتِ مربوط به تخمین و تعیین سطح اقتصادی نشت در شبکه‌های توزیع آب تحتِ شرایط مختلف است؛ همچنین خلاصه‌ای از روش‌های تخمین و دست‌یابی به سطح اقتصادی نشت، به همراه نقاط ضعف و قوت هر یک ارائه شده است. در نهایت با توجه به شرایط مقتضی، که برای هر شرکت آب و فاضلاب ممکن است متفاوت باشد، راهکاری عملی توصیه می‌شود.

۲- پیشینه مطالعات اولیه در تعیین سطح اقتصادی نشت

اولین مطالعات مربوط به سطح اقتصادی نشت را می‌توان در مطالعات Gledhill (1957) و در ارتباط با عملیات نشت‌یابی اقتصادی مشاهده کرد. در دهه ۷۰ میلادی، تمرکز مطالعات، بر تشخیص نشت و برنامه‌ریزی جهت رفع نشت افزایش یافت، تا آنجا که Howe (1971) و Hudson (1978) بخشی از نشت شبکه را اجتناب‌ناپذیر اعلام نموده و تخمینی از این سطح نشت ارائه کردند. Wallace (1987) و Holtschulte and Laske (1989) نیز تخمینی از سطح نشت اجتناب‌ناپذیر ارائه کردند که نشان‌دهنده تأثیر شرایط زیربنایی بر نشت شبکه است. در دهه ۸۰ میلادی موضوع نشت به طور جدی‌تر مطرح شد؛ ضرورت اجرای برنامه‌های بلندمدت باعث شد که در گزارش شماره ۲۶ مرکز تحقیقات آب انگلستان (۱۹۸۰)، سود و هزینه حاصل از عملیات مختلف کنترل نشت، از جمله: کنترل فعال و منفعل نشت، عملیات نشت‌یابی منظم و اندازه‌گیری هدررفت با هم مقایسه شود. در این گزارش آمده است که: «اینکه خطوط شبکه و مخازن ذخیره هرگز نشت نکنند، فرضی دور از انتظار است و بدیهی است برای کنترل بهینه، باید قیدی اقتصادی برای هدررفت آب در شبکه وجود داشته باشد»؛ مشخص کردن این قید، نیازمند شناخت کافی از نشت، روش‌های تشخیص آن و برنامه‌ریزی مالی جهت رفع نشت است. مدیریت و برنامه‌ریزی مالی نیز با توجه به شرایط شرکت می‌تواند در

قالب زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت بررسی شود (UKWIR, 1994)؛ در جهت تحقق این هدف می‌توان به مطالعات Walski (1983)، Walski (1984)، Griffin et al. (1984) و Shore (1988) اشاره نمود (جدول ۱). با تمام تلاش‌هایی که در زمینه مدل‌سازی مبتنی بر هزینه شد، اما این مدل‌ها درک درستی از نشت موجود در شبکه ارائه نمی‌دادند و ممکن بود نتایج مدل‌سازی نیز تخمین درستی نداشته باشد. Lambert (1994) برای اولین بار روشی جهت ارزیابی مؤلفه‌های نشت و پارامترهای مؤثر بر آن ارائه داد که با نام تخمین نشت زمینه و نشت از شکستگی‌ها (BABE) منتشر شد. پس از این مطالعات، نهایتاً مرکز تحقیقات آب انگلستان، UKWIR (1994)، بر اساس مطالعات پیشین، ۹ جلد گزارش برای مدیریت نشت به صورت عملی و سیستماتیک تهیه کرد؛ در گزارش C برای اولین بار عنوان "سطح اقتصادی نشت" با مفهوم «سطحی از نشت که هزینه نهایی مدیریت و کنترل نشت برابر با هزینه نهایی آب به هدررفته از شبکه است» معرفی شد؛ این گزارش، کلید دستیابی به یک استراتژی مناسب را جمع‌آوری داده‌های واقعی و کافی معرفی کرد. این مطالعات در جدول ۱ با رعایت تواتر زمانی ذکر شده است.

مطالعاتی که در این بخش بررسی شد را می‌توان مهمترین عوامل شکل‌گیری سطح اقتصادی نشت دانست. تمامی روابط و مفاهیم توسعه داده شده در این مطالعات بر پایه روابط تجربی است، که سعی بر تخمین صحیحی از وضعیت موجود شبکه دارند. البته برخی از مفاهیم در برخی از شبکه‌ها و کشورها قابلیت استفاده ندارند. رابطه NFN اگرچه یک رابطه اساسی در تخمین جریان خالص شبانه (نشت) محسوب می‌شود، اما به دلیل مدل‌سازی این رابطه در کشور انگلستان و وابستگی به ضرایبی که به راحتی قابل دست‌یابی نیستند، در کشورهای در حال توسعه چندان کاربردی نبوده و تخمین صحیحی ارائه نمی‌دهد. همچنین تخمین صحیح مؤلفه‌های نشت، ساده نبوده و نیازمند درک صحیحی از ساختارِ زیربنایی شبکه است.

۳- پیشینه مطالعاتی تعیین سطح اقتصادی نشت در بریتانیا

صنعت آب در انگلستان و ولز خصوصی بوده و به گونه‌ای کنترل و مدیریت می‌شود که شبکه‌های آبرسانی به طوری کارآمد و مؤثر بهره‌برداری شوند.

Table 1- The initial studies for determining the economic level of leakage and its evolutionary time line

جدول ۱- پیشینه مطالعات اولیه تعیین سطح اقتصادی نشت و روند تکاملی آن

محقق(ان)	مطالعات صورت گرفته
Parry (1881)	– بررسی سود و هزینه پیش‌گیری هدررفت آب، از طریق بازرسی و ایجاد یک سیستم اندازه‌گیری هدررفت آب در لیورپول؛ که در کتاب "آب – جمع‌آوری و توزیع آن[۱۴]" به آن اشاره شده است. این کتاب در زمانی نوشته شد که اکثر بخش‌های شهر لندن عرضه نوبتی و ناقص آب را دریافت می‌کردند و اولویت آنان دستیابی به تأمین پایدار و ثابت آب بود.
Gledhill (1957)	– اولین مطالعات در زمینه عملیات نشت‌یابی به صورت اقتصادی و معرفی روابط نظری
Howe (1971)	– برآوردی مهندسی از میزان نشت اجتناب‌ناپذیر – مدلی پارامتری با نام «نقطه بازسازی اقتصادی[۱۵]» جهت تشخیص و رفع نشت – کاهش هزینه تولید و توزیع آب در برابر هزینه‌های تشخیص و تعمیر نشت معمول در آمریکا – پیشنهاد نقطه بازسازی اقتصادی، حدوداً ۳ برابر نشت اجتناب‌ناپذیر
Hudson (1978)	– بررسی سطح نشت اجتناب‌ناپذیر – پیشنهاد سطح نشت اجتناب‌ناپذیر، ۲/۳ تا ۶/۹ (مترمکعب در روز بر کیلومتر لوله)
Walski (1983)	– توسعه یک مدل مبتنی بر پارامتر برای تخمین هزینه‌های بلندمدت کاهش یا تعویق توسعه منابع عرضه
Walski (1984)	– بررسی فواید تشخیص و تعمیر نشت و بررسی توجیه اقتصادی در سرمایه‌گذاری‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت ○ ذخیره سرمایه‌ی بلندمدت، کاهش هزینه‌ها توسط تعمیر نشت ○ ذخیره سرمایه‌ی کوتاه‌مدت، بر اساس هزینه واحد پمپاژ آب و هزینه‌های نشت‌یابی ○ اجرای یک برنامه اقتصادی یک تا پنج سال زمان لازم دارد
Griffin et al. (1984)	– معرفی مدل‌های سود و هزینه جهت برنامه‌ریزی تشخیص و تعمیر نشت بر مبنای برنامه‌های کوتاه‌مدت در شرایط ناپایدار شبکه، و برنامه‌های بلندمدت پیوسته در شرایط پایدار شبکه

	– سود حاصل از این مدل در طول زمان و به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد – فقط بخشی از هزینه تعمیرات باید در مدل‌ها گنجانده شود؛ زیرا تشخیص نشت باعث می‌شود که تعمیرات نشت زودتر از قبل اتفاق افتد. – نسبت سود– هزینه اقدامات تشخیص نشت و تعمیر آن از ۰/۵ تا ۱۰ متغیر است.
Wallace (1987)	– مروری بر رابطه‌های نرخ ثابت نشت – نشت اجتناب‌ناپذیر موجود در بازه‌ای بین ۳/۴ تا ۶ (متر مکعب در روز بر کیلومتر)
Shore (1988)	– پیشنهاد هدف‌گذاری سطح نشت بر اساس یک رابطه سه بخشی برای هزینه کلی؛ طبق این رابطه، هزینه نشت با سطح نشت نسبت مستقیم دارد؛ هزینه تشخیص نشت با سطح نشت تناسب معکوس دارد و هزینه تعمیر، مستقل از سطح نشت است
Holtschulte and Laske (1989)	– بررسی سطحی از نشت برای انواع گوناگون لوله در انواع خاک – سطح نشت اجتناب‌ناپذیر، ۲/۴ (مترمکعب در روز بر کیلومتر)
Lambert (1994)	– ارزیابی مؤلفه‌های نشت توسط مفهوم "تخمین نشت زمینه و نشت از شکستگی‌ها" (BABE) – حجم سالانه نشت از مؤلفه‌های گوناگونی تشکیل می‌شود که به نرخ جریان نشت و زمان قبل از تعمیر نشت بستگی دارد. ○ شکستگی‌های گزارش‌شده: نرخ جریان بالا، به نسبت در کوتاه‌مدت ○ شکستگی‌های گزارش‌نشده: نرخ جریان متوسط، زمان نشت بستگی به عملیات نشت‌یابی شرکت دارد. تعداد شکستگی‌های گزارش‌شده (یا نشده) × متوسط نرخ جریان نشت × متوسط زمان نشت = حجم نشت ○ نشت زمینه (غیر قابل تشخیص): نرخ جریان پایین اما در طولانی مدت (رابطه تخمینی محاسبه نشت زمینه با توجه به شرایط کشور انگلستان) $NFN=[C1\times L/N+C2]\times PCF\times SCF+NFCUA\times SCF$ (۱) در این رابطه: NFN: جریان خالص شبانه زمینه (نشت زمینه واقعی)؛ $C1$: ضریب نشت زمینه در خطوط اصلی (لیتر/کیلومتر/ساعت)؛ L/N: میانگین طول خطوط اصلی بر تعداد انشعابات (متر)؛ $C2$: ضریب نشت زمینه در انشعابات (لیتر/ انشعاب/ ساعت)؛ PCF: فاکتور اصلاح فشار؛ SCF: فاکتور اصلاح فاصله نمونه‌گیری؛ $NFCUA$: ارزیابی مصرف شبانه مشترکین است.
UKWIR (1994)	– تنها یک رابطه میان فشار و نشت وجود ندارد– تا قبل از سال ۱۹۹۴ رابطه فشار و نشت بر اساس منحنی شاخص نشت صورت می‌گرفت.
May (1994)	– ارائه مفهوم "سطوح ثابت و متغیر نشت[۱۶]" (FAVAD)؛ نشت با فشار رابطه توانی دارد و توان این رابطه، توان رابطه فشار– نشت (N1) نامیده می‌شود. $L_1/L_0=(P_1/P_0)^{N1}$ (۲) که L_0میزان نشت آب قبل از اجرای مدیریت فشار ؛ L_1 میزان نشت آب پس از اجرای مدیریت فشار؛ P_0 متوسط فشار در نقطه میانگین ناحیه قبل از اجرای مدیریت فشار؛ P_1 متوسط فشار در نقطه میانگین ناحیه بعد از اجرای مدیریت فشار؛ N_1 از ۰/۵ تا ۱/۵ متغیر بوده و به جنس لوله و نوع شکست بستگی دارد؛ در سطوح ثابت نشت (سوراخ ناشی از خوردگی) برابر ۰/۵، و در سطوح متغیر نشت، که همراه با تغییر فشار، سطح نشت نیز تغییر می‌کند و برابر ۱/۵ است.
Lambert and Morrison (1996)	– تحلیل مؤلفه بر اساس مفهوم تخمین نشت زمینه و شکستگی‌ها (BABE) را تعریف نموده تا تحلیل‌های مالی، اقتصادی و مدیریت فشار را در نرم‌افزاری مخصوص برای کاربردهای عملیاتی پوشش دهند.
Lambert et al. (1999)	– معرفی شاخص زیربنایی نشت (ILI)[۱۷] که برابر است با نسبت نشت موجود در یک شبکه (CARL) به نشت اجتناب‌ناپذیر سالیانه (UARL)؛ – ارائه یک رابطه تجربی برای محاسبه نشت اجتناب‌ناپذیر، که در آن رابطه بین فشار و نشت، خطی درنظر گرفته شده است.

از الزامات کنترل‌کننده هر شرکت آبرسانی در انگلستان، تعیین سطح اقتصادی نشت بر مبنای یک دستورالعمل مشخص و کسب رضایت‌مندی عمومی است؛ دستورالعمل هدف‌گذاری نشت که در انگلستان مورد استفاده قرار گرفته است، مجموعه‌ای شامل سه گزارش است که در مارس ۲۰۰۲، توسط قانون‌گذاری آب انگلستان (Ofwat)، آژانس محیط‌زیست (EWA) و دپارتمان محیط‌زیست، غذا و امور روستایی (DEFRA)، منتشر شد. این دستورالعمل، اصول و قواعدی که شرکت‌ها باید در توسعه روش‌های تعیین سطح اقتصادی نشت درنظر بگیرند را ارائه می‌دهد (شکل ۲). روش پیشنهادی یک رویکرد هدف‌گذاری سطح نشت در شبکه‌های توزیع آب است که بر مبنای دو توصیه اصلی شکل گرفته است. ۱- تعیین سطح اقتصادی نشت با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی حداقل هزینه؛ و ۲- تعیین سطح اقتصادی نشت با استفاده از روش هزینه حاشیه‌ای؛ که برای روش هزینه حاشیه‌ای نیز دو روش A و B معرفی شده است (Tripartite Group, 2002).

در عمل انگلستان و ولز روش‌های مجزای خود را بر اساس اصول مندرج در این گزارش‌ها توسعه داده‌اند؛ و از مدل‌های نرم‌افزاری پیچیده برای انجام تحلیل سطح اقتصادی نشت و برنامه‌ریزی حداقل هزینه استفاده می‌کنند، که وابسته به داده‌های زیاد با قابلیت اطمینان بالا است. همچنین توصیه رویکرد برنامه‌ریزی حداقل هزینه به نوعی مخصوص کشور انگلستان است، زیرا مشخص شده که تقریباً تمام شرکت‌های آبرسانی در انگلستان و ولز یک تعادل شکننده در عرضه و تقاضای آب دارند. در نتیجه این امکان وجود دارد که سرمایه‌گذاری در منابع جدید آب را با راهکارهای کاهش نشت، به تعویق اندازند. در این شرایط، روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه، روشی است که تنها می‌تواند در تحلیل گزینه‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرد. در این گزارش‌ها روشی برای تعیین هزینه‌ها، مزایای اجتماعی و زیست‌محیطی مرتبط در تعیین سطح اقتصادی ارائه نشده و به جای آن تنها یک چارچوب کلی برای این هزینه‌ها پیشنهاد شده است. البته باید توجه داشت که شرکت‌های آبرسانی در انگلستان برای سال‌های متمادی عملیات نشت‌یابی فعال انجام داده‌اند، و به طورکل انباشتگی شکستگی‌های گزارش‌نشده در این شبکه‌ها وجود ندارد. علاوه بر این تقریباً تمام شبکه‌های آبرسانی در انگلستان از زیرساخت مناسب، به صورت نواحی ایزوله‌شده، بهره می‌برند.

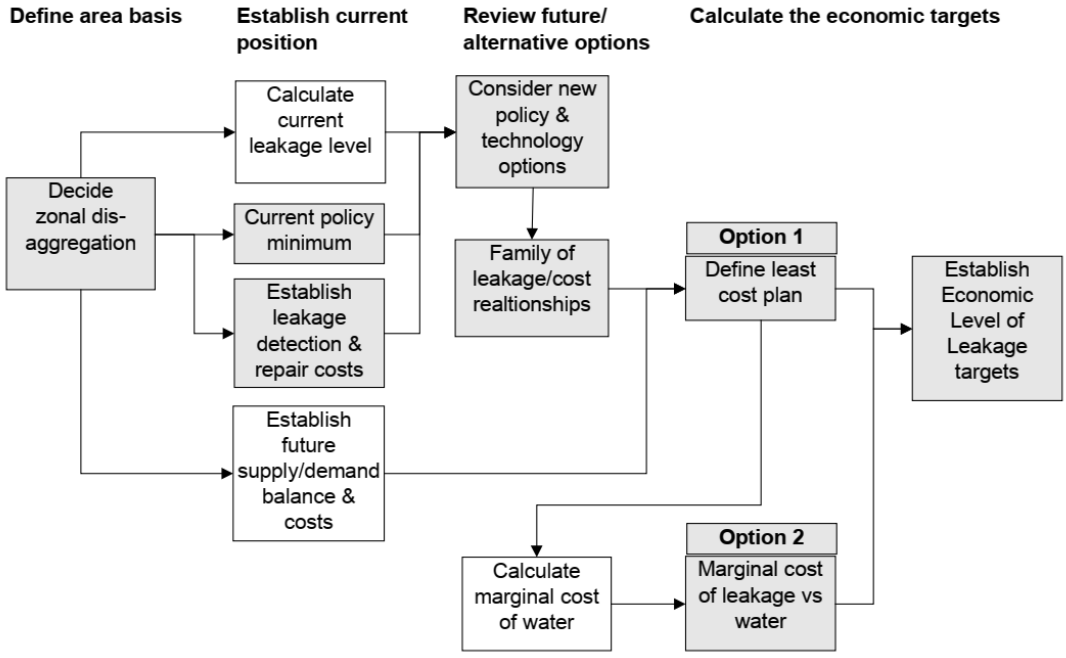


Fig. 2- Leakage target setting guideline with respect to economic, social and environmental costs (Tripartite (Group, 2002

شکل ۲- دستورالعمل هدف‌گذاری نشت با درنظر گرفتن هزینه‌های اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی (Tripartite Group, 2002)

۴- پیشینه مطالعات انجام شده توسط گروه هدرفت آب- انجمن بین المللی آب

پس از تمام مطالعاتی که پیرامون مدیریت اقتصادی نشت در انگلستان انجام شد، اعضای گروه هدررفت انجمن بین‌المللی آب[۱۸] متوجه شدند که روش تعیین سطح اقتصادی نشت مورد استفاده در انگلستان را نمی‌توان بلافاصله برای بسیاری از شبکه‌های آبرسانی در خارج از انگلستان مورد استفاده قرار داد؛ زیرا اکثر شبکه‌ها در حالت پایدار نبوده و کنترل فعال نشت در این شبکه‌ها انجام نشده است، بنابراین تعداد زیادی شکستگی گزارش‌نشده در شبکه وجود دارد. به علاوه، معدود شرکت‌هایی نواحی ایزوله شده را در شبکه‌های خود پیاده‌سازی کرده‌اند. حاصل این نگاه به مسأله، توسعه یک روش سریع و کاربردی برای کمک به این شرکت‌ها به منظور برآورد سطح اقتصادی نشت بود؛ در این روش تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی[۱۹] با استفاده از نرخ افزایش نشت گزارش‌نشده (RR) انجام می‌گیرد و برای شرکت‌هایی در نقاط جهان پیشنهاد شد که فاقد زیرساخت مناسب بودند (Lambert and Fantozzi, 2005). گروه هدرفت آب همچنین تأثیر فعالیت‌های گوناگون بر سطح اقتصادی نشت را بررسی کرد که در جدول ۲ به جزییات آن اشاره شده است.

با بررسی تمام مطالعاتِ پایه، سطح اقتصادی نشت را می‌توان به سه دوره زمانی کوتاه‌مدت[۲۰]، بلندمدت[۲۱] و پایدار[۲۲] دسته‌بندی نمود؛ این دسته‌بندی بر اساس چهار استراتژی مدیریت نشت و با توجه به نوع سرمایه‌گذاری تعریف می‌شود. قبل از ارائه هر یک از روش‌های تعیین سطح اقتصادی نشت در این دوره‌ها، ابتدا باید مفاهیم دوره‌های زمانی که وابسته به مفاهیم هزینه است، بررسی شود. از این جهت در ادامه، ابتدا تئوری هزینه و مفاهیم مربوط به آن شرح داده می‌شود. سپس به بررسی شاخص‌های عملکردی و جایگاه مؤثر آن در تعیین سطح اقتصادی پرداخته می‌شود. و در انتها هر یک از روش‌ها بررسی شده و مطالعات مربوط به آن ارائه می‌شود.

۵- تئوری هزینه

ارزش‌گذاری مناسب برای آب تولیدی با توجه به شرایط هریک از شرکت‌های آب و فاضلاب و دوره زمانی متفاوت تعیین می‌شود. به طور کلی در اقتصاد، هزینه‌های کامل تولید آب به انواع هزینه‌های مرتبط با عرضه (هزینه‌های سرمایه‌ای و بهره‌برداری- نگهداری طرح‌ها)، هزینه فرصت (ارزش مصرف آب در موقعیت‌های مصرفی دیگر)، هزینه اقتصادی و هزینه محیط‌زیستی تفکیک می‌شود. برای بدست آوردن هزینه‌های تولید آب، نیاز است که در ابتدا تابع هزینه به‌دست آید تا رابطه بین هزینه و مقدار تولید مشخص شود.

Table 2- Studies by international water association-water loss task force
جدول ۲- مطالعات انجام شده توسط گروه هدرفت آب انجمن بین‌المللی آب

پژوهشگران	مطالعات صورت گرفته
Lambert et al. (1999)	– ارائه شیوه استاندارد محاسبه تعادل آبی (بالانسینگ) توسط IWA
Lambert (2002)	– ارائه شاخص عملکردی ارتقاء یافته جهت مقایسه نشت و روش‌های ارزیابی مدیریت نشت در شبکه‌های مختلف
Lambert and Lalonde (2005)	– توسعه روشی ساده برای تعیین تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی فعال با استفاده از نرخ افزایش نشت گزارش‌نشده (RR) و تعیین سطح اقتصادی نشت گزارش‌نشده بر آن اساس
Lambert and Fantozzi (2005)	– برآورد سطح اقتصادی نشت با استفاده از مفهوم تحلیل مؤلفه‌های نشت (BABE)
Pearson and Trow (2005)	– ارائه رویکردی گام به گام و کاربردی (شکل ۳)، جهت برآورد سطح اقتصادی نشت
Fantozzi and Lambert (2007)	– بررسی تأثیر مدیریت فشار بر سطح اقتصادی نشت و ارائه راهکار تجربی برای محاسبه آن با استفاده از رابطه فشار-نشت و فشار- شکستگی
Fanner et al. (2007)	– تعیین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت برای استراتژی‌های عملیات نشت‌یابی فعال، مدیریت فشار و سرعت- کیفیت تعمیرات با درنظر گرفتن حاشیه اطمینان – توسعه نرم‌افزار ELLCalc V2a که به محاسبه سطح اقتصادی نشت می‌پردازد
Trow and Pearson (2010)	– بررسی جنبه‌های اقتصادی، محیط زیستی، سیاسی و فنی بر هدررفت فیزیکی و هدررفت ظاهری آب

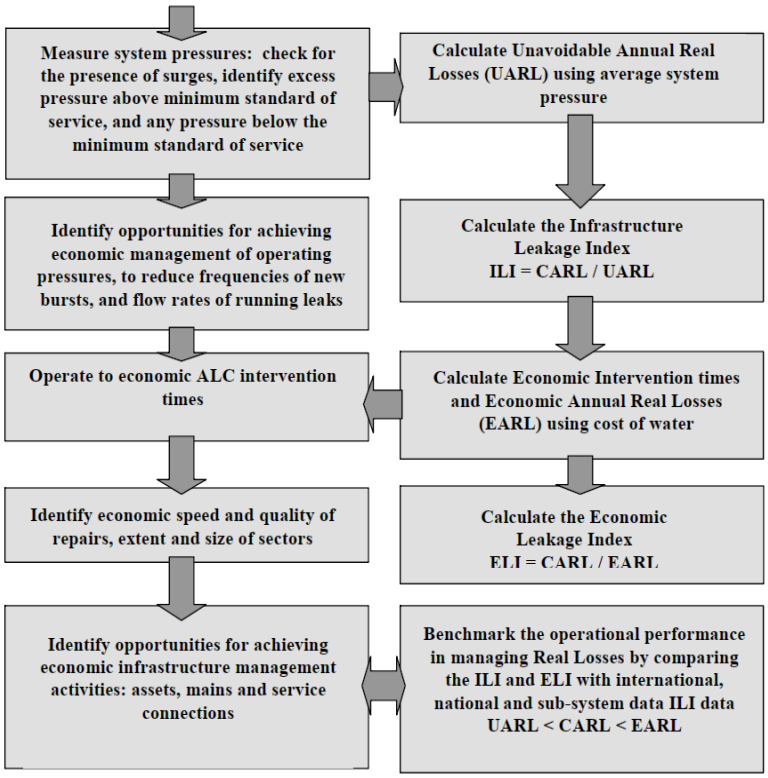


Fig. 3- Practical application to calculate ELL (Pearson and Trow, 2005)

شکل ۳- رویکرد گام به گام ارائه شده جهت محاسبه سطح اقتصادی نشت (Pearson and Trow, 2005)

تابع تولید و قیمت عوامل تولید که برای استفاده از آن‌ها پرداخت می‌شود، تابع هزینه شرکت را تشکیل می‌دهد. در شرایطی که شرکت آب و فاضلاب نتواند ظرفیت تولید را تغییر دهد، یا به عبارتی برخی از هزینه‌ها ثابت درنظر گرفته شده باشند، تابع هزینه کوتاه مدت، و در غیر این صورت تابع هزینه بلندمدت حاصل می‌شود (Khiabani et al., 2017).

۵-۱- تابع هزینه کوتاه‌مدت

در دوره زمانی کوتاه‌مدت سه هزینه دارای اهمیت است: هزینه ثابت، هزینه متغیر و هزینه کل. به کلیه‌ی تعهدات شرکت در رابطه با عوامل تولید ثابت، در دوره زمانی معین که به وسیله‌ی شرکت پرداخت می‌شود، هزینه ثابت می‌گویند. همچنین به کلیه هزینه‌های که با تغییر مقدار تولید، تغییر می‌کنند نیز هزینه متغیر می‌گویند. مجموعه این دو هزینه (هزینه ثابت و هزینه متغیر)، هزینه کل را بدست می‌دهد. حال با توجه به مفهوم هزینه کوتاه‌مدت می‌توان چهار نوع هزینه دیگر معرفی نمود. ۱- هزینه متوسط ثابت، که از تقسیم هزینه ثابت به مقدار تولید حاصل می‌شود؛ منحنی این هزینه نزولی بوده و با افزایش مقدار تولید، شیب آن کاهش می‌یابد؛ ۲- هزینه متوسط متغیر، که از تقسیم هزینه متغیر بر مقدار تولید بدست می‌آید؛ ۳- هزینه متوسط کل، که از تقسیم هزینه کل به مقدار تولید حاصل می‌شود و ۴- هزینه حاشیه‌ای (نهایی)، که از تغییرات هزینه کل در اثر یک واحد تولید اضافی حاصل می‌شود. در حقیقت هزینه حاشیه‌ای، مشتق تابع هزینه کل نسبت به تولید یا شیب منحنی هزینه کل در هر سطح تولید می‌باشد. منحنی هزینه حاشیه‌ای ابتدا نزولی و سپس صعودی است که از حداقل منحنی‌های هزینه متوسط متغیر و هزینه متوسط کل عبور می‌کند. یا به طور شفاف‌تر زمانی هزینه‌های متوسط متغیر و متوسط کل حداقل می‌شوند که هزینه حاشیه‌ای با آن‌ها برابر شود (Faraji, 1999).

۵-۲- تابع هزینه بلندمدت

برخلاف دوره زمانی کوتاه‌مدت که در آن برخی از نهاده‌ها ثابت هستند و به تبع هزینه‌های آن نیز ثابت می‌باشد، در دوره زمانی بلندمدت همه هزینه‌ها متغیر است و شرکت می‌تواند افزایش ظرفیت تولید ایجاد کند. لذا به دلیل متغیر بودن هزینه‌ها، شرکت آزاد است که اقتصادی‌ترین ترکیب عوامل تولید را اتخاذ نماید. یعنی منحنی هزینه کل آب در بلندمدت کمترین هزینه تولید در هر سطح معینی از تولید را نشان

می‌دهد. به عبارت دیگر، اگر شرکت بخواهد در بلند مدت به سطح مشخصی از تولید دست یابد، مناسب است مقیاسی از افزایش ظرفیت را در نظر بگیرد که در آن هزینه کل در کوتاه‌مدت با هزینه کل در بلندمدت برابر شود. منحنی هزینه متوسط بلندمدت نیز از اتصال نقاطی بر منحنی‌های هزینه متوسط کوتاه‌مدت بدست می‌آید که بیان‌کننده کمترین سطح معین از تولید هستند؛ لزوماً این نقاط، اکسترمم منحنی نیستند. در حقیقت یک منحنی هزینه متوسط کل کوتاه‌مدت فقط وقتی در نقطه اکسترمم‌اش با منحنی هزینه متوسط بلندمدت مماس است که هزینه متوسط کل بلندمدت حداقل باشد (Faraji, 1999).

در دوره زمانی کوتاه‌مدت مشاهده شد، زمانی که هزینه نهایی کمتر از هزینه متوسط باشد، با افزایش تولید هزینه متوسط کاهش می‌یابد و اگر هزینه نهایی بیش از هزینه متوسط باشد، در این صورت هزینه متوسط شروع به افزایش می‌کند. و در نقطه حداقل هزینه متوسط، هزینه متوسط با هزینه نهایی برابر می‌شود. حال زمانی هزینه نهایی کوتاه‌مدت با هزینه نهایی بلندمدت برابر می‌شود که هزینه متوسط کوتاه مدت با هزینه متوسط بلندمدت برابر باشد.

۵-۳- هزینه حاشیه‌ای (هزینه نهایی)

برای همه شرکت‌های آب، ارزش آب به هدررفته شامل هزینه‌های حاشیه‌ای تولید آب خواهد بود. هزینه‌های حاشیه‌ای تولید آب معمولاً شامل هزینه مواد شیمیایی و انرژی استفاده شده در تصفیه‌خانه، پمپاژ آب، و هرگونه هزینه‌های مرتبط با حجم آب خریداری‌شده یا استخراج‌شده از یک منبع آب است. اگر شرکت آب دارای تصفیه‌خانه‌های مختلف با هزینه‌های بهره‌برداری یا عملیاتی متفاوت باشد و آب حاصل از این تصفیه‌خانه‌ها به مناطق جداگانه از شبکه آب فرستاده می‌شود، بهتر است برای هر منطقه ارزش‌گذاری جداگانه آب هدررفته و سطوح اقتصادی نشت انجام گیرد. با این حال، اگر یک شرکت آب و فاضلاب دارای تعدادی تصفیه‌خانه مختلف باشد که یک شبکه یکپارچه را تغذیه کند، بالاترین هزینه حاشیه‌ای تولید آب، از بین این تصفیه‌خانه‌ها، به عنوان هزینه حاشیه‌ای تولید استفاده می‌شود؛ به این صورت شرکت می‌تواند مصرف آب را از این منبع گران و هزینه‌بر در صورت کاهش هدررفت آب کاهش دهد. قابل توجه است که هزینه‌های حاشیه‌ای تولید آب می‌توانند به صورت فصلی نیز تغییر کنند. علاوه بر هزینه‌های حاشیه‌ای تولید، اکثر شرکت‌های آب و فاضلاب هزینه‌های حاشیه‌ای توزیع آب نیز دارند؛ که باید در ارزش‌گذاری مقدار آب به هدررفته گنجانده شود. هزینه‌های حاشیه‌ای توزیع آب شامل هزینه انرژی ایستگاه‌های پمپاژ، هزینه مربوط به انرژی و مواد شیمیایی فرآیند تصفیه درون شبکه توزیع می‌شود. هزینه‌های حاشیه‌ای تولید و توزیع آب به عنوان هزینه‌های حاشیه‌ای کوتاه‌مدت شناخته می‌شود. چنانچه یک شرکت آب و فاضلاب دسترسی به منابع محدودی از آب برای تأمین تقاضاهای جدید داشته باشد، و این امر منجر به سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی برای ایجاد منابع آب جدید شود تا سرمایه‌گذاری به وسیله یک استراتژی مدیریت نشت به تعویق بیافتد، هزینه حاشیه‌ای این تعویق سرمایه نیز باید در ارزش‌گذاری آب به هدررفته گنجانده شود. ارزش هزینه حاشیه‌ای تعویق سرمایه‌گذاری، معمولاً به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در توسعه ظرفیت منبع جدید آب، بسیار بیشتر از مؤلفه‌های هزینه حاشیه‌ای تولید و توزیع آب است. مجموع هزینه‌های حاشیه‌ای تولید، توزیع و تعویق سرمایه، هزینه حاشیه‌ای بلندمدت را تشکیل می‌دهند. در برخی از کشورها نیز، قانون‌گذاران شرکت‌های آب و فاضلاب را ملزم می‌کنند تا هزینه‌های حاشیه‌ای زیست‌محیطی و اجتماعی را در ارزش‌گذاری آب به هدررفته درنظر بگیرند. بنابراین ارزش آب به هدر رفته در هر شبکه آب بسته به شرایط هر شرکت می‌تواند متغیر باشد. به همین دلیل، تحلیل سطح اقتصادی نشت مختص به هر شرکت آب و فاضلاب و شرایط حاکم بر آن است؛ یعنی ممکن است شرکت‌های آب و فاضلاب مجاور، به علت شرایط متفاوت سطوح کاملاً متفاوتی از سطح اقتصادی نشت را داشته باشند (Fanner et al., 2007).

۵-۴- هزینه حاشیه‌ای کوتاه مدت

هزینه حاشیه‌ای کوتاه‌مدت (SRMC)[۲۳] را می‌توان به صورت موقعیتی تعریف کرد که در آن یک یا چند متغیر ورودی برای تولید و تأمین آب، ثابت هستند (مانند ظرفیت مخزن و یا ظرفیت تصفیه‌خانه آب). بنابراین هزینه حاشیه‌ای کوتاه‌مدت تنها شامل هزینه‌های متغیر بهره‌برداری مانند هزینه‌های پمپاژ، هزینه‌های پرسنلی و هزینه مواد شیمیایی می‌باشند (هزینه‌های متغیر تولید و توزیع آب). در این شرایط، تنها فاکتورهایی که می‌توانند به سرعت تغییر کنند و بر سطح نشت تأثیر بگذارند، میانگین زمان تداوم نشت‌های گزارش‌شده (سرعت تعمیرات) و افزایش تواتر عملیات نشت‌یابی (نشت‌یابی فعال) برای یافتن نشت‌های گزارش‌نشده است. با این فرض، زمانی که هزینه حاشیه‌ای کوتاه‌مدت آب با هزینه حاشیه‌ای استراتژی‌های مدیریت نشت که نیاز به سرمایه‌گذاری ندارند مانند افزایش تواتر عملیات نشت‌یابی فعال، افزایش سرعت- کیفیت تعمیرات، و اجرای برخی از طرح‌های مدیریت فشار (با بازده در کوتاه‌مدت) برابر شود، سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت به دست می‌آید (Fanner et al., 2007).

۵-۵- هزینه حاشیه‌ای بلندمدت

هزینه حاشیه‌ای بلندمدت (LRMC)[۲۴] ، تمام هزینه‌های تأمین آب را متغیر فرض می‌کند؛ که شامل هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌ای می‌شود. مدت زمانی که طی آن هزینه‌های حاشیه‌ای محاسبه می‌شود، بستگی به دوره بازگشت سرمایه‌گذاری مورد نظر دارد. اگر این تعریف در رابطه با کاهش نشت درنظر گرفته شود، سرمایه‌گذاری روی استراتژی‌های مدیریت نشت نظیر مدیریت فشار، پهنه‌بندی ناحیه، بهبود سطح خدمات- که نیازمند پروژه‌های بازسازی و نوسازی است- بر روی سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت نیز تأثیر می‌گذارند؛ بنابراین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت، سودها و هزینه‌های مربوط به آن نیز می‌تواند با هزینه‌های سرمایه‌گذاری مقایسه شود. این هزینه‌های سرمایه‌گذاری گاهی اوقات هزینه‌های انتقالی نامیده می‌شوند، زیرا هزینه گذر از یک حالت پایدار به حالت پایدار دیگر را نشان می‌دهند (Fanner et al., 2007).

۵-۶- انواع تابع هزینه

تعیین الگوی مناسب برای تخمین تابع هزینه شرکت‌های آب و فاضلاب و شناسایی متغیرهای مورد نیاز برای تحلیل، اهمیت بسزایی دارد، و نیاز است که تابع هزینه منعطف و سازگار با ساختار هزینه شرکت‌های آب و فاضلاب بررسی شود. تابع هزینه تکنولوژی کاب- داگلاس[۲۵]، تابع هزینه تکنولوژی لئونتیف[۲۶]، تابع هزینه تکنولوژی خطی[۲۷]، تابع هزینه تکنولوژی دارای کشش جانشینی ثابت[۲۸] و تابع هزینه ترانسلوگ[۲۹] از انواع توابعی هستند که برای این هدف استفاده می‌شود. مطالعات گوناگونی به بررسی توابع هزینه و قیمت‌گذاری آب در شرکت‌های آب و فاضلاب در ایران پرداخته‌اند که می‌توان به مطالعات Tahamipour et al. (2017)، Sajadifar et al. (2017) و Fallahi et al. (2009) اشاره نمود.

۶- شاخص‌های عملکردی سطح نشت اقتصادی

شاخص‌های عملکرد[۳۰] برای ارزیابی شبکه‌های توزیع آب، مقایسه عملکرد شبکه‌ها با یکدیگر و یا تعیین یک هدف اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در زمینه‌ی کاهش نشت به‌کار می‌روند. در ادامه به بررسی شاخص نشت زیربنایی، فاکتور شرایط زیربنایی پرداخته می‌شود.

۶-۱- شاخص نشت زیربنایی

شاخص نشت زیربنایی (ILI) یک شاخص عملکردی برای ارزیابی نشت است که توسط انجمن بین‌المللی آب در سال ۲۰۰۰ توسعه و ارائه شد. این شاخصِ بدون بعد، نشان‌دهنده نسبت نشت سالانه موجود (CARL) به نشت سالانه اجتناب‌ناپذیر (UARL) است، که می‌تواند معیار ارزیابی و مقایسه عملکرد شبکه‌های توزیع آب با یکدیگر در زمینه مدیریت و کنترل نشت باشد. شبکه‌ای که به خوبی مدیریت و نگهداری شود، می‌تواند ILI برابر با یک داشته باشد. البته ILI یک شاخص عملکردی کاملاً فنی است و در آن ملاحظات اقتصادی در نظرگرفته نشده است.

$$ILI=CARL/UARL \qquad (۳)$$

CARL را می‌توان از طریق جدول موازنه سالانه و یا اندازه‌گیری جریان شبانه (روش دقیق‌ترِ موجود) محاسبه نمود. در روش اندازه‌گیری جریان شبانه، CARL اختلاف مصارف مجاز شبانه مشترکان (LNC)[۳۱] از جریان حداقل شبانه (MNF)[۳۲] است، که به عنوان جریان شبانه خالص (NNF)[۳۳] شناخته می‌شود. NNF عمدتاً شامل نشت از خطوط اصلی و خطوط انشعابات است، که از نشت‌های گزارش‌شده (شکستگی‌ها)، نشت‌های گزارش‌نشده و نشت زمینه تشکیل می‌شود؛ معمولاً بخش بزرگی از NNF مربوط به نشت زمینه است (Hamilton and McKenzie, 2014). UARL نیز توسط رابطه ۴ بدست می‌آید، که اولین بار توسط Lambert et al. (1999) و بر اساس تحقیقات بین‌المللی در چند کشور مختلف، با در نظر گرفتن شرایط زیربنایی و فرض نمودن رابطه خطی بین فشار و نشت ارائه شد؛ و البته توسط Thornton and Lambert (2005) تصحیح شد. در رابطه تصحیح شده (رابطه ۴)، تأثیر فشارهای مختلف و روابط جریان برای انواع نشت و جنس مختلف لوله‌ها، با اضافه کردن فاکتور تصحیح فشار Cp، در نظر گرفته شد (Lambert et al., 2014a; Lambert et al., 2014b).

$$UARL(m^3/year)=(6.57\times L_m+0.292\times N_c+9.13\times L_t)\times P\times C_p \qquad (۴)$$

در رابطه فوق: L_m طول لوله‌های اصلی شبکه (برحسب کیلومتر)، N_c تعداد انشعابات، L_t طول کل لوله‌های خصوصی انشعاب از محل انشعاب روی خط اصلی تا محل کنتور مشترک (بر حسب کیلومتر)، P فشار متوسط شبکه (برحسب متر) و C_p فاکتور تصحیح فشار می‌باشد که با استفاده از شکل ۴ بدست می‌آید. در این شکل بر اساس فشار متوسط اندازه‌گیری شده در نقطه میانگین ناحیه و درصد شکستگی‌های گزارش‌شده می‌توان فاکتور تصحیح فشار را تخمین زد (طبق خطوط راهنما).

در شبکه‌های توزیعِ آب، حذف کامل نشت غیر ممکن است و همواره حد پایینی برای آن در هر فشار عملیاتی وجود دارد.

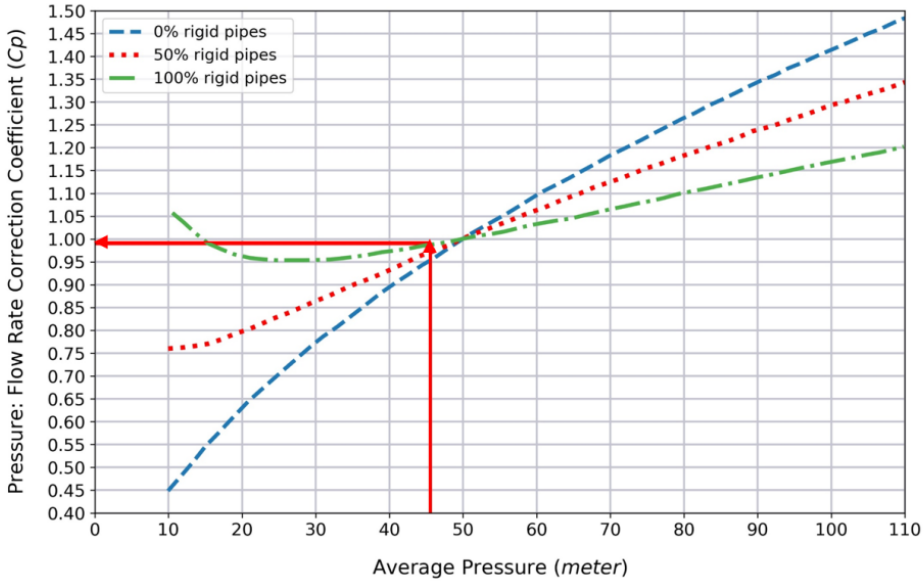


Fig. 4- Provisional relationship between pressure and Cp, for systems with different % of rigid pipes (source: (Lambert et al., 2014))

شکل ۴- رابطه شرطی فشار با ضریب Cp برای شبکه‌های با درصد صلبیت مختلف لوله‌ها (Lambert et al., 2014)

در تخمین نشت به وسیله‌ی روش اندازه‌گیری جریان شبانه، حد مذکور، نشت اجتناب‌ناپذیر زمینه (UBL)[۳۴] است. UBL نشت‌های کوچک پنهانی بر روی خطوط اصلی و انشعابات شبکه است که از طریق عملیات نشت‌یابی قابل کشف نیستند. در تخمین نشت به وسیله جدول موازنه‌ی آبی، حد مذکور تلفات واقعی اجتناب‌ناپذیر سالانه (UARL) است؛ که از نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر (UBL) به علاوه نشت‌ها و شکستگی‌های گزارش‌شده و گزارش‌نشده تشکیل می‌شود. مقادیرِ UBL و UARL وابسته به فشار هستند، بنابراین محاسبه آن‌ها طبقِ پارامترهای تجربی در فشار استاندارد ۵۰ متر توسعه یافته است. پارامترهای UBL سابقاً بر اساس آزمایش‌های متعدد در نواحی مجزا (DMA)[۳۵] ، و عمدتاً در انگلستان و ولز در اواخر دهه ۱۹۹۰ انجام و تعیین شد. پس از آنکه شرکت‌ها از آخرین فن‌آوری‌ها برای یافتن و رفع نشت‌های قابل تشخیص استفاده نمودند؛ مقادیر مورد استفاده برای UBL مورد پذیرش متخصصان کنترل نشت در کشورهای آلمان و اتریش قرار گرفت، که با تعداد محدودی آزمون در استرالیا و نیوزیلند نیز بررسی شدند. آزمایشات در بریتانیا و برزیل (۱۹۹۵ تا ۲۰۰۹) نشان داد که نشت زمینه به طور معمول با فشار به توان ۱/۵ (FAVAD N1 = 1.5) تغییر می‌کند. در تحلیل مولفه‌های جریان شبانه، رابطه نشت اجتناب‌ناپذیر زمینه (UBL) بر روی خطوط اصلی و انشعابات شبکه تا مرز ملک مشتری با استفاده از رابطه ۵ بدست می‌آید؛ که در آن، AZNP فشار متوسط شبانه ناحیه (بر حسب متر) می‌باشد کـــه در نقطه میانگین ناحیه اندازه‌گیری می‌شود (Fanner et al., 2007).

$$\mathrm{UBL(liters/hour)} = (20 \times L_M + 1.25 \times N_C) \times (AZNP/50)^{1.5} \quad (۵)$$

۶-۲- فاکتور شرایط زیربنایی

یکی از مهمترین عوامل مؤثر بر میزان نشت در یک شبکه توزیع آب، وضعیت کلی لوله‌های اصلی و انشعابات شبکه است. شرایط زیرساخت شبکه از نسل‌های گذشته به ارث برده می‌شود و نمی‌توان بدون سرمایه‌گذاری عمده در کارهای تجدید و نوسازی وارد شد. شرایط زیرساخت از لحاظ تأثیر آن بر سطح نشت زمینه، توسط فاکتور شرایط زیربنایی (ICF)[۳۶] معرفی می‌شود، که نسبت نشت زمینه واقعی (یا هدف) به نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر است (رابطه ۶).

$$\mathrm{ICF=TBL/UBL} \quad (۶)$$

نشت زمینه واقعی نمی‌تواند توسط روش‌های معمول نشت‌یابی تشخیص داده شود؛ از این جهت مناسب‌ترین راه جهت برآورد نشت زمینه واقعی، تخمین صحیح ICF است. روش‌های مختلف تخمین ICF به صورت زیر است (Fanner et al., 2007, AWWA, 2016, Moslehi et al., 2020a):

۱. ارزیابی سطح نشت زمینه در یک ناحیه ایزوله از طریق عملیات نشت‌یابی؛ به این صورت که ابتدا به تشخیص و تعمیر کامل نشت‌ها و حذف تمامی شکستگی‌های گزارش‌نشده پرداخته می‌شود. حال بعد از رفع همه شکستگی‌ها، تلفات باقی‌مانده در ناحیه به عنوان نشت زمینه شناخته می‌شود که از تقسیم آن بر

نشت زمینه اجتناب‌ناپذیر، مقدار فاکتور شرایط زیربنایی به دست می‌آید؛

۲. از طریق آزمایش مرحله‌ای فشار در نواحی که جنس غالب لوله‌ها صلب یا فلزی هستند؛ می‌توان مقدار فاکتور شرایط زیربنایی را برآورد نمود؛

۳. برآورد فاکتور شرایط زیربنایی توسط تحلیل حساسیت، و یا تخمین بر اساس مقادیری که برای دیگر نواحی مشابه به دست آمده است؛

۴. روش کاربردی دیگر آن است که مقدار فاکتور شرایط زیربنایی با شاخص نشت زیربنایی هدف (یعنی زمانیکه سطح نشت هدف‌گذاری حاصل شد)، برابر قرار داده شود. شاخص نشت زیربنائی هدف را می‌توان با استفاده از جدول ۳ که راهنمای اولیه هدف‌گذاری مدیریت نشت در شبکه‌های آب‌رسانی است و با درنظر گرفتن ملاحظات مربوط به منابع آب، ملاحظات اجرایی و بهره‌برداری و ملاحظات مالی تعیین نمود.

۶-۳- شاخص سطح نشت اقتصادی

با بدست آوردن ILI می‌توان نتیجه گرفت که یک شرکت آب تا چه اندازه به طور مؤثر و کارآمد سطح نشت را با استفاده از استراتژی‌های مختلف مدیریت و کنترل می‌کند. اگر شبکه‌ای به خوبی مدیریت و نگهداری شود، ILIای نزدیک به یک خواهد داشت؛ اما ILI لزوماً یک شاخص عملکردی و فنی است که در آن ملاحظات اقتصادی درنظر گرفته نشده است، بنابراین نمی‌تواند به عنوان شاخصی اقتصادی مورد هدف کاهش نشت قرار گیرد (Fanner et al., 2007; Lambert, 2001; Liemberger, 2002). لذا در هر شبکه ابتدا باید سطح اقتصادی نشت تعیین شود و بر اساس آن، اقتصادی‌ترین شاخص نشت زیربنائی محاسبه و هدف‌گذاری گردد. بر این اساس شاخص نشت اقتصادی (ELI)[۳۷] شبیه به شاخص ILI معرفی شد. در این شاخص مقدار نشت سالیانه اجتناب‌ناپذیر (UARL) با سطح نشت اقتصادی سالیانه (EARL)[۳۸] جایگذاری می‌شود (رابطه ۷) (Pearson and Trow, 2005; Thornton et al., 2008; VPSPS, 2012). همچنین می‌توان با استفاده از رابطه ۸ بازده اقتصادی شبکه (ENE)[۳۹] را بدست آورد (Liemberger, 2002). این شاخص بیانگر توانایی یک شرکت در مدیریت و کنترل نشت شبکه به لحاظ اقتصادی می‌باشد (VPSPS, 2012).

$$ELI=CARL/EARL \quad (۷)$$

$$ENE(\%)=1/ELI \quad (۸)$$

Table 3- Guidelines for use of the infrastructure leakage index as a preliminary leakage target-setting (Source: (AWWA, 2016))

جدول ۳- راهنمای اولیه هدف‌گذاری مدیریت نشت در شبکه‌های آب‌رسانی توسط شاخص نشت زیربنایی (AWWA, 2016)

بازه هدف ILI	ملاحظات منابع آب	ملاحظات بهره‌برداری و اجرایی	ملاحظات مالی
۱-۳	منابع آب موجود بسیار محدود بوده و توسعه آن بسیار سخت و یا از لحاظ محیط زیستی ناپایدار است.	بهره‌برداری با نشت شبکه بالاتر از این سطح به توسعه زیرساخت‌های موجود و منابع آب اضافی برای تأمین تقاضا نیاز دارد.	خرید یا توسعه منابع آب هزینه‌بر و گران است.
۳-۵	منابع آبی برای تأمین نیازهای بلندمدت کافی است، اما اقدامات مربوط به مدیریت تقاضا شامل مدیریت نشت در برنامه‌ریزی بلندمدت وجود دارد.	توانایی زیرساخت‌های موجود تأمین آب برای برآورده ساختن تقاضای بلندمدت کافی است، به شرط آنکه مدیریت نشت معقولی اجرا شود.	خرید یا توسعه منابع آبی با یک هزینه معقول امکان دارد.
۵-۸	منابع آب فرآوان، قابل اعتماد و به راحتی قابل استخراج هستند.	ظرفیت و قابلیت اعتماد بالای زیرساخت‌های تأمین آب، آن را در مقابل تأمین کمبودها تقریباً مصون می‌سازد.	هزینه خرید یا تصفیه آب پایین است.
بیشتر از ۸	هنگامی که ملاحظات مالی و بهره‌بردای و اجرایی سبب شوند ILI در بلندمدت بیش از ۸ شود، چنین سطحی از نشت جهت مصرف آب مؤثر نیست و هدف‌گذاری نشت در این حالت به غیر از حالتی که منجر به سطح نشت کمتر در دراز مدت شود بی‌تأثیر است.		
کمتر از ۱	از لحاظ نظری، دست‌یابی به ILI کمتر از ۱ برای اکثر شبکه‌ها غیرممکن است، و اگر حاصل شود، کنترل سطح نشت به خوبی صورت گرفته است. اگر شرکت آب به طور مداوم کنترل نشت را در شبکه اعمال کند، اثر بخشی آن را خواهد دید.		

۷- سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت

سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت (SRELL)، با استفاده از هزینه عملیاتی کاهش نشت بر اساس هزینه حاشیه‌ای کوتاه‌مدت آب (SRMC) و بدون درنظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری محاسبه می‌شود؛ که مقدار کمینه هزینه‌های کلی کنترل فعال نشت، سطح اقتصادی نشت را ارائه می‌دهد. انواع روش‌های تعیین سطح اقتصادی کوتاه‌مدت عبارت‌اند از: ۱- روش A (منحنی هزینه کل)[۴۰] ؛ ۲- روش B (منحنی هزینه حاشیه‌ای)[۴۱] ؛ ۳- روش نرخ افزایش نشت[۴۲]؛ ۴- روش مدل مالی[۴۳] و ۵- روش هزینه-فایده تجمعی[۴۴]، که در ادامه هر یک به تفصیل ارائه می‌شود.

۷-۱- روش A (منحنی هزینه کل)

روش A، یک روش مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت (ALC) است که برای شبکه‌های در حالت پایدار توسعه‌یافته است. شرایط پایدار بدان معنی است که هزینه‌های سرمایه‌گذاری، شامل هزینه‌های انتقالی یکبار انجام[۴۵] برای کاهش نشت، به صورت جداگانه درنظر گرفته می‌شوند. بر اساس فرضیات این روش هزینه تعمیر شکستگی‌ها، شامل شکستگی‌های گزارش نشده (یا کشف‌شده) ($C_{Det\text{-}rep}$) و شکستگی‌های گزارش‌شده ($C_{Rep\text{-}rep}$)، ثابت است و در هزینه عملیات کنترل فعال نشت آورده نمی‌شود؛ زیرا تعداد کل شکستگی‌ها با تغییر تواتر عملیات نشت‌یابی تغییر نمی‌کند و تنها زمان تداوم شکستگی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد (UKWIR, 2011).

$$C_{Det\text{-}rep}+C_{Rep\text{-}rep}=cte. \quad (۹)$$

$$Min\sum(C_{ALC}+C_{Det-rep}+C_{Rep-rep}+C_{MCW})\Rightarrow Min\sum(C_{ALC}+C_{MCW})$$

بنابراین، طبق این روش هزینه تعمیرات تغییر نکرده و ثابت می‌ماند، و باید هزینه‌های عملیات کنترل فعال نشت و هزینه حاشیه‌ای آب کمینه شوند. اما گزاشات بعدی، پیشنهاد کردند که برای مدل‌سازی هزینه عملیات کنترل فعال نشت، باید بخشی از هزینه‌های آن را متغیر تعریف نمود. بر این اساس هزینه مربوط به پایش نشت، هزینه ثابت درنظر گرفته می‌شود که نسبت به سطح نشت تغییر نمی‌کند؛ و هزینه عملیات نشت‌یابی (کشف و تعمیر نشت) متغیر است. هرچند فرض شده است که هزینه کل نشت‌های کشف‌شده و گزارش‌شده ثابت می‌باشد، اما برای مدل‌سازی هزینه عملیات کنترل فعال نشت بهتر است که هزینه تعمیر نشت‌های کشف‌شده در معادله بالا آورده شود (DCWW, 2014). بنابراین معادله به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$Min\sum(C_{ALC}+C_{Det-rep}+C_{Rep-rep}+C_{MCW})\Rightarrow Min\sum(C_{ALC}+C_{Det-rep}+C_{MCW}) \quad (۱۰)$$

هزینه عملیات نشت‌یابی فعال شامل: هزینه پایش نشت[۴۶] (C_{ALC})، (C_{Monit}) هزینه پیمایش، کشف نشت ($C_{Det\text{-}survey}$) و هزینه تعمیرات نشت ($C_{Det\text{-}rep}$) است. هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر با توجه به سطح نشت هدف‌گذاری شده تعیین می‌شوند؛ دستیابی به سطح نشت پایین‌تر هزینه بیشتری دارد. دو روش برای جمع‌آوری داده‌های هزینه عملیات نشت‌یابی وجود دارد: ۱- استفاده از داده‌های هزینه جمع‌آوری شده توسط شرکت، ۲- استفاده از رابطه هزینه که به صورت زیر ارائه شده است.

$$C_{ALC}=C_{Monit}+C_{Det\text{-}survey}+C_{Det\text{-}rep} \quad (۱۱)$$

$$C_{Monit}=cte.$$

$$C_{Det-survey}+C_{Det-rep}=NLD\times\left[(C_{L_m}\times L_m+C_{N_C}\times N_C)\right]+\left[(C_{Bp}+C_{Rp})(Num_m+Num_C)\right]$$

در این رابطه، NLD تعداد دفعات انجام عملیات نشت‌یابی جهت حفظ نشت موجود، C_{L_M} هزینه پیمایش نشت در خطوط اصلی، C_{N_C} هزینه پیمایش نشت در انشعابات، C_{Bp} جایزه به ازای هر نشت پیدا شده در شبکه (انشعاب و خطوط اصلی)، C_{Rp} هزینه تعمیر هر نشت کشف شده در شبکه (انشعاب و خطوط اصلی)، Num_M تعداد نشت‌های پیدا شده در خطوط اصلی و Num_C تعداد نشت‌های پیدا شده در انشعابات است.

جهت بدست آوردن منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال باید رابطه‌ای بین هزینه‌های متغیر ALC ($C_{Det\text{-}rep}$) و سطح نشت، با توجه به نقاط زیر بدست آورد؛

۱- هزینه کنترل فعال نشت در سطح نشت موجود: مقدار هزینه‌ای که صرف عملیات کنترل فعال نشت شده است تا شبکه به سطح نشت موجود (CARL) برسد.

۲- هزینه‌های نامحدود کنترل فعال نشت در سطح نشت زمینه واقعی: سطح نشت بالاتر از سطح نشت زمینه واقعی (TBL)، نشت اضافی[۴۷] موجود در شبکه است که قابلیت کاهش از طریق کنترل فعال نشت را دارد. با کاهش سطح نشت و نزدیک شدن به سطح نشت زمینه واقعی، هزینه‌های بیشتری جهت عملیات نشت‌یابی نیاز است؛ این هزینه‌ها در مجاورت سطح نشت زمینه به سمت بی‌نهایت میل می‌کنند و مجانب قائمی با TBL شکل می‌گیرد. سطح نشت زمینه واقعی به عنوان حد عملی و کاربردی نشت‌های قابل کشف با استفاده از روش‌های مرسوم عملیات کنترل فعال نشت است.

۳- هزینه صفر در سطح نشت منفعل[۴۸]: سطحی از نشت است که در آن عملیات نشت‌یابی فعال انجام نشده و تنها شکستگی‌های

گزارش‌شده تعمیر می‌شوند. سطح نشت منفعل را می‌توان با استفاده از تحلیل داده‌های حداقل جریان شبانه در طول یکسال تخمین زد (DCWW, 2014; Moslehi et al., 2020a). منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی فعال در سطح نشت منفعل به مجانب افقی می‌رسد که فقط شامل هزینه عملیات پایش نشت است.

روابط مختلفی برای برآورد منحنی هزینه عملیات نشت‌یابی در روش منحنی هزینه کل ارائه شده است؛ این روابط برای سطوح مختلف نشت (L) محاسبه می‌شوند. پارامترهای m، n و k مقادیر ثابتی دارند. مرسوم‌ترین شکل منحنی ALC، فرم هایپربولیک آن است (رابطه ۱۲ با مقدار $m=1$) (UKWIR, 2011).

$$C=C_a\times(CARL-TBL)^m/(L-TBL)^m \quad (۱۲)$$

$$C=k+m\times(L-TBL)+[n/(L-TBL)] \quad (۱۳)$$

$$C=C_a/\ln\left((CARL-TBL)/(L_{pl}-TBL)\right)^m\times\ln\left((L-TBL)/(L_{pl}-TBL)\right)^m \quad (۱۴)$$

در مرحله بعدی، منحنی هزینه آب هدررفته تعیین می‌شود؛ که عموماً یک خط مستقیم است و از مبدأ افزایش می‌یابد. برای تعیین این منحنی به هزینه حاشیه‌ای آب نیاز است که با استفاده از توابع هزینه برای هر شرکت معین شده است (بخش ۵). در نهایت، منحنی هزینه کنترل فعال نشت به همراه هزینه آب تلف‌شده در یک نمودار ترسیم شده و منحنی هزینه کل از جمع این دو منحنی به دست می‌آید (Moslehi et al., 2020a). شکل ۵، یک منحنی هزینه کل را نشان می‌دهد که مقدار کمینه منحنی، مقدار سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت (SR-ELL) را نشان می‌دهد. نقاط دیگری در این منحنی حائز اهمیت است که می‌توان به سطح اقدام[۴۹] و سطح خروج[۵۰] اشاره کرد. منظور از سطح اقدام، سطحی از نشت است کـــه در آن عملیات نشت‌یابی فعال بر اساس سطح نشت اضافی موجود توسط شرکت شروع گردیده و بـــه بازبینی و تعمیر مجدد نشت‌های شبکه اقدام می‌شـــود. سطح خروج نیز نشان‌دهنده سطحی از نشت است که در آن می‌تـــوان عملیات کنترل فعال نشت را بـــرای کاهش بیشتر نشت متوقف نمود (Islam and Babel, 2013).

۷-۲- روش B (منحنی هزینه حاشیه‌ای)

روش B یک روش مبتنی بر استراتژی کنترل فعال نشت (ALC) است که بر اساس رابطه بین هزینه حاشیه‌ای کنترل فعال نشت و سطوح مختلف نشت توسعه یافته است. در این روش فـــــرض می‌شود که ۱- شبکه در حالت پایدار است؛ ۲- اگر عملیاتی برای حفظ و کاهش نشت صورت نگیرد، نرخ افزایش طبیعی نشت‌های گزارش‌نشده (NRR) در یک دوره زمانی و در یک فشار متوسط به طور ثابت افزایش می‌یابد. لذا تعداد تعمیرات (لیتر بر روز بر شکستگی) با افزایش سطح نشت کاهش می‌یابد؛ ۳- تعداد شکستگی‌های گزارش‌شده ثابت است، یا به عبارتی هزینه تعمیر نشت‌های گزارش‌شده با سطح نشت ثابت است ($C_{Rep\text{-}rep}=cte.$) و در نتیجه ۴- تعداد کل تعمیرات شکستگی‌ها با کاهش سطح نشت یک افزایش کلی خواهد داشت. بنابراین می‌توان این روش را به صورت زیر خلاصه نمود (UKWIR, 2011).

$$\text{Min}\sum(C_{ALC}+C_{Det\text{-}rep}+C_{MCW}) \quad (۱۵)$$

بخشی از NRR به وسیله تعمیر شکستگی‌های گزارش‌شده متوقف می‌شود؛ اما بخش دیگرِ آن مربوط به شکستگی‌های گزارش‌نشده (نشت‌های کشف‌شده) است که با عملیات کنترل فعال نشت متوقف می‌شود.

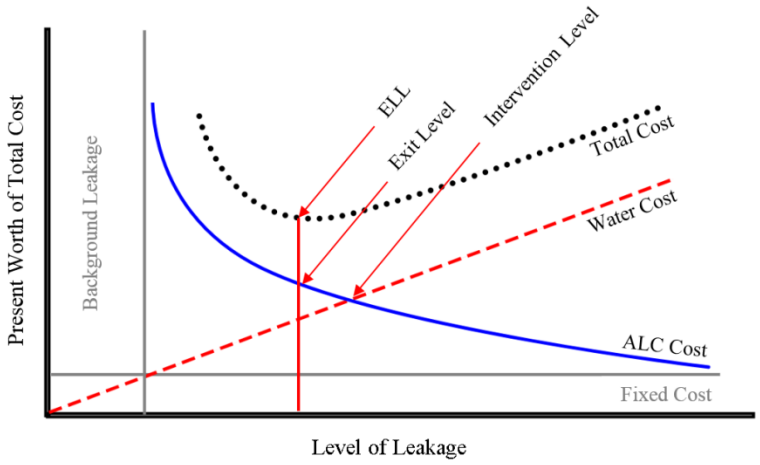


Fig. 5- Total curve method for estimating the economic level of leakage (Fantozzi and Lambert, 2007)

شکل ۵- منحنی هزینه کل برای برآورد سطح اقتصادی نشت (Fantozzi and Lambert, 2007)

در واقع NRR تخمینی از توزیع رشد نشت در نواحی ایزوله شده برای تسهیل در تحلیل نشت ارائه می‌دهد. بنابراین با استفاده از کنترل فعال نشت می‌توان برنامه‌ریزی نمود که در چه تواترهایی عملیات کنترل فعال نشت صورت بگیرد تا سطح اقتصادی نشت بدست آید. در این روش هزینه‌های انتقالی، انتقال از سطح نشت بالاتر به سطح نشت پایین‌تر، به طورکامل در نظر گرفته می‌شود (UKWIR, 2011).

جهت بدست آوردن منحنی هزینه حاشیه‌ای کشف (C_{ALC}) و تعمیر نشت ($C_{Det\text{-}rep}$)، می‌توان یک رابطه توانی با استفاده از داده‌های میدانی (هزینه کشف نشت و سطح نشت، یا هزینه تعمیر نشت کشف شده و سطح نشت) در نظر گرفت (رابطه ۱۶). ذکر این نکته اهمیت دارد که هزینه‌های عملیات نشت‌یابی فعال، مجموع هزینه‌های حاشیه‌ای (انتگرال هزینه حاشیه‌ای) در طی بازه کاهش نشت از سطح شروع نشت (Entry) تا سطح مورد نظر نشت (Exit) است. معادله کلی منحنی هزینه حاشیه‌ای (کشف و تعمیر نشت) عملیات نشت‌یابی به شکل زیر است (UKWIR, 2011):

$$C_{Det\text{-}rep}=a(L\text{-}TBL)^b \quad (۱۶)$$

$$AnnualCost=(-1/T)\int_{Entry}^{Exit} a(L\text{-}TBL)^b \quad (۱۷)$$

که در آن a و b ضرایب رابطه هستند که بصورت تجربی تعیین می‌شوند. هزینه حاشیه‌ای بر (حسب واحد پولی بر واحد نرخ نشت (لیتر بر روز)) می‌باشد. عموماً تواتر عملیات نشت‌یابی (T)، یکساله و ثابت درنظر گرفته می‌شود.

۷-۳- روش نرخ افزایش نشت

روش نرخ افزایش نشت جهت تعیین تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی و سطح اقتصادی نشت کوتاه مدت با عنوان (RR EFI) توسط گروه هدررفت آب ارائه شد. این روش برای شرکت‌هایی توصیه شد که عملیات نشت‌یابی فعال را انجام، یا به طور مستمر انجام نداده‌اند؛ و در شرایط پایدار بهره‌برداری نباشند. منظور از شرایط پایدار بهره‌برداری این است که انباشتگی نشت‌های گزارش‌نشده در شبکه وجود ندارد و فقط نشت‌هایی وجود دارند که بعد از آخرین عملیات نشت‌یابی رخ داده‌اند. سه پارامتر اصلی مورد نیاز در این روش عبارت‌اند از ۱- هزینه عملیات نشت‌یابی (CI)؛ ۲- هزینه متغیر آب (CV) و ۳- نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده (RR). پارامترهای هزینه متغیر آب و هزینه عملیات نشت‌یابی را به سهولت و با استفاده از داده‌های شرکت‌های آب و فاضلاب می‌توان تعیین نمود. برای محاسبه نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده روش‌های متعددی وجود دارد که در جدول ۵ به آن‌ها اشاره شده است. در این روش ابتدا با استفاده از سه پارامتر مذکور، تواتر اقتصادی عملیات کنترل فعال نشت بدست آمده و سپس با استفاده از آن سطح نشت اقتصادی کوتاه‌مدت تخمین زده می‌شود. روش نرخ افزایش نشت روشی سریع و کاربردی است که از آن می‌توان برای هر شبکه توزیع در هر اندازه‌ای و حتی ناحیه‌بندی‌نشده استفاده کرد (Fanner et al., 2007). قابل ذکر است که در تعیین سطح اقتصادی نشت، اجرای طرح‌های مدیریت فشار مؤثر باعث کاهش نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده و نشت زمینه و در نتیجه افزایش فاصله‌ی زمانی بین عملیات نشت‌یابی اقتصادی می‌شود؛ یعنی بعد از مدیریت فشار، در مدت زمان طولانی‌تری لازم است که عملیات نشت‌یابی فعال انجام شود- این مسأله به منزله کاهش هزینه عملیات نشت‌یابی است (Fantozzi and Lambert, 2007). بنابراین تأثیر مدیریت فشار بر سطح نشت اقتصادی کوتاه مدت باید درنظر گرفته شود؛ طرح مفهومی روش نرخ افزایش نشت در شکل ۶ نشان داده شده است.

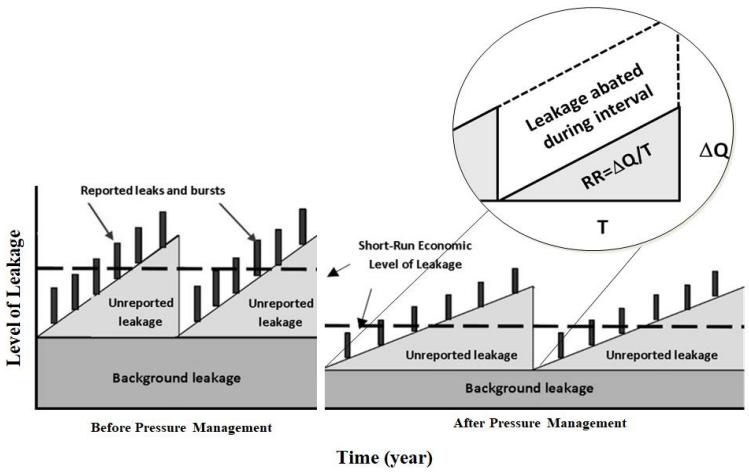


Fig. 6- Conceptual model for determining ELL based on the rate of rise of unreported leakage

شکل ۶- مدل مفهومی تعیین سطح اقتصادی نشت بر اساس نرخ افزایش نشت گزارش نشده

Table 4- Rate of rise calculation guideline

جدول ۴- راهنمای تعیین نرخ افزایش نشت

(۱۸)	–	RR نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده (مترمکعب در روز در سال)	$RR=\Delta Q/T$
(۱۹)	–	CI هزینه عملیات نشت‌یابی (واحد پولی)	$CI=CV\times(Q\times T/2)=CV\times RR\times T^2/2$
	–	CV قیمت متغیر آب (واحد پولی بر مترمکعب)	
(۲۰)	–	EIF تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی (بر حسب ماه)	$EIF=\sqrt{(0.789\times CI)/(CV\times RR)}$

Table 5- Different methods for determining the rate of rise of unreported leaks (Lambert and Lalonde, 2005) (RR)

جدول ۵- روش‌های مختلف تعیین نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده (RR) (Lambert and Lalonde, 2005)

روش اول: مقایسه نشت توسط جدول تعادل آبی چندین سال متوالی		
فرض اولیه	–	در شبکه، جریان شبانه اندازه‌گیری نشده است
	–	در طول زمان تهیه جدول تعادل آبی، عملیات نشت‌یابی فعال صورت نگرفته است.
روش محاسبه	–	محاسبه حجم نشت سالانه در سال اول (RL_1)
	–	محاسبه حجم نشت سالانه در N سال بعدی (RL_N)
	–	اگر تعداد انشعابات یا متوسط فشار تغییر کند، نشت در سال Nام را بر حسب تعداد انشعابات و فشار در سال اول تنظیم می‌کنیم ($RL`_N$)
	–	نرخ افزایش نشت از رابطه $(RL_1-RL`_N)/N$ به دست می‌آید
روش دوم (الف): استفاده از داده‌های عملیات نشت‌یابی در کل یا بخشی از شبکه		
فرض اولیه	–	در شبکه، جریان شبانه اندازه‌گیری نشده است
	–	تنها یک نشت‌یابی فعال در کل یا بخشی از سیستم انجام شده باشد
روش محاسبه	–	دسته‌بندی نشت‌های تشخیصی توسط متوسط جریان و محل آن (خطوط اصلی، شیرهای آتش نشانی، انشعابات)
	–	برآورد کلی مقدار جریان تمام نشت‌های کشف‌شده
	–	تخمین تعداد سال‌هایی که باعث تجمیع چنین نشت‌هایی می‌شود
	–	به دست آوردن میانگین نرخ افزایش نشت سالانه
	–	نرخ افزایش سالانه (بر حسب انشعابات) یا (بر حسب طول خط اصلی) برای بخشی از شبکه که مورد ارزیابی قرارگرفته است و تعمیم آن به کل سیستم
روش دوم (ب): استفاده از داده‌ها در کل یا بخشی از شبکه توسط عملیات نشت‌یابی پیوسته		
فرض اولیه	–	در شبکه، جریان شبانه اندازه‌گیری نشده است
	–	عملیات نشت‌یابی فعال با فاصله‌ی زمانی معین صورت‌گرفته است
روش محاسبه	–	دسته‌بندی نشت‌های تشخیصی توسط متوسط جریان و محل آن (خطوط اصلی، شیرهای آتش نشانی، انشعابات)
	–	برآورد حجم کل نشت‌های کشف شده و تقسیم بر دوره زمانی بین نشت‌یابی به منظور به دست آوردن نرخ افزایش نشت
	–	هنگامی که به بلوک‌های شهری یا محدوده‌های مشخص در یک سیستم بزرگ اعمال شود، RR می‌تواند برای پیش‌بینی زمان عملیات نشت‌یابی بعدی در هر بلوک یا منطقه به کار رود.
روش سوم: استفاده از اندازه‌گیری جریان شبانه		
فرض اولیه	–	این روش را می‌توان برای سیستم‌های کوچک و متوسط در یک منطقه تحت فشار استفاده کرد.
	–	نیازی نیست که ابزار اندازه‌گیری جریان شبانه به صورت پیوسته یا دائمی نصب شوند.
روش محاسبه	–	برداشت جریان باید بیش از چند شب در طول سال صورت بگیرد؛ در حالی که مصارف استثنایی (آبیاری و صنعتی) وجود نداشته باشد یا در حداقل میزان خود قرار داشته باشد و البته درصورت وجود، شناسایی شود.
	–	تنظیم نرخ جریان اندازه‌گیری شده برای هر گونه تغییر در فشار و یا دیگر تأثیرات
محاسبه نرخ افزایش نشت بر حسب (مترمکعب/ ساعت/ سال) از تفاوت جریان شبانه و تقسیم بر طول دوره زمانی اندازه‌گیری شده و سپس ضرب در فاکتور روز-شب (NDF) که از رابطه زیر به دست می‌آید		

$$NDF=\sum_{i=0}^{i=23}(AZP_{i,i+1}/AZNP)^{N_1}=\sum_{i=0}^{i=23}(AZP_{i,i+1}/AZP_{3\text{-}4})^{N_1} \quad (۲۱)$$

N_1: توان رابطه فشار- نشت؛ AZNP و $AZP_{i,i+1}$ به ترتیب مقدار فشار متوسط شبانه ناحیه و مقدار فشار متوسط در هر ساعت در نقطه میانگین ناحیه می‌باشد.

- (در صورت نبود اطلاعات کافی، فاکتور روز-شب برابر (۲۴ ساعت/روز) فرض می‌شود)

۷-۴- روش مدل مالی

با توجه به مفهوم هزینه حاشیه‌ای، (Wyatt, 2010) مدلی مالی با رویکرد کنترل و مدیریت نشت معرفی نمود؛ این روش دو حالت برای مدیریت و کنترل نشت را در نظر می‌گیرد؛ حالت انتقالی و حالت پایدار؛ که حالت انتقالی به کاهش نشت از سطحی به سطح کمتر و حالت پایدار به کنترل نشت می‌پردازد. روش مدل مالی، به حالت انتقالی و نحوه‌ی انجام آن تمرکز نمی‌کند، بلکه سعی دارد حالت پایدار را حفظ و کنترل کند. اگر سطح نشت موجود (در حالت پایدار) پایین باشد، استراتژی‌ها و اقداماتی مانند مدیریت فشار، نشت‌یابی فعال- با تعداد تواتر بیشتر- مناسب است؛ و در صورت انتخاب اقدامات منفعل‌تر، سطح نشت افزایش پیدا می‌کند.

روش مدل مالی در دوره زمانی کوتاه‌مدت، بر اساس دو فرض اولیه مطرح است: ۱- عرضه آب مازاد بر تقاضا است، و شبکه در حال حاضر نیازی به افزایش منابع جدید ندارد (نیازی به سرمایه‌گذاری نیست)؛ ۲- عرضه آب کمتر از تقاضا است، و نیاز است منابع آبی جدید اضافه شود اما بودجه کافی در اختیار شرکت برای سرمایه‌گذاری نیست -قصد توسعه منابع را ندارد. در این دو حالت باید سطح بهینه در شرایطی تعیین شود که نیاز به سرمایه‌گذاری نباشد (Wyatt, 2010).

در حالت اول (عرضه مازاد بر تقاضا، بدون سرمایه‌گذاری) فرض می‌شود که شرایط شبکه (انشعابات، تعداد خطوط) و ظرفیت تقاضا ثابت است. کاهش نشت در شبکه باعث کاهش هزینه حاشیه‌ای آب و کاهش هزینه‌های شرکت می‌شود. بنابراین جهت بهینه‌سازی اقتصادی سطح نشت، مدلی بر مبنای هزینه نشت و هزینه اقدامات کنترل نشت ارائه می‌شود (رابطه ۲۴). در این مدل سطح نشت بهینه زمانی رخ می‌دهد که مجموع این دو هزینه، کمینه شود (مشتق توابع هزینه بر حسب l_p صفر شود). با توجه به رابطه ۲۲، اگر l_p صفر باشد، تولید آب به حداقل ممکن خواهد رسید- برابر با کل مصرف. با افزایش سطح نشت (l_p)، نشت افزایش و در نتیجه هزینه متغیر تولید آب نیز افزایش پیدا می‌کند. اگر l_p برابر یک شود، نیاز به تولید آب افزایش و به بی‌نهایت میل می‌کند؛ سطح بالای نشت دلالت بر نیاز بالای تولید آب و هزینه‌های بالای آن دارد. با توجه به رابطه ۲۳، زمانی که سطح نشت(l_p) کم باشد، هزینه کنترل نشت افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا سطح نشت به سطح نشت زمینه و نشت حاصل از شکستگی‌های گزارش‌نشده نزدیک می‌شود که کنترل آن اجتناب‌ناپذیر است و هزینه بالایی را در بر می‌گیرد، و اگر l_p به یک میل کند، تمام آب تولید شده در حال نشت از شبکه است و هیچ اقدامی جهت کنترل نشت صورت نمی‌گیرد.

در حالت دوم (عرضه کمتر از تقاضا، بدون سرمایه‌گذاری) فرض می‌شود شرایط شبکه (انشعابات، تعداد خطوط) و ظرفیت عرضه ثابت است. درآمد حاصل از فروش آب برای شرکت ثابت است و با کاهش سطح نشت می‌توان درآمد شرکت را با فروش آب‌های بازیابی شده افزایش داد. سطح بهینه‌ی نشت در این حالت را می‌توان بر مبنای رابطه ۲۸ که متشکل از تابع درآمد سالیانه شرکت و هزینه اقدامات کنترل نشت است به دست آورد (Wyatt, 2010).

۷-۵- روش هزینه-فایده تجمعی

روش هزینه-فایده تجمعی برای اولین بار در کشور کره جنوبی توسعه داده شد (شکل ۸). این مدل سطح اقتصادی آب بدون درآمد (یا به طور خاص‌تر نشت) را از طریق ارتباط بین هزینه تجمعی کنترل آب بدون درآمد (یا نشت) و فایده تجمعی حاصل از کاهش آب بدون درآمد (یا نشت) تخمین می‌زند. فایده سالانه کاهش آب بدون درآمد از طریق ضرب بین حجم کاهش‌یافته آب بدون درآمد سالیانه و هزینه حاشیه‌ای آب به دست می‌آید (Lim et al., 2015). این روش داده‌محور بوده و بسیار وابسته به داده‌های جمع‌آوری شده در طول چندین سال متوالی است؛ و برای شرکت‌هایی که به هر دلیلی قادر به ثبت چنین داده‌هایی نیستند، مشکل و ناکارآمد است.

مطالعات گوناگونی با توجه روش‌های تعیین سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت در طی دو دهه اخیر صورت گرفته است که به طور خلاصه در جدول ۷ تشریح شده، و روندنمای حاصل از آن نیز در شکل ۹ ارائه شده است.

۸- سطح اقتصادی بلندمدت نشت

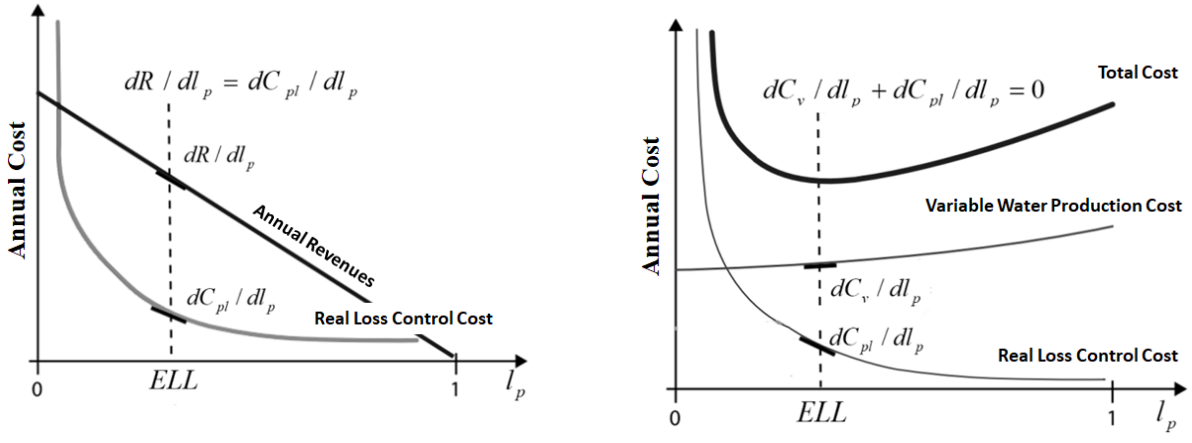
زمانی سطح اقتصادی بلندمدت روی خواهد داد که هزینه حاشیه‌ای بلندمدت برابر هزینه حاشیه‌ای استراتژی‌های کنترل و کاهش نشت شود. طول دوره بلندمدت نیز، بستگی به دوره بازگشت سرمایه‌گذاری مورد نظر دارد. یعنی ممکن است در طرح‌های اقتصادی مدیریت فشار، چند ماه، و در پروژه‌های بزرگ توسعه منابع آب، ۲۵ تا ۳۰ سال به طول انجامد. در تعیین سطح اقتصادی بلندمدت اگر به اندازه ارزش آب ذخیره شده حاصل از نشت طی دوره سرمایه‌گذاری، هزینه صرف اجرای برنامه‌های کاهش هدررفت آب شود، آنگاه سرمایه‌گذاری برای کاهش هدررفت واقعی اقتصادی خواهد بود.

Table 5- The guide of short-run economic level of leakage based on financial model method

جدول ۵- راهنمای سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت بر اساس روش مدل مالی (Wyatt, 2010)

$C_v = C_w Ncp365/(1-l_p)$	(۲۲)	
$C_{pl} = [C_s D^2 N\ nq_1/(2cp)][(1-l_p)/l_p]$	(۲۳)	حالت اول
$dC_v/dl_p + dC_{pl}/dl_p = 0$	(۲۴)	
$ELL = (D/cp) \times [C_s nq_1/(2C_w 365)]^{1/2}$	(۲۵)	
$R = TQ_p 365(1-l_c)$	(۲۶)	
$C_{pl} = [C_s D^2 N^2 nq_1/(2Q_p)][1/l_p]$	(۲۷)	حالت دوم
$dR/dl_p - dC_{pl}/dl_p = 0$	(۲۸)	
$ELL = (DN/Q_p) \times [C_s nq_1/(2T365(1-l_c))]^{1/2}$	(۲۹)	

- C_V: هزینه متغیر تولید آب در سال (واحد پولی/ سال)
- C_W: میانگین هزینه متغیر تولید آب (واحد پولی/ مترمکعب)
- C_{p1}: هزینه کنترل نشت در سال (واحد پولی/ سال)
- C_S: هزینه پیمایش و تعمیرات (واحد پولی/ کیلومتر)
- D: طول خطوط اصلی بر حسب انشعاب (کیلومتر/ انشعاب)
- N: تعداد انشعابات
- n: نشت‌های جدید/ کیلومتر/ سال
- q_1: نرخ میانگین نشت (مترمکعب/ روز/ نشت)
- C: سرانه مصرف آب (مترمکعب/ فرد/ روز)
- P: میانگین تعداد افراد در هر انشعاب
- 1_p: نسبت نشت به ازای آب تولید شده
- T: متوسط تعرفه شرکت
- Q_p: حجم آب تولیدی
- 1_c: نسبت تلفات ظاهری به ازای آب تولید شده



حالت دوم — حالت اول

Fig. 7- Short-run economic level of leakage based on the financial model method in two cases of supply in excess of demand (first case) and supply less than demand (second case) (Wyatt, 2010)

شکل ۷- سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت بر اساس روش مدل مالی در دو حالت عرضه مازاد بر تقاضا (حالت اول) و عرضه کمتر از تقاضا (حالت دوم) (Wyatt, 2010)

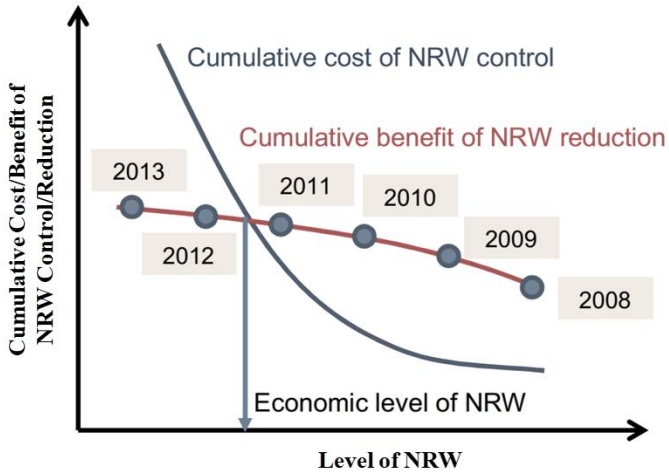


Fig. 8- Comulative cost-benefit approach for determining ELL (Lim et al., 2015)

شکل ۸- رویکرد هزینه- فایده تجمعی برای تعیین سطح اقتصادی نشت (Lim et al., 2015)

Table 6- Review of case studies on short-run economic level of leakage

جدول ۶- خلاصه‌ای از مطالعات موردی انجام شده در زمینه سطح اقتصادی نشت در کوتاه‌مدت

محقق(ان)	مطالعات صورت گرفته
Tabesh et al. (2009)	مکان: ایران روش: منحنی هزینه کل – ارائه روشی برای تخمین نشت گره‌ها و لوله‌های شبکه با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی – تخمین نشت کل شبکه از طریق تحلیل جریان حداقل شبانه بدست می‌آید. سپس با استفاده از مقدار نشت بدست آمده و مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی، نشت در گره‌ها و لوله‌های شبکه تخمین زده می‌شود. – تخمین سطح اقتصادی نشت (۰/۲۲۷ میلیون مترمکعب در سال) از طریق شاخص‌های عملکردی مدیریت نشت و منحنی هزینه کل
Smout et al. (2010) Munoz-Trochez et al. (2011)	مکان: زاراگوزا- اسپانیا روش: روش نرخ افزایش نشت – تخمین سطح نشت مخازن، نشت زمینه و شکستگی‌های گزارش‌شده – تخمین سطح نشت شکستگی‌های گزارش‌نشده به وسیله نرخ افزایش نشت – تعیین سطح اقتصادی نشت با کمک داده‌های جمع‌آوری شده از شبکه و سطح نشت تخمین زده شده ○ سطح اقتصادی نشت برابر ۱/۵۶ میلیون مترمکعب در سال تخمین زده شد؛ سطح هدررفت واقعی در این شهر در حدود ۹ تا ۱۲ میلیون مترمکعب در سال بود ○ ساماندهی جمع‌آوری اطلاعات در شبکه به صورت هدفمند
Islam and Babel (2013)	مکان: بانکوک-تایلند روش: منحنی هزینه کل – تعیین سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت با استفاده از عملیات کنترل فعال نشت به وسیله روش منحنی هزینه کل – تخمین سطح نشت در شبکه به وسیله روش منحنی هزینه کل – تخمین سطح نشت شکستگی‌های گزارش‌نشده به وسیله نرخ افزایش نشت – جمع‌آوری داده‌های فشار شبکه، هزینه‌های حاشیه‌ای آب و هزینه کنترل فعال نشت مبتنی بر مدل هیدرولیکی شبکه – بررسی عوامل مؤثر بر سطح اقتصادی نشت ○ هزینه حاشیه‌ای آب و فشار به طور قابل توجهی بر هزینه کنترل فعال نشت و سطح اقتصادی نشت تأثیرگذار است. ○ هزینه عملیات نشت‌یابی و سطح اقتصادی نشت در فشارهای بالا افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند

Alkasseh et al. (2015)	مکان: کینتا- مالزی روش: نرخ افزایش نشت – تعیین تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی با استفاده از روش نرخ افزایش – تعیین هدررفت آب حاصل از شکستگی‌های گزارش‌شده توسط نرم‌افزار PrimeWorks – برآورد هدررفت واقعی حاصل از نشت‌ها و شکستگی‌های گزارش‌نشده توسط روش نرخ افزایش و تحلیل رگرسیون – برآورد نشت زمینه به صورت ضریبی از نشت اجتناب‌ناپذیر زمینه (UBL)
Lim et al. (2015)	مکان: کره جنوبی روش: هزینه- فایده تجمعی – توسعه رویکرد هدف‌گذاری سطح آب بدون‌درآمد؛ تحلیل هزینه- فایده تجمعی – جمع‌آوری داده‌های مطلوب چند ساله (شامل هزینه کاهش سطح آب بدون درآمد و مقدار کاهش آب بدون درآمد) – سطح اقتصادی آب بدون درآمد با این روش در منطقه مورد مطالعه حدود ۲۰ درصد سطح آب بدون درآمد تخمین زده شد
Kanakoudis and Gonelas (2016)	مکان: کوزانی- یونان روش: نرخ افزایش نشت – تعیین تواتر اقتصادی عملیات نشت‌یابی با استفاده از روش نرخ افزایش – تعیین زمان بهینه انجام تعمیرات و بازسازی در شبکه – سود سالانه حاصل از تسریع تعمیرات شبکه برابر است با تولید کل حجم آبی که در کوتاه‌مدت از نشت یا شکستگی، برای یک شرکت ذخیره می‌شود. – جهت رسیدن به سطح اقتصادی نشت، بهبود سرعت و کیفیت تعمیرات لوله‌های اصلی و انشعابات در اولویت قرار دارد
Naghdi et al. (2018)	مکان: ورامین- ایران روش: نرخ افزایش نشت – تعیین سطح اقتصادی نشت به وسیله روش نرخ افزایش نشت – برآورد هدررفت واقعی سالیانه از طریق جدول تعادل آبی – این مطالعه اجرا برنامه مدیریت فشار، کنترل فعال نشت و بهبود وضعیت نگهداری شبکه را برای کاهش نشت در عوض بازسازی شبکه پیشنهاد می‌دهد
Moslehi et al. (2019) Moslehi et al. (2020a)	مکان: مشهد- ایران روش: منحنی هزینه کل – ارائه متدولوژی مبتنی بر داده‌های میدانی (داده‌های اندازه‌گیری شده جریان و فشار) جهت تخمین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت – ارائه روشی ریاضی برای تعیین هزینه عملیات نشت‌یابی فعال – تخمین سطح نشت زمینه واقعی با استفاده از کمترین داده و با توجه به شرایط زیرساخت شبکه – بررسی تأثیر فشار بر هزینه عملیات نشت‌یابی – تغییرات هزینه عملیات نشت‌یابی نسبت به فشار خطی نیست. – بررسی تأثیر تغییرات فشار بر سطح اقتصادی نشت در هزینه‌های حاشیه‌ای متفاوت – در اثر کاهش فشار، تواتر شکستگی‌ها، سطح نشت زمینه، نرخ افزایش نشت‌های گزارش‌نشده و سطح اقتصادی کوتاه‌مدت کاهش پیدا می‌کند – تغییرات فشار نسبت به سطح اقتصادی نشت خطی نیست (کاهش ۲۰ درصدی فشار منجر می‌شود به اینکه سطح اقتصادی کوتاه‌مدت ۳۰ درصد کاهش پیدا کند) – تغییرات هزینه حاشیه‌ای تا حد معینی قابل توجه است. – بررسی تأثیر هزینه حاشیه‌ای بر سطح اقتصادی نشت و هزینه کل – عملیات نشت‌یابی فعال از قانون کاهش بازده پیروی می‌کند (در هزینه حاشیه‌ای آب گران‌تر نسبت به ارزانتر، سطح اقتصادی نشت به مراتب کاهش کمتری دارد) – بررسی تأثیر سطح نشت زمینه بر سطح اقتصادی نشت – زمانی که شرایط زیربنایی شبکه ضعیف می‌شود، سطح نشت زمینه قابل دستیابی افزایش پیدا می‌کند و سطح نشت غیرقابل پایش افزایش پیدا می‌کند – رابطه سطح اقتصادی نشت با سطح نشت زمینه خطی است – بررسی تأثیر هزینه متغیر عملیات نشت‌یابی بر سطح اقتصادی نشت – افزایش سطح اقتصادی نشت با افزایش هزینه‌های متغیر عملیات نشت‌یابی (در هزینه‌های حاشیه‌ای آب ارزانتر شیب تغییرات بیشتر است)

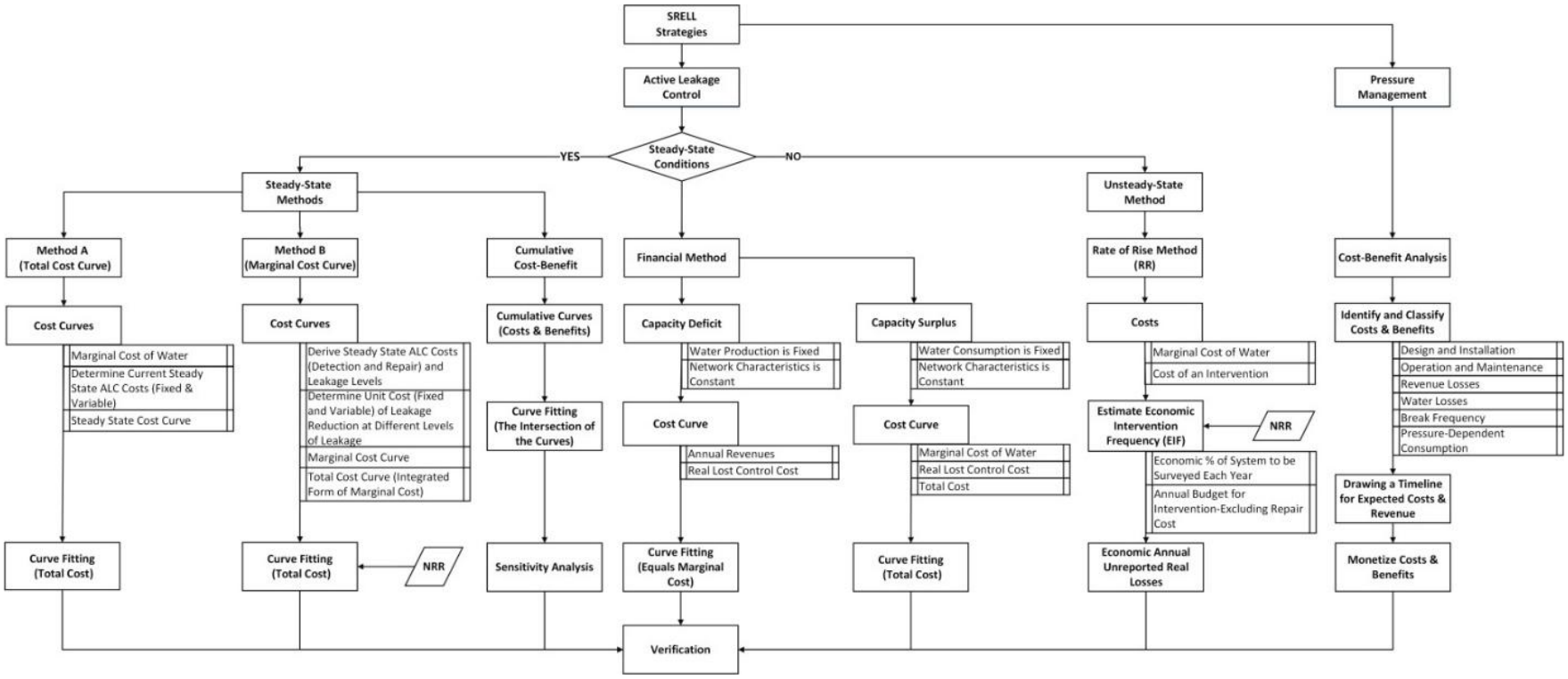


Fig. 9- Flowchart for determination of Short-run Economic Level of Leakage (SRELL)

شکل ۹- روندنمای تعیین سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت

به طور کلی سطح اقتصادی بلندمدت نشت به وسیله یک نوع تحلیل اقتصادی (تحلیل هزینه- فایده) که در برگیرنده عوامل و فاکتورهای مختلف است، در طول یک دوره بلندمدت محاسبه می‌شود. روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه[۵۱] (LCP) با استفاده از روش ارزش خالص فعلی (NPV)، روش مدل مالی و تحلیل هزینه- فایده[۵۲] اجرای استراتژی‌های کاهش نشت از جمله روش‌های پیشنهادی در مطالعات است که در ادامه بررسی خواهند شد.

۸-۱- روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه

روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه یک تحلیل ارزش خالص فعلی است که طی یک افق برنامه‌ریزی بلندمدت، عمدتاً ۲۵ تا ۳۰ سال، انجام می‌شود؛ هدف آن بهینه‌سازی راهکارهای کاهش نشت، جهت بررسی یک محدودیت قریب الوقوع در عرضه- تقاضای آب و پیشنهاد راهکار کاربردی به شرکت‌های آب است (Tripartite Group, 2002). بنابراین روشی است که مسائل را بسیار وسیع‌تر از سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت در نظر می‌گیرد و اگر رویکرد آن کاهش سطح هدررفت واقعی باشد، منجر به تعیین سطح اقتصادی بلندمدت نشت می‌شود. این روش در شرایطی استفاده می‌شود که یک شرکت آب، برنامه سرمایه‌گذاری توسعه ظرفیت جدید منابع آب یا افزایش ظرفیت تصفیه‌خانه آب داشته باشد (افزایش عرضه) و یا مایل به ارزیابی تحلیل سود- هزینه راه‌حل جایگزین، برای بهبود تعادل عرضه- تقاضا باشد؛ نظیر استفاده از بازیافت آب یا افزایش اقدامات حفاظتی. نقطه شروع این تحلیل، تعادل عرضه- تقاضای بدون محدودیت[۵۳] در طول افق برنامه‌ریزی شرکت می‌باشد. پیش‌بینی تقاضا از روی تقاضای فعلی شبکه و بر اساس تخمین رشد مصارف خانگی، تجاری و صنعتی پیشنهاد می‌شود؛ فارغ از تأثیر برنامه‌ریزی اقدامات محدودکننده تقاضا در افق برنامه‌ریزی. در هنگام برنامه‌ریزی برای ایجاد ظرفیت عرضه جدید، ضروری است که یک حاشیه اطمینان- بیش‌تر از تقاضای پیش‌بینی شده- درنظر گرفته شود، زیرا احتمال قطع برق در تصفیه‌خانه وجود دارد که باعث کاهش ظرفیت عرضه می‌شود. این مطلب در شکل ۱۰ به صورت یک بالاسری[۵۴] نشان‌داده شده که در طول زمان با افزایش عدم قطعیت، افزایش می‌یابد. تقاضای کل، مجموع ظرفیت جدید عرضه و بالاسری است.

در تحلیل به روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه، هدررفت واقعی به عنوان بخشی از تقاضای کل سیستم درنظر گرفته می‌شود و هدف استفاده بهینه از تمام گزینه‌های موجود برای بهبود تعادل عرضه- تقاضا و حفظ حاشیه اطمینان مورد نیاز است.

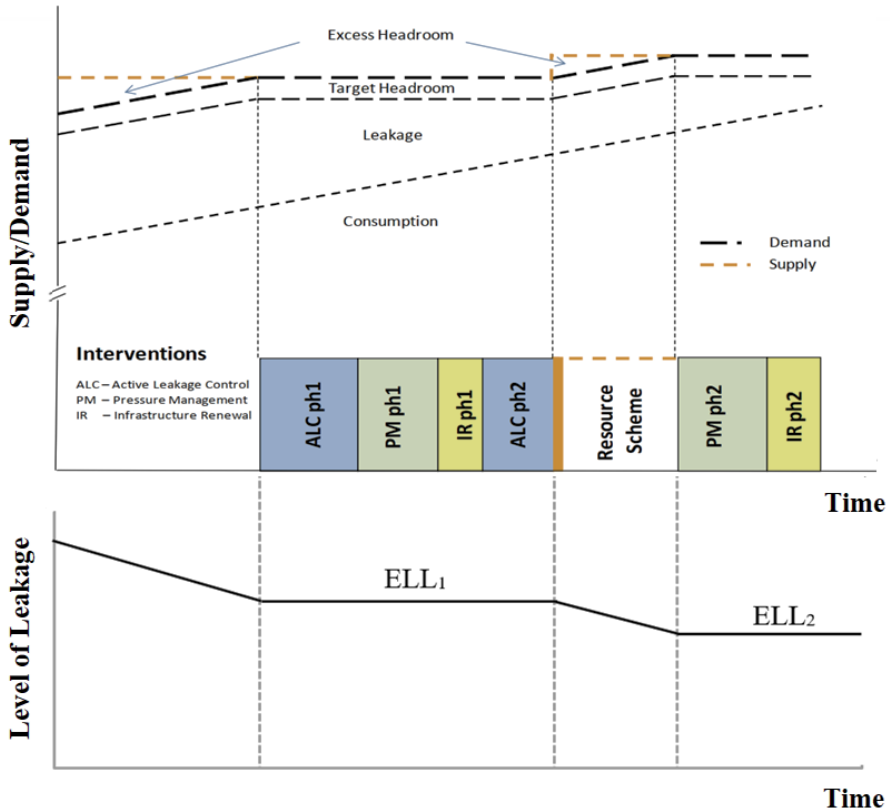


Fig. 10- Conceptual figure of least cost planning approach (Pearson and Trow, 2011)

شکل ۱۰- طرح مفهومی رویکرد حداقل هزینه (Pearson and Trow, 2011)

یعنی تمام گزینه‌های کنترل فعال نشت و سایر گزینه‌های کاهش و حفظ تقاضا، از جمله: بازچرخانی آب، بهبود مدیریت آبیاری، کاهش حجم فلاشینگ، استفاده از ابزارآلات کارآمد، آموزش مصرف‌کنندگان و غیره در نظر گرفته می‌شود، تا تأثیر این گزینه‌ها در تعویق سرمایه‌گذاری اولیه جهت ایجاد ظرفیت جدید برای تأمین آب مشخص شود. راه حل نهایی روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه می‌تواند ترکیبی از گزینه‌های مختلف باشد. اقتصادی‌ترین گزینه‌ها باید با یکدیگر در سناریوهای کاربردی ترکیب شوند و مورد ارزیابی قرار بگیرند؛ کاهش نشت یکی از اقتصادی‌ترین گزینه‌ها در این روش است.

سپس ارزش خالص فعلی ۲۵ یا ۳۰ ساله هر سناریو باید برای دامنه گسترده‌ای از هدف‌گذاری‌های نشت ارزیابی شود و ارزش خالص فعلی تخمین‌زده شده برای هر هدف‌گذاری درنظر گرفته شود (Tripartite Group, 2002). در روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه (شکل ۱۰) می‌توان مشاهده کرد که سطح اقتصادی نشت زمانی کاهش می‌یابد که تقاضا افزایش یابد و نیاز به توسعه منابع عرضه جدید باشد، این کاهش می‌تواند سرمایه‌گذاری را به تعویق اندازد. از لحاظ تئوری، زمانی که پروژه اجرایی می‌شود با استفاده از یک تحلیل صرفاً اقتصادی، می‌توان اجازه داد تا سطح اقتصادی نشت به طور موقت افزایش یابد، تا زمانیکه تقاضای پیش‌بینی شده افزایش یابد. زیرا در ابتدا، تقاضای کافی برای استفاده‌ی کامل از عرضه جدید وجود ندارد. تحلیل برنامه‌ریزی حداقل هزینه از این نوع پیچیده و نیازمند تکرارهای متعدد برای تعیین راه‌حل حداقل هزینه است. به همین علت، توسعه یک مدل نرم‌افزاری جامع برای تسهیل این تحلیل ضروری است که البته نیاز به مقدار قابل توجهی از داده‌های قابل اعتماد دارد. در انگلستان، شرکت‌های آب موظف‌اند داده‌هایی قابل اعتماد و با دقت بالا را در دوره‌های زمانی سالیانه به قانون‌گذاران و سازمان‌های کنترل‌کننده ارائه دهند و از این جهت داده‌های مورد نیاز برای پشتیبانی از این تحلیل را در اختیار دارند. به نظر می‌رسد چنین امکانی در کشورهای در حال‌توسعه وجود ندارد.

۸-۲- روش مدل مالی

رویکرد دیگری که در سطح اقتصادی بلندمدت نشت مطرح است، روش هزینه حاشیه‌ای نسبت به سرمایه‌گذاری است. اگر هزینه حاشیه‌ای کنترل نشت برای ذخیره آب کمتر از هزینه توسعه منابع مورد نیاز باشد، افزایش کنترل نشت از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود؛ در غیر این صورت لازم است منابع جدید آبی توسعه یابند. بر این اساس روش مدلی مالی ارائه شد که شامل دو فرض اولیه است: ۱- عرضه آب مازاد بر تقاضا است ولی در آینده با توجه به تقاضا نیاز به توسعه منابع آبی است (نیازمند سرمایه‌گذاری است)؛ ۲- عرضه آب کمتر از تقاضا است و نیازمند توسعه منابع آبی است. در این دو حالت سطح بهینه نشت باید در شرایطی تعیین شود که الزامات اقتصادی سرمایه‌گذاری را نیز درنظر بگیرد.

در حالت اول (عرضه مازاد بر تقاضا، همراه با سرمایه‌گذاری)، فرض اولیه این است که شرایط شبکه (انشعابات، تعداد خطوط) ثابت است [فرض اول]. از این رو کاهش نشت در شبکه باعث کاهش هزینه حاشیه‌ای آب، کاهش هزینه‌های شرکت، کاهش سطح نیاز به منابع آبی و یا تأخیر در توسعه منابع آبی می‌شود. این مدل شرایطی را درنظر می‌گیرد که توسعه منابع آبی به تأخیر می‌افتد [فرض دوم]؛ تنها هزینه توسعه منابع آتی در نظر گرفته می‌شود [فرض سوم]؛ و همچنین در نظر می‌گیرد تقاضا به طور خطی و بر اساس نرخ رشد جمعیت افزایش پیدا می‌کند [فرض چهارم]. از این رو طبق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که با افزایش نشت ($l_p>0$)، در زمان (t) تقاضا از عرضه پیشی می‌گیرد، و جهت برآورده کردن عرضه نیاز است ظرفیت عرضه افزایش یابد که هزینه آن باید با توجه به سطح نشت تعیین شود؛ بنابراین جهت بهینه‌سازی اقتصادی سطح نشت، علاوه بر دو تابع هزینه نشت و اقدامات کنترل نشت (بخش ۷-۴)، تابع هزینه سرمایه‌گذاری نیز درنظر گرفته می‌شود. هزینه سرمایه‌گذاری از چهار مؤلفه تشکیل می‌شود: ۱- تخمین هزینه سرمایه‌گذاری آینده (F)؛ ۲- برآورد زمان ایجاد ظرفیت عرضه جدید (t)؛ ۳- محاسبه ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده (PV) (رابطه نرخ تنزیل)؛ ۴- محاسبه هزینه سالانه برابر با ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده (CRF) (رابطه ضریب بازگشت سرمایه). با توجه به این چهار مؤلفه، هزینه سالانه ایجاد ظرفیت جدید عرضه، به دست می‌آید (جدول ۸) (Wyatt, 2010).

در حالت دوم (عرضه کمتر از تقاضا، همراه با سرمایه‌گذاری) با فرض ثابت بودن شرایط شبکه (انشعابات، تعداد خطوط) و ظرفیت عرضه (همانند آنچه در بخش ۷-۴ شرح داده شد)، هزینه توسعه منابع آب به صورت جداگانه باید درنظر گرفته شود. در این روش، شرکت همواره نیاز به توسعه منابع عرضه خود دارد، بنابراین نمی‌تواند آن را بر اساس سطح نشت موجود مدل‌سازی کند و باید الزامات سرمایه‌گذاری به صورت جداگانه و مستقل از نشت انجام و طراحی شود.

۸-۳- روش تحلیل هزینه- فایده

روش کاربردی دیگر در زمینه دست‌یابی به سطح اقتصادی نشت، تحلیل هزینه- فایده است. در تحلیل هزینه- فایده، علاوه بر ارزیابی هزینه و فایده هر عامل در طرح اقتصادی مورد نظر، ارزش زمان انجام

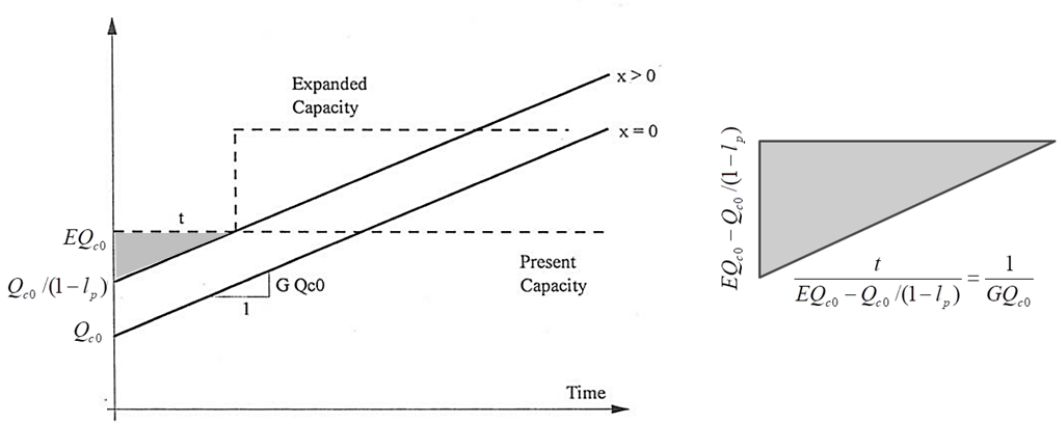


Fig. 11- The concept of estimating the cost of increasing supply capacity in a situation where supply is in excess of demand (Wyatt, 2010)

شکل ۱۱- مفهوم برآورد هزینه افزایش ظرفیت عرضه در حالتی که عرضه مازاد بر تقاضا است (Wyatt, 2010)

Table 7- The guide of long-run economic level of leakage based on financial model method

جدول ۷- راهنمای سطح اقتصادی بلندمدت نشت بر اساس روش مدل مالی

$F=k(zGQ_{c0})^{0.7}$	(۲۹)
$t=[E-(1/1-l_p)]/G$	(۳۰)
$PV=F(1+r)^{-t}$	(۳۱)
$CRF=r(1+r)/[(1+r)^{z}-1]$	(۳۲)
$C_c=CRFF(1+r)^{-[E-(1/1-l_p)]/G}$	(۳۳)
$dC_v/dl_p+dC_{pl}/dl_p+dC_c/dl_p=0$	(۳۴)

- F: ضریب هزینه (واحد پولی/ مترمکعب/روز)
- k: ضریب هزینه
- Z: طول عمر مفید ظرفیت عرضه جدید
- G: نرخ رشد جمعیت
- Q_{c0}: مصرف پایه شبکه
- E: نسبت ظرفیت آب تولیدی حاضر به مصرف آب حاضر
- 1_p: نسبت نشت به ازای آب تولید شده
- r: نرخ بهره‌ی مؤثر

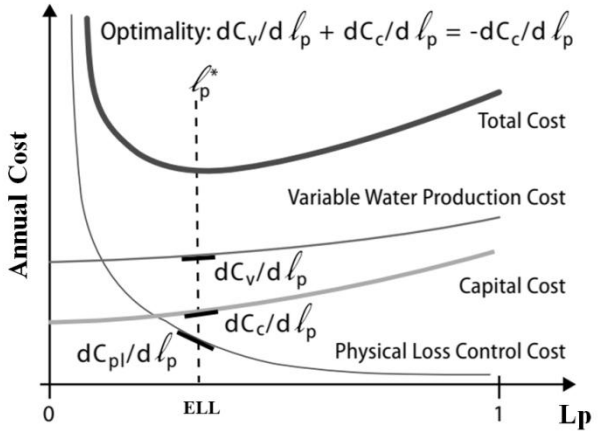


Fig. 12- Long-run economic level of leakage based on financical model method (Wyatt, 2010)

شکل ۱۲- سطح اقتصادی بلندمدت نشت بر اساس روش مدل مالی (Wyatt, 2010)

هزینه یا درآمد نیز باید درنظر گرفته شود. از این جهت می‌توان از روش ارزش فعلی[55] (PV) استفاده نمود (رابطه ۳۵)؛ این روش جریان نقدینگی (درآمدها و هزینه‌ها) را بر پایه زمان وقوع (درآمد یا هزینه) به نرخ روز تنزیل می‌کند. همچنین توسط روش ارزش فعلی خالص[56] (NPV)، می‌توان نرخ بازده سرمایه‌گذاری را مورد بررسی قرار داد (رابطه ۳۶). حاصل شدن ارزش فعلی خالص مثبت، نشان‌دهنده ارزیابی مطلوب پروژه است؛ یعنی نرخ بازده سرمایه‌گذاری انجام شده بالاتر از نرخ بازده مورد نظر است.

$$PV_t = \frac{C}{(1+i)^t} \qquad (۳۵)$$

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{C}{(1+i)^t} - I \qquad (۳۶)$$

که C: هزینه زمان آینده، t: تعداد دوره‌های زمانی و i: نرخ تنزیل و I: سود نقدی آتی پروژه است. به طور معمول نرخ بهره برای طرح‌های سرمایه‌گذاری، معادل حداکثر نرخ سود بدون ریسک (مانند نرخ سود سپرده بلندمدت بانکی یا اوراق مشارکت) به‌علاوه چند درصد برای پوشش ریسک سرمایه‌گذاری انتخاب می‌شود (Tabesh and Beigi, 2017).

طبق مطالعات انجام گرفته روش هزینه- فایده بیش‌تر در زمینه تحلیل اقتصادی طرح‌های مدیریت فشار استفاده می‌شود. مدیریت فشار از بین استراتژی‌های کنترل فعال نشت، می‌تواند بر هر سه مؤلفه نشت به خصوص نشت زمینه تأثیر داشته باشد و آن‌ها را کاهش دهد (Vicente et al., 2015). از لحاظ دوره زمانی نیز، مدیریت فشار جزو استراتژی‌های میان‌مدت و بلندمدت بوده که دوره بازگشت سرمایه آن سریع است و گاهاً به چند ماه می‌رسد (Pearson and Trow, 2005, Fanner et al., 2007). تمام این مسائل باعث شده است که مدیریت فشار به عنوان یک ابزار کارآمد و اقتصادی در مدیریت نشت مطرح باشد (Lambert, 2003, Martínez-Codina et al., 2015). مدیریت فشار شامل فعالیت‌های مختلفی نظیر استفاده از شیرهای کاهنده فشار، پمپ‌های دور متغیر و تنظیم ارتفاع آب در مخازن ذخیره می‌باشد (Vicente et al., 2015). اگرچه مدیریت فشار یکی از روش‌های کاربردی و مؤثر برای کنترل و کاهش نشت است، اما مزایای عمده دیگری از جمله کاهش تعداد شکستگی‌ها، کاهش هزینه کنترل فعال نشت، تأخیر در تعویض لوله‌ها، افزایش عمر لوله‌ها، افزایش رضایت مشترکین و کاهش برخی از اجزای مصرف آب دارد (Lambert and Fantozzi, 2010, Lambert and Thornton, 2012, Moslehi and Jalili Ghazizadeh, 2016). جنبه‌های مختلف اقتصادی حاصل از اجرای یک طرح مدیریت فشار را می‌توان در قالب یک تحلیل جامع هزینه- فایده ارزیابی نمود.

مطالعات گوناگونی با توجه روش‌های تعیین سطح اقتصادی بلندمدت نشت در طی دو دهه اخیر صورت گرفته است که به طور خلاصه در جدول ۹ تشریح شده، و روندنمای حاصل از آن نیز در شکل ۱۳ ارائه شده است.

۹- تعیین سطح اقتصادی پایدار نشت

در بخش‌های پیشین سطح اقتصادی کوتاه‌مدت و بلندمدت نشت، با درنظرگرفتن معیار اقتصادی بیان شد. در یک رویکرد جامع‌تر، سطحی از نشت با درنظر گرفتن معیارهای زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی مطرح می‌شود که سطح اقتصادی نشت را به طور کامل‌تری ارائه می‌دهد و از آن به عنوان سطح اقتصادی نشت پایدار یاد می‌شود.

اولین بار Howarth (1998)، به بررسی نقش آژانس محیط‌زیست در کنترل نشت و تفکر موجود در سطح اقتصادی نشت پرداخت و بعد از بیان سطح اقتصادی نشت و نحوه به دست آوردن آن، نشان داد که هزینه‌های حاشیه‌ای آب تنها هزینه‌های عملیاتی تصفیه و پمپاژ آب نیست؛ بلکه هزینه‌های دیگری نظیر هزینه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی نیز باید دراین تجزیه و تحلیل مورد توجه قرار گیرد؛ این هزینه‌ها با استفاده از ارزش فعلی خالص حساب شده و سپس به هزینه آب اضافه می‌شود. حال، فرض براین است که برای حفظ تعادل عرضه- تقاضا، کنترل نشت تنها جایگزین توسعه منابع است؛ در صورتی که ممکن است دیگر گزینه‌های مدیریت تقاضا، مانند اندازه‌گیری، امکانات آبرسانی پیشرفته یا عملکردهای حفاظتی آب، اقتصادی‌تر باشد و از این رو مورد توجه قرارگیرد.

در مناطقی که فقر آبی وجود دارد، موضوع سطح اقتصادی پایدار اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، زیرا حفظ منابع آبی منجر به حفظ تعادل زیست محیطی می‌شود، که همچنین رابطه‌ای با اصل بازگشت هزینه[57] دارد. هزینه‌های آب عرضه شده باید از طریق مصرف‌کنندگان آن برگردانده شود. آبی که از طریق نشت از بین رفته را نمی‌توان به مصرف‌کنندگان تخصیص داد. بنابراین بازگشت سرمایه وجود ندارد، مگر اینکه هزینه‌های نشت در تعرفه آب مصرفی لحاظ شود. یک مثال عینی در مناطق دچار کمبود آب، اندرکنش بین آب‌های سطحی و زیرزمینی است که در آن اکوسیستم‌های زیرزمینی از طریق کمبود آب تحت تأثیر قرار می‌گیرند؛ برداشت‌های غیرضروری از پهنه‌های آبی به علت نشت اضافی در شبکه، این شرایط را تشدید می‌کند. علاوه بر این، نشت بیانگر تلفات انرژی الکتریسیته و مواد شیمیایی مورد استفاده در فرایندهای تصفیه است که می‌تواند محصولات جانبی مانند اُزن تولید کند و باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای شود.

Table 8- Review of case studies on long-run economic level of leakage

جدول ۸- خلاصه‌ای از مطالعات موردی انجام شده در زمینه سطح اقتصادی نشت در بلندمدت

محقق(ان)	مطالعات صورت گرفته
Girard and Stewart (2007)	مکان: گلدکست- استرالیا روش: ارزش خالص فعلی - بررسی مزایای حاصل از مدیریت فشار و کنترل فعال نشت - ارزیابی سود اقتصادی حاصل از کاهش نشت و کاهش شکستگی‌ها حاصل از مدیریت فشار - استراتژی مدیریت فشار و کنترل فعال نشت، کم‌هزینه‌ترین و اقتصادی‌ترین گزینه در بین گزینه‌های موجود برای تأمین آب موجود است
Awad et al. (2008)	مکان: انگلستان روش: ارزش خالص فعلی - ارائه روش ارزیابی مزایا حاصل از مدیریت فشار مبتنی بر شیرهای فشار شکن - برآورد سود حاصل از کاهش نشت، شکستگی‌ها، کنترل فعال نشت، مصرف آب، مصرف انرژی و رضایت مشتریان - تخمین مقدار کاهش نشت حاصل از مدیریت فشار با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی - تخمین سود حاصل از کاهش شکستگی‌ها از رابطه فشار- شکستگی که در مطالعات بعدی چنین رابطه‌ای را رد کرده و مدل‌های کامل‌تری ارائه دادند
González-Gómez et al. (2011)	مکان: مجازی روش: ارزش خالص فعلی - ارائه روشی مبتنی بر مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی، رابطه فشار- نشت و رابطه فشار- مصرف برای ارزیابی مزایای حاصل از مدیریت فشار - تخمین میزان نشت و مصارف وابسته به فشار با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولکی - تخمین سود حاصل از کاهش نشت و کاهش مصارف وابسته به فشار
Venkatesh (2012)	مکان: اسلو- نروژ روش: ارزش خالص فعلی - برنامه بلندمدت ۱۰ ساله - بررسی هزینه- فایده کاهش نشت به وسیله بازسازی لوله‌های شبکه
Malm et al. (2015)	مکان: گوتنبرگ- سوئد روش: ارزش خالص فعلی - بررسی اثر ارزش خالص چهار استراتژی کاهش نشت به وسیله تحلیل هزینه- فایده، و تحلیل عدم قطعیت - تعمیر شکستگی لوله‌ها نسبت به جایگزینی آن‌ها اقتصادی‌تر است - ایجاد ترکیبی از افزایش پرسنل تعمیرات و افزایش دبی‌سنج‌های موجود در شبکه نسبت به دیگر گزینه‌ها اقتصادی‌تر است
Kanakoudis and Gonelas (2015)	مکان: کوزانی- یونان روش: ارزش خالص فعلی - تحلیل اقتصادی سود و هزینه حاصل مدیریت فشار - برآورد نشت زمینه توسط سناریوهای مختلف مدیریت فشار - برآورد سطح اقتصادی بلندمدت برای افق ۵، ۱۰ و ۱۵ سال - (کاهش حجم ورودی به شبکه به میزان ۲/۹ (میلیون مترمکعب) در یک دوره ۱۵ ساله)
Kanakoudis and Gonelas (2016)	مکان: کوزانی- یونان روش: ارزش خالص فعلی - سطح اقتصادی بلندمدت برای مدیریت فشار - (محاسبه هزینه تمام شده آب، محاسبه مزایا، هزینه‌های اقتصادی انجام مدیریت فشار و تعیین نقطه سر به سر سرمایه‌گذاری مربوطه) - بررسی تأثیر ۵ سناریو مدیریت فشار در ۲۴ ناحیه ایزوله شده - بررسی هر سناریو به روش ارزش خالص فعلی (NPV) - برآورد سطح اقتصادی هدررفت واقعی (EARL)
Creaco and Walski (2017)	مکان: ایتالیا روش: ارزش خالص فعلی - بررسی هزینه- فایده کاهش نشت و شکستگی توسط اجرای مدیریت فشار در یک ناحیه مدیریت فشار توسط شیرهای فشار شکن (PRVs) و شیرهای کنترل زمانی (RTC)

	– سود حاصل از کاهش نشت و کاهش شکستگی‌ها با توجه به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش هزینه لوله‌های آسیب دیده برآورد شد – میزان کاهش نشت با استفاده از مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی برای یک شبکه با نشت زیاد، متوسط و کم تخمین زده شد
Aboelnga et al. (2018)	مکان: مادابا– اردن روش: هزینه– فایده – تحلیلی هدفمند برای تخمین حجم نشت و اجزا نشت – برآورد مؤلفه‌های نشت‌واقعی از طریق روش تخمین نشت زمینه و شکستگی‌ها – بررسی تأثیر بالقوه مدیریت فشار، نشت‌یابی فعال و کاهش زمان پاسخ – کاهش ۳۷/۲ درصد از کل حجم هدررفت واقعی توسط افزایش سیاست‌های پاسخ‌گویی و مدیریت دارایی‌ها – کاهش شکستگی‌های گزارش‌نشده توسط مدیریت فشار و نشت‌یابی فعال
Moslehi et al. (2020b)	مکان: مشهد– ایران روش: ارزش خالص فعلی – توسعه مدلی ریاضی جهت مدیریت پیشرفته فشار – اجرای سامانه مدیریت فشار از طریق نصب شیرهای کاهنده فشار زمانی و جریانی در شبکه فاقد مدل هیدرولیکی – برآورد سود حاصل از کاهش نشت آب، کاهش تواتر شکستگی‌های گزارش شده و نشده، کاهش عملیات نشت‌یابی فعال، کاهش مصارف وابسته به فشار، کاهش مصرف انرژی، کاهش نرخ خسارت ساختمان‌ها بابت شکستگی، کاهش تماس‌های مشترکان و افزایش رضایت مشتریان، صرفه‌جویی غیرمستقیم انرژی – برآورد هزینه سامانه مدیریت فشار مبتنی بر شیرهای کاهنده فشار – فایده حاصل از کاهش نشت حدود نصف کل فایده حاصل از اجرای مدیریت فشار است – نسبت فایده به هزینه بیش از ۳ برابر است.
Haider et al. (2019)	مکان: بریده– عربستان روش: منحنی هزینه کل (به صورت کلی به بررسی پرداخته است) و ارزش خالص فعلی – توسعه روشی مفهومی جهت رسیدن به سطح اقتصادی نشت در شبکه‌های با عرضه نوبتی در مناطق گرمسیر – این روش نیازی به مدل هیدرولیکی ندارد و بر پایه داده (داده‌های اندازه‌گیری شده جریان، فشار، ساعات عرضه آب و هزینه عملیات نشت‌یابی) است – اجرای ۶ سناریو و تعیین سطح اقتصادی نشت توسط ILI موجود o تخمین نشت قبل از عملیات کنترل نشت (ILI=20) o تخمین نشت بعد عملیات کنترل نشت فعال و غیرفعال (ILI=7.28) o تخمین نشت بعد از مدیریت فشار (ILI=5.53) o تخمین نشت بعد از شناسایی و تعمیر لوله‌های خانگی (۱۰ درصد بالای خانوارهای پرمصرف) (ILI=5.36) o تخمین نشت بعد از شناسایی و تعمیر لوله‌های خانگی (۵۰ درصد بالای خانوارهای پر مصرف) (ILI=5.27) – تخمین نشت بعد از شناسایی و تعمیر لوله‌های خانگی باقیمانده (ILI=4.98) – استفاده از سناریو تحت مدیریت فشار، جهت کاهش هدررفت واقعی و کاهش شاخص نشت زیر بنایی

Ofwat (2008) در راهنمای "بهترین عملکرد"، روش‌های اضافه نمودن هزینه‌های اثرات خارجی[58] (زیست محیطی و اجتماعی) را به طور کامل ارائه نمود که برای بررسی بیشتر می‌توان به آن مراجعه نمود.(2012) Tripartite Group نیز روش محاسبه نشت اقتصادی پایدار و یکپارچه‌سازی آن در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب را بررسی و پیشنهاداتی جهت محاسبه هر یک از اجزاء آن ارائه کرد. با این وجود، ارزیابی کردن مقدار کربن از این حیث حائز اهمیت است که هزینه تغییرات آب و هوا و انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای نیاز به تبدیل حجم گازهای مختلف گلخانه‌ای به معادله CO_2 و سپس استفاده از یک قیمت سایه[59] یا ارزش خارجی برای تبدیل میزان انتشار CO_2 به معادل ارزی دارد (Smout et al., 2010). جدول ۱۱، خلاصه‌ای از مطالعات انجام گرفته در خصوص تعیین سطح اقتصادی نشت پایدار را ارائه می‌کند.

با توجه به مطالعات انجام شده می‌توان رویکردی گام به گام جهت دستیابی به سطح اقتصادی نشت بر اساس مفاهیم بررسی شده در این مقاله ارائه داد (شکل ۱۴). در این فلوچارت چارچوب زمانی تعیین سطح اقتصادی نشت و روش‌های مورد استفاده جهت کاهش نشت و دستیابی به سطح اقتصادی نشت نشان داده شده است.

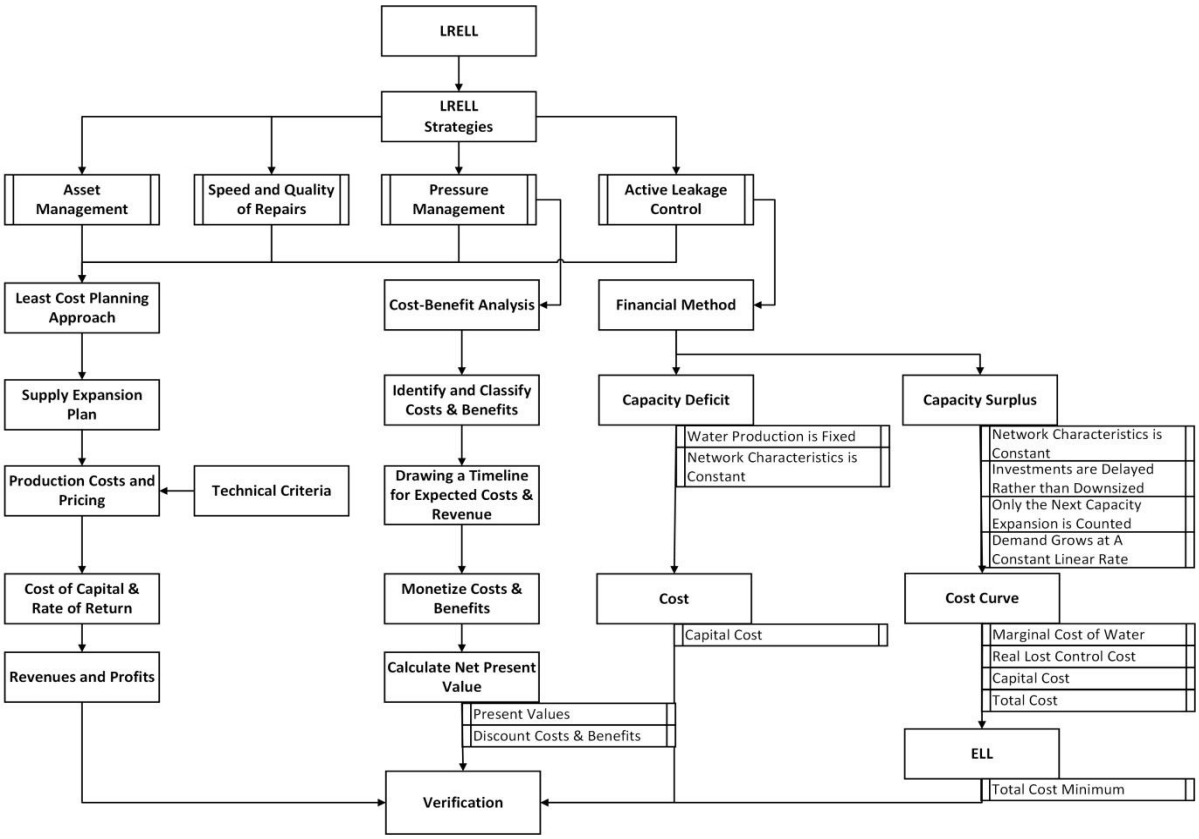


Fig. 13- Flowchart for determination of Long-run Economic Level of Leakage (LRELL)

شکل ۱۳- روندنمای تعیین سطح اقتصادی بلندمدت نشت

۱۰- بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل سطح اقتصادی نشت باتوجه به نوع سرمایه‌گذاری، به دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت دسته‌بندی می‌شود که در اصل به زمان مورد نیاز برای اجرای استراتژی‌های کنترل نشت بستگی دارد. در طی سال‌های اخیر این مفهوم به تحلیل اقتصادی و پایدار نشت نیز توسعه‌یافته است که به علت جامع بودن آن، از اهمیت و توجه بیشتری

Table 9- Review of studies on sustainable economic level of leakage

جدول ۹- خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه سطح اقتصادی نشت پایدار

محقق(ان)	روش عملکردی
Ofwat (2008)	– اضافه نمودن هزینه‌های خارجی (زیست محیطی و اجتماعی) – ارائه راهنمای عملکردی برای کنترل فعال نشت، مدیریت فشار و بازسازی، نوسازی و تعمیرات
Smout et al. (2010)	مکان: زاراگوزا– اسپانیا – محاسبه انتشار کربن به وسیله عملیات نشت‌یابی فعال – ترکیب هزینه‌های اقتصادی انتشار کربن در مدل سطح اقتصادی نشت می‌تواند در ۵ مرحله درنظر گرفته شود. ○ ۱– برآورد انرژی مصرفی عوامل خارجی در فعالیت‌های مدیریت آب و نشت آب؛ ○ ۲– جمع‌آوری داده‌ها و ارزیابی خروجی در فعالیت‌های مدیریت آب و نشت آب؛ ○ ۳– ارزیابی اثرات کربن حاصل از عوامل خارجی در فعالیت‌های مدیریت آب و نشت آب؛ ○ ۴– اعمال مقدار کربن عوامل خارجی در تحلیل اقتصادی؛ ○ ۵– نظارت پس از تجزیه و تحلیل
Tripartite Group (2012)	– محاسبه نشت اقتصادی پایدار و یکپارچه سازی آن در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب – ارائه راهنمای عملکردی برای کنترل فعال نشت، مدیریت فشار و بازسازی، نوسازی و تعمیرات

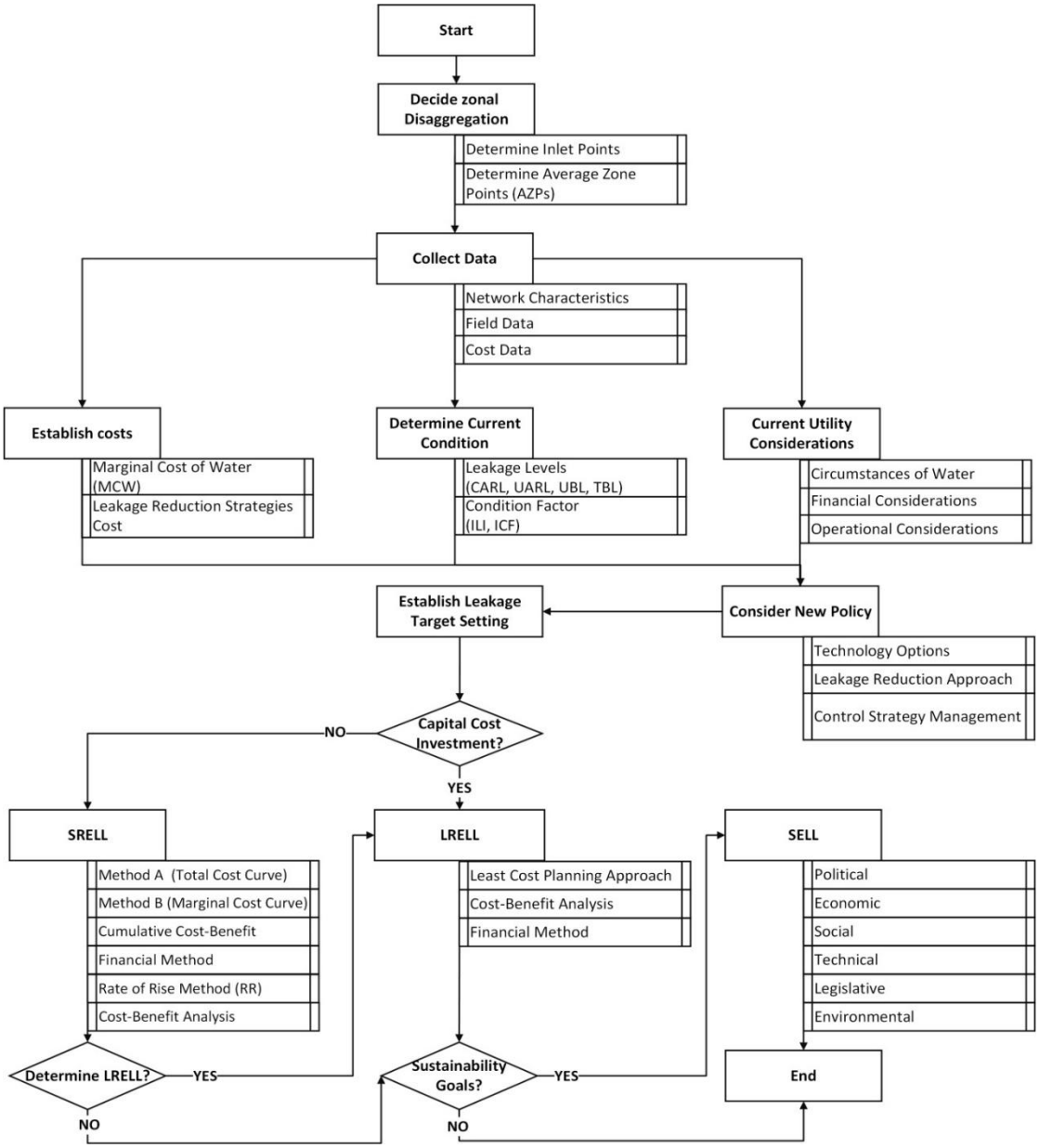


Fig. 14- Flowchart for determination of leakage target setting and economic level of leakage

شکل ۱۴- روندنمای تعیین هدف‌گذاری نشت و سطح اقتصادی نشت

برخوردار است. همانطور که در مقاله به طور کامل بحث شد اگر بحث سرمایه‌گذاری و ایجاد ظرفیت جدید برای تامین آب مطرح نباشد، تحلیل اقتصادی مورد نظر شرکت در دوره زمانی کوتاه‌مدت قرار خواهد گرفت. در دوره زمانی کوتاه‌مدت، شرکت باید با توجه به اطلاعات در دسترس از شبکه مورد نظر، جهت هدف‌گذاری نشت برنامه‌ریزی کند. از این جهت، استراتژی‌های مدیریت فشار، مدیریت حوادث و عملیات کنترل فعال نشت می‌تواند شرکت آب و فاضلاب را در یک دوره زمانی کوتاه به سطح اقتصادی نشت برساند. در صورت اعمال مدیریت فشار در شبکه توزیع آب، تحلیل اقتصادی می‌تواند با توجه به تکنیک اقتصادی هزینه- فایده صورت بگیرد. اما اگر شرکت دچار بحران مالی است و نمی‌تواند بر روی طرح‌های مدیریت فشار سرمایه‌گذاری کند، بهترین گزینه انجام عملیات کنترل فعال نشت است. در این مقاله پنج روش ۱- روش A (منحنی هزینه کل)؛ ۲- روشB (هزینه حاشیه‌ای)؛ ۳- روش نرخ افزایش نشت؛ ۴- روش هزینه- فایده تجمعی و ۵- روش مدل مالی، برای تعیین سطح اقتصادی نشت کوتاه‌مدت و به خصوص استراتژی عملیات نشت‌یابی فعال بیان شده است. تمامی این روش‌ها، مبتنی بر داده‌های میدانی هستند که با توجه به شرایط برخی بـــر برخی دیگر اولویت دارند و می‌توانند در شرایط مختلف هر یـک

جوابگوی هدف‌گذاری نشت مورد نظر باشند.

۱. روش منحنی هزینه کل با توجه به اینکه یک روش مبتنی بر حداقل داده است؛ اما در عمل، چند مسأله وجود دارد که ممکن است باعث شود که این روش تخمین صحیحی از سطح اقتصادی نشت ارائه ندهد. از جمله: ۱- بدست آوردن نقاط مختلف روی منحنی هزینه کنترل فعال نشت، به خصوص نقاط دور از وضعیت موجود شبکه، که از نظر عملی امکان‌پذیر نیست؛ زیرا این منحنی هزینه، بر اساس یک معادله هایپربولیک شامل یک نقطه (که نشان‌دهنده هزینه و سطح نشت موجود است) به علاوه دو مجانب قائم و افقی رسم می‌شود. همچنین فرضیات ذکر شده در مورد رفتار مجانب‌های قائم و افقی نیز در عمل تست نشده است؛ ۲- منحنی هایپربولیک هزینه عملیات کنترل فعال نشت بر مبنای یک فرض اساسی استوار است؛ که همواره پس از انجام عملیات نشت‌یابی، نشت موجود به سطح نشت زمینه واقعی خواهد رسید. این یک فرض ساده‌سازِ عملی است؛ و در عمل به عملیات کنترل فعال نشتِ بیشتری نیاز است. حال ممکن است برای یک ناحیه، سطح خروج سطح نشت زمینه واقعی نباشد. اگر سطح خروج بالاتر از سطح نشت زمینه واقعی باشد، نشت اضافی با افزایش تواتر عملیات کنترل فعال نشت به دو برابر، نصف نخواهد شد؛ و فقط نشت بالاتر از سطح خروج نصف خواهد شد. جهت اصلاح تئوری، پیشنهاد می‌شود سطح خروج به جای سطح نشت زمینه واقعی استفاده شود؛ ۳- فرض می‌شود که عملیات کنترل فعال نشت حاضر، تا رسیدن به نشت زمینه واقعی تغییر نمی‌کند؛ اما در عمل معمولاً عملیات نشت‌یابی تا کشف یک شکستگی بزرگ ادامه می‌یابد، تا دستیابی به نشت زمینه واقعی. از آنجا که تخمین سطح اقتصادی نشت به وسیله روش منحنی هزینه کل با استفاده از متغیرهای متفاوتی تعیین می‌شود، بنابراین با عدم قطعیت همراه است و پیشنهاد می‌شود جهت بررسی تأثیر عوامل مختلف بر سطح اقتصادی کوتاه‌مدت نشت، تحلیل حساسیت بر هر متغیر صورت بگیرد.

۲. روش هزینه حاشیه‌ای نیز مشابه روش منحنی هزینه کل است، با این تفاوت که در این روش به جای استفاده از یک معادله‌ی هایپربولیک، از داده‌های هزینه مربوط به کشف و تعمیر نشت‌های گزارش نشده موجود در شرکت استفاده می‌شود. یعنی هزینه حاشیه‌ای عملیات کنترل فعال نشت بر اساس داده‌های هزینه و نشت مشخص می‌شود. همچنین در این روش فاصله زمانی بین عملیات نشت‌یابی ثابت درنظر گرفته می‌شود. بنابراین سطوح نشت ورودی و خروجی و متوسط متغیر خواهند بود. این روش بسیار وابسته به داده است و کیفیت پایین داده‌ها می‌تواند باعث افزایش عدم قطعیت در نتایج بدست آمده شود. اگرچه که سطوح نشت وروی و خروجی در این روش متغیر است، اما فاصله زمانی ثابت برای انجام عملیات کنترل فعال نشت معمولاً در عمل اتفاق نمی‌افتد؛ که محدودیت بزرگی برای این روش محسوب می‌شود. علاوه بر این، رابطه بین نشت اضافی و هزینه که با استفاده از داده‌های میدانی در نواحی مختلف بدست می‌آید، می‌تواند تحت تأثیر ترکیب و مشخصات ناحیه یا دیگر فاکتورها نظیر نوع لوله، فشار و غیره باشد. به طور خلاصه این روش بسیار پیچیده است و در صورتی می‌تواند نتایجی نزدیک به واقعیت تولید کند که توسط داده‌های با قابلیت اعتماد بالا مدل‌سازی شود. با توجه به داده‌های مناسب می‌توان انتظار داشت که این روش نسبت به روش منحنیِ هزینه کل، نتایج نزدیک به واقعیت‌تری را ارائه دهد.

۳. روش نرخ افزایش نشت، روشی سریع و کاربردی است که با کمترین اطلاعات ممکن می‌تواند تنها تخمینی از تواتر اقتصادی عملیات کنترل فعال نشت ارائه دهد. کاربرد این روش نسبت به روش‌های دیگر، کارآیی آن در سیستم‌های ناپایدار است. این روش می‌تواند برای هر شبکه توزیع با هر اندازه‌ای استفاده شود تا یک ارزیابی اولیه از تواتر اقتصادی عملیات کنترل فعال نشت، و بودجه مورد نیاز برای اجرای مراحل اولیه یک برنامه کاهش تلفات واقعی را به دست دهد. متغیرهای استفاده شده در معادله این روش، همگی از ریشه دوم هستند که باعث می‌شود خطاهای این پارامترها از حساسیت کمتری برخوردار باشند. البته باید درنظر داشت که فرض اصلی این روش نرخ ثابت افزایش نشت‌های گزارش‌نشده در زمان است که یک فرض ساده‌ساز از واقعیت است.

۴. روش هزینه- فایده تجمعی ساده‌ترین روش تخمین سطح اقتصادی نشت از نظر انجام محاسبات است. اما این روش برای تخمین سطح اقتصادی نشت به داده‌های هزینه کنترل فعال نشت، سود حاصل از کنترل فعال نشت و همچنین سطح نشت موجود در چندین سال متوالی نیاز دارد. یعنی در این روش، برنامه‌ریزی کاهش نشت مبتنی بر سوابق و داده‌های گذشته جمع‌آوری شده است. به نظر می‌رسد این روش مختص کشورهای توسعه‌یافته‌ای است که عملیات کنترل فعال نشت را به طور منظم انجام می‌دهند (شرایط پایدار شبکه) و داده‌های مربوط به آن را به طور کامل مستند می‌کنند.

۵. روش مدل مالی، یک روشی مبتنی بر حداقل داده جهت حفظ حالت پایدار شبکه است؛ که در قالب دو حالت سعی می‌کند شرایط پایدار شبکه را حفظ نماید و سطح اقتصادی نشت را

تخمین بزند. ۱- حالت اول (عرضه مازاد بر تقاضا، بدون سرمایه‌گذاری) که در آن تغییری در شبکه حاصل نمی‌شود و ظرفیت تقاضا همواره ثابت است. ۲- حالت دوم (عرضه کمتر از تقاضا، بدون سرمایه‌گذاری) که در آن تغییری در شبکه حاصل نمی‌شود و ظرفیت عرضه همواره ثابت است. مشکل اساسی این روش فرض‌هایی دور از واقعیت است که از جنبه کاربردی آن می‌کاهند. همچنین مشاهده می‌شود که در محاسبات مربوط به این روش نیاز است نسبت‌های هدررفت واقعی و هدررفت ظاهری تعیین شود؛ در حالی‌که این نسبت‌ها به سادگی قابل تشخیص نبوده و در صورت تخمین نیز عدم قطعیت را وارد مسأله می‌کند.

موارد مربوط به بررسی روش‌های مختلف تحلیل اقتصادی سطح نشت در کوتاه‌مدت بیان شد؛ حال اگر شرکت آب و فاضلاب، به دنبال رویکردی بلندمدت (صرف کردن هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری) یا افزایش ظرفیت تامین آب در افق برنامه‌ریزی خود باشد، روش‌های ۱- رویکرد برنامه‌ریزی حداقل هزینه؛ ۲- روش مدل مالی و ۳- روش هزینه- فایده (ارزش خالص فعلی) می‌تواند برای تعیین سطح اقتصادی نشت بلندمدت- توسعه استراتژی اقتصادی برای عرضه منابع آب جدید- پیشنهاد شود. روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه با توجه به گستردگی و استفاده از گزینه‌های مختلف، نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش‌هایی ارائه می‌دهد که بر مبنای هزینه حاشیه‌ای (روش مدل مالی) تحلیل می‌شوند؛ روش هزینه حاشیه‌ای تنها توازن بین کنترل نشت و هزینه‌های توسعه منابع و تصفیه آب را درنظر می‌گیرد که ساده‌تر از روش برنامه‌ریزی حداقل هزینه است. اگر شرکت برنامه‌ای جهت تخصیص منابع جدید آب نداشته باشد، تنها راهکار، روش ارزش خالص فعلی است. با این وجود قبل از اینکه چنین تحلیلی انجام گیرد، ابتدا باید شبکه در حالت پایدار قرار بگیرد، و شرکت نیز تحلیل اقتصادی نشت کوتاه‌مدت را با توجه به شرایطی که برای هر روش ذکر شد و همچنین شرایط موجود شرکت تعیین نماید. اگر بعد از تعیین تحلیل اقتصادی کوتاه‌مدت یا بلندمدت نشت، اهداف زیست محیطی و اجتماعی نیز مورد اهمیت باشد، می‌توان تحلیل پایدار مانند برآورد میزان انتشار کربن بر روی تحلیل اقتصادی نشت صورت داد. به طورکلی شرکت‌های آب و فاضلاب به منظور برنامه‌ریزی و اجرای برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت مدیریت نشت، اختصاص بودجه و تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب هر یک از استراتژی‌های کنترل نشت، تحلیل اقتصادی نشـت و تعیین سطح اقتصادی نشت را به طور جد مد نظر داشته باشند.

پی‌نوشت‌ها

1- Bursts and Background Estimates
2- Top Down Method (Water Balance)
3- Component Analysis Method
4- Bottom up Method (Minimum Night Flow Approach)
5- Speed and Quality of Repairs (SQR)
6- Rehabilitation and Renew Pipeline and Asset Management
7- Passive Leakage Management (PLM)
8- Active Leakage Management (ALM)
9- Current Annual Real Loss (CARL)
10- Unavoidable Annual Real Loss (UARL)
11- Economic Level of Leakage (ELL)
12- Capital Cost
13- Marginal Cost
14- Water: It`s Composition, Colloction and Distribution
15- Economic Repair Point
16- Fixed and Variable Area Discharges
17- Infrastructure Leakage Index (ILI)
18- IWA-WLTF
19- Economic Intervention Frequency (EIF)
20- Short-Run Economic Level of Leakage (SRELL)
21- Long-Run Economic Level of Leakage (LRELL)
22- Sustainable Economic Level of Leakage (SELL)
23- Short-Run Marginal Cost (SRMC)
24- Long-Run Marginal Cost (LRMC)
25- Cobb-Douglas Technology Cost Function
26- Leontief Technology Cost Function
27- Linear Technology Cost Function
28- Constant Elasticity of Substitution Technology Cost Function
29- Translog Cost Function
30- Performance Indicators
31- Legitimate Night Consumption (LNC)
32- Minimum Night Flow (MNF)
33- Net Night Flow (NNF)
34- Unavoidable Background Leakage (UBL)
35- District Metered Area (DMA)
36- Infrastructure Condition Factor (ICF)
37- Economic Leakage Index (ELI)
38- Economic Annual Real Losses (EARL)
39- Economic Network Efficiency (ENE)
40- Method A (Total Cost Curve)
41- Method B (Marginal Cost Curve)
42- Rate of Rise (RR) Method
43- Financial Model Method
44- Cumulative Cost-Benefit Method
45- One-off Transitional Effort
46- Leakage Survey Cost
47- Excess Leakage
48- Passive Leakage Level
49- Intervention Level
50- Exit Level
51- Least Cost Planning
52- Cost-Benefit Analysis

53- Unconstrained Supply-Demend Balance
54- Headroom
55- Present Value (PV)
56- Net Present Value (NPV)
57- Cost Recovery Principle
58- Externalities
59- Shadow Price

۱۱- مراجع

Aboelnga H, Saidan M, Al-Weshah R, Sturm M, Ribbe L, & Frechen FB (2018) Component analysis for optimal leakage management in Madaba, Jordan. Journal of Water Supply: Research And Technology-Aqua 67(4):384-396

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

Alkasseh J, Adlan M, Abustan I, & Hanif A (2015) Achieving an economic leakage level in Kinta Valley, Malaysia. Water Utility Journal, 11:31-47

Awad H, Kapelan Z, & Savić D (2008) Analysis of pressure management economics in water distribution systems. In: Proc. of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference (WDSA2008), 17–20 Aug, Kruger National Park (South Africa), 520–531

AWWA (2016) Water audits and loss control programs: M36, AWWA manual. American Water Works Association, Denver, 423p

Creaco E, Walski T (2017) Economic analysis of pressure control for leakage and pipe burst reduction. Journal of Water Resources Planning And Management 143(12):04017074

Crowder G, Hassan S, & Lee M (2012) Developing the network improvement plan for Selangor state, Malaysia. In: Proc. of the 7th IWA Water Loss Reduction Specialist Conference, Manila, Philippines, 1-7

DCWW (2014) Final water resources management plan.Technical Report 1:1-197

Fallahi MA, Ansari H, Davari K, Salehnia N (2009) Pricing urban drinking water with Ramseymodel. Quarterly Iranian Economic Research 13(38):217-242 (In Persian)

Faraji Y (1999) Microeconomic theory. Commercial Print and Publications Company, 470p (In Persian)

Fanner P, Davis S, Hoogerwerf T, Liemberger R, Sturm R, & Thornton J (2007) Leakage management technologies. American Water Works Association, AWWA Research Foundation, Denver, Colo, 380p

Fantozzi M, Lambert A (2007) Including the effects of pressure management in calculations of short-run economic leakage levels. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss", Manila, Philippines, 1–10

Girard M, Stewart RA (2007) Implementation of pressure and leakage management strategies on the Gold Coast, Australia: Case Study. Journal of Water Resources Planning And Management 133(3):210-217

Gledhill E (1957) An investigation of the incidence of underground leakage and an improved method of waste control. Journal of The Institution of Water Engineers 11(2):117-188

González-Gómez F, García-Rubio MA, & Guardiola J (2011) Why is non-revenue water so high in so many cities?. International Journal of Water Resources Development 27:345-360

Griffin A, Heath DC, Brooks AS (1983) Examination of the benefits of leak detection. Department of Water Resources, Office of Water Conservation

Haider H, Al-Salamah IS, Ghazaw YM, Abdel-Maguid RH, & 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):05018018

Hamilton S, Mckenzie R (2014) Water management and water loss, vol. 13. IWA Publishing, London, 250p.

Holtschulte H, Laske C (1989) Causes and assessment of water losses. Water Supply: The Review Journal of The International Water Supply Association

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

Howe CW (1971) Savings recommendations with regard to water-system losses. Journal of American Water Works Association 63(5):284-286

Hudson WD (1978) Increasing water system efficiency through control of unaccounted for water. Journal of American Water Works Association 70(7):362-365

Islam MS, 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, Gonelas K (2015) Estimating the economic leakage level in a water distribution system. In: Proc. of "EWRA2015", Istanbul, Turkey, 1-7

Lambert A, 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 2005", 310-321

Lambert A, Morrison JAE (1996) Recent developments in application of 'bursts and background estimates'concepts for leakage management. Water and Environment Journal 10(2):100-104

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

Thornton J, Lambert A (2005) Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. In: Proc. of IWA Special Conference' Leakage, 12-14

Lambert A, Thornton J (2012) Pressure: bursts relationships: influence of pipe materials, validation of scheme results, and implications of extended asset life. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2012"

Lim E, Savic D, Kapelan Z (2015) Development of a leakage target setting approach for south korea based on economic level of leakage. Procedia Engineering 119(1):120-129

Malm A, Moberg F, Rosén L, Pettersson TJR (2015) Cost-benefit analysis and uncertainty analysis of water loss reduction measures: Case study of the gothenburg drinking water distribution system. Water Resources Management 29(15):5451-5468

May J (1994) Leakage, pressure and control. In: Proc. BICS International Conf. on Leakage Control, London, 1-10

Moslehi I, Jalili-Ghazizadeh M, Yousefi-Khoshqalb E (2020a) Developing a framework for leakage target setting in water distribution networks from an economic perspective. Structure and Infrastructure Engineering , 17(6): 821-837

Moslehi I, Jalili-Ghazizadeh M (2016) A review of the relationships between pressure and burst in water supply systems. Journal of Water and Wastewater Science and Engineering 1:11-19 (In Persian)

Moslehi I, Jalili-Ghazizadeh M, Yousefi-Khoshqalb E (2019) Determination of economic level of leakage in water distribution networks. Iran-Water Resources Research 15(5):35-54 (In Persian)

Moslehi I, Jalili-Ghazizadeh M, Yousefi-Khoshqalb E (2020b) Economic analysis of pressure management in water distribution networks. Journal of Water and Wastewater 31(2(126)):100-117 (In Persian)

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

Karadirek I, Kara S, Yilmaz G, Muhammetoglu A, & Muhammetoglu H (2012) Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. Water Resources Management 26(9):2555-2568

Khiabani N, Bagheri S, BashiriPour A (2017) Economic requirements of water resources management. Journal of Water and Wastewater 28(1):42-56 (In Persian)

Lambert A (1994) Accounting for losses: The bursts and background concept. Water and Environment Journal 8(2):205-214

Lambert A (2001) What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems. In: Proc of IWA Conference. Systems Approach to Leakage Control and Water Distribution System Management, 1–8

Lambert A (2002) International report: Water losses management and techniques. 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", 189-196

Lambert A, Brown TG, Takizawa M, & 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):227-237

Lambert A, Charalambous B, Fantozzi M, Kovac J, Rizzo A, & St John SG (2014a) 14 years experience of using IWA best practice water balance and water loss performance indicators in Europe. In:Proc. of IWA Specialized Conference: "Water Loss"

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

Lambert A, Fantozzi M (2010) Recent developments in pressure management. In: Proc. of IWA Conference "Water Loss 2010"

Lambert A, Koelbl JK, Fuchs-Hanusch D (2014b) Interpreting ILIs in small systems. In: Proc. of IWA Water Ideas 2014: Intelligent Distribution for Efficient and affordable Supplies, 1-10

Tahami Pour M, Molaei F, Moshrefi R (2017) Determination of optimal price of domestic water in Tehran city using Ramsey model. Iran-Water Resources Research 13(3):143-158 (In Persian)

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

Tripartite Group (2002) Best practice principles in the economic level of leakage calculation. Tripartite Group, UK, 158p

Tripartite Group (2012) Review of the calculation of sustainable economic level of leakage and its integration with water resource management planning. Tripartite Group, UK, 107p

Trow S, Pearson D (2010) Setting targets for non-revenue water reduction. Water 21(Apr.):40-43

UKWIR (1994) Managing leakage (Report C): Setting economic leakage targets. UK Water Industry Research, London

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

UKWIR (2013) Factors affecting background leakage levels. UK Water Industry Research, London

Venkatesh G (2012) Cost-benefit analysis–leakage reduction by rehabilitating old water pipelines: Case study of Oslo (Norway). Urban Water Journal 9(4):277-286

Vicente D, Garrote L, Sánchez R, Santillán D (2015) Pressure management in water distribution systems: Current status, proposals, and future trends. Journal of Water Resources Planning and Management 142:04015061

VPSPS (2012) Guideline for determining effective parameters on Unaccounted for Water (UFW) and water losses reduction schemes. Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, Tehran, Iran (In Persian)

Wallace LP (1987) Water and revenue losses: Unaccounted-for water. American Water Works Foundation

Walski TM (1983) The nature of long run cost savings due to water conservation 1. Journal of the American Water Resources Association 19(3):489-498

Walski TM (1984) Analysis of water distribution systems. Wiley & Sons

Wyatt AS (2010) Non-revenue water: financial model for optimal management in developing countries. Rti Press

Munoz-Trochez C, Smout I, Kayaga S (2011) Economic Level of Leakage (ELL) calculation with limited data: An application in Zaragoza. In: Proc. of 35th WEDC International Conference, Loughborough, UK.

Naghdi A, Jalili-Ghazizade M, Moslehi I, Hoseini A (2018) Economic level of leakage analyse in water distribiution networks, case study: Varamin. In: Proc. of 1st Water Loss Conference, Tehran, Iran (In Persian)

Ofwat (2008) Providing best practice guidance on the inclusion of externalities in the ELL calculation. Ref PROC/01/0075. Guidance V08

Parry J (1881) Water: its composition, collection and distribution: a practical handbook for domestic and general use. Norderstedt Hansebooks

Pearson D, Trow S (2005) Calculating economic levels of leakage. In: Proc. of leakage 2005 conference, Portugal, 1-16

Pearson D, Trow S (2011) Managing Leakage 2011 and beyond. In: Proc. of Waer Loss UK

Puust R, Kapelan Z, Savic D, Koppel T (2010) A review of methods for leakage management in pipe networks. Urban Water Journal 7(1):25-45

Sajjadifar S, Pakrouh S, Ghane A, Fathi B (2017) Effective drinking water pricing, a case study of Arak City. Journal of Water and Wastewater 28(1):95-103 (In Persian)

Shore D (1988) Economic optimization of distribution leakage control. Water and Environment Journal 2(5):545-551

Smout IK, Kayaga S, Munoz-Trochez C (2010) Adapting the economic level of leakage concept to include carbon emissions, and application with limited data. In: Proc. of IWA World Water Congress 2010, 1–10

Stephens I (2003) Regulating economic levels of leakage in England and Wales. World Water Week, Washington DC

Tabesh M, Asadiani-Yekta AA, Burrows R (2009) An integrated model to evaluate losses in water distribution systems. Water Resources Management 23(3):477-492

Tabesh M, Beigi S, (2017) Water pricing as an economic justification for reducing Nonrevenue Water (NRW) projects. Journal of Water and Wastewater 28 (1):113–125