



Development of an Economic Decision-Making Model for Determining the Optimal Replacement Time of Water Meters Based on the Net Present Value Replacement Chain Concept

Mohammad Reza Jalili Ghazizadeh^{1*}, Seyyed Ahmad Reza Shahangian^{2,3}, Maryam Amir Mohamadi⁴

1. Assoc. Prof., Dept. of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (Corresponding Author) m.jalili@sbu.ac.ir
2. PhD. in Civil-Environmental Engineering, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3. Senior Research and Development Specialist, Iranab Consulting Engineers Co., Tehran, Iran
4. Head of Management Development and Research Office, Tehran Water and Wastewater Company – Region 4, Tehran, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.567069.3537>

Original Paper

Abstract

Water meters are among the most important measurement devices and revenue-generating assets of water and wastewater utilities, playing a significant role in recovering part of the costs associated with water production, transmission, and distribution, and consequently contributing to the financial sustainability of these utilities. Determining the optimal timing for meter replacement is of particular importance because premature replacement imposes unnecessary costs, whereas delayed replacement increases economic losses resulting from declining measurement accuracy. Therefore, the primary objective of this study is to determine the economically optimal replacement interval for WMs by balancing replacement costs against the losses associated with measurement errors. Based on the Net Present Value Replacement Chain concept, an economic model was developed to determine the optimal replacement point of WMs. To operationalize the model, a computational tool was designed and implemented in the Python programming environment. To evaluate the model's performance under real operating conditions, data from all customers of Tehran Water and Wastewater Company, District 4, were analyzed as a case study, and the economically optimal replacement point was determined individually for each customer. This process enabled the assessment of the developed model using data from more than 172,000 customers. The findings revealed that service connection diameter, water consumption level, and the corresponding water tariff paid by customers are the most influential factors in determining the economically optimal meter replacement point. Accordingly, high-consumption customers across all customer categories were identified as the highest-priority group for meter replacement, whereas low-consumption residential customers were assigned the lowest priority, since the economic benefits obtained from correcting measurement errors in this group are insufficient to offset replacement costs. In addition, apparent water losses attributable to meter inaccuracies were estimated at approximately 6.4%. The results further indicated that 70,076 customers require meter replacement, and implementing this replacement program would require an investment of approximately IRR 1,773,610,000,000 (equivalent to approximately 177.4 billion Tomans), expressed in 2024 values. The developed NPVRC-based model is capable of determining the economically optimal timing for water meter replacement while simultaneously considering both technical and economic factors. The Python-based computational tool enables the simultaneous analysis and prioritization of a very large number of customers, transforming the underlying theoretical framework into a practical, real-scale decision-support tool. The proposed model can contribute to improved meter replacement planning, reduction of apparent losses caused by measurement errors, and enhancement of the financial sustainability of water and wastewater utilities. Owing to its flexible structure, the model can also be readily applied to other utilities through simple updates of input data and parameters without modifying the computational framework or decision-making logic.



Received: Dec. 31, 2025
Revised: Mar. 15, 2026
Accepted: Apr. 9, 2026

To cite this article:

Jalili Ghazizadeh, M. R., Shahangian, S. A. R., Amir Mohamadi, M., 2026. Development of an economic decision-making model for determining the optimal replacement time of water meters based on the net present value replacement chain concept. *Water and Wastewater*, 37(1), 18-40.
<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.567069.3537>

Use your device to scan and read the article online



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



1. Introduction

Water meters¹, as the primary instruments used by water utilities to measure billable water consumption (Yazdandoost and Izadi, 2018), play a fundamental role in sustaining utility operations by recovering part of the costs associated with water transmission and distribution (Van Zyl, 2011). However, as WMs age, the volume of unregistered water gradually increases, leading to substantial revenue losses for utilities (Arregui et al., 2011).

In Iran, given the existing tariff structure and the extensive water distribution networks, revenue reduction caused by meter inaccuracies has become one of the major economic challenges in water resources management (Dezhestan et al., 2025). Although malfunctioning WMs may continue to operate for extended periods, the economic losses resulting from inaccurate consumption measurement make their replacement with new, accurate meters unavoidable (Arregui et al., 2011). Failure to replace WMs at the appropriate time, allowing measurement errors to exceed acceptable levels, can significantly amplify the adverse financial impacts on water utilities (Jalili Ghazizadeh, 2024).

Conversely, the procurement, installation, and replacement of WMs involve considerable capital expenditures that may impose a substantial financial burden on utilities (Akbarpour and Azizi, 2018, 2020). Therefore, before implementing meter replacement programs, water utilities should evaluate the economic feasibility of replacement by balancing expected benefits against associated costs and subsequently identify the population of meters requiring replacement (Jalili Ghazizadeh, 2024).

Nevertheless, water utilities traditionally replace customers' WMs primarily according to their service life or operational age (Cassidy et al., 2021), which may result in either premature replacement, incurring unnecessary costs, or delayed replacement, increasing non-revenue water and hidden economic losses (Ghasemi Razveh et al., 2019; Dezhestan et al., 2025). In reality, the optimal level of meter inaccuracy is closely related to the optimal replacement frequency. For instance, WMs installed in areas with relatively low water tariffs generally have longer economically justified replacement intervals-and consequently higher acceptable measurement inaccuracies-than those installed in areas where water tariffs are higher (Arregui et al., 2010).

Determining the optimal service life of a water meter before replacement is, therefore, fundamentally an economic decision. The optimal solution is the one that best aligns with the investment and revenue policies of the utility while maximizing net economic benefits, which requires a comprehensive cost-benefit analysis for each meter category (Arregui et al., 2006). Despite the importance of this issue, no comprehensive scientific guideline currently exists in Iran for determining the optimal replacement timing of WMs. Consequently, identifying the economically optimal replacement time remains a significant challenge for water utilities. Proper implementation of an integrated water meter management strategy can create a win-win situation for all stakeholders (Van Zyl, 2011), yet the limited attention paid to this issue is also evident in the existing research literature (Ebadati et al., 2021).

Accordingly, the primary objective of this study was to determine the economically optimal replacement interval for WMs by balancing replacement costs against the economic losses associated with measurement errors.

2. Methodology

To achieve this objective, the Net Present Value Replacement Chain² model was adopted as the analytical framework and further extended by incorporating water consumption patterns, the increasing-block water tariff structure, customer categories, service connection diameter, and the life-cycle costs of WMs (Equation 1)

$$Cost = [C_{purchase} + C_{install} + C_{administrative} - \quad (1)$$

$$C_{salvage} + \sum_{i=1}^n \forall_i \times \varepsilon_i \frac{WP_i}{(1+r')^{(i-1)}}] \times \frac{(1+r')^i}{(1+r')^i - 1}$$

in which $C_{purchase}$: meter purchase cost, $C_{install}$: meter installation cost, $C_{administrative}$: meter administrative cost, $C_{salvage}$: meter salvage value, $\forall_i$: average water consumption of customer i , ε_i : meter error of customer i , WP_i : water tariff for customer i , and r' : real discount rate corresponding to the customer's tariff block. To operationalize the extended model, a Python-based computational tool was designed and implemented to efficiently process and analyze very large customer datasets within a short computational time. By integrating the extended NPVRC model with actual customer information, the tool

¹ Water Meters (WMs)

² Net Present Value Replacement Chain (NPVRC)

simultaneously determines the economically optimal replacement point for each individual WM while prioritizing large numbers of customers for replacement. The performance of the proposed model was evaluated using data from more than 172,000 customers of Tehran Water and Wastewater Company, District 4, where the economically optimal replacement point was determined individually for every customer.

The model inputs were classified into two main categories. The first category comprised actual data extracted from the customer database of Tehran Water and Wastewater Company, District 4, including: (1) economic information related to WMs, such as purchase, replacement, service connection standardization, and salvage (scrap) values categorized by service connection diameter; (2) water tariff information, including the increasing-block tariff structure for residential customers and the tariff schedules applicable to different non-residential customer categories; and (3) customer characteristics, including customer identification number, service connection diameter, customer category, water consumption, service connection installation date, and the date of the last WM replacement. The second category consisted of WM measurement performance data (meter error over time- $WMErr_n$), which was estimated using the relationship proposed by [Akbarpour and Azizi, \(2018\)](#) and incorporated into the developed model (Equation 2)

$$WMErr_n = 0.3124 \times n + 2.5 \quad (2)$$

3. Results and discussion

The results demonstrated that the economically optimal replacement timing of WMs is achieved by balancing the capital costs of replacement against the economic losses caused by declining measurement accuracy. For low-consumption customers, particularly residential customers within the lower consumption tariff blocks, the economic losses associated with under-registration of water consumption are often lower than the replacement costs; therefore, premature replacement is not economically justified. Conversely, increases in water consumption, service connection diameter, and water charges

significantly increase the opportunity cost associated with meter inaccuracies, making earlier replacement economically preferable. These findings indicate that applying a uniform replacement policy to all customers does not necessarily result in efficient allocation of financial resources, whereas economic prioritization of customers can substantially improve the effectiveness of WM replacement programs.

The analysis further revealed that service connection diameter, water consumption level, and the corresponding water tariff paid by customers are the most influential factors in determining the economically optimal replacement point. Furthermore, the estimated apparent water losses attributable to meter inaccuracies indicate that continued operation of deteriorated WMs can result in substantial losses of potential utility revenue, highlighting the importance of systematic WM management and changing paradigm from fixed-time replacement policies to economically driven decision-making approaches. Apparent water losses caused by meter inaccuracies were estimated at approximately 6.4%. Finally, the results showed that 70,076 customers require meter replacement, and implementing the proposed replacement program would require an investment of approximately IRR 1,773,610,000,000 (equivalent to approximately 177.4 billion Tomans), expressed in 2024 values.

4. Conclusion

The principal contribution of this research lies not merely in extending the NPVRC model theoretically, but in localizing, operationalizing, and implementing it as a practical data-driven decision-support tool for addressing a real-world asset management problem in the water industry. This achievement transforms the NPVRC framework from a purely theoretical analytical model into a practical tool that can directly support operational planning and asset management within water and wastewater utilities. Moreover, because the computational framework remains unchanged, the developed tool can readily be applied to other utilities simply by updating the required input data and model parameters.



تدوین مدل تصمیم‌گیری اقتصادی برای تعیین زمان بهینه تعویض کنتورهای آب بر پایه مفهوم زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص

محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^{۱*}، سید احمد رضا شاهنگیان^{۲،۳}، مریم امیر محمدی^۴

۱- دانشیار، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) m_jalili@sbu.ac.ir

۲- دکترای مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- کارشناس ارشد تحقیق و توسعه، شرکت مهندسی مشاور ایراناب، تهران، ایران

۴- مدیر دفتر توسعه مدیریت و تحقیقات، شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران، تهران، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.567069.3537>

مقاله پژوهشی

چکیده

واژه‌های کلیدی:
آب بدون درآمد، هزینه
چرخه عمر، ارزش فعلی
خالص، کنتور آب، تحلیل
اقتصادی

کنتورهای آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری و منابع درآمدی شرکت‌های آب و فاضلاب، نقش مهمی در تأمین بخشی از هزینه‌های تولید، انتقال و توزیع آب و در نتیجه پایداری مالی این شرکت‌ها دارند. تعیین زمان بهینه تعویض کنتورها اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا تعویض زودهنگام موجب تحمیل هزینه‌های غیرضروری و تعویض دیرنگام سبب افزایش زیان ناشی از افت دقت اندازه‌گیری می‌شود. از این رو، هدف اصلی این پژوهش تعیین دوره زمانی بهینه اقتصادی تعویض کنتورهای آب به‌منظور ایجاد تعادل میان هزینه‌های تعویض و زیان ناشی از خطای اندازه‌گیری بود. با بهره‌گیری از مفهوم زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص، یک مدل اقتصادی برای تعیین نقطه بهینه تعویض کنتورهای آب توسعه داده و به‌منظور عملیاتی‌سازی آن، یک ابزار محاسباتی مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون طراحی و پیاده‌سازی شد. برای ارزیابی کارایی مدل در شرایط واقعی بهره‌برداری، اطلاعات تمامی مشترکین شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران به‌عنوان مطالعه موردی مورد تحلیل قرار گرفت و نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتور برای هر مشترک به‌صورت مجزا تعیین شد. این فرایند امکان آزمون مدل توسعه‌یافته بر پایه اطلاعات بیش از ۱۷۲ هزار مشترک را فراهم ساخت. یافته‌ها نشان داد که قطر انشعاب، میزان مصرف و سطح آب‌بهای پرداختی مشترکین، مهم‌ترین عوامل مؤثر در تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورها هستند. بر این اساس، مشترکین پرمصرف در تمامی کاربری‌ها در اولویت تعویض قرار می‌گیرند، در حالی که مشترکین خانگی کم‌مصرف کمترین اولویت را دارند؛ زیرا صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از رفع خطای اندازه‌گیری در این گروه توان جبران هزینه‌های تعویض کنتور را ندارد. همچنین، میزان هدررفت ظاهری ناشی از خطای اندازه‌گیری کنتورها حدود ۶/۴ درصد برآورد شد. در نهایت، نتایج نشان داد که از مجموع مشترکین مورد بررسی، ۷۰۰۷۶ مورد نیازمند تعویض کنتور هستند که اجرای این برنامه مستلزم حدود ۱۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال (معادل حدود ۱۷۷۰۴ میلیارد تومان) بر اساس محاسبات سال ۱۴۰۳ سرمایه‌گذاری خواهد بود. مدل توسعه‌یافته، قادر است نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورهای آب را با در نظر گرفتن هم‌زمان عوامل فنی و اقتصادی تعیین کند. ابزار محاسباتی طراحی‌شده در محیط پایتون امکان تحلیل و اولویت‌بندی هم‌زمان تعداد بسیار زیادی از مشترکین را فراهم کرده و چارچوب نظری مورد استفاده را به یک ابزار عملیاتی و پشتیبان تصمیم‌گیری در مقیاس واقعی تبدیل می‌کند. این مدل می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی تعویض کنتورها، کاهش هدررفت ظاهری ناشی از خطای اندازه‌گیری و ارتقای پایداری مالی شرکت‌های آب و فاضلاب کمک کند و تنها با به‌روزرسانی داده‌ها و پارامترهای ورودی، در سایر شرکت‌های آب و فاضلاب نیز استفاده شود.



دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰

اصلاح: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۲۰

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

جلیلی قاضی‌زاده، م. ر.، شاهنگیان، س. ا.، ر.، امیر احمدی، م.، ۱۴۰۵، تدوین مدل تصمیم‌گیری اقتصادی برای تعیین زمان بهینه تعویض کنتورهای آب بر پایه مفهوم زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص. *آب و فاضلاب*. ۳۷(۱)، ۴۰-۱۸.
<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.567069.3537>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

بهینه‌سازی بهره‌وری سامانه‌های آب شهری به یکی از دغدغه‌های روزافزون شرکت‌های آب و فاضلاب در سراسر جهان تبدیل شده است. در این میان، آب بدون درآمد^۱ یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که شرکت‌های آب و فاضلاب در تلاش برای کاهش آن هستند (Behruzian et al., 2021). هدررفت آب^۲ به عنوان یک مسئله حیاتی در شبکه‌های توزیع آب (Kaveh Yazdy and Zarifzadeh, 2021) می‌تواند تا یک سوم آب برداشت شده را شامل شود و زیان درآمدهای قابل توجهی را به شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل کند. در چنین شرایطی، شرکت‌های آب و فاضلاب نقشی کلیدی در تضمین مدیریت بهینه چرخه آب شهری ایفا می‌کنند؛ به گونه‌ای که ضمن کاهش تلفات آب، پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی نیز حفظ شود (Cassidy et al., 2021). در این راستا، مدیریت منابع محدود آب شهری بدون اطلاع از اینکه چقدر آب در دسترس بوده و چگونه و در کجا مصرف می‌شود، غیرممکن خواهد بود (Van Zyl, 2011). این موضوع، به ویژه در کشورهایی مانند ایران با اقلیم خشک و نیمه خشک، ضرورت مدیریت دقیق و کنترل مصرف این منبع حیاتی را بیش از پیش آشکار می‌سازد (Ebadati et al., 2021).

به منظور بسترسازی و ایجاد امکان پایش میزان مصرف آب، استفاده از تجهیزات اندازه‌گیری در اولویت بالایی قرار دارد. در این میان، کنتورهای آب از جمله کلیدی‌ترین این تجهیزات بوده (Van Zyl, 2011, Ebadati et al., 2021) و می‌توانند در رسیدن به اهداف بلندمدت تأمین و توزیع آب شرب بسیار مؤثر باشند (Van Zyl, 2011). آب به عنوان کالایی اجتماعی-اقتصادی که توسط شرکت‌های آب و فاضلاب ارائه می‌شود، باید از طریق قبوض آب مصرف‌کنندگان جبران شود (Yazdandoost and Izadi, 2018)، بنابراین، کنتورهای آب به منظور تعیین و اندازه‌گیری مقدار مصرف مشترکین و محاسبه آب‌بها در ابتدای ورودی انشعاب هر مشترک نصب می‌شوند (Van Zyl, 2011). این کنتورها به عنوان مرز میان شبکه توزیع و مصرف‌کننده، محل سنجش آب تحویلی به مشترک و محل تأمین درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب است (Iranmehr et al., 2025). از آنجاکه بخش عمده درآمد شرکت‌های آب از محل

هزینه آب مصرفی مشترکان تأمین می‌شود، وجود کنتورهای کم‌دقت می‌تواند عامل مهمی در کاهش درآمد این شرکت‌ها باشد (Ebadati et al., 2021). از این رو، کنتورهای آب به عنوان تنها ابزار عملی شرکت‌های آب و فاضلاب برای اندازه‌گیری درآمد (Yazdandoost and Izadi, 2018)، نقشی کلیدی در امکان خدمت‌رسانی مستمر و کارآمد این شرکت‌ها از طریق جبران بخشی از هزینه‌های تأمین و توزیع آب دارند (Van Zyl, 2011).

اگرچه با مقایسه قرائت‌های کنتورهای آب موجود در شبکه و مشترکین، می‌توان میزان هدررفت آب در یک سیستم آب‌رسانی را تخمین زد و اتصالات غیرقانونی را شناسایی کرد (Van Zyl, 2011) اما بخش عمده هدررفت ظاهری^۳ مربوط به خود کنتورهای آب است (Publication No. 556, Akbarpour and Azizi, 2018). به گونه‌ای که خطای کنتورهای مشترکین به عنوان یکی از منابع اصلی ایجاد هدررفت ظاهری شناخته می‌شود (Cassidy et al., 2021, Omid-Kashani and Deymi, 2021, Iranmehr et al., 2025). خطای کنتورها موجب برآورد نادرست حجم آب مصرفی ثبت شده و اختلال در برنامه‌ریزی تأمین منابع آب می‌شود و می‌تواند خسارات قابل توجهی به زیرساخت‌های شبکه وارد کند (Ebadati et al., 2021). اصلاح کنتورها و افزایش دقت در آن‌ها، موجب افزایش بهره‌وری شبکه توزیع، استفاده بهینه از منابع آب و کاهش میزان آب بدون درآمد خواهد شد (Omid-Kashani and Deymi, 2021). از این رو اطمینان از صحت عملکرد و میزان دقت کنتورهای مشترکین، باید مورد توجه ویژه قرار گیرد (Iranmehr et al., 2025). بنابراین، ضروری است دقت کنتورهای نصب شده و جدید مطابق یک برنامه زمانی منظم ارزیابی شده و در صورت نیاز، تعویض شوند؛ زیرا این امر موجب نزدیک‌تر شدن مقدار اندازه‌گیری شده به مقدار واقعی مصرف و در نتیجه، افزایش درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب و کاهش تلفات خواهد شد (Ebadati et al., 2021).

از دیدگاه اقتصادی، مصرف اندازه‌گیری شده اساس اکثر محاسبات مربوط به آب را تشکیل می‌دهد (Van Zyl, 2011). بنابراین محاسبات قبوض آب صادر شده مشترکین نیز، بر مبنای دو عامل مهم استوار است: ۱) تعرفه آب تخصیص یافته به میزان مصرف

³ Apparent Losses¹ Non-Revenue Water² Water Loss

دقیق مصرف آب توسط آنها، جایگزینی کنتورهای خراب را با کنتورهای دقیق جدید اجتناب‌ناپذیر می‌کند (Arregui et al., 2011). با این حال، اتخاذ سیاست‌های تعویض صرفاً مبتنی بر عمر کنتور و برنامه‌های تعویض تصادفی، منجر به تعویض کنتورهای سالم، افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تصمیم‌گیری غیراقتصادی می‌شود؛ زیرا بسیاری از کنتورها علی‌رغم عمر بالا همچنان دقت قابل‌قبولی دارند (Yilmaz et al., 2021). در واقع، سطح بهینه عدم دقت کنتور آب ارتباط نزدیکی با تواتر بهینه تعویض آنها دارد؛ به‌عنوان مثال، کنتورهای آب نصب‌شده در مناطقی با قیمت فروش آب کم نسبت به کنتورهای نصب‌شده در شهرهایی که قیمت آب بیشتری دارند، دوره تعویض طولانی و در نتیجه عدم دقت بیشتری نیز خواهند داشت (Arregui et al., 2010).

در حال حاضر بسیاری از کشورها فاقد مدیریت مناسب کنتور آب هستند، به‌طوری‌که بسیاری از شرکت‌های آب و فاضلاب توانایی انجام و مدیریت بهینه و یکپارچه کالیبراسیون، تعویض، قرائت و مدیریت اطلاعات کنتورها را ندارند؛ در صورتی‌که به‌کارگیری صحیح یک استراتژی مدیریت یکپارچه کنتور آب، شرایط برد-برد را برای همه طرف‌های درگیر ایجاد می‌کند (Van Zyl, 2011). اگرچه تاکنون رویکردهای متعددی باهدف کاهش آب بدون درآمد در شبکه‌های توزیع آب ارائه شده‌اند، اما موضوع اولویت‌بندی بهینه تعویض کنتورهای آب همچنان کمتر مورد توجه قرار گرفته است (Ebadati et al., 2021).

با توجه به ساختار تعرفه‌ای و گستردگی شبکه‌های توزیع در ایران، کاهش درآمد ناشی از خطای کنتورها به یکی از چالش‌های اقتصادی مهم در مدیریت منابع آب تبدیل شده است (Dezhestan et al., 2025). در چنین شرایطی، اگر تعویض کنتورها به‌موقع انجام نشود و میزان خطای آنها از حد معینی فراتر رود، تأثیر منفی آن بر درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب به‌مراتب چشمگیرتر خواهد بود (Jalili Ghazizadeh, 2024).

از سوی دیگر، هزینه‌های ناشی از فرایند تأمین، خرید و نصب کنتور می‌تواند از لحاظ اقتصادی بار مالی قابل‌توجهی را به شرکت‌های آب و فاضلاب تحمیل کند (Akbarpour and Azizi, 2018). در این راستا باید قبل از برنامه‌ریزی عملیات تعویض و چگونگی پیاده‌سازی آن، نسبت به ارزیابی میزان سود به هزینه این عملیات توسط شرکت‌ها اقدامات لازم به عمل آید و سپس نسبت

آب و (۲) میزان آب اندازه‌گیری شده توسط کنتورهای آب، در حالی‌که تصمیم‌گیران معمولاً به عامل اول توجه بیشتری داشته و سالانه نسبت به نحوه سیاست‌گذاری در قبال آن بازنگری می‌کنند، عامل دوم می‌تواند نقش مؤثرتری در از دست دادن درآمدها از طریق صدور قبوض نادرست داشته باشد؛ چراکه بسیاری از کنتورهای موجود در بسیاری از شبکه‌های توزیع آب از دهه‌های گذشته باقی مانده‌اند که دقت اندازه‌گیری آب آنها در طول سال‌ها کاهش یافته و کارایی لازم را ندارند. این کاهش دقت اندازه‌گیری در طول عمر عملیاتی آنها، می‌تواند شرکت‌ها را با چالش‌هایی جدی مواجه کند که اغلب نیز، به شکل افزایش عرضه آب بدون درآمد است (Yazdandoost and Izadi, 2018).

در واقع، از آنجاکه بیشتر کنتورهای آب برای اندازه‌گیری حجم آبی که به مشترکین فروخته می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرند، با افزایش سن آنها حجم‌های آب ثبت نشده افزایش یافته و موجب تحمیل ضرر درآمدی قابل توجه به شرکت‌های متولی صنعت آب می‌شود (Arregui et al., 2011). علاوه بر این، طراحی و اجرای سیاست‌های تعرفه‌ای بدون وجود یک سیستم اندازه‌گیری دقیق و قابل اعتماد امکان‌پذیر نیست (Van Zyl, 2011)؛ بنابراین، در صورتی‌که کنتورهای آب به‌درستی مدیریت شوند، نه تنها می‌توانند درآمد متولیان صنعت آب را افزایش دهند، بلکه بر عملکرد مطلوب و تداوم خدمت‌رسانی آنها تأثیر به‌سزایی داشته و کارکنان را نیز برای مدیریت سیستم توزیع به بهترین شکل توانمند می‌سازند (Van Zyl, 2011).

امروزه میلیون‌ها کنتور آب در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند و هر روز هزاران کنتور جدید نصب و کنتورهای قدیمی تعویض می‌شوند (Van Zyl, 2011). به‌طور سنتی، شرکت‌های آب و فاضلاب برای کاهش خطاهای اندازه‌گیری، کنتورهای مشترکان را بر اساس عمر مفید یا مدت‌زمان بهره‌برداری آنها تعویض می‌کنند (Cassidy et al., 2021). با این وجود، تعویض کنتورهای فرسوده و خراب با عمر بیش از ۱۰ سال و دارای خطای غیرمجاز، سالانه شرکت‌های آب و فاضلاب را متحمل هزینه‌های قابل توجهی می‌کند (لشکری و لطفعلیان، ۱۳۸۸؛ Akbarpour and Azizi, 2018, 2020, Lashkari and Lotfalian, 2009).

از سوی دیگر، اگرچه کنتورهای خراب نیز هنوز می‌توانند برای طولانی مدت کار کنند، اما ضررهای اقتصادی ناشی از عدم ثبت

پژوهش در نظر گرفته شد. بر این اساس، سؤال محوری پژوهش آن بود که با در نظر گرفتن عوامل فنی-اقتصادی مؤثر، نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورها آب چگونه قابل تعیین است و به چه نحوی می‌توان این فرایند تصمیم‌گیری را برای حجم بسیار بزرگی از مشترکین به صورت هم‌زمان، نظام‌مند و عملیاتی پیاده‌سازی کرد؟ به منظور پاسخ به این سؤال، مدل زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص^۱ به عنوان چارچوب تحلیلی این پژوهش انتخاب و توسعه داده شد.

در این راستا، الگوی مصرف آب، ساختار پلکانی تعرفه آب، تنوع کاربری مشترکین، قطر انشعاب و هزینه‌های چرخه عمر کنتورها در قالب یک چارچوب اقتصادی یکپارچه به صورت هم‌زمان در مدل لحاظ شد. ساختار پلکانی تعرفه آب خانگی با برقراری ارتباط میان الگوی مصرف آب (پله مصرف) و آب‌بهای پرداختی، امکان اولویت‌بندی اقتصادی تعویض کنتورها را بر مبنای تحلیل هزینه-فایده فراهم می‌سازد. همچنین، لحاظ کردن تنوع کاربری‌ها و مشخصات فنی انشعابات، زمینه برآورد واقع‌بینانه هزینه‌ها و منافع اقتصادی متناسب با شرایط هر مشترک را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه عواملی نظیر نوع کاربری و قطر انشعاب بر هزینه‌های سرمایه‌ای و بهره‌برداری مرتبط با کنتور اثر مستقیم دارند، هزینه‌های چرخه عمر کنتور شامل خرید، نصب، راه‌اندازی و ارزش بازیافتی (فروش اوراقی) نیز به صورت متناسب با ویژگی‌های هر انشعاب در مدل لحاظ شد.

به این ترتیب، فرایند تصمیم‌گیری اقتصادی انطباق بیشتری با شرایط واقعی بهره‌برداری شرکت‌های آب و فاضلاب خواهد داشت. در ادامه، به منظور عملیاتی‌سازی مدل توسعه‌یافته، یک ابزار محاسباتی مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون طراحی و پیاده‌سازی شده که قادر است حجم بسیار بزرگی از داده‌های مشترکین را در زمانی کوتاه پردازش و تحلیل کند. این ابزار با تلفیق مدل زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص و اطلاعات واقعی مشترکین، امکان تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتور و اولویت‌بندی هم‌زمان تعداد زیادی از مشترکین را فراهم می‌سازد. کارایی مدل توسعه‌یافته از طریق تحلیل اطلاعات بیش از ۱۷۲ هزار مشترک شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران ارزیابی و نقطه بهینه اقتصادی تعویض برای هر

به تعیین جامعه آماری کنتورهای خراب مشمول تعویض اقدام شود (Jalili Ghazizadeh, 2024). با این حال، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بسیاری از شرکت‌های آب و فاضلاب، تعویض کنتورها به صورت دوره‌ای یا پس از خرابی انجام می‌شود؛ بدون آنکه تحلیل اقتصادی دقیقی برای تعیین زمان بهینه تعویض انجام شود. این موضوع، می‌تواند منجر به تعویض زودهنگام (تحمیل هزینه‌های اضافی) یا تعویض دیرهنگام (افزایش آب بدون درآمد و زیان‌های پنهان) شود (Ghasemi Razveh et al., 2019, Dezhestan et al., 2025).

علی‌رغم اهمیت موضوع، تاکنون دستورالعمل دقیق و علمی در سطح کشور که به طور خاص مربوط به زمان مناسب و بهینه تعویض کنتورها باشد، وجود ندارد؛ در حالی که سالانه بیش از ۶۰ هزار کنتور در تهران تعویض می‌شود و بیش از یک و نیم میلیون کنتور در این استان وجود دارد. تمامی این موضوعات، به ضرورت و اهمیت بررسی و ارائه یک مدل اقتصادی برای تعیین نقطه بهینه که هزینه‌های تعویض کنتور و عدم درآمد ناشی از خطای کنتور را شامل شود، اشاره دارد (Jalili Ghazizadeh, 2024).

تعیین مدت‌زمان بهینه بهره‌برداری از کنتور پیش از تعویض آن، ماهیتی اقتصادی دارد و راه‌حل بهینه آن، گزینه‌ای است که بیشترین سازگاری را با سیاست‌های سرمایه‌گذاری و درآمدی شرکت آب و فاضلاب داشته و سود خالص را حداکثر کند؛ امری که مستلزم تحلیل هزینه-فایده برای هر نوع کنتور است (Arregui et al., 2006). با این وجود، تعیین زمان بهینه تعویض کنتورها در شبکه‌های توزیع آب همچنان یکی از چالش‌های مهم شرکت‌های آب و فاضلاب به شمار می‌رود و زمانی پیچیده‌تر می‌شود که تفاوت در نوع کاربری مشترکین، الگوی مصرف آنها، ساختار تعرفه‌ای آب‌بها، قطر انشعاب و هزینه‌های مرتبط با چرخه عمر کنتورها نیز در فرایند تصمیم‌گیری لحاظ شود.

با توجه به اهمیت مدیریت اقتصادی کنتورهای آب و نقش آن در کاهش هدررفت ظاهری و بهبود درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب، تعیین دوره زمانی بهینه و اقتصادی برای تعویض کنتورهای مشترکین باهدف ایجاد تعادل میان هزینه‌های تعویض و زیان ناشی از افت دقت اندازه‌گیری، به عنوان هدف اصلی این

¹ Net Present Value of the Replacement Chain (NPVRC)

۲- ادبیات موضوعی پژوهش

در اوایل دهه ۱۹۹۰، هیچ اصطلاح استاندارد برای بیان و ارزیابی هدررفت آب در یک سیستم توزیع آب وجود نداشت. انجمن بین‌المللی آب^۱ با اذعان به این مسئله، در همان سال‌ها به‌طور جدی بهترین شیوه‌های بین‌المللی بررسی شد و تعریف استاندارد برای آب بدون درآمد (آب به حساب نیامده)^۲ بیان کرد که طبق این تعریف، آب بدون درآمد شامل دو بخش هدررفت فیزیکی (واقعی)^۳ و غیر فیزیکی (ظاهری)^۴ است (Publication No. 556, 2012).

در یک سیستم انتقال و توزیع آب شهری، اختلاف میان حجم کل آب ورودی به شبکه و حجم آبی که برای آن قبض صادر می‌شود، بیانگر میزان آب بدون درآمد است. شرکت‌های آب و فاضلاب همواره در تلاش هستند تا این مقدار را به حداقل ممکن برسانند. تحقق این هدف، مستلزم صدور قبض‌های دقیق و مبتنی بر اندازه‌گیری واقعی مصرف آب مشترکین است؛ امری که به دقت عملکرد کنتورها به‌عنوان اصلی‌ترین ابزار اندازه‌گیری و ثبت حجم مصرفی وابسته است. از این رو، دقت کنتورهای مشترکین و میزان اطمینان به داده‌های ثبت شده توسط آن‌ها همواره از مهم‌ترین دغدغه‌های مدیریتی شرکت‌های آب و فاضلاب به شمار می‌رود. در این راستا، انجمن کار آب آمریکا^۵ توصیه‌ها و مقرراتی را برای زمان آزمایش و تعویض کنتورها با سایزهای مختلف ارائه داد که بر اساس آن، کنتورهایی با سایزهای ۵/۸ (پنج‌هشتم) تا ۱ اینچ، ۱ تا ۴ اینچ و ۴ اینچ به بالا باید به ترتیب هر ۵، ۱۰ و ۱ سال یک‌بار آزمایش شود (Yee, 1999)؛ اما از آنجاکه کاهش دقت کنتورها تحت شرایط عملیاتی مختلف به عوامل متعددی وابسته است، توصیه‌های موجود کارایی لازم را ندارند؛ زیرا طراحی یک سیاست بهینه برای تعویض کنتورها نیازمند درک و تحلیل جامع این عوامل در قالب یک مدل اقتصادی است (Arregui et al., 2010, 2011).

از این رو، بسیاری از پژوهشگران سعی کرده‌اند تا از این پیشنهادها گام را فراتر نهاده و دستورالعمل‌های مختلفی را برای پیش‌بینی جایگزینی به‌موقع کنتورها پیشنهاد دهند؛ به عنوان مثال، بعضی میزان حجم عبوری و میزان کارکرد کنتور و برخی تاریخ نصب کنتور را معیار اساسی برای تعویض و نصب کنتور در نظر

مشترک به‌صورت مجزا تعیین شد. به این ترتیب، چارچوب نظری مورد استفاده از سطح یک مدل مفهومی فراتر رفته و به ابزاری عملیاتی و تصمیم‌یار برای برنامه‌ریزی و مدیریت تعویض کنتورها در مقیاس گسترده تبدیل شد. به این ترتیب، نوآوری‌ها و ارزش افزوده این پژوهش که سهم آن را نسبت به مطالعات پیشین برجسته می‌سازد را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

- توسعه یک چارچوب اقتصادی مبتنی بر مفهوم زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص برای تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورهای آب در سطح هر مشترک؛
 - تلفیق هم‌زمان عوامل فنی و اقتصادی مؤثر بر تصمیم تعویض کنتور شامل نوع کاربری، قطار انشعاب، الگوی مصرف، ساختار پلکانی تعرفه آب و هزینه‌های چرخه عمر کنتور در یک مدل یکپارچه تصمیم‌گیری؛
 - توسعه و پیاده‌سازی یک ابزار محاسباتی مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون با قابلیت پردازش، تحلیل و اولویت‌بندی هم‌زمان تعداد بسیار زیادی از مشترکین در زمانی کوتاه؛
 - استفاده از داده‌های واقعی بهره‌برداری و تحلیل اطلاعات حجم انبوهی از مشترکین شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس واقعی؛
 - تبدیل یک چارچوب اقتصادی نظری به یک ابزار عملیاتی و تصمیم‌یار با قابلیت پشتیبانی از برنامه‌ریزی و مدیریت تعویض کنتورها و امکان به‌کارگیری آن در سایر شرکت‌های آب و فاضلاب از طریق به‌روزرسانی داده‌ها و پارامترهای ورودی.
- بنابراین، ارزش افزوده اصلی این پژوهش بیش از آنکه در توسعه نظری مدل زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص باشد، در بومی‌سازی، عملیاتی‌سازی و به‌کارگیری آن برای حل یک مسئله واقعی در صنعت آب و فاضلاب، با استفاده از داده‌های واقعی و توسعه یک ابزار تصمیم‌یار در مقیاس گسترده نهفته است.

⁴ Non Physical Losses

⁵ American Water Works Association (AWWA)

¹ International Water Association (IWA)

² Unaccounted for Water

³ Physical or Real Losses

می‌گیرند (Arregui et al., 2006, Davis, 2005, Mutikanga, 2011, Male et al., 1985). با این وجود فونتانازا و همکاران اظهار داشتند، تنها با اطلاع از سن کنتورها و میزان حجم عبوری آب از آنها، نمی‌توان معیار مناسبی برای تعویض کنتورها ارائه کرد؛ بنابراین آنها یک معیار جدید را به نام شاخص جایگزینی مرکب^۱ بر اساس توصیه‌های سازمان همکاری اقتصادی و توسعه^۲ ارائه و پیشنهاد کردند (Fontanazza et al., 2012).

در پژوهش‌های بعدی نشان داده شد، در مدت زمان عمر یک کنتور عواملی چون سیاست‌گذاری‌های جایگزینی کنتور، هزینه‌های نصب، میزان آب از دست رفته در شبکه، هزینه آزمایش‌ها، تعمیرات و نگهداری کنتور و قیمت کنتورهای مختلف همراه با نرخ تورم بهره‌وری، خود عواملی تأثیرگذار در این زمینه به شمار می‌آیند (Arregui et al., 2010, Mutikanga, 2011).

در سطح بین‌المللی، طی سال‌های اخیر پژوهش‌هایی با هدف توسعه رویکردهای هوشمند، داده‌محور و چندمعیاره برای مدیریت، اولویت‌بندی و بهینه‌سازی تعویض کنتورهای آب انجام شده است (Cassidy et al., 2021). با بررسی دو شرکت آب و فاضلاب در شیلی، یک سامانه هوشمند مبتنی بر رایانش ابری^۳ برای مدیریت بهینه کنتورهای آب توسعه دادند. در این پژوهش، ۶۸۷ کنتور با در نظر گرفتن قطر، مدل، برند، عمر و میزان مصرف انتخاب و در آزمایشگاه آزمون شدند تا منحنی خطای اندازه‌گیری، نرخ افت دقت و عمر بهینه هر کنتور تعیین شود. سپس این نتایج در سامانه Meterwise برای تحلیل اطلاعات بیش از ۴۵۵ هزار کنتور فعال و بیش از ۴/۱ میلیون رکورد قرائت کنتور به کار گرفته شد. این سامانه با برآورد خطای اندازه‌گیری بر اساس ویژگی‌هایی نظیر قطر، سن، برند، مدل و الگوی مصرف، اولویت تعویض کنتورها را بر مبنای عمر بهینه و نه صرفاً سن کنتور تعیین کرد. نتایج نشان داد که این رویکرد نسبت به تعویض بر اساس سن ثابت، موجب کاهش سرمایه‌گذاری اولیه، بهبود دوره بازگشت سرمایه، افزایش درآمد شرکت‌های آب، کاهش آب بدون درآمد و صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجه شد.

همچنین ییلماز و همکاران با هدف توسعه یک رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تعیین مناطق دارای اولویت در

تعویض یا بازسازی کنتورهای مشترکان و کاهش آب بدون درآمد ناشی از خطاهای اندازه‌گیری، یک مدل ترکیبی مبتنی بر روش‌های فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و ELECTRE I ارائه کردند. این پژوهش در شهر مالاتیا ترکیه انجام شد و داده‌های مربوط به ۱۸۱۳۷۰ کنتور مشترکان در مناطق مرکزی Battalgazi و Yeşilyurt بررسی شد. در این پژوهش، اولویت تعویض کنتورها بر اساس هفت معیار شامل نرخ مصرف آب، میانگین عمر کنتورها، نسبت کنتورهای معیوب، جمعیت منطقه، درصد وفاداری مشترکان، متوسط فشار بهره‌برداری و عمر کالیبراسیون تعیین شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تصمیم‌گیری صرفاً بر اساس عمر کنتور، همانند رویکردهای متداول شرکت‌های آب و فاضلاب، نمی‌تواند منجر به تخصیص اقتصادی منابع شود و لازم است عواملی مانند میزان خطای اندازه‌گیری، شرایط بهره‌برداری، میزان مصرف و تعداد مشترکان نیز به صورت هم‌زمان در برنامه‌های تعویض کنتورها لحاظ شوند. بر این اساس، مدل پیشنهادی امکان تدوین یک برنامه بلندمدت و اقتصادی برای مدیریت تعویض کنتورها و کاهش هدررفت‌های ظاهری ناشی از خطاهای اندازه‌گیری را فراهم می‌کند (Yilmaz et al., 2021).

در ایران نیز، پژوهش‌های متنوعی در زمینه کنتورها و تأثیر آنها انجام شده است. پژوهشی که توسط پوراسحاق و همکاران بر روی کنتورهای خانگی ۱۳ شهر از توابع خراسان رضوی انجام شد، نشان داد که به‌طور میانگین تنها حدود ۱۶ درصد کنتورها در دبی‌های ۳۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ لیتر در ساعت در محدوده استاندارد واقع شده و سالم هستند و مابقی آنها دارای خطای غیرمجاز بوده و ایجاد هدررفت ظاهری می‌کنند (Poureshagh et al., 2017).

شمسیان و همکاران، در شهر آرادان استان سمنان بر روی ۲۷ مشترک کم‌مصرف و دارای کنتور با سن بالای ۱۰ سال، وضعیت مصرف و درآمد قبل و بعد از تعویض کنتور بررسی شدند. نتایج نشان داد که تأثیر افزایش مصرف و درآمد حاصل از تعویض کنتور در کاربری تجاری بیش از کاربری مسکونی است (Shamsian et al., 2008).

مهردادی و همکاران در منطقه‌ای از شهرستان ورامین، حدود ۶۰۰۰ اشتراک و ۴۵۰۰ کنتور سالم را به‌عنوان پایلوت در نظر

³ Cloud-Based Tools

¹ Composite Replacement Index (CRI)

² Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD)

کنکور تعویض شده انجام گرفت که نتیجه آن ۲۹ درصد افزایش مصرف و ۳۷۱ درصد افزایش درآمد بود (Zeynodini, 2011).

به‌منظور بررسی نقش تعویض کنتورهای فرسوده کم‌کار بر کاهش آب بدون درآمد، در سال ۱۳۹۶ در بندر گناوه استان بوشهر، ۳۸ فقره انشعاب دارای کنتور با عمر بالای ۷ سال و متوسط مصرف ماهانه کمتر از ۱۰ مترمکعب بررسی شد. نتیجه این بررسی، حاکی از افزایش ۴۲ درصدی در مصرف و ۶۳ درصدی در درآمد بود. همچنین اولویت قرار دادن تعویض کنتورهای فرسوده کم‌کار نسبت به تعویض کنتورهای خراب توصیه شد (Delavari et al., 2017).

در سال ۱۳۹۷ پژوهش دیگری در شهر تیران استان اصفهان انجام شد. نمونه انتخاب شده در این پژوهش، شامل ۱۱۷ مشترک بود که در محدوده تقریباً قدیمی شهر واقع شده بودند که به‌صورت خوشه‌ای انتخاب و کنتور آنها تعویض شد و تمامی کنتورها در آزمایشگاه کنتور شرکت آب و فاضلاب استان اصفهان مورد آزمون قرار گرفتند. عمر کنتورها از ۸ تا ۲۵ سال متغیر و متوسط عمر آنها ۲۰ سال بود. نتیجه آزمون کنتور حاکی از سالم بودن تنها ۱۳ درصد کنتورها (دقت در محدوده ۲٪ $\pm$) و مابقی پرکار، کم‌کار و ثابت بودند. بررسی مصرف مشترکین موردنظر تنها ۵ درصد افزایش مصرف را نشان داد. نتیجه نهایی این پژوهش نیز حاکی از آن بود که عمر کنتور به‌تنهایی ملاک خرابی کنتور نیست و عوامل دیگری همچون کلاس کنتور و میزان کارکرد کنتور در خرابی کنتور تأثیر دارند (Ghanbari Adivi et al., 2018).

نتایج پژوهش بر روی ۴۳۰ مشترک در منطقه شش شهر اصفهان نیز نشان داد که ۸ سال پس از نصب کنتور، خطای آن به‌تدریج افزایش می‌یابد؛ اما عمر کنتور به‌تنهایی ملاک خرابی کنتور نیست (Ghasemi Razveh et al., 2019).

در پژوهشی که توسط اکبرپور و عزیزی با هدف شناسایی مقدار آب بدون درآمد ناشی از عدم دقت کنتورهای مشترکین روستاهای شهرستان بیرجند انجام شد، ۱۰۰۷ کنتور (معادل ۵ درصد) مشترکین خانگی روستاهای شهرستان بیرجند را با در نظر گرفتن پارامتر عمر کنتور به شش طبقه با عمر ۱ تا ۳ سال، ۴ تا ۶ سال، ۷ تا ۹ سال، ۱۰ تا ۱۲ سال، ۱۳ تا ۱۵ سال و ۱۶ تا ۱۸ سال تقسیم‌بندی و سپس با استفاده از روش نمونه‌گیری تصادفی سیستماتیک انتخاب و مورد آزمون قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که ۷۵/۳ درصد کنتورها دارای خطای در محدوده مجاز و

گرفتند. در این شهر یک درصد کنتورهای مشترکین به‌طور تصادفی انتخاب و مورد بررسی و تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند تا میزان دقت کنتورهای مشترکین محاسبه شود. نتایج به کل شهر تعمیم داده و مقدار کل آب به حساب نیامده ناشی از خطای کنتور مشترکین محاسبه شد. بر اساس نتایج، عموماً تعمیر کنتورهای آب مشترکین پس از سپری شدن عمر مفید آن (حدود ۵ تا ۶ سال) غیراقتصادی بوده و لازم است در صورتی که پس از آزمون، خطای آن مشخص شد، با کنتور نو تعویض شوند (Mehrdadi et al., 2009).

خادمی‌فر و همکاران نیز، پژوهشی به‌منظور بررسی اقتصادی تعویض کنتورهای خطادار انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که تعویض کنتورهای خطادار برای کاهش آب بدون درآمد و افزایش درآمدهای شرکت‌های آب و فاضلاب باید در یک نقطه بهینه اقتصادی انجام شود تا بتواند حداقل میزان درآمدها و هزینه‌های تعویض کنتور را در نقطه سربه‌سر قرار دهد و در این صورت تعویض کنتور از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه خواهد بود (Khademifar et al., 2009).

لشکری و لطفعلیان پژوهشی با عنوان مطالعه و بررسی خطای اندازه‌گیری کنتورها در حسابرسی آب در جامعه نمونه شهرهای سمنان، شاهرود، گرمسار و دامغان انجام دادند. نتایج حاصل از انجام عملیات آزمون و تعویض کنتورها در چهار شهر مورد مطالعه نشان داد، مقدار کل تلفات ظاهری آب در جامعه نمونه از ۱۳/۳۷ درصد قبل از اجرای طرح به مقدار ۸/۳۴ درصد رسیده که حاکی از کاهش حدود ۵ درصدی در هدررفت ظاهری پس از انجام مطالعه برای حسابرسی آب بوده است. برگشت سرمایه ناشی تعویض کنتور در کمتر از ۲ سال در چهار شهر مورد مطالعه مستهلک شده و با توجه به اینکه عمر مفید کارکرد کنتورها ۵ سال در نظر گرفته می‌شود، ۳ سال آتی به‌عنوان سود و درآمد برای مجموعه شرکت آب و فاضلاب استان سمنان بود (Lashkari and Lotfalian, 2009).

پژوهش‌هایی که در سال ۱۳۸۸ در استان اصفهان و در شهر شهرضا بر روی ۵۸۷ کنتور خراب تعویض شده انجام شد، حاکی از افزایش ۱۳۶ درصدی مصرف آب و ۲۰۹ درصدی درآمد حاصله بود که نشان داد، کاربری‌های غیرمسکونی و تجاری باید در اولویت تعویض کنتور قرار گیرند (Saleh and Bahrami, 2009). در سال ۱۳۹۰ در شهر کرمان بررسی مصارف و درآمد ۱۰۰ مشترک دارای

ملاباشی و همکاران نیز با هدف ارائه طرح بهینه تعویض کنتور آب مشترکین، معیارهایی از جمله قطرهای بالاتر از ۲ اینچ، کنتورهای خراب با قطرهای بالا، مشترکین دارای کاهش مصرف (به دلیل نوع تأثیر جابه‌جایی طبقات و کاهش مصرف در بحث درآمدی و آب‌بها)، کاربری غیرمسکونی و کاربری مسکونی با تعداد آحاد بالا را ملاک عمل اولویت‌بندی تعویض کنتور در استان اصفهان قرار دادند. به این ترتیب، نتایج نشان داد که اولویت اول با کنتورهای خراب با قطر بالای ۲ اینچ، کنتورهای خراب با قطر ۱ و ۱/۵ اینچ و با کاربری غیرمسکونی، کنتور خراب با قطر ۱ و ۱/۵ اینچ و با کاربری مسکونی و تعداد واحد بالای ۵ واحد بوده و سپس کنتورهای با کاهش مصرف بیش از ۵۰ درصد با اولویت قطر و با کاربری غیرمسکونی تعیین شد. در نهایت با توجه به محدود بودن بودجه لازم برای عملیات تعویض کنتور، در کاربری مسکونی شرط میانگین مصرف ماهانه کمتر از ۷ مترمکعب در اقطار ۱ و ۱/۵ اینچ و شرط عمر بالای ۴۰ سال در کاربری‌های مسکونی و غیرمسکونی با قطرهای ۵/۰ و ۷/۵ اینچ لحاظ شد. به عبارت دیگر، تعویض کنتورهای خراب صرفاً با قطرهای بالا توصیه شد و تمرکز بعدی بر روی کنتورهای کم‌کار قرار گرفت (Molabashi et al., 2023).

در سطح ملی نیز، پژوهش‌هایی با هدف بهبود مدیریت تعویض کنتورهای آب، کاهش آب بدون درآمد و ارتقای دقت اندازه‌گیری انجام شده است. بهروزیان و همکاران با هدف ارائه رویکردی علمی برای تصمیم‌گیری در خصوص تعویض کنتورهای آب، عوامل مؤثر بر دقت کنتورها را از طریق مطالعات میدانی در یکی از مناطق شهر بیرجند بررسی کردند. در این پژوهش، ۱۱۷ کنتور مورد آزمون قرار گرفت که پس از حذف داده‌های نامعتبر، ۹۶ کنتور برای تحلیل نهایی انتخاب شدند. ابتدا با استفاده از تحلیل خوشه‌ای دو مرحله‌ای، کنتورها بر اساس پارامترهایی نظیر عمر، فشار کاری، نوع کاربری، عمق نصب، قطر و مدل کنتور دسته‌بندی شدند و سپس یک شبکه عصبی مصنوعی با بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی عملکرد و دقت کنتورها توسعه یافت. نتایج نشان داد که سن کنتور به‌تنهایی معیار مناسبی برای تعویض آن نیست و عواملی نظیر شرایط بهره‌برداری، فشار شبکه، نوع کاربری و شرایط نصب نیز تأثیر قابل‌توجهی بر افت دقت کنتورها دارند (Behruzian et al., 2021).

۲۴/۷ درصد دارای خطای بیشتر از محدوده مجاز بوده که ۱۹/۵ درصد آنها دارای خطای مثبت و ۵/۲ درصد دارای خطای منفی بودند (Akbarpour and Azizi, 2018, 2020).

علاوه بر این، با توجه به افزایش چشم‌گیر هزینه تعویض کنتورهای فرسوده، نه تنها میزان خطا و عمر کنتور، بلکه میزان مصرف سالانه مشترک هم به عنوان ملاک عملی برای تعویض کنتور بررسی شود تا در کنار کاهش بیشتر حجم آب بدون درآمد، هزینه تهیه و تعویض کنتور نیز سریع‌تر برگردد. در منطقه سه شهر اصفهان در سال ۱۳۹۹، تعداد ۱۹۸ مشترک دارای کنتور با عمر بالای ۳۰ سال انتخاب و کنتور آنها تعویض شد که پس از تعویض، در مجموع این مشترک‌ها ۲۶/۵ درصد افزایش مصرف داشتند که به تبع آن، ۶۷/۸ درصد افزایش درآمد را نیز به دنبال داشت. در مشترکین نمونه، بعد از تعویض ۳۵ درصد افزایش مصرف، ۱۳ درصد کاهش مصرف و مابقی اختلاف مصرف در حدود ± 1 مترمکعب داشتند. در اینجا نیز، نتایج حاکی از آن بود که عمر کنتور تنها عامل تعیین‌کننده برای خرابی کنتور نیست (Barani and Abdollah Ghazi, 2022).

مجدداً در سال ۱۴۰۰ مطالعات تأثیر تعویض کنتور، در استان اصفهان و این بار در منطقه یک شهر اصفهان انجام شد. نمونه انتخابی شامل ۱۵۶ مشترک با مصرف کمتر از الگوی مصرف انتخاب و کنتور آنها تعویض شد. پس از تعویض در مجموع، مصارف این مشترکین ۳۳ درصد و درآمد حاصله ۵۱ درصد افزایش یافت (Amini and Eshtehardieh, 2021).

در سال ۱۴۰۰ در شهر شهرضا استان اصفهان، بر روی ۱۱۹۳ مشترک دارای کنتور خراب مطالعات دفتری انجام و با استفاده از برنامه‌نویسی انجام شده، مصارف این مشترکین تحلیل شد. بر اساس یافته‌ها، کنتورهای خراب با قطرهای بالاتر از ۲ اینچ صرفاً جز مشترکین پر مصرف بوده و باید در اولویت تعویض باشند. همچنین، کنتورهای خراب با قطرهای بالاتر از ۱ اینچ و دارای کاربری غیرمسکونی باید در اولویت تعویض قرار گیرند و در قطرهای ۱ اینچ به بالا برای تعویض کنتورهای مسکونی تعداد آحاد باید در نظر گرفته شود. به علاوه، عمر کنتور با توجه به تجربه سال‌های گذشته اولویت مناسبی در انتخاب تعویض نبوده و انتخاب مشترکین دارای کاهش مصرف برای اولویت تعویض بسیار تأثیرگذار خواهد بود (Bahrami, 2021).

اگرچه تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی خطای کنتورها، عوامل مؤثر بر افت دقت، اولویت‌بندی تعویض و تأثیر آن بر کاهش آب بدون درآمد انجام شده است، اما بیشتر این مطالعات بر شناسایی کنتورهای نیازمند تعویض، بهبود دقت اندازه‌گیری و کاهش هدررفت‌های ظاهری تمرکز داشته‌اند. بر اساس دانسته‌های نویسندگان این پژوهش، یزدان‌دوست و ایزدی از محدود پژوهش‌هایی است که مسئله تعویض کنتورها را با تمرکز بر جنبه‌های اقتصادی و تعیین زمان بهینه تعویض بررسی کرده است (Yazdandoost and Izadi 2018). هرچند سایر پژوهش‌ها مانند (Bahrami, 2021)، (Molabashi et al., 2023)، به اولویت‌بندی تعویض کنتورها پرداخته شده‌اند، اما رویکردها آنها در این اولویت‌بندی عمدتاً محدود به در نظر گرفتن قطر انشعاب و نوع کاربری بوده است؛ درحالی‌که پژوهش‌های متعدد انجام شده در سطح بین‌المللی به اهمیت این موضوع توجه ویژه‌ای داشته‌اند (Arregui et al., 2010, 2011, Van Zyl, 2011, Moahloli et al., 2019).

۳- روش‌شناسی پژوهش

۳-۱- عوامل مؤثر در انتخاب سیاست مناسب برای مدیریت کنتورها

صرف‌نظر از محدودیت‌هایی که یک شرکت آب و فاضلاب ممکن است هنگام تعویض کنتورها با آنها مواجه باشد، از نظر مدیریتی، ارزیابی همه گزینه‌های محتمل و انتخاب مناسب‌ترین آنها به عوامل متعددی بستگی دارد که بر تحلیل اقتصادی تأثیر می‌گذارد (Arregui et al., 2006).

- **هزینه‌های اولیه:** قیمت خرید کنتور جدید تنها هزینه‌ای نیست که در مدیریت کنتورها باید در نظر گرفته شود، بلکه سایر هزینه‌ها مانند هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و اداری مربوط به تعویض کنتور نیز باید لحاظ شود (Arregui et al., 2010, 2011). از سوی دیگر، کیفیت یک کنتور معمولاً با هزینه آن مرتبط بوده و منطقی است که انتظار داشته باشیم یک کنتور ارزان‌تر، سریع‌تر از یک کنتور گران‌تر و بهتر خراب شود. با توجه به متغیرهای دیگری مانند قیمت آب، این هزینه دیر یا زود قابل بازیابی است؛ هرچند ممکن است در طول عمر کنتور نیز قابل بازیابی نباشد. قیمت پایین آب، معمولاً منجر به نصب کنتورهای ارزان‌تر می‌شود و تعرفه بالاتر، نصب

عبادتی و همکاران با هدف کاهش آب بدون درآمد و بهبود درآمد شرکت‌های آب و فاضلاب، الگوریتمی هدفمند برای ارزیابی عملکرد و اولویت‌بندی تعویض کنتورهای مشترکین ارائه کردند. در این پژوهش در شبکه توزیع آب روستاهای شیردارکلا و گاوآنکلا در شهرستان بابل با ۱۵۹۰ مشترک انجام شد. در این الگوریتم، وضعیت کنتورها بر اساس مصرف ثبت شده، عمر کنتور، آزمون خوشه‌ای کنتورها و خطای اندازه‌گیری ارزیابی و کنتورهای دارای اولویت برای تعویض شناسایی شدند. همچنین، احتمال خرابی کنتورها با استفاده از مدل احتمالاتی پواسون و خطای نسبی کنتورها بر اساس اختلاف بین حجم ثبت شده توسط کنتورهای قدیمی و کنتورهای مرجع محاسبه شد. نتایج بررسی ۴۸ کنتور تعویض شده نشان داد که تعویض هدفمند کنتورها موجب افزایش میانگین مصرف ثبت شده از ۹/۶۳ به ۱۹/۲۸ مترمکعب در ماه (حدود دو برابر شدن مصرف ثبت شده)، کاهش آب بدون درآمد از ۵۸ به ۱۵ درصد و افزایش درآمد سالانه شرکت آب از حدود ۸۶ به ۴۱۷ یورو شد. همچنین، پژوهش نشان داد که اگرچه افزایش کلاس دقت کنتور (از کلاس B به C) می‌تواند کاهش بیشتری در هدررفت‌های ظاهری ایجاد کند، اما انتخاب نوع کنتور باید با توجه به هدف اقتصادی و دوره بازگشت سرمایه انجام شود (Ebadati et al., 2021).

کاوه یزدی و ظریف‌زاده با هدف هوشمندسازی فرایند تعویض کنتورهای آب، چارچوبی مبتنی بر تشخیص ناهنجاری ارائه کردند که تنها با استفاده از سوابق مصرف مشترکان، کنتورهای مستعد خرابی را شناسایی می‌کند. این پژوهش بر پایه داده‌های ۹۸۸،۲۵۰،۱۲ رکورد صورتحساب مربوط به ۱۹۳،۵۷۳ مشترک خانگی در شبکه توزیع آب شهر یزد طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ انجام شد که شامل ۴۴،۷۰۶ مورد تعویض کنتور بود. در روش پیشنهادی، پس از استخراج ویژگی‌های مؤثر از سری زمانی مصرف، چندین الگوریتم تشخیص ناهنجاری به صورت ترکیبی به کار گرفته شد تا کنتورهای دارای الگوی مصرف غیرعادی شناسایی و برای بازدید فنی و تعویض پیشنهاد شوند. نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند بدون نیاز به آزمون‌های میدانی گسترده یا داده‌های برچسب‌گذاری شده، کنتورهای مشکوک به خرابی را با دقت مناسبی شناسایی کرده و به عنوان یک سیستم پشتیبان تصمیم، هزینه‌های بازرسی دوره‌ای و فرایند انتخاب کنتورهای نیازمند تعویض را کاهش دهد (Kaveh Yazdy and Zarifzadeh, 2021).

می‌تواند موجب جابه‌جایی پله مصرف مشترک شده و در نتیجه آن ضرر شرکت آب و فاضلاب را به‌طور تصاعدی افزایش دهد. علاوه بر این، تفاوت رویکرد مدیریت کنتورها برای کاربری تجاری و صنعتی نیز با توجه به تفاوت چشم‌گیر تعرفه آب آنها نسبت به کاربری خانگی کاملاً قابل توجیه است.

- منحنی خطای کنتور: خطای اندازه‌گیری به دبی عملیاتی که از یک مسیر منحنی بسیار مشخص پیروی می‌کند و به‌عنوان منحنی خطای کنتور تعریف می‌شود، بستگی دارد. از آنجایی که خطاها در محدوده اندازه‌گیری متفاوت است، مقدار آبی که توسط کنتور آب ثبت نمی‌شود نه تنها به شکل منحنی بلکه به دبی مصرفی مشترکین نیز بستگی دارد. تکامل منحنی خطا با زمان به عواملی مانند تکنولوژی کنتور، کیفیت آب، پروفیل مصرف آب مشترک، شرایط نصب و ترکیب قطعات کنتور بستگی دارد. به‌طور معمول، خطاهای کنتور در جریان‌های کم با گذشت زمان و حجم انباشته شده، در حالی که در دبی‌های متوسط و زیاد، پایداری بیشتری خواهند داشت (Arregui et al., 2006, 2010, 2011).

- خطای وزن‌دار: اهمیت خطای کنتور در یک نرخ جریان معین، همان‌طور که توسط منحنی خطای کنتور تعریف می‌شود، به مقدار آب مصرف شده در آن دبی خاص بستگی دارد. اگر حجم کمی آب با دبی معینی مصرف شود، اهمیت آن کمتر از مصرف حجم بیشتر خواهد بود. در واقع، خطای وزن‌دار کنتور به‌عنوان خطای ترکیبی در جریان‌های مختلف با در نظر گرفتن درصد آبی که در هر دبی مصرف شده، تعریف می‌شود. برای یک پروفیل مصرف خاص، این پارامتر مقدار آبی را برحسب درصد ارائه می‌دهد که برای هر لیتر مصرف شده اندازه‌گیری نشده یا بیش از حد اندازه‌گیری می‌شود (Arregui et al., 2006, 2010, 2011). اگرچه تاکنون روش‌های متعددی برای محاسبه خطای وزن‌دار یک کنتور توسط نویسندگان مختلف پیشنهاد و توسعه داده شده است (Male et al., 1985, Johnson, 2001, Ferreol, 2005, Allender, 1996, Yee, 1999, Arregui et al., 2006) اما به‌منظور ساده‌سازی، تکامل خطای وزن‌دار یک کنتور با زمان معمولاً خطی فرض می‌شود (Male et al., 1985, Ferreol 2005, Arregui et al., 2006, 2011).

- الگوی مصرف: مقدار کل آب ثبت نشده توسط یک کنتور کاملاً به الگوی مصرف مشترک بستگی دارد. یک کنتور نصب شده یکسان برای دو مشترک مختلف، ممکن است خطاهای کاملاً

کنتورهای با کیفیت بالاتر را توصیه می‌کند (Arregui et al., 2006). قیمت پایین آب، حتی ممکن است در برخی موارد موجب شود تا تعویض کنتورهای آب توجیه اقتصادی نداشته باشد. در چنین شرایطی، شرکت‌های آب و فاضلاب بعضاً به دنبال سیاست اولویت‌بندی کنتورها، بر اساس عواملی مانند نوع کاربری، قطر انشعاب و سرانه مصرف آب هستند. به‌علاوه، پس از جایگزینی کنتورهای قدیمی با جدید، شرکت‌های آب و فاضلاب سالانه از طریق مزایده کنتورهای اسقاطی مبلغی را دریافت می‌کنند که می‌توان این مبلغ را از هزینه کنتور کسر کرد.

- تعرفه آب: آب ثبت نشده به دلیل عدم دقت کنتور، باید به‌عنوان هزینه واقعی برای شرکت آب و فاضلاب در نظر گرفته شود که زیان مالی ناشی از آن، متناسب با حجم ثبت نشده و قیمت فروش آب است (Arregui et al., 2007, 2010, 2011). از این رو، تعرفه آب نقش اساسی در تحلیل اقتصادی مدیریت کنتور دارد و ارزیابی صحیح تأثیر قیمت آن در این تحلیل اقتصادی حائز اهمیت است. برای مثال، در شرکت‌های آب و فاضلابی که نظام تعرفه به‌صورت پلکانی اجرا می‌شود، زیان در آمدی ناشی از کم برآوردی مصرف آب باید بر اساس قیمت آخرین مترمکعب ثبت شده توسط کنتور محاسبه شود. با افزایش قیمت آب، ضرورت مدیریت کارآمد کنتورهای نصب شده اهمیتی دوچندان می‌یابد. در چنین شرایطی، سیاست نوسازی باید دقیق و به‌موقع اجرا شود؛ زیرا تنها ۲ تا ۳ سال خطا در تعیین دوره بهینه نوسازی می‌تواند منجر به از دست رفتن بخش قابل توجهی از درآمد شرکت شود. در مقابل، هنگامی که قیمت آب پایین است، تأخیر یا خطا در سیاست نوسازی تأثیر نسبتاً محدودی بر درآمد شرکت آب و فاضلاب خواهد داشت. در نتیجه، قیمت بالای آب تواتر تجدید را افزایش می‌دهد. در این شرایط، شانس استفاده از کنتورهای با کیفیت بالاتر افزایش یافته و تخمین دوره نوسازی به یک تصمیم کلیدی تبدیل می‌شود که بر درآمدهای آتی تأثیرگذار خواهد بود (Arregui et al., 2006). لازم به توضیح است که ساختار تعرفه پلکانی، می‌تواند منجر به طراحی و پیاده‌سازی سیاست‌های مجزایی در برنامه نوسازی کنتورها برای مشترکین با پله‌های مصرف متفاوت باشد؛ برای مثال، مشترکین پرمصرف یا با قطر انشعاب بالا، در پله‌های بالای مصرف حضور داشته و هزینه بیشتری را بابت آب‌بها پرداخت می‌کنند. رشد خطای اندازه‌گیری در این مشترکین،

که در آنها

PV معادل ارزش فعلی پول، FV معادل ارزش آتی پول و r معادل نرخ بهره است.

در مورد سرمایه‌گذاری در کنتورهای آب، به دلیل ریسک بسیار پایین آن، نرخ تنزیل به‌کاررفته معمولاً نزدیک به نرخ بدون ریسک تعیین شده توسط کشور (مثلاً نرخ سود اوراق قرضه دولتی) است. با این حال، برای محاسبه نرخ تنزیل واقعی، باید اثر تورم (s) از نرخ اسمی حذف شود. مقدار حاصل، نرخ تنزیل واقعی (r') خواهد بود که می‌تواند به‌صورت معادله ۳ محاسبه شود (Arregui et al., 2006, 2010, 2011).

$$r' = \frac{(1+r)}{(1+s)} - 1 \quad (3)$$

هرچه r' بزرگتر باشد، ارزش مبالغ اقتصادی آینده تبدیل به پول امروز (ارزش فعلی) کمتر خواهد بود. به‌عنوان مثال، اگر قرار باشد مقدار اقتصادی معینی (P_i) در سال i در طول عمر آتی کنتور محاسبه شود، ارزش فعلی آن برای مقایسه با مقدار امروزی (P_{actual})، به‌صورت معادله ۴ محاسبه می‌شود (Arregui et al., 2006, 2010, 2011).

$$P_{actual} = \frac{P_i}{(1+r')^i} \quad (4)$$

۳-۲- مدل اقتصادی

هزینه چرخه عمر^۱ یک دارایی، هزینه‌ای است که در اشکال مختلف از جمله هزینه‌های سرمایه اولیه، بهره‌برداری، نگهداری، تعمیر، بازسازی، حذف و جایگزینی صرف می‌شود. روش‌های مختلفی مانند روش ارزش فعلی خالص^۲ در ادبیات برای تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر بسیاری از دارایی‌ها معرفی شده است. در این روش، بهترین زمان برای هرگونه مداخله‌ای، مانند آزمایش یا تعویض کنتورها، معمولاً به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که هزینه چرخه عمر برای هر دارایی به حداقل برسد (Yazdandoost and Izadi, 2018).

متفاوتی داشته باشد. اگرچه بیشترین تأثیر در خطای وزن‌دار ناشی از مصرف در کمترین دبی است، جایی که کنتورها عملکرد بدتری دارند و تغییرات بیشتر در منحنی خطا ظاهر می‌شود، اما برخی از کارشناسان با این استدلال که مصرف در این دبی‌ها از نظر حجم زیاد نیست، به‌طور کامل با آن موافق نیستند؛ چراکه ممکن است سه واقعیت مهم را در نظر نگرفته باشند: (۱) هرچند درصد آن نسبت به کل مصرف کم است، اما بزرگی خطای آن (۱۰۰ درصد کمتر از دبی شروع) این موضوع را جبران می‌کند؛ (۲) منحنی خطا در دبی متوسط و زیاد با گذشت زمان تقریباً بدتر نمی‌شود و در بیشتر موارد، میانگین خطای دبی اسمی را در محدوده ۲ درصد حفظ می‌کند؛ و (۳) منحنی خطا در دبی‌های کم خیلی سریع بدتر می‌شود که در نتیجه آن، زمانی که مصرف در این محدوده از دبی متمرکز شود خطای وزن‌دار بسیار سریع با زمان افزایش می‌یابد (Arregui et al., 2006).

- **نرخ تنزیل:** برای ارزیابی صحیح کل هزینه آب ثبت نشده، باید زیان‌های اقتصادی آتی ناشی از آن را به ارزش فعلی تبدیل کرد که برای آن، از نرخ تنزیل اسمی (r) استفاده می‌شود (Arregui et al., 2006, 2010, 2011). درواقع، یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریت منابع مالی و سرمایه‌گذاری، ارزش زمانی پول است. برای درک بهتر مفهوم ارزش زمانی پول، باید توجه داشت که ارزش ۱۰ هزار تومان در سال ۱۴۰۲ برابر با همان مقدار در سال ۱۳۹۰ نیست. یکی از مفاهیمی که ارتباط مستقیمی با ارزش آتی پول دارد، تورم است که باعث می‌شود هرروز از ارزش پولی که در حال حاضر وجود دارد، کاسته شود. به‌منظور به دست آوردن ارزش فعلی پول در آینده، از نرخ تنزیل و برای ارزش آتی آن، از نرخ بهره استفاده می‌شود. منظور از ارزش آتی، ارزش پول فعلی در آینده است که دو مفهوم کلی در محاسبه آن وجود دارد: تبدیل ارزش فعلی به آتی که به آن مرکب کردن (معادله ۱) و تبدیل آن به‌صورت بالعکس که به آن تنزیل (معادله ۲) می‌گویند.

$$FV = PV \times (1+r)^n \quad (1)$$

$$PV = FV \div (1+r)^n \quad (2)$$

¹ Life Cycle Cost (LCC)

² Net Present Value (NPV)

اما مشکل اصلی در به‌کارگیری معادلات فوق، ارزیابی میزان زوال خطای اندازه‌گیری وزن‌دار است که امکان محاسبه درآمدهای به‌دست‌آمده با هر مدل را به‌عنوان تابعی از زمان فراهم می‌کند و معمولاً هنگام اولین انتخاب کنتور در دسترس نخواهد بود. با این حال، پس از نصب، امکان تجزیه و تحلیل منحنی خطای نمونه انتخاب شده از کنتورها و محاسبه تواتر بهینه نوسازی با رفتار واقعی ابزارها وجود خواهد داشت. اگر تواتر نوسازی به هر دلیلی ثابت باشد، انتخاب مناسب‌ترین کنتور نسبتاً آسان خواهد بود؛ زیرا بهترین مدل کنتور، مدلی است که طبق معادله ۵ هزینه‌ها را حداقل کند یا طبق معادله ۶ درآمد را به حداکثر برساند. تواتر نوسازی ثابت، طول عمر تمام کنتورها را به مقدار معینی محدود می‌کند. اگر این تواتر نوسازی تحمیل نشود، عمر بهینه یک کنتور می‌تواند منافع اقتصادی را برای یک شرکت آب و فاضلاب به حداکثر رساند.

این موضوع، حاکی از آن است که مدل‌های مختلف باید با تواترهای مختلف نوسازی برای تعیین بهترین انتخاب سرمایه‌گذاری مقایسه شوند. با این وجود، برای انجام این کار روش ساده ارزش فعلی خالص دیگر روش مناسبی نیست و باید از زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص استفاده شود. زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص، شامل به‌دست آوردن ارزش فعلی خالص از یک متوالی بی‌نهایت از جایگزینی کنتورها (شکل ۱) است (Arregui et al., 2006) و بر اساس پژوهش‌های پیشین (Arregui et al., 2006, Yazdandoost and Izadi, 2010, 2011) تواتر نوسازی بهینه با هدف درآمدهای حداکثر (یا هزینه حداقل) مطابق با معادله ۸ تعیین خواهد شد. در نتیجه، طول عمر بهینه کنتور با مقایسه مقدار زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص حاصل خواهد شد. در رابطه با اثبات معادله ۸ نیز این‌گونه می‌توان استدلال کرد که فرض می‌کنیم یک شرکت آب و فاضلاب قرار است هر n سال یکبار کنتورهای مشترکین خود را تعویض کند. در اینجا مطابق با معادله ۵، در بازه زمانی n سال اول شرکت هزینه‌ای برابر با C_n انجام داده است. اما در بازه زمانی n سال دوم، هزینه‌ای که شرکت صرف کرده است با در نظر گرفتن ارزش فعلی پول برابر $\frac{C_n}{(1+r')^n}$ خواهد بود و به ترتیب برای سال‌های بعدی (مطابق با معادله ۷)

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد (زیربخش ۳-۲)، هزینه‌ها را می‌توان به دودسته کلی تقسیم کرد: (۱) هزینه‌های مستقیم سرمایه‌گذاری، شامل هزینه‌های خرید، نصب، اداری، نگهداری (که معمولاً در کنتورهای کوچک ناچیز یا حذف‌شدنی است) و همچنین ارزش اسقاطی (اوراقی) کنتورها که به‌عنوان یک درآمد در پایان عمر مفید تجهیزات در نظر گرفته شده و از سایر هزینه‌ها کسر می‌شود؛ و (۲) هزینه‌های ناشی از خطای اندازه‌گیری که معمولاً با گذشت زمان افزایش می‌یابد. نرخ افزایش این خطا به ویژگی‌های شرکت آب و فاضلاب و نوع کنتور بستگی دارد (و در برخی موارد حتی ممکن است با گذشت زمان کاهش یابد). این دسته از هزینه‌ها باید با نرخ تنزیل واقعی تعدیل شوند (مطابق معادله ۵) تا بتوان آنها را با هزینه‌های دسته اول (هزینه‌های مستقیم سرمایه‌گذاری) مقایسه کرد (Arregui et al., 2006, 2010, 2011, Yazdandoost and Izadi, 2018)

$$Cost = C_{purchase} + C_{install} + C_{administrative} \quad (5)$$

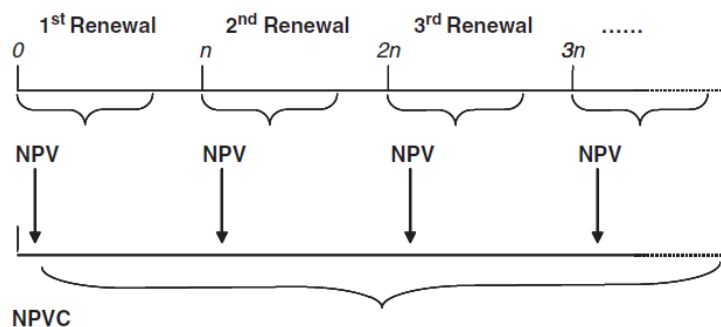
$$- C_{salvage} + \sum_{i=1}^n \forall_i \times \varepsilon_i \frac{WP_i}{(1+r')^{(i-1)}}$$

که در آن

$C_{purchase}$: هزینه خرید کنتور، $C_{install}$: هزینه نصب کنتور، $C_{administrative}$: هزینه اداری کنتور، $C_{salvage}$: هزینه اسقاط کنتور، $\forall_i$: متوسط حجم آب مصرفی توسط مشترک i ام، ε_i : خطای کنتور مشترک i ام و WP_i : قیمت آب مشترک i ام با توجه به پله مصرف آن است. لازم به توضیح است که اگر به‌جای هزینه‌ها، تمرکز بر روی درآمدها باشد، رویه مشابه بوده و فقط بخش مربوط به هزینه‌های آب اندازه‌گیری نشده و نیز علائم مربوط به هزینه‌ها در معادله ۵ به‌صورت معادله ۶ تغییر می‌کند (Arregui et al., 2006)

$$Cost = -C_{purchase} - C_{install} - C_{administrative} + \quad (6)$$

$$C_{salvage} + \sum_{i=1}^n \forall_i \times (1 - \varepsilon_i) \frac{WP_i}{(1+r')^{(i-1)}}$$



شکل ۱- زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص (Arregui et al., 2006)

Fig. 1. NPVRC (Arregui et al., 2006)

شرکت دارای ۱۷۲۷۸۴ مشترک است که از این تعداد، ۱۳۰۳۰۷ مشترک در گروه خانگی و ۴۲۴۷۷ مشترک در گروه‌های غیر خانگی (شامل آزاد و بنایی، نیروهای مسلح، اماکن مذهبی و متبرکه، صنعتی، تجاری و سایر کاربری‌ها) قرار دارند.

ورودی‌های مدل در دودسته اصلی طبقه‌بندی شدند. دسته نخست شامل اطلاعات واقعی استخراج شده از پایگاه داده شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران بود که مشتمل بر: (۱) اطلاعات اقتصادی مرتبط با کنتور شامل هزینه خرید، هزینه تعویض، هزینه استانداردسازی انشعاب و ارزش بازیافتی (فروش اوراقی) کنتورها برحسب قطر انشعاب؛ (۲) اطلاعات تعرفه آب‌بها شامل ساختار پلکانی تعرفه مشترکین خانگی (۷ پله مصرف) و تعرفه‌های مربوط به ۲۵ نوع کاربری غیر خانگی؛ و (۳) اطلاعات مشخصات مشترکین شامل شماره اشتراک، قطر انشعاب، نوع کاربری، میزان مصرف، تاریخ نصب انشعاب و تاریخ آخرین تعویض کنتور بود.

دسته دوم ورودی‌ها مربوط به عملکرد اندازه‌گیری کنتورها بود که شامل خطای اولیه کنتور (کنتور نو) و روند تغییرات خطا در طول زمان می‌شود. این اطلاعات بر اساس رابطه ارائه شده توسط (Akbarpour and Azizi, 2018) استخراج و در مدل استفاده شد. بر این اساس، برای خطای کنتورها معادله ۹ ارائه و درون برنامه اعمال شده که در آن خطای اولیه کنتور برابر ۲/۵ درصد و شیب نمودار خطی برازش داده شده برای محاسبه خطای کنتور در طول زمان $(WMErr_n)$ ، برابر ۰/۳۱۲۴ بود. به‌این ترتیب، مدل توسعه‌یافته با تلفیق هم‌زمان اطلاعات فنی، اقتصادی و بهره‌برداری مشترکین، امکان تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورها و

$$C_{total} = C_n + \frac{C_n}{(1+r')^n} + \frac{C_n}{(1+r')^{2n}} + \frac{C_n}{(1+r')^{3n}} + \dots \quad (7)$$

$$= C_n \times \left(1 + \frac{1}{(1+r')^n} + \frac{1}{(1+r')^{2n}} + \frac{1}{(1+r')^{3n}} + \dots\right) = C_n \frac{(1+r')^n}{(1+r')^n - 1}$$

$$Cost = [C_{purchase} + C_{install} + C_{administrative} - \quad (8)$$

$$C_{salvage} + \sum_{i=1}^n \forall_i \times \varepsilon_i \frac{WP_i}{(1+r')^{(i-1)}}] \times \frac{(1+r')^i}{(1+r')^i - 1}$$

با داشتن مقدار داده‌هایی مانند نرخ تورم، نرخ تنزیل (قیمت آب و هزینه کنتور)، نرخ مصرف آب، نرخ زوال دقت کنتورها در طول سال‌های متمادی و سایر پارامترها، زمان اقتصادی تعویض کنتور را برای هر نوع کنتور می‌توان تعیین کرد. لازم به توضیح است با توجه به اینکه هدف کمینه‌سازی هزینه‌های شرکت آب و فاضلاب بوده، نقطه بهینه اقتصادی زمانی است که مقدار زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص حداقل شود.

۴- نتایج پژوهش

در این پژوهش، با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط پایتون، یک ابزار محاسباتی و پشتیبان تصمیم‌گیری برای تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورهای آب بر مبنای مدل زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص توسعه داده شد. این ابزار به‌گونه‌ای طراحی شد که بتواند حجم بسیار زیادی از اطلاعات مشترکین را در مدت زمانی کوتاه پردازش کرده و نقطه بهینه اقتصادی تعویض را برای هر مشترک به‌صورت مجزا تعیین کند. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، اطلاعات تمامی مشترکین شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس اطلاعات دریافتی، این

ردیف ۵۶ که دوره بهینه تعویض کنتور آن هر ۷ سال یکبار است، تاریخ آخرین تعویض کنتور آن به ۲۰ سال پیش برمی‌گردد. به علاوه، مقایسه بین مشترکین ردیف‌های ۷۰ و ۷۲ حاکی از نقش تعیین‌کننده نوع کاربری در تعیین زمان اقتصادی تعویض کنتور است؛ درحالی‌که هر دو مشترک مصارف مشابهی دارند. برای مشترک ردیف ۷۰ با کاربری تجاری، زمان اقتصادی تعویض کنتور آن ۱۹ سال تعیین شده، اما تعویض کنتور مشترک ردیف ۷۲ که یک مجتمع آموزشی است، هیچ‌گاه بهینه نبوده و صرفه اقتصادی ندارد.

همچنین نتایج مشخص می‌کند که در پله‌های بالای مصرف خانگی (۶ و ۷)، زمان اقتصادی تعویض کنتور تقریباً برای مشترکین خانگی و تجاری یکسان است (ردیف‌های ۴۲ و ۵۱)؛ درحالی‌که مقایسه نتایج با تاریخ آخرین تعویض کنتور نشان می‌دهد توجه شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران عمدتاً به تعویض کنتورهای مشترکین غیر خانگی معطوف بوده است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که از میان ۱۷۲۷۸۴ مشترک، ۷۰۰۷۶ مورد آنها نیاز به تعویض دارند.

با استفاده از رابطه رشد خطای کنتور ارائه شده در پژوهش اکبرپور و عزیزی میزان خطای هر کنتور بر اساس عمر آن (i) و با فرض خطای اولیه ۲/۵ درصد (معادله ۹) محاسبه شد (Akbarpour and Azizi, 2018). سپس با محاسبه و میانگین‌گیری خطای برآورد شده برای تمامی کنتورهای مورد بررسی، میزان هدررفت ظاهری ناشی از خطای اندازه‌گیری کنتورها در منطقه مورد مطالعه برابر با ۶/۳۸ درصد برآورد شد. درنهایت، بر اساس مبالغ اعلام شده از سوی شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران در سال ۱۴۰۳، تعویض کنتورهای مشترکین ۱۰،۷۷۳،۶۱۰،۰۰۰،۰۰۰ ریال (معادل حدود ۱۷۷۰۴ میلیارد تومان) بر اساس محاسبات سال ۱۴۰۳ برآورد شده است.

اولویت‌بندی مشترکین را در مقیاس واقعی شبکه توزیع آب فراهم می‌سازد

$$WMErr_n = 0.3124 \times n + 2.5 \quad (9)$$

در جدول ۱، نمونه‌ای از نتایج «زمان بهینه اقتصادی تعویض کنتور» بر اساس نتایج مدل و «نیاز یا عدم نیاز به تعویض کنتور» با مقایسه تاریخ آخرین تعویض یا تاریخ نصب انشعاب با زمان بهینه اقتصادی تعویض کنتور، کنتورهایی که نیاز به تعویض یا عدم تعویض دارند، ارائه شده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۱، اهمیت تأثیرگذاری عوامل مهمی از جمله (۱) قطر انشعاب که هزینه‌های مربوط به کنتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد، (۲) میزان مصرف ماهانه مشترک که به‌ویژه در پله‌های مصرف خانگی خود را نشان می‌دهد و (۳) نوع کاربری که میزان آب‌بهای پرداختی را تعیین می‌کند را به‌خوبی در زمان اقتصادی تعویض کنتور نشان می‌دهد. در ادامه، برای هرچه روشن‌تر شدن نتایج جدول ۱ مثال‌هایی ارائه و نتایج تحلیل می‌شوند. در مشترکین خانگی ردیف‌های ۲۳ و ۲۶، مدت‌زمان بهینه تعویض کنتور ۵۰ سال به‌دست آمده است. از آنجا که حداکثر مدت‌زمان تعویض کنتور در مدل ۵۰ سال تعریف شده است، این نتیجه نشان می‌دهد که تعویض کنتورهای این دو مشترک با توجه به اینکه قطر انشعاب کم و مصارف آنها پایین است، هیچ‌گاه تعویض کنتور در این مشترکین به لحاظ اقتصادی به‌صرفه نیست.

در مقابل، مشترکین ردیف‌های ۱، ۲، ۸، ۱۹، ۵۶ و ۶۹ با قطر انشعاب بالاتر و مصارف بسیار قابل‌توجه‌تر، سال بهینه تعویض زیر ۱۰ سال است؛ این در حالی است که بر اساس تاریخ آخرین تعویض کنتورهای این مشترکین، سالها است که کنتورهای آنها تعویض نشده که این موضوع می‌تواند ضرر قابل‌توجهی را به شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران وارد سازد؛ به‌طور خاص مشترک

جدول ۱- بخشی از نتایج پژوهش

Table 1. A selection of research results

No.	Connection type	Model inputs				Model outputs		
		Connection diameter (inch)	Water consumption (m ³ /month)	Installation date of connection	Last replacement date	Optimal meter replacement year	Meter age	Replacement necessity (Yes/No)
1	Residential	1.5	285.36	1371/10/12	1395/02/15	6	8	Yes
2	Residential	1.5	162.68	1372/01/07	1399/08/28	8	4	No
3	Commercial	0.5	7.57	1384/11/24	1401/04/11	16	2	No
4	Commercial	0.75	29.58	1371/10/12	1394/11/10	10	9	No
5	Commercial	0.5	12.25	1389/08/06	1398/04/11	13	5	No
6	Commercial	0.5	12.68	1383/09/02	1392/09/20	13	11	No
7	University	0.75	44.08	1364/03/19	1388/02/27	32	15	No
8	Residential	0.5	67.75	1371/10/12	1386/01/22	7	17	Yes
9	Cultural center	0.5	8.39	1381/11/15	1399/08/10	18	4	No
10	Residential	0.5	14.51	1372/05/12	1388/02/27	22	15	No
11	Residential	0.5	24.36	1353/01/18	1399/09/25	12	4	No
12	Residential	0.5	67.57	1373/06/28	1384/07/28	7	19	Yes
13	Residential	0.5	37.02	1367/03/22	1390/12/08	9	13	Yes
14	Residential	0.5	14.45	1371/10/19	1382/09/22	22	21	No
15	Residential	0.5	9.77	1390/07/02	1399/07/23	40	4	No
16	Residential	0.5	22.31	1372/05/16	1383/09/04	16	20	Yes
17	Residential	0.5	32.89	1351/06/15	1399/09/25	11	4	No
18	Residential	0.5	42.8	1366/03/03	1393/12/12	9	10	Yes
19	Residential	0.75	61.38	1352/06/15	1381/05/02	8	22	Yes
20	Residential	0.5	47.06	1366/05/21	1384/07/28	8	19	Yes
21	Residential	0.5	12.91	1366/08/30	1390/08/27	23	13	No
22	Residential	0.5	63.85	1360/03/31	1396/10/07	7	7	Yes
23	Residential	0.5	1.72	1370/07/02	1402/12/19	50	1	No
24	Residential	0.5	60.69	1381/10/08	1398/08/08	7	5	No
25	Commercial	0.5	4.13	1361/06/21	1381/06/16	20	22	Yes
26	Residential	0.5	5.5	1398/02/08	1402/03/03	50	1	No
27	Residential	0.75	60	1381/10/11	1388/08/06	8	15	Yes
28	Commercial	0.5	0	1361/04/26	1389/02/14	50	14	No
29	Residential	0.5	103.49	1351/06/15	1400/07/09	6	3	No
30	Residential	0.75	132.52	1351/06/15	1396/03/03	5	7	Yes
31	Residential	0.5	35.5	1373/01/15	1393/11/28	11	10	No
32	P_Hospital	0.5	4.01	1352/04/20	1384/07/12	24	19	No
33	Residential	0.5	14.26	1371/08/30	1393/11/28	22	10	No
34	Residential	0.5	55.4	1350/10/14	1394/07/29	8	9	Yes
35	Residential	0.5	39.65	1363/02/10	1393/10/11	9	10	Yes
36	Residential	0.5	25.25	1358/06/04	1396/05/15	12	7	No
37	Residential	0.5	65.79	1381/11/20	1402/10/18	7	1	No
38	Commercial	0.5	8.47	1370/08/19	1401/04/23	16	2	No
39	P_Hospital	0.5	2.97	1380/10/19	1401/04/06	26	2	No
40	Residential	0.5	58.35	1355/06/01	1395/10/02	8	8	Yes
41	Residential	0.75	99.46	1365/01/24	1384/05/01	6	19	Yes
42	Commercial	0.5	124.6	1367/03/24	1380/11/10	5	23	Yes

ادامه جدول ۱- بخشی از نتایج پژوهش

Cont. Table 1. A selection of research results

Model inputs						Model outputs		
No.	Connection type	Connection diameter (inch)	Water consumption (m ³ /month)	Installation date of connection	Last replacement date	Optimal meter replacement year	Meter age	Replacement necessity (Yes/No)
43	Residential	0.5	24.36	1364/09/10	1380/10/18	12	23	Yes
44	Residential	0.5	79.31	1370/11/26	1380/10/19	7	23	Yes
45	Residential	0.5	40.69	1364/08/22	1391/04/13	9	12	Yes
46	Residential	0.5	40.84	1364/08/12	1380/10/18	9	23	Yes
47	Residential	0.5	24.06	1367/07/30	1390/12/20	13	13	Yes
48	Construction	0.5	5.21	1363/04/31	1380/11/10	13	23	Yes
49	Residential	0.5	16.31	1364/04/06	1382/09/23	21	21	Yes
50	Residential	0.75	65.35	1365/06/06	1387/05/20	7	16	Yes
51	Residential	0.5	120.56	1354/08/15	1402/04/12	5	1	No
52	Residential	1	178.6	1354/08/15	1402/01/29	6	1	No
53	Educational center	0.5	0.7	1354/08/15	1395/11/06	50	8	No
54	Educational center	0.5	43.88	1354/08/15	1401/02/05	27	2	No
55	Residential	0.75	75.28	1365/12/16	1384/04/11	7	19	Yes
56	Residential	1	157.57	1355/11/04	1383/06/17	6	20	Yes
57	P_Hospital	0.5	26.78	1373/02/18	1402/01/20	11	1	No
58	Commercial	0.5	78.93	1367/05/08	1396/04/14	6	7	Yes
59	Commercial	0.5	13.04	1365/12/16	1394/07/25	13	9	No
60	Commercial	0.5	0	1364/12/25	1389/12/16	50	14	No
61	Commercial	0.5	3.93	1368/03/11	1391/11/04	21	12	No
62	Commercial	0.5	6.17	1368/09/08	1390/01/21	18	13	No
63	Commercial	0.5	2.66	1391/04/06	1394/04/02	24	9	No
64	Commercial	0.5	100.93	1354/08/15	1392/02/30	5	11	Yes
65	Residential	0.5	58.88	1366/10/27	1395/03/24	7	8	Yes
66	Educational center	0.75	12.48	1351/10/24	1386/01/27	43	17	No
67	Residential	0.75	25.51	1354/08/15	1380/11/21	13	23	Yes
68	Cultural Center	0.75	28.18	1366/04/27	1396/04/14	11	7	No
69	Residential	1	232.43	1364/10/08	1395/10/25	5	8	Yes
70	Commercial	0.5	5.19	1369/09/18	1397/09/14	19	6	No
71	Commercial	0.5	25.23	1351/12/16	1384/09/28	10	19	Yes
72	University	0.5	4.63	1368/08/27	1390/12/11	50	13	No
73	Commercial	0.5	51.45	1370/06/26	1382/07/24	7	21	Yes
74	Commercial	0.5	1.4	1373/05/02	1399/07/03	30	4	No
75	P_Hospital	0.5	81.31	1390/10/25	1401/02/05	7	2	No
76	Commercial	0.5	0.42	1372/08/11	1397/07/10	45	6	No
77	Residential	0.5	2.52	1365/12/16	1395/03/12	50	8	No
78	Commercial	0.5	1.54	1373/05/02	1396/09/04	29	7	No
79	Commercial	0.5	13.32	1362/02/12	1393/12/18	13	10	No
80	Public	2	212.86	1368/02/25	1392/03/18	24	11	No
81	Residential	0.5	0	1386/05/09	1394/02/19	50	9	No

۵- بحث و نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری دقیق آب، یکی از ارکان اصلی مدیریت بهره‌برداری و پایداری مالی شرکت‌های آب و فاضلاب محسوب می‌شود؛ زیرا درآمد حاصل از فروش آب، به‌طور مستقیم به عملکرد صحیح سامانه‌های اندازه‌گیری وابسته است. علاوه بر این، اطلاعات حاصل از کنتورهای شبکه توزیع و مشترکین، مبنای محاسبه شاخص‌های کلیدی عملکرد از جمله آب بدون درآمد، هدررفت ظاهری، کارایی شبکه و برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های توزیع آب قرار می‌گیرد. از این رو، تعویض به‌موقع کنتورهای فرسوده صرفاً یک اقدام درآمدی نبوده، بلکه ابزاری مؤثر در ارتقای دقت اندازه‌گیری، بهبود کیفیت داده‌های بهره‌برداری، افزایش عدالت در صدور صورتحساب‌ها و کاهش هدررفت ظاهری آب به شمار می‌رود.

در همین راستا، هدف اصلی این پژوهش تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورهای آب و پاسخ به این پرسش بود که چگونه می‌توان با در نظر گرفتن هم‌زمان هزینه‌های تعویض، ویژگی‌های فنی کنتورها، الگوی مصرف مشترکین و ساختار تعرفه‌ای، زمان مناسب تعویض هر کنتور را به‌گونه‌ای تعیین کرد که هزینه اقتصادی شرکت آب و فاضلاب حداقل شود. برای دستیابی به این هدف، یک مدل اقتصادی مبتنی بر زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص توسعه یافت و در قالب یک ابزار محاسباتی مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی شد. این ابزار قابلیت تحلیل هم‌زمان حجم بسیار بزرگی از اطلاعات مشترکین را فراهم کرده و در این پژوهش برای تحلیل اطلاعات بیش از ۱۷۲ هزار مشترک شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران استفاده شد. در این فرایند، نقطه بهینه اقتصادی تعویض برای هر مشترک به‌صورت مجزا تعیین شد. ورودی‌های مدل شامل اطلاعات واقعی هزینه‌های مرتبط با کنتورها، تعرفه‌های آب‌بها، مشخصات مشترکین و همچنین اطلاعات مربوط به عملکرد و خطای کنتورها بود که از منابع معتبر و داده‌های بهره‌برداری موجود استخراج شدند.

نتایج پژوهش نشان داد که زمان بهینه تعویض کنتورها حاصل برقراری تعادل میان هزینه‌های سرمایه‌ای تعویض و زیان اقتصادی ناشی از افت دقت اندازه‌گیری است. بر این اساس، در مشترکین با مصرف پایین، به‌ویژه مشترکین خانگی واقع در پله‌های ابتدایی مصرف، زیان ناشی از کم‌ثباتی مصرف در بسیاری از موارد کمتر از

هزینه تعویض کنتور بوده و بنابراین تعویض زودهنگام فاقد توجیه اقتصادی است. در مقابل، با افزایش مصرف، افزایش قطر انشعاب و افزایش مبلغ آب‌بهای پرداختی، هزینه فرصت ناشی از خطای اندازه‌گیری افزایش یافته و تعویض کنتور در سنین پایین‌تر از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که اتخاذ سیاست‌های یکسان برای تمامی مشترکین، لزوماً منجر به استفاده بهینه از منابع مالی شرکت‌های آب و فاضلاب نخواهد شد و اولویت‌بندی اقتصادی مشترکین می‌تواند اثربخشی برنامه‌های تعویض کنتور را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

از سوی دیگر، نتایج حاصل نشان داد که قطر انشعاب، میزان مصرف و سطح آب‌بهای پرداختی، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در زمان بهینه تعویض کنتورها هستند. همچنین، برآورد هدررفت ظاهری ناشی از خطای اندازه‌گیری بیانگر آن است که استمرار بهره‌برداری از کنتورهای فرسوده می‌تواند منجر به از دست رفتن بخش قابل توجهی از درآمد بالقوه شرکت‌های آب و فاضلاب شود. این موضوع اهمیت مدیریت نظام‌مند کنتورها و جایگزینی رویکردهای مبتنی بر دوره‌های زمانی ثابت با رویکردهای مبتنی بر تحلیل اقتصادی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر، توسعه یک ابزار تصمیم‌یار عملیاتی برای تعیین نقطه بهینه اقتصادی تعویض کنتورها در مقیاس واقعی بود. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که به تحلیل مفهومی یا بررسی تعداد معدودی از عوامل مؤثر بر سیاست تعویض محدود بوده‌اند، مدل توسعه‌یافته در این پژوهش قادر است با تلفیق هم‌زمان نوع کاربری مشترکین، قطر انشعاب، ساختار پلکانی تعرفه آب، هزینه‌های چرخه عمر کنتور و عملکرد اندازه‌گیری آن، برای هر مشترک یک تصمیم اقتصادی اختصاصی ارائه کند. این قابلیت، چارچوب نظری زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص را از سطح یک مدل تحلیلی به یک ابزار کاربردی و قابل‌استفاده در فرایندهای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی شرکت‌های آب و فاضلاب ارتقا داده است.

در مجموع، نتایج پژوهش نشان داد که مدل توسعه‌یافته مبتنی بر زنجیره جایگزین ارزش فعلی خالص، ابزاری علمی، کاربردی و قابل‌اتکا برای مدیریت اقتصادی کنتورهای آب است. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های واقعی و در نظر گرفتن شرایط بهره‌برداری هر مشترک، امکان تعیین زمان

تغییرات وجود دارد.

۶- قدردانی

این پژوهش حاصل انجام پروژه پژوهشی با عنوان "تعیین نقطه اقتصادی تعویض کنتور در محدوده تحت پوشش شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران" بوده که تحت حمایت شرکت آب و فاضلاب منطقه ۴ شهر تهران انجام شده است.

بهینه تعویض کنتورها را فراهم کرده و می‌تواند به کاهش هدررفت ظاهری، افزایش دقت اندازه‌گیری، بهبود عدالت در صدور صورت حساب‌ها، ارتقای بهره‌وری سرمایه‌گذاری و افزایش پایداری مالی شرکت‌های آب و فاضلاب کمک کند. همچنین، به دلیل انعطاف‌پذیری ساختار مدل و اتکای آن به اصول اقتصادی شناخته شده، امکان به‌کارگیری آن در سایر شرکت‌های آب و فاضلاب و شبکه‌های توزیع آب با حداقل

References

- Akbarpour, A. and Azizi, M., 2018. *Economic Assessment of Residential Water Meter Inaccuracies and Their Impact on Non-Revenue Water*. Technical Report. (In Persian)
- Akbarpour, A. and Azizi, M., 2020. Economic study and analysis of the flowmeters error of the home subscribers and its effect on the amount of non-revenue water. *Irrigation and Water Engineering*, 11(2), 204-233. (In Persian). [Link]
- Allender, H. D., 1996. Determining the economical optimum life of residential water meters. *Water Engineering and Management*, 143(9), 20-23. [Link]
- Amini, A. and Eshtehardieh, H., 2021. The role of replacing aged water meters in optimizing residential water consumption and increasing water revenue: a case study of Isfahan Water and Wastewater Company, Region 1. In *Proceedings of the First National Conference on Water Quality Management and the 3rd National Conference on Water Consumption Management*. Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Arregui, F. J., Cabrera, E. and Cobacho, R., 2006. *Integrated Water Meter Management*. IWA Publishing, London, UK. [Link]
- Arregui, F. J., Cobacho, R., Cabrera Jr, E. and Espert, V., 2011. Graphical method to calculate the optimum replacement period for water meters. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 143-146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000100).
- Arregui, F. J., Pardo, M. A., Parra, J. C. and Soriano, J., 2007. Quantification of meter errors of domestic users: case study. In *Proceedings of the Water Loss 2007 Conference*. IWA, Bucharest, Romania. 1-12. [Link]
- Arregui, F., Cobacho, R., Soriano, J. and García-Serra, J., 2010. *Calculating the Optimum Level of Apparent Losses Due to Water Meter Inaccuracies*. Water Loss, 8 pages. Camino de Vera, Valencia, Spain. [Link]
- Bahrami, F., 2021. *Report on Defective Water Meters and Prioritization Criteria for Replacement*. Shahreza Water and Wastewater Affairs. Isfahan Province Water and Wastewater Company. (In Persian).
- Barani, N. and Abdollah Ghazi, Z., 2022. Investigating the effect of replacing domestic water meters in reducing the apparent losses, case study (region 3 of water and wastewater company of Isfahan Province). *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 7(4), 75-84. (In Persian). <https://doi.org/10.22112/jwwse.2022.328977.1308>.
- Behruzian, M., Naseri, M., Akbari, M. and Nasirian, A., 2021. Investigating the factors affecting the accuracy of water meters and providing appropriate approach for replacing them using cluster analysis and artificial neural networks. *Irrigation and Water Engineering*, 12(1), 398-414. (In Persian). <https://doi.org/10.22125/iwe.2021.138353>.
- Cassidy, J., Barbosa, B., Damião, M., Ramalho, P., Ganhão, A., Santos, A. et al., 2021. Taking water efficiency to the next level: digital tools to reduce non-revenue water. *Journal of Hydroinformatics*, 23(3), 453-465. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.072>.
- Davis, S. E., 2005. Residential water meter replacement economics. In *Proceedings of IWA Leakage 2005 Conference*. pp. 1-10. [Link]

- Delavari, B., Sasani, A. and Keshavarz, S., 2017. Investigating the role of replacing underperforming old water meters on reducing non-revenue water: a case study of Bandar Ganaveh. *Proceedings of the 1st National Conference on Water Consumption Management with a Waste Reduction*. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Dezhestan, N., Jalili Ghazizadeh, M. and Shahangian, S. A., 2025. Presenting a model to determine the optimal economic point for replacing customers' water meters. *Proceedings of the 3rd National Conference on Water Quality Management and the 5th National Conference on Water Consumption Management with a Waste Reduction and Recycling Approach*. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Ebadati, E., Shafaghat, R., Raji Asadabadi, M. J., Majidaci, H. and Negharchi, S. M., 2021. Providing a targeted algorithm for replacing customers' water meters aiming at reducing NRW: case study. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, UK. 1196(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1196/1/012034>.
- Ferreol, E., 2005. How to measure and reduce the water meter park inefficiency. In *Proceedings of IWA Leakage 2005 Conference*. Halifax, Canada. 1-4. [Link]
- Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G., Notaro, V. and Puleo, V., 2012. A composite indicator for water meter replacement in an urban distribution network. *Urban Water Journal*, 9(6), 419-428. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2012.690434>.
- Ghanbari Adivi, S., Molabashi, A. S. and Mahmoudi, A., 2018. Cluster testing of water meters in Tiran City and evaluation of factors affecting meter accuracy. In *Proceedings of the Second Iranian Congress on Water and Wastewater Engineering and the 2nd National Conference on Drinking Water Supply and Demand*. Isfahan, Iran. (In Persian). [Link]
- Ghasemi Razveh, M., Molabashi, A. S., Mahmoudi, A. and Fathian, M., 2019. Determining the average meter age for replacement based on cluster test results: a case study of District 6, Isfahan. In *Proceedings of the 2nd National Conference on Water Consumption Management*. Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Iranmehr, S., Haftani, A., Panahi Emam, M., Taghipournia, A. and Zare Zirak M., 2025. Studying the performance of customers meters and analyzing the parameters affecting their measurement accuracy along with policy-making for conducting cluster testing of meters. *Journal of Water and Wastewater*, 36(1), 97-113. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2025.508207.3473>.
- Jalili Ghazizadeh, M., 2024. *Determining the Economic Replacement Point of Water Meters in the Coverage Area of Water and Wastewater Company, Region 4*, Tehran. Technical Report. (In Persian)
- Johnson, E. H., 2001. Optimal water meter selection system. *Water SA*, 27(4), 481-488. [Link]
- Kaveh Yazdy, F. and Zarifzadeh, S., 2021. Water meter replacement recommendation for municipal water distribution networks using ensemble outlier detection methods. *Journal of Artificial Intelligence and Data Mining*, 9(4), 425-438. [Link]
- Khademifar, S. A., Tayebe, A. and Pahlavanzadeh, H., 2009. Economic assessment of replacing inaccurate water meters (components of apparent water losses). In *Proceedings of the 3rd National Conference on Water Consumption Management with a Waste Reduction*. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Lashkari, A. and Lotfalian, R., 2009. Study and evaluation of water meter measurement errors in water auditing: a case study of Semnan, Shahrood, Garmsar, and Damghan Cities. In *Proceedings of the 3rd National Conference on Water Consumption Management with a Waste Reduction*. Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Male, J. W., Noss, R. R. and Moore, I. C., 1985. *Identifying and Reducing Losses in Water Distribution Systems*. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, United States. [Link]
- Mehrdadi, N., Jalali Amin, F. and Haghollahi, A., 2009. A Research on Unaccounted Water due to Customer Metering Inaccuracies. *Journal of Environmental Studies*, 34(48), e27453. (In Persian). [Link]



- Moahloli, A., Marnewick, A. and Pretorius, J. H. C., 2019. Domestic water meter optimal replacement period to minimize water revenue loss. *Water SA*, 45(2), 165173. <https://doi.org/10.4314/wsa.v45i2.02>.
- Molabashi, A. S., Amini, A. and Saleh, S. M. H., 2023. Optimal water meter replacement plan for customers: a case study of Isfahan Province. In *Proceedings of the 2nd National Conference on Water Quality Management and the 4th National Conference on Water Consumption Management with a Waste Reduction and Recycling Approach*. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K. and Vairavamoorthy, K., 2011. Investigating water meter performance in developing countries: a case study of Kampala, Uganda. *Water SA*, 37(4), 567574. <https://doi.org/10.4314/wsa.v37i4.18>.
- Omidi-Kashani, B. and Deymi, O., 2021. Investigating the correct operation of domestic water meters in the range of water consumption of evaporative coolers according to the different atmospheric conditions for four cities of South Khorasan Province. *Journal of Water and Wastewater*, 32(3), 40-54. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2020.250004.3067>.
- Poureshagh, M., Mobini, A. and Poureshagh, M., 2017. Evaluation of the accuracy of household water meters and its impact on the amount of non-revenue water in 13 cities under the jurisdiction of the Khorasan Razavi Water and Wastewater Company. *The 1st National Conference on Water Consumption Management and Waste Management*, Tehran, Iran. (In Persian). <https://civilica.com/doc/879270>.
- Publication No. 556, 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: The Office of Deputy for Strategic Supervision Ministry of Energy. (In Persian). [Link]
- Saleh, S. M. H. and Bahrami, F., 2009. Water Demand Management.
- Shamsian, M. R., Shahmansourian, E., Bagheri, E. and Lashkari, A., 2008. A case study on the impact of replacing water meters older than 10 years and the resulting benefits in the selected community (Aradan City). *2nd National Conference on Water and Wastewater with an Operation-Oriented Approach*, Tehran, Iran. (In Persian). <https://civilica.com/doc/51941>.
- Van Zyl, J. E., 2011. *Introduction to Integrated Water Meter Management*. Johannesburg: Water Research Commission. Scientific Research an Academic Publisher. pp. 25-49. [Link]
- Yazdandoost, F. and Izadi, A., 2018. An asset management approach to optimize water meter replacement. *Environmental Modelling and Software*, 104, 270-281. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.015>.
- Yee, M. D., 1999. Economic analysis for replacing residential meters. *Journal-American Water Works Association*, 91(7), 72-77. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08666.x>.
- Yılmaz, S., Firat, M., Bozkurt, C. and Özdemir, Ö., 2021. Identification of the priority regions in the customer water meters replacement using the AHP and ELECTRE methods. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 39(4), 331-342. [Link]
- Zeynodini, G., 2011. Investigating the effectiveness of replacing faulty customer water meters on non-revenue water in Kerman City. *International Conference on Water and Wastewater*, Tehran, Iran. (In Persian). [Link]