



Study of the ways and methods of reducing non-revenue water

Seyed Saeid Taghavian¹, Mohsen Najarchi², Mohammad Mahdi Najafizadeh³,
Sayed Yaghoub Zolfegharifar⁴, and Saeid Shabanlou⁵

1. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran E-mail: saeid.taghaviyan67@yahoo.com
2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: m-najarchi@iau-arak.ac
3. Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: m-najafizadeh@iau-arak.ac.ir
4. Department of Civil Engineering, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran. E-mail: syzoalfeghary@gmail.com
5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: saeid.shabanlou@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:
Research Article

Article history:

Received 07 February 2025
Received in revised form 24
May 2025
Accepted 14 September 2025
Available online 21 March
2026

Keywords:

water distribution network,
non-revenue water,
network analysis,
Vicor,
Aras,
Copeland method

Objective The main objective of this research is to study and examine the methods and approaches for reducing non-revenue water.

Method: This study adopted a systematic approach to identify and evaluate strategies for reducing non-revenue water. Eleven potential strategies were identified, and the Copeland method was used to prioritize them. Results showed that leakage management in pipelines and connections—including active and inactive control, continuous inspection, monitoring, and pipe repair—was the highest priority. This methodology provides a clear framework to focus on the most effective interventions.

Results: The analysis revealed that pipeline and connection leakages are the most significant contributors to non-revenue water. The prioritization using the Copeland method showed that leakage management measures—including inactive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, and pipe replacement or repair—were ranked highest among all identified strategies. Other strategies, such as pump control to prevent water hammer and pressure waves, the use of flexible fittings to reduce physical damage, and the recording of all information related to customers, properties, connections, meters, and subsequent changes in customer records, were assigned equal priority. These strategies were ranked lower compared to leakage management measures.

Conclusions: This study evaluated strategies to reduce non-revenue water, highlighting leakage from pipelines and connections as the primary cause. Effective leakage management—including active and inactive control, continuous inspection, monitoring, and pipe repair—is essential, while other measures such as pump control, flexible fittings, and data management offer supportive but lower-priority benefits. Prioritizing targeted leakage management is the most effective approach for reducing water loss and enhancing operational efficiency.

Cite this article: Taghavian, S.S., Najarchi, M., Najafizadeh, M.M., Zolfegharifar, S.Y., & Shabanlou, S. (2026). Study of the ways and methods of reducing non-revenue water, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(1), 1-24. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11769.1156>



Introduction

Non-revenue water is the difference between the net volume of water that enters the network and is consumed. In recent years, the severe shortage of resources and the rapid increase in water production costs have caused the issue of non-revenue water to be considered. Based on this, identifying the ways and means of reducing non-revenue water has double importance. In this regard, the aim of this research was to identify and prioritize these solutions.

Method

In this research, based on the main objective of the research, which is to study and investigate the ways and methods of reducing non-revenue water, 11 potential solutions include entering all the information related to the subscriber, ownership, branching and contour and any subsequent changes in the subscriber file, renewal and replacement of low-quality materials with new and high-quality materials in different parts of branching (branching belt, network valve, branching pipe, branching valve, branching connections, connecting and disconnecting valve and one-way valve), planning for regular and permanent reading of subscribers' contours, quality of readers, subscribers' contour reading routes and quality control of the read statistics, leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair), use of higher precision meters (class meter C instead of class B meter), periodical testing of sharing meters, adjustment and uniformity of distribution network pressure in the range of 3 to 5 atmospheres, use of flexible and non-rigid connections to reduce physical damage, careful monitoring of contracts and installation of pipes in underground, the use of pressure relief valves (PRV) to reduce the possibility of leakage and pump control to prevent the phenomenon of water hammer and pressure waves have been identified.

Results

After identifying potential non-revenue water reduction solutions, these identified solutions were ranked using multi-criteria decision-making techniques (network process analysis method, Vicor method and Aras method) and finally the results obtained from them were prioritized using the Copeland method. Became. Based on network analysis technique, leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair) and use of higher precision meters (class C meter instead of class B meter) had the highest priority among other options and the use of pressure relief valves (PRV) had the third priority. Based on Vicor technique, periodical testing of subscription meters and careful monitoring of contracts and installation of underground pipes had the highest priority among other options, and the solution of periodical renovation and replacement of poor quality materials with new and high quality materials in different parts of branching (branching belt, network valve, branching pipe, branching valve, branching connections, connecting and disconnecting valve and one-way valve) had the third priority. Also, based on the Aras phase technique, the leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair) and periodical renovation and replacement of poor quality materials with new and high quality materials in different parts of branching (branching belt, network valve, branching pipe, branching valve, branching connections, disconnecting and connecting valve, and one-way valve) had the first and second priority among other options, and the solution for careful monitoring of contracts and installation of pipes in underground had the third priority.

Conclusions

Finally, the results of the final prioritization with Copeland method showed that measures related to leakage management in pipes and branches (passive leakage control, active leakage control, continuous inspection, leakage monitoring, replacement or repair) have a higher priority than other solutions. In other words, it can be stated that the leakage from pipes and connections is the most important factor in the occurrence of non-revenue water and since water leakage will happen in any case, the necessity of monitoring and dealing with it is the most important solution in reducing non-revenue water. Also, pump control solutions to prevent the phenomenon of water hammer and pressure waves, the use of flexible connections to reduce physical damage and include all information related to the subscriber, property, branching and contour and subsequent changes in the subscriber file had the same priorities and had lower priority than other solutions.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مطالعه و بررسی شیوه‌ها و روش‌های کاهش آب بدون درآمد

سید سعید تقویان^۱، محسن نجارچی^۲، محمدمهدی نجفی زاده^۳، سید یعقوب ذوالفقاری فر^۴، و سعید شعبانلو^۵

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: saeed.taghaviyan67@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: m-najarchi@iau-arak.ac
۳. گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: m-najafizadeh@iau-arak.ac
۴. گروه مهندسی عمران، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران. رایانامه: syzoalfeghary@gmail.com
۵. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saeid.shabanlou@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف اصلی این مطالعه بررسی و شناسایی روش‌ها و راهکارهای کاهش آب بدون درآمد است. روش پژوهش: در این پژوهش، ابتدا با مرور و تحلیل جامع، ۱۱ راهکار بالقوه برای کاهش آب بدون درآمد شناسایی شد. برای ارزیابی و اولویت‌بندی این راهکارها، از روش کپلند استفاده شد که امکان مقایسه ساختاریافته بر اساس اثرگذاری، قابلیت اجرا و اهمیت هر راهکار را فراهم می‌کند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۹	یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدیریت نشت در لوله‌ها و اتصالات شامل کنترل نشت فعال و غیرفعال، بازرسی مستمر، پایش نشت و تعمیر یا تعویض لوله‌ها در اولویت بالاتری نسبت به سایر راهکارها قرار دارد. سایر راهکارها مانند کنترل پمپ برای جلوگیری از پدیده ضربه قوچ، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و ثبت اطلاعات جامع مشترکین تأثیر کمتری بر کاهش آب بدون درآمد دارند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳	نتیجه‌گیری: یافته‌ها تأکید می‌کنند که نشت از لوله‌ها و اتصالات مهم‌ترین عامل آب بدون درآمد است و اولویت اصلی در کاهش این هدررفت، مدیریت هدفمند نشت شامل کنترل، پایش و تعمیر لوله‌ها است. سایر اقدامات حمایتی می‌توانند کارایی سیستم را افزایش دهند، اما تأثیر فوری کمتری دارند.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳	کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع آب، آب بدون درآمد، تحلیل شبکه، ویکور، آراس، روش کپلند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱	

استناد: تقویان، سید سعید؛ نجارچی، محسن؛ نجفی زاده، محمدمهدی؛ ذوالفقاری فر، یعقوب؛ و شعبانلو، سعید. (۱۴۰۵). مطالعه و بررسی شیوه‌ها و روش‌های کاهش

آب بدون درآمد. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۱)، ۲۴-۱.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11769.1156>



مقدمه

کشور ایران با متوسط بارش سالانه حدود ۲۴۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر در زمره مناطقی از جهان است که از موهبت نزولات جوی به‌اندازه کافی بهره‌مند نمی‌باشد (قهرمانی و همکاران، ۱۴۰۱). قسمت عمده مساحت کشور را مناطق خشک و کم آب فراگرفته و لذا از دیرباز آب نقش تعیین‌کننده‌ای در توسعه اقتصادی آن داشته است (قصابی و فتاحی، ۱۴۰۰). نظر به اینکه در گذشته آب به قیمت ارزان و به‌آسانی در دسترس بوده، لذا دستگاه‌های مسئول توزیع آب شهری تا قبل از تشکیل شرکت‌های آب‌وفاضلاب نسبت به کاهش آب بدون درآمد به‌عنوان راه‌حلی برای صرفه‌جویی در منابع آب، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش بازده یا درآمد، توجه کافی نداشته‌اند. در سال‌های اخیر کمبود شدید منابع و افزایش سریع هزینه‌های تولید آب باعث شده که موضوع آب بدون درآمد موردتوجه قرار گیرد. بنابراین در کنار تأمین آب از منابع جدید باید از هدررفتن آب در مراحل مختلف انتقال، تصفیه، ذخیره و توزیع به‌عنوان یک فعالیت درازمدت و با برنامه‌ریزی مدون جلوگیری کرد (چاویرا و همکاران^۱، ۲۰۲۲).

در طراحی شبکه‌های آب‌رسانی شهری کمیته‌ی تحت‌عنوان آب به‌حساب نیامده (UFW) در محاسبات وارد می‌شود. نشت در شبکه‌های آب‌رسانی شهری یکی از اصلی‌ترین مؤلفه‌های آب به‌حساب نیامده بشمار می‌رود. باتوجه‌به محدودیت‌های موجود در تأمین آب مصرفی و هزینه بالای نگهداری سیستم‌ها و منابع آب، می‌توان با بهره‌برداری اصولی و علمی از منابع آب موجود و همچنین جلوگیری از هدررفت آب، نیازها و کمبودهای آبی را به نحوه صحیحی مدیریت کرد. کاهش میزان نشت در سیستم‌های آب‌رسانی را می‌توان یکی از اهداف عمده سازمان‌های تأمین و توزیع آب تصفیه شده به شمار آورد (گوپتا و کولات^۲، ۲۰۱۸). میزان نشت آب در سیستم‌های توزیع آب به طور گسترده‌ای بین کشورها، مناطق و سیستم‌های مختلف، از ۳ تا ۷ درصد در سیستم‌های تحت نظارت در هلند و تا ۵۰ درصد در برخی از کشورهای توسعه‌نیافته یا سیستم‌هایی که کمتر سرویس شده‌اند، متفاوت است (بیوکن و همکاران^۳، ۲۰۰۸). وقوع نشت در شبکه آب باعث توزیع ناهمسان فشار و ناکارآمد انرژی در شبکه و در نتیجه اتلاف انرژی مورد استفاده جهت تأمین آب می‌گردد (پووست و همکاران^۴، ۲۰۱۰).

کاهش مقدار آب بدون درآمد دارای مزایای زیادی است که برخی از آن‌ها را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد (لیمبرگر و ویات^۵، ۲۰۱۹؛ ساباله و همکاران^۶، ۲۰۲۳؛ و بزکورت و همکاران^۷، ۲۰۲۲).

- کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای ساخت تأسیسات منابع آب جدید و توسعه سامانه‌های آب‌رسانی
- بالا بردن عمر تأسیسات آب از جمله تجهیزات تصفیه آب، پمپاژ و ...
- کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری
- کاهش امکان ورود آلودگی از محل‌های نشت لوله‌ها
- افزایش بازده و کارایی شرکت‌های آب‌وفاضلاب در بخش‌های فنی و مهندسی، بهره‌برداری، مشترکین و ...
- بالا بردن درآمد شرکت‌های آب‌وفاضلاب
- جلب رضایت مشترکین

در چند دهه اخیر مجامع بین‌المللی و کشورهای پیشرفته توجه خاصی به مسئله محدودیت منابع آب و یافتن راه‌حلی در زمینه مقابله با کمبود آب به‌ویژه جلوگیری از تلفات آب معطوف داشته‌اند. موضوع آب بدون درآمد و نشت در سامانه‌های آب‌رسانی و شبکه‌های توزیع آب شهری از مواردی است که در سه دهه اخیر در بسیاری از کشورها موردتوجه قرار گرفته و با برنامه‌ریزی

1. Chawira et al
 2. Gupta & Kulat
 3. Beuken et al
 4. Puust et al
 5. Liemberger & Wyatt
 6. Sabale et al
 7. Bozkurt et al

مدون علمی، تجارب خوبی نیز در خصوص مباحث نظری و موارد اجرایی کاهش آن، حاصل گردیده است (رحمان و همکاران^۱، ۲۰۲۲؛ هوو و همکاران^۲، ۲۰۲۱؛ و استفلباتور و همکاران^۳، ۲۰۲۲).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

طبق پژوهش‌های انجام‌گرفته چندین عامل مختلف در وقوع نشت یا آب بدون درآمد در سیستم توزیع آب دخیل هستند که در میان آن‌ها عمق قرارگیری لوله‌ها، قطر و همچنین طول عمر لوله‌ها، و از همه مهم‌تر فشار دارای نقش کلیدی‌تر هستند؛ لذا دیگر عوامل قابل‌چشم‌پوشی هستند. به عبارتی در بسیاری از پژوهش‌های صورت‌گرفته در زمینه نشت‌یابی شبکه‌های آب‌رسانی و مطالعه شبکه تنها عامل فشار در نظر گرفته شده است (مجیدی خلیل‌آباد و همکاران^۴، ۲۰۱۸؛ و فانگ و همکاران^۵، ۲۰۱۹). در زمینه آب بدون درآمد و کاهش مقدار آن پژوهش‌های گسترده‌ای صورت‌گرفته است که از میان آنها می‌توان به تحقیقاتی نظیر فارلی و لیمبرجر^۶ (۲۰۰۵) در رابطه با برنامه‌ریزی و اجرای استراتژی‌های کاهش آب بدون درآمد اشاره کرد. لیمبرجر و مارینم^۷ (۲۰۰۶) به بررسی چالش کاهش آب بدون درآمد در کشورهای در حال توسعه با تمرکز بر نقش بخش خصوصی پرداختند.

ورمرسچ و ریزو^۸ (۲۰۰۸) طراحی برنامه عملیاتی برای کنترل آب غیر درآمدی را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر موارد فوق می‌توان به مطالعاتی چون اولویت‌بندی استراتژی‌های مؤثر برای ارزیابی اولیه آب بدون درآمد (لیمبرجر، ۲۰۱۰)، بررسی وضعیت آب بدون درآمد در کشورهای مختلف (مک کنزی و همکاران^۹، ۲۰۱۲)، بررسی و امکان‌سنجی کاهش آب بدون درآمد از طریق مدیریت فشار در شبکه توزیع آب (کاناکودیس و گودلاس^{۱۰}، ۲۰۱۶)، اشاره کرد. برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه شناسایی و کاهش آب بدون درآمد و مدیریت نشت از شبکه‌ها با استفاده از مدل‌سازی و ابزار DSS و یا بهره‌گیری از ابزارهای دیجیتال و روش‌های میدانی انجام‌گرفته است (گونگور - دمیرسی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۸؛ سیسمان و کیزیلوز^{۱۲}، ۲۰۲۰؛ لایی و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۰؛ فاروک و همکاران^{۱۴}، ۲۰۲۱؛ کاسیدی و همکاران^{۱۵}، ۲۰۲۱؛ و چاویرا و همکاران^{۱۶}، ۲۰۲۲).

با استفاده از روش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی یکی دیگر از راهکارهای دیگر مورد استفاده برای برآورد آب بدون درآمد باهدف مدیریت پایدار در شبکه‌های آب‌رسانی شهری است (تابش و همکاران^{۱۷}، ۲۰۱۸؛ سیسمان و کیزیلوز، ۲۰۲۰؛ ناسارا و همکاران^{۱۸}، ۲۰۲۱؛ و چاویرا و همکاران، ۲۰۲۲).

در برخی از تحقیقات استفاده از مدل‌های هیبریدی با ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های هوش مصنوعی مختلف برای نشت‌یابی در شبکه‌های توزیع آب باعث افزایش دقت در پیش‌بینی مقدار و محل نشت در این شبکه‌ها شده است (الویسی و

1. Rahman et al
2. Hu et al
3. Steffelbauer et al
4. Majidi Khalilabad et al
5. Fang et al
6. Farley & Liemberger
7. Liemberger & Marinm
8. Vermersch & Rizzo
9. McKenzie et al
10. Kanakoudis & Gonelas
11. Güngör-Demirci et al
12. Şişman & Kızıllöz
13. Lai et al
14. Farouk et al
15. Cassidy et al
16. Chawira et al
17. Tabesh et al
18. Nasara et al

فرانچینی^۱، جین و ژوو^۲، ۲۰۱۴؛ لیجوان و همکاران^۳، ۲۰۱۲؛ و شکفته و همکاران^۴، ۲۰۲۰). یکی از روش های پرکاربرد در زمینه تخمین میزان و محل نشت که به دلیل ساختار چندلایه خود و همچنین امکان اتصال آن به الگوریتم های فرا کاوشی در مقایسه با سایر روش های هوش مصنوعی همواره دارای دقت مناسبی بوده است روش MLP است (جانگ و چویی^۵، ۲۰۱۷؛ شراوانی و همکاران^۶، ۲۰۱۹؛ روجک و استودزینسکی^۷، ۲۰۱۹؛ پرز و همکاران^۸، ۲۰۲۰؛ و فلاحی و همکاران^۹، ۲۰۲۱).

خوشبختانه این امر مهم بیش از یک دهه است که در کشور ایران نیز مورد توجه قرار گرفته و ابتدا در قالب طرح ملی تحقیق، توسعه و بهسازی تأسیسات توزیع آب شهری در طول برنامه دوم توسعه و سپس به وسیله دفاتر نظارت بر کاهش آب بدون درآمد در شرکت های آب و فاضلاب کشور به امر مطالعه و کاهش تلفات و آب بدون درآمد پرداخته شده است. براین اساس به کارگیری روش هایی که متضمن پیشگیری از هدررفت و میزان تلفات آب باشد ضرورت دارد. برای ایجاد وحدت رویه در مطالعات آب بدون درآمد و هدایت مطالعات و عملیات اجرایی تا وصول به اهداف نهایی، در این تحقیق علاوه بر تعریف اجزای آب بدون درآمد، روش هایی به منظور شناخت و بررسی عوامل مؤثر در آب بدون درآمد و راهکارهای کاهش آن ارائه شده است. براین اساس اهداف این تحقیق شامل بررسی روش های مختلف تلفات آب در شبکه آبرسانی و انتخاب بهترین روش جهت برآورد دقیق تلفات آب در شبکه و نهایتاً افزایش سرویس دهی تأسیسات آب شرب از کنترل و استحصال میزان تلفات آب موجود در شبکه است

روش پژوهش

از آنجاکه هدف این تحقیق بررسی روش ها و شیوه های کاهش آب بدون درآمد است، براین اساس راهکارهای کاهش آب بدون درآمد شناسایی شده و در نهایت اولویت بندی می شوند. برای تعیین اولویت این راهکارها از روش های متنوعی می توان استفاده کرد که در این تحقیق از روش های تحلیل فرایند شبکه ای، آر اس فازی، ویکورفازی و روش کپ-لند برای جمع بندی و نهایی سازی اولویت ها استفاده شده است.

۱. تحلیل فرایند شبکه ای

فرایند تحلیل شبکه ای یک تئوری ریاضی است که به طور سیستماتیک با انواع وابستگی ها سروکار داشته و به طور موفقیت آمیزی در زمینه های گوناگون به کار گرفته شده است. این روش از سوی ساعتی توسعه یافت تا اولویت هایی را برای تصمیم ها، بدون آن که فرضیاتی درباره رابطه سلسله مراتبی یک سویه میان سطوح تصمیم انجام گیرد، فراهم آورد. روش تحلیل شبکه ای بر اساس تحلیل مغز انسان برای مسائل پیچیده با ساختار غیر رده ای و به منظور اصلاح روش سلسله مراتبی ارائه شده است. در این روش برای مدل کردن مسئله شبکه ای که گره های موجود در این شبکه معادل، هدف معیارها و گزینه ها است، رسم می شود. بردارهای جهت داری که این گره ها را به هم وصل می کنند نشان دهنده جهت اثر گره ها بر یکدیگر است. فرایند تجزیه و تحلیل شبکه ای مسئله تصمیم گیری را با به کارگیری دیدگاه سیستمی توأم با بازخورد، مدل سازی می کند (سپاهی و تیمور^{۱۰}، ۲۰۱۰).

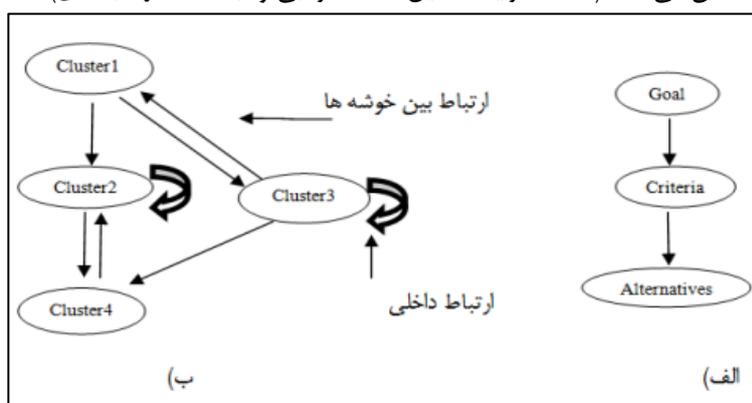
فرایند تحلیل شبکه ای نظریه جدیدی است که فرایند تحلیل سلسله مراتبی را برای پرداختن به وابستگی در بازخورد توسعه می دهد و به این منظور از رهیافت ابر ماتریس استفاده می کند. اگر چه هم فرایند تحلیل شبکه ای و هم فرایند تحلیل سلسله مراتبی اولویت ها را با انجام مقایسات زوجی اتخاذ می کنند، اما تفاوت هایی میان آنها وجود دارد. اولین تفاوت آن است که فرایند تحلیل سلسله مراتبی

1. Alvisi & Franchini
2. Jin & Zhou
3. Lijuan et al
4. S.hekofteh et al
5. Jang & Choi
6. Shrivani et al
7. Rojek & Studzinski
8. Pérez et al
9. Fallahi et al
10. Sipahi & Timor

حالت خاصی از فرایند تحلیل شبکه‌ای است، چرا که فرایند تحلیل شبکه‌ای وابستگی درون خوشه‌ای وابستگی (درونی و میان خوشه‌ای وابستگی) برونی را در نظر می‌گیرد. دومین تفاوت آن است که فرایند تحلیل شبکه‌ای ساختاری غیرخطی دارد. به‌طور کلی مدل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی چهارچوب تصمیم‌گیری است که رابطه‌ای یک‌سویه و سلسله‌مراتبی را میان سطوح تصمیم در نظر می‌گیرد. در عوض فرایند تحلیل شبکه‌ای نیازی به این ساختار اکیداً سلسله‌مراتبی و عمودی ندارد.

تکنیک تحلیل شبکه فازی با چارچوب جامع و فراگیر تمامی تعاملات و روابط میان سطوح تصمیم‌گیری را که تشکیل یک ساختار شبکه‌ای می‌دهد، می‌تواند در نظر گیرد. خوشه‌ها معرف سطوح تصمیم‌گیری هستند و کمان‌ها تعاملات میان سطوح تصمیم‌گیری را نشان می‌دهند. جهت کمان‌ها وابستگی را مشخص می‌کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود ساختار سلسله‌مراتبی حالت خاص و ویژه‌ای از ساختار شبکه‌ای است. شکل ۱ مقایسه ساختار سلسله‌مراتبی و شبکه‌ای را نشان می‌دهد. (الف - فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی و ب - ساختار شبکه‌ای).



شکل ۱. مقایسه ساختار سلسله‌مراتبی و شبکه‌ای (سپاهی و تیمور، ۲۰۱۰)

ساده‌ترین شبکه از تعدادی خوشه به همراه عناصر درون آنها ساخته می‌شود. در مواردی که عناصر یک خوشه روی همه یا برخی عناصر خوشه دیگر اثر می‌گذارند یا از آنها اثر می‌پذیرند، ارتباطی بین دو خوشه ایجاد می‌شود که آن را وابستگی بیرونی می‌نامیم. وابستگی دوسویه بین دو خوشه، به‌عنوان چرخه بازخورد بیان می‌شود و هنگامی که عناصر به عناصر درون خوشه خودشان مرتبط می‌شوند، وابستگی درونی وجود دارد. کاربرد وابستگی‌های درونی و بیرونی در حقیقت بهترین روشی است که می‌توان در شناسایی و معرفی مفاهیم تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری در میان خوشه‌ها و عوامل، با توجه به یک عامل خاص، مورد استفاده قرارداد (سپاهی و تیمور؛ ۲۰۱۰).

در مرحله مدل‌سازی، هدف تصمیم‌گیری، شاخص‌های تصمیم‌گیری و گزینه ممکن، مشخص می‌شود. از طریق مقایسه زوجی می‌توان وزن نسبی معیارها و زیر معیارها را مشخص کرد. مقایسه زوجی عناصر در هر سطح، با توجه به اهمیت نسبی آن نسبت به معیار، کنترل شبیه روش سلسله‌مراتبی انجام می‌شود. در چنین مقایسه‌هایی، یک معیار نسبی از ۱ تا ۹ جهت مقایسه دو عامل به کار می‌رود. در مرحله بعد، وزن‌های داخلی شاخص‌ها و زیر شاخص‌ها که در مرحله مدل‌سازی مشخص شده بودند، محاسبه می‌شود. در این مرحله وابستگی‌های درونی و بازخوردی مدنظر می‌باشند. نکته مهم در قضاوت‌ها و مقایسه‌های زوجی، کنترل سازگاری آنها است. این مهم به‌ویژه در تصمیم‌گیری‌های کلان اهمیت فراوانی دارد، زیرا افراد ممکن است در قضاوت‌های خود به‌صورت ضدونقیض عمل کنند. در حالت کلی میزان ناسازگاری کمتر از ۰/۱ در ماتریس‌های مقایسات زوجی قابل قبول است. نسبت سازگاری CR هر ماتریس محاسبه می‌گردد که در آن CI شاخص سازگاری ماتریس مقایسه زوجی بوده و با استفاده از بزرگ‌ترین مقدار بردار ویژه λ_{max} و بعد آن n برآورد می‌گردد (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳).

نرخ ناسازگاری توسط نرم‌افزار برای هر ماتریس مقایسه زوجی محاسبه و ارائه می‌شود که اگر از ۰/۱ فراتر رود آن قضاوت ناسازگار است، و در نحوه قضاوت باید تجدیدنظر شود. سوپر ماتریس برای تجزیه و تحلیل وابستگی‌های داخلی میان اجزای سیستم به کار

می‌رود. اجزای سوپرماتریس از ماتریس های مقایسات زوجی وابستگی های درونی حاصل شده و در آن جای گذاری می‌شوند. هر ارزش غیر صفر در ستون سوپرماتریس، نشانگر اهمیت نسبی وزن حاصل شده از ماتریسهای مقایسات زوجی وابستگی های درونی می باشد (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳).

یک سوپرماتریس در حقیقت یک ماتریس جزء بندی شده است که در آن هر بخش از ماتریس رابطه میان ۲ گره، سطح تصمیم گیری را در کل مسئله تصمیم گیری نشان می‌دهد. فرم استاندارد یک سوپرماتریس که توسط ساعتی (۱۳۹۶) معرفی شده است در جدول ۱ قابل مشاهده است که C بیانگر گره‌ها و e بیانگر عناصر درون گره‌ها است. بردارهای W درون ماتریس نیز بردارهای وزنی حاصل از مقایسات زوجی عناصر گره‌ها با یکدیگر است (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳).

جدول ۱. ساختار کلی سوپرماتریس (Saaty et al., 2013).

		C_1				C_2				==	C_N			
		C_{11}	C_{12}	"."	C_{1N}	C_{21}	C_{22}	-	C_{2N}		e_{NI}	C_{N2}	-	C_{NN}
C_1	C_{11}									...	W_{1N}			
	C_{12}													
	...													
	e_{1N}													
C_2	e_{21}	W_{21}				W_{22}				...	W_{2N}			
	e_{22}													
	...													
	C_{2N}													
!		--			
C_N	e_{NI}	W_{N1}				W_{N2}				--	W_{nn}			
	e_{N2}													
	...													
	e_{NN}													

همان‌طور که ذکر شد هریک از خوشه‌های مدل در مدل‌سازی تحلیل شبکه‌ای دارای سه وضعیت سوپرماتریس غیروزنی ماتریس حاوی اولویت‌ها که از مقایسه دودویی به‌دست‌آمده است وزنی (عناصر ماتریس در وزن خوشه ضرب می‌شود وحدی از به توان رساندن ماتریس وزن‌دار تا زمانی که همه عناصر برابر شوند و به پاسخ برسد به دست می‌آید) هستند لازم به ذکر است که درایه‌های صفر موجود در ماتریس این مطلب را می‌رساند که عامل متناظر موجود در ستون این سوپرماتریس روی دیگر عوامل تأثیرگذار نبوده

است؛ زیرا دارای رابطه‌ی تعاملی با یکدیگر نیستند (ساعتی و همکاران؛ ۲۰۱۳). در نهایت وزن کلی هر کدام از جایگزین‌ها با ضرب کردن وزن‌های به‌دست‌آمده از هر کدام از مراحل پیشین مشخص شده و با توجه به آن تصمیم نهایی اتخاذ می‌شود.

۲. تکنیک آراس

نمونه بارزی از مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره مربوط به رتبه‌بندی تعداد متناهی از گزینه‌های تصمیم‌گیری است که هر یک از آنها به‌وضوح برحسب ضوابط تصمیم‌گیری متفاوت که باید به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شود، توصیف شده است. مطابق روش آراس، مقدار یک تابع، مطلوبیت مجموعه بازده نسبی کارایی نسبی یک گزینه ممکن، به‌طور مستقیم متناسب با اثر نسبی ارزش‌ها و وزن معیارهای اصلی که در یک پروژه مطرح شده است، را تعیین می‌کند.

با استفاده از هر یک از این روش‌ها در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره، می‌توان مسئله را به‌صورت تصمیم‌گیری تک‌معیاره به‌صورت مناسب تبدیل کرد و براین‌اساس بسیاری از آنها به‌سادگی حل می‌شوند (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

روش آراس^۲ توسط زاوادسکاز و تورسکی در سال ۲۰۱۰ طراحی شد و می‌تواند به‌عنوان یکی از جدیدترین، مؤثرترین و درعین‌حال ساده‌ترین روش‌ها در تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد استفاده قرار گیرد. روش آراس برای حل مسائل تصمیم‌گیری مختلف به کار برده می‌شود. این روش همچنین می‌تواند به شکل فازی و خاکستری طراحی شود که به آراس فازی و آراس خاکستری نام‌گذاری شده‌اند. فرایند حل مسئله با استفاده از روش آراس می‌تواند به‌طور خیلی دقیق با استفاده از گام‌های زیر شرح داده شود:

(۱) گام اول - تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری: اولین گام در حل هر مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره، تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری است. در تصمیم‌گیری چندمعیاره، از مسئله بهینه‌سازی گسسته هر مسئله‌ای که باید حل شود، با ماتریس تصمیم‌گیری به شکل زیر نمایش داده می‌شود که برای m گزینه ممکن ارزیابی شده (ردیف) روی معیار معین (ستون) تنظیم می‌شود (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$X = \begin{bmatrix} X_{01} & \cdots & X_{0j} & \cdots & X_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mj} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix}; \quad i = \overline{0, m}; \quad j = \overline{1, n} \quad (1)$$

در این ماتریس: m تعداد گزینه‌ها، n تعداد معیار معین هر گزینه تصمیم‌گیری، X_{ij} ارزشی که مقدار کارایی گزینه در شرایط معیار را بیان می‌کند، X_0 مقدار بهینه معیار j است.

(۲) گام دوم - تعیین مقدار بهینه‌ی هر معیار: بعد از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، گام بعدی در این روش تعیین مقدار بهینه هر معیار است. اگر مقدار بهینه معیار برای تصمیم‌گیرندگان مشخص نبود آنگاه:

$$X_{0j} = \max_i X_{ij} \quad (2) \quad \text{اگر مقدار ماکزیمم برتری داشت:}$$

$$X_{0j} = \max_i X_{ij}^* \quad (3) \quad \text{اگر مقدار مینیمم برتری داشت:}$$

که در آن X_{0j} مقدار بهینه گزینه j در ارتباط با معیار j است. مقادیر بیشینه به معنی مجموعه‌ای از معیارهای از نوع سود است؛ یعنی جهت و سوی بهینگی بیشینه‌سازی است و مقادیر کمینه به معنی مجموعه‌ای از معیارهای از نوع هزینه است. یعنی جهت و سوی بهینگی کمینه‌سازی است (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

معمولاً مقادیر عملکرد کارایی x_i و وزن معیارها W به‌عنوان ورودی در ماتریس تصمیم‌گیری نمایش داده می‌شود. معیارها همچنین مقادیر و وزن‌های اولیه معیارها به‌وسیله کارشناسان و خبرگان تعیین می‌شود. اطلاعات به‌دست‌آمده می‌توانند به‌وسیله اشخاص

ذی نفع باتوجه به اهداف و فرصت‌های آنان تصحیح شوند، سپس تعیین اولویت‌های گزینه‌ها است که در چند مرحله (گام) انجام می‌شود (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

(۳) گام سوم - محاسبه ماتریس تصمیم نرمال: معمولاً معیارها، اهمیت اندازه و مقیاسهای متفاوتی دارند هدف گام بعدی این است که از معیارهای نسبی به مقادیر ارزشهای وزن دهی شده برسد به منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از ابعاد مختلف، معیارها از نسبت (نرخ) ارزش بهینه استفاده شده است نظریه های مختلفی در توصیف نسبت (نرخ) ارزش بهینه وجود دارد با این حال مقادیر با استفاده از نرمال سازی ماتریس تصمیم‌گیری در بازه یا فاصله [۰ و ۱] ترسیم شده است. در گام سوم مقادیر اولیه همه معیارها نرمال می‌شود. مقادیر X_i که با استفاده از فرمولهای زیر محاسبه می‌گردد ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده X را معین می‌کند (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{X}_{01} & \cdots & \bar{X}_{0j} & \cdots & \bar{X}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{X}_{i1} & \cdots & \bar{X}_{ij} & \cdots & \bar{X}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{X}_{m1} & \cdots & \bar{X}_{mj} & \cdots & \bar{X}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i=\overline{0,m}; \quad j=\overline{1,n} \quad (4)$$

معیاری که ارزش موردنظر ترجیحی آن بیشینه است به شکل زیر نرمال می‌شود (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$\bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=0}^m X_{ij}} \quad (5)$$

معیاری که ارزش ترجیحی آن کمینه است با استفاده از گام زیر نرمال می‌شود:

$$X_{ij} = \frac{1}{X_{ij}^*}; \quad \bar{X}_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=0}^m X_{ij}} \quad (6)$$

هنگامی که مقادیر بدون مقیاس (نرمال) هر معیار مشخص شد در اصل همه معیارهایی که در ابتدا مقیاس‌های متفاوتی داشتند می‌توانند با یکدیگر مقایسه شوند.

(۴) گام چهارم - محاسبه ماتریس تصمیم نرمال وزن دار: گام چهارم تعریف (معین کردن) ماتریس نرمال وزن دار شده X است. فقط وزن‌های کاملاً سنجیده به درستی تعیین شده باید استفاده گردد. زیرا وزن‌ها همیشه ذهنی هستند و در جواب مسئله تأثیر دارند ارزش وزن W_j معمولاً به وسیله روش ارزیابی کارشناس تعیین می‌گردد. مجموع وزن‌های W_j باید به شکل زیر محدود شوند.

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (7)$$

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{01} & \cdots & \hat{X}_{0j} & \cdots & \hat{X}_{0n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{X}_{i1} & \cdots & \hat{X}_{ij} & \cdots & \hat{X}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{X}_{m1} & \cdots & \hat{X}_{mj} & \cdots & \hat{X}_{mn} \end{bmatrix}; \quad i=\overline{0,m}; \quad j=\overline{1,n} \quad (8)$$

مقادیر وزن داده شده نرمال شده تمام معیارها به شکل زیر محاسبه می‌گردد (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$\hat{X}_{ij} = \bar{X}_{ij} w_j; \quad i=\overline{0, m} \quad (9)$$

که در آن W_j وزن اهمیت معیار است و X مقدار نرمال شده از معیار Z است.

(۵) گام پنجم تعیین مقادیر بهینه برای هر گزینه:

تعیین مقادیر تابع بهینگی برای هر گزینه می‌تواند به صورت مجموع مقادیر نرمال وزن دار به روش زیر محاسبه گردد.

$$s_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} ; i=0, m \quad (10)$$

که در آن S مقدار بهینه تابع به‌ازای گزینه i ام است. بزرگ‌ترین مقدار بهترین است و کمترین آن بدترین با توجه به روند محاسبه شده، تابع بهینگی S دارای یک رابطه مستقیم و متناسب با مقادیر x_{ij} و وزن‌های W از معیارهای بررسی شده و تأثیر نسبی آنها روی نتیجه ی نهایی است بنابراین بیشترین مقدار (ارزش) تابع بهینگی S اثر بخش ترین متغیر است. اولویت‌های گزینه‌ها می‌تواند با توجه به مقدار S تعیین گردد. در نتیجه استفاده از این روش برای ارزیابی و رتبه‌بندی گزینه‌های تصمیم‌گیری مناسب است.

(۶) گام ششم محاسبه درجه مطلوبیت هر گزینه: در مورد ارزیابی گزینه‌ها نه تنها تعیین بهترین رتبه اهمیت دارد بلکه مهم است که کیفیت مطلوبیت نسبی هر گزینه مطرح شده نیز مشخص شود به همین منظور از درجه مطلوبیت هر گزینه استفاده می‌گردد درجه مطلوبیت هر گزینه (آلترناتیو به وسیله مقایسه‌ی متغیر که تجزیه و تحلیل شده است با حالت ایده آل یعنی S مشخص می‌گردد معادله مورد استفاده برای محاسبه درجه ی مطلوبیت K_i از یک گزینه a به صورت زیر است (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰):

$$K_i = \frac{S_i}{S_0} ; i=0, m \quad (11)$$

که در آن S_i و S_0 مقادیر بهینه معیار به دست آمده از معادله است (زاوادسکاس و تورسکیس، ۲۰۱۰).

(۷) گام هفتم رتبه‌بندی گزینه‌ها و یا انتخاب مؤثرترین آنها: روشن است که ارزشهای محاسبه شده در بازه صفر تا ۱ هستند و می‌تواند به صورت صعودی مرتب شوند که به ترتیب اولویت مرتب شده اند کارایی نسبی مختلط هر گزینه ممکن می‌تواند با توجه به مقدار ارزشهای تابع مطلوبیت مشخص گردد (پاراماسیوام و همکاران^۱، ۲۰۲۰). گزینه‌های مطرح شده با غربالگری ها رتبه‌بندی می‌گردد به عنوان مثال گزینه با مقدار بزرگ‌تر K برتری و رتبه بیشتری دارد و گزینه با بزرگ‌ترین مقدار K_i در بهترین مکان و رتبه قرار دارد بنابراین انتخاب بهترین گزینه می‌تواند با استفاده از فرمول زیر صورت پذیرد (پاراماسیوام و همکاران، ۲۰۲۰).

$$\{A_i | \max_i K_i\} A^* = ; i=1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

۳. تکنیک ویکور

اپریکوویت و تزنگ در سال ۱۹۸۸ روش ویکور را ارائه و سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ این روش را توسعه دادند. این روش که مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره است مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. در شرایطی که فرد تصمیم‌گیرنده قادر به شناسایی و بیان برتری‌های یک مسئله در زمان شروع و طراحی آن نیست این روش می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری مطرح شود (گول و همکاران^۲، ۲۰۱۶).

مراحل روش حل تکنیک ویکور به شرح زیر است:

اگر در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره n معیار و m گزینه وجود داشته باشد به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از این روش مراحل روش به شرح ذیل است (گول و همکاران، ۲۰۱۶):

(۱) مرحله اول تشکیل ماتریس تصمیم: با توجه به تعداد معیارها تعداد گزینه‌های ارزیابی همه گزینه‌ها برای معیارهای مختلف ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \dots & \dots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

که در آن X_{ij} عملکرد گزینه $i = 1, 2, \dots, n$ در رابطه با معیار $j = 1, 2, \dots, n$ است.

(۲) مرحله دوم بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم:

در این مرحله سعی می‌شود معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بی بعد تبدیل شوند و ماتریس F به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{in} \\ \vdots & \dots & \dots \\ f_{m1} & \dots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

که در این ماتریس:

$$f_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}} \quad (15)$$

(۳) مرحله سوم تعیین بردار وزن معیارها: در این مرحله باتوجه به ضریب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم‌گیری، برداری به صورت

زیر تعریف می‌شود:

$$W = W_1, W_2, \dots, W_n \quad (16)$$

(۴) مرحله چهارم: تعیین بهترین و بدترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر معیار: بهترین مقدار برای معیارهای مثبت و منفی

به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_j^* = \max_i f_{ij} \quad (17)$$

$$f_j^- = \min_i f_{ij} \quad (18)$$

بدترین f_j مقدار برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_j = \min_i f_{ij} \quad (19)$$

$$f_j = \max_i f_{ij} \quad (20)$$

(۵) مرحله پنجم: محاسبه مقدار سودمندی S و مقدار تأسف R : مقادیر S و R باتوجه به روابط زیر محاسبه می‌شوند (مردانی و همکاران^۱، ۲۰۱۶):

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (21)$$

$$R_i = \max \left\{ w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right\}$$

که w مقدار وزن موردنظر برای معیار است.

در روش برنامه‌ریزی توافقی اگر پارامتر P مساوی یک باشد همان مقدار S به دست می‌آید:

$$L(A_i) = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} = S_i \quad (22)$$

در روش برنامه‌ریزی توافقی اگر پارامتر P مساوی f شد همان مقدار R_i به دست می‌آید:

$$L_\infty(A_i) = \max \left[w_j \left(\frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right) \right] \quad (23)$$

(۶) مرحله ششم: محاسبه شاخص ویکور (مقدار Q): مقدار Q باتوجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود (مردانی و همکاران: ۲۰۱۶):

$$Q_i = V \left[\frac{S_i - S^-}{S^* - S^-} \right] + (1-V) \left[\frac{R_i - R^-}{R^* - R^-} \right] \quad (24)$$

$$S^- = \min S_i \quad S^* = \max S_i \quad R^- = \min R_i \quad R^* = \max R_i$$

(۷) مرحله هفتم: مرتب کردن گزینه‌ها بر اساس مقادیر S ، R و Q : در این مرحله باتوجه به مقادیر S ، R و Q گزینه‌ها در سه گروه از کوچکتر به بزرگتر مرتب می‌شوند. در نهایت گزینه‌ای به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود که در هر سه گروه به‌عنوان گزینه برتر شناخته شود لازم به ذکر است که در گروه Q گزینه‌ای به‌عنوان گزینه برتر انتخاب می‌شود که بتواند دو شرط زیر را ارضاء کند:

شرط (۱): اگر گزینه‌های A_1 و A_2 به ترتیب اولین و دومین گزینه برتر در گروه و n بیانگر تعداد گزینه‌ها باشد رابطه زیر برقرار باشد (مردانی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq \frac{1}{n-1} \quad (۲۵)$$

شرط (۲): گزینه A_1 باید حداقل در یکی از گروه‌های R و S به‌عنوان رتبه برتر شناخته شود. زمانی که شرط اول برقرار نباشد مجموعه‌ای از گزینه‌ها به‌عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شود. بیشترین مقدار m باتوجه به رابطه زیر محاسبه می‌شود (مردانی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$Q(A_m) - Q(A_1) < \frac{1}{n-1} \quad (۲۶)$$

زمانی که شرط دوم برقرار نباشد دو گزینه A و A_2 به‌عنوان گزینه‌های برتر انتخاب می‌شوند.

۴. استراتژی‌های اولویت‌بندی کپ‌لند

در یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره ممکن است از چند روش تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شود که نتایج این روش‌ها همیشه یکسان نیستند در این مواقع سؤالی که مطرح می‌شود آن است که کدام گزینه باید انتخاب شود؟ در چنین وضعیتی باید از روش‌های مختلف ادغام از جمله روش میانگین رتبه‌ها روش بردا و روش کپلند استفاده کرد.

• روش میانگین رتبه‌ها

در این روش برای هر گزینه میانگین حسابی رتبه‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره تعیین می‌شود و براین اساس گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند. بدیهی است که گزینه‌های با میانگین حسابی بالاتر در اولویت خواهند بود (ساری و مرلین، ۱۹۹۶).

• روش بردا

در این روش برای تصمیم‌گیری ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها ایجاد می‌شود. در صورتی که بر اساس روش‌های مختلف تصمیم‌گیری تعداد ارجحیت گزینه‌ای بر گزینه دیگر بیش از تعداد مغلوب شدن آن گزینه دیگری باشد در ماتریس مقایسه زوجی عدد ۱ گذاشته می‌شود و در صورتی که رأی اکثریت وجود نداشت و یا آرا با هم مساوی باشند، در ماتریس مقایسه زوجی عدد صفر گذاشته می‌شود. عدد ۱ به منزله آن است که سطر بر ستون ارجحیت دارد و عدد صفر به منزله آن است که ستون بر سطر ارجحیت دارد (ساری و مرلین، ۱۹۹۶).

پس از مقایسه زوجی ماتریس مقایسه زوجی شکل خواهد گرفت مجموع عناصر هر سطر تعداد مسلط شدن هر گزینه را نشان می‌دهد و گزینه‌ها بر اساس تعداد مسلط شدن اولویت‌بندی می‌شوند (ساری و مرلین، ۱۹۹۶).

• روش کپ‌لند

این روش اصلاح شده روش بردا است با این تفاوت که در اولویت‌بندی علاوه بر تعداد مسلط شدن (مجموع عناصر هر سطر) تعداد مغلوب شدن مجموع عناصر هر ستون نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد بدین منظور گزینه‌ها بر اساس تفاضل مقادیر تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن اولویت‌بندی می‌شوند (فاوردین و همکاران، ۲۰۰۲).

یافته‌های پژوهش

۱. تأیید راهکارهای بالقوه شناسایی شده

نتایج به‌دست‌آمده از آزمون نشان می‌دهد که تمامی راهکارهای در نظر گرفته شده در کاهش آب بدون درآمد مورد تأیید قرار گرفته است. جدول شماره ۲ ضرایب بارهای عاملی، ضریب تعیین تعدیل شده، عدد معناداری و نتایج مربوط به هر راهکار مطرح شده در تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج حاصل از ارزیابی متغیرهای تحقیق

شناسه	راهکارهای کاهش آب بدون درآمد	ضرایب بارهای عاملی	ضریب تعیین تعدیل شده	معنی‌داری	نتیجه
A1	استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس B به جای کنتور C)	۰/۸۹۱	۰/۷۹	۳۴/۰۲۱	تأیید
A2	نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه)	۰/۹۰۴	۰/۸۱۳	۳۸/۳۴۶	تأیید
A3	تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک	۰/۸۵۶	۰/۷۲۹	۲۴/۸۷۳	تأیید
A4	کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری	۰/۹۰۳	۰/۸۱۲	۳۹/۸۶۳	تأیید
A5	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی	۰/۷۸	۰/۶۰۲	۱۴/۲۶۱	تأیید
A6	مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)	۰/۷۲۷	۰/۵۲	۱۰/۸۴۷	تأیید
A7	استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV)	۰/۶۸۱	۰/۴۵۴	۸/۸۱	تأیید
A8	درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک	۰/۳۸	۰/۳۸	۶/۴۸۷	تأیید
A9	نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک	۰/۶۱۹	۰/۳۷۳	۷/۳۰۷	تأیید
A10	تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر	۰/۷۱۶	۰/۵۰۴	۹/۸۷۴	تأیید
A11	برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دائمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیبه‌های خواندن کنتور و کنترل کیفیت آمار خوانده شده	۰/۷۸۷	۰/۶۱۳	۱۵/۵۰۸	تأیید

می‌توان با توجه به نتایج به‌دست‌آمده (جدول ۲)، به بررسی برخی از راهکارهای کاهش آب بدون درآمد پرداخت. به‌عنوان نمونه: تجزیه و تحلیل آماری در راستای تأثیر استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B) بر کاهش آب بدون درآمد، نشان می‌دهد که عدد معنی‌داری برابر ۳۴/۰۲۱ است و چون این مقدار بزرگ‌تر از ۱/۹۶ است، از این‌رو این تأثیر مورد تأیید قرار می‌گیرد. از طرفی چون عدد معنی‌داری به‌دست‌آمده مثبت است، این اثر مستقیم است همچنین ضریب تعیین تعدیل شده برابر ۰/۷۹۰ به‌دست‌آمده است و نشان می‌دهد که این روش توانسته است ۷۹ درصد از تغییرات آب بدون درآمد را تبیین و توجیه نماید.

همچنین تجزیه و تحلیل آماری در راستای تأثیر برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دائمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیبه‌های خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده بر کاهش آب بدون درآمد، نشان می‌دهد که عدد معنی‌داری برابر ۱۵/۵۰۸ است و چون این مقدار بزرگ‌تر از ۱/۹۶ است، از این‌رو این تأثیر مورد تأیید قرار می‌گیرد. از طرفی چون عدد معنی‌داری به‌دست‌آمده مثبت است، این اثر مستقیم است هم چنین ضریب تعیین تعدیل شده برابر ۰/۶۱۳ به‌دست‌آمده است و نشان می‌دهد که این راهکار توانسته است حدود ۶۰ درصد از تغییرات آب بدون درآمد را تبیین و توجیه نماید.

۲. رتبه‌بندی روش‌ها و راهکارهای مؤثر بر کاهش آب بدون درآمد

پس از شناسایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد، محقق در صدد است که راهکارهای شناسایی شده را با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره رتبه‌بندی نموده و نتایج حاصل از آنها را به کمک روش کپلند اولویت‌بندی نماید. نتایج محاسبات وزن‌دهی، رتبه‌بندی و اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد در ذیل آمده است.

نتایج تکنیک تحلیل فرایند شبکه

به‌منظور دستیابی به وزن راهکارها، پرسش‌نامه‌های مقایسات زوجی طراحی و بین خبرگان توزیع شده است. بدین منظور جداول مقایسات زوجی انجام شده، وزن راهکارها به دست آورده شده و بر اساس آن رتبه‌بندی انجام می‌شوند. مراحل محاسبه وزن راهکارها عبارت‌اند از:

مرحله اول) جهت جمع نظرات خبرگان، از مقایسات زوجی پاسخ‌دهندگان میانگین هندسی گرفته می‌شود.

مرحله دوم) محاسبه بردار ویژه: برای محاسبه بردار ویژه هر یک از جداول مقایسات زوجی جمع شده، از روش لگاریتمی حداقل مجذورات، استفاده می‌شود.

مرحله سوم) تشکیل ماتریس‌های بردار ویژه: این ماتریس‌ها شامل بردارهای ویژه‌ای هستند که از مقایسات زوجی مرحله دوم به‌دست آمده‌اند.

مرحله چهارم) محاسبه اوزان نهایی سطوح: برای محاسبه وزن نهایی مؤلفه‌های هر سطح، حاصل ضرب ماتریس بردار ویژه روابط درونی در بردار ویژه همان سطح، در وزن نهایی سطح بالاتر ضرب می‌شود. جدول شماره ۳ اوزان نهایی و رتبه راهکارهای مختلف بر اساس تکنیک تحلیل شبکه فازی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. ماتریس اوزان نهایی نسبت به وزندهی راهکارها بر اساس تکنیک تحلیل شبکه فازی

رتبه	وزن قطعی نهایی مؤلفه‌ها	راهکارهای کاهش آب بدون درآمد	شناسه
۲	۰/۱۰۲	استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به‌جای کنتور کلاس B)	A1
۸	۰/۰۸۶	نوسازی و جایگزینی دوره‌های مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه	A2
۴	۰/۰۹۸	تست دوره‌های کنتورهای اشتراک	A3
۹	۰/۰۸۵	کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری	A4
۶	۰/۰۹۵	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی	A5
۱	۰/۱۱۴	مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)	A6
۳	۰/۰۹۹	استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV)	A7
۱۱	۰/۰۷۵	درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک	A8
۱۰	۰/۰۸۳	نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک	A9
۷	۰/۰۹	تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر	A10
۵	۰/۰۹۷	برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسی‌های خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده	A11

همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، بر پایه تکنیک تحلیل شبکه، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به‌جای کنتور کلاس B) دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها هستند و استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) اولویت سوم را دارد.

۳. نتایج تکنیک ویکور

جدول شماره ۴ رتبه بندی گزینه ها را بر اساس تکنیک ویکور فازی نشان می دهد. چنانچه پیش تر در فصل سوم گفته شده بود، مراحل تکنیک ویکور جهت رتبه بندی راهکارهای شناسایی شده به شرح زیر بوده است:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری ارزیابی گزینه ها

گام دوم: پی مقیاس نمودن ماتریس تصمیم گیری

گام سوم: تعیین بردار وزن معیارها

گام چهارم: تعیین بهترین و بدترین مقدار از میان مقادیر موجود برای هر معیار

گام پنجم: محاسبه مقدار سودمندی^۱ (S) و مقدار تأسف^۲ (R)

گام ششم: محاسبه شاخص ویکور (مقدار Q)

گام هفتم: تعیین جواب نهایی

جدول ۴. رتبه گزینه ها بر اساس S، R و Q

گزینه ها	R	S	Q	رتبه نهایی
A1	۷	۸	۸	۸
A2	۱	۳	۳	۳
A3	۱	۱	۱	۱
A4	۹	۱۱	۹	۹
A5	۱۰	۱۰	۱۱	۱۱
A6	۱	۶	۶	۶
A7	۷	۵	۷	۷
A8	۱۰	۹	۱۰	۱۰
A9	۱	۲	۲	۲
A10	۱	۶	۵	۵
A11	۱	۳	۳	۴

همان طور که از نتایج این جدول مشخص است، بر پایه تکنیک تکنیک ویکور فازی، تست دوره های کنترلهای اشتراک و نظارت دقیق بر پیمانکاری ها و نصب لوله ها در زیر خاک دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه ها هستند و راهکار نوسازی و جایگزینی دوره های مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت های مختلف انشعاب (کمبرند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک طرفه اولویت سوم را دارد.

۴. نتایج تکنیک آراس

چنانچه پیش تر گفته شده بود مراحل رتبه بندی راهکارهای مورد مطالعه با تکنیک آراس به صورت زیر هستند:

- گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم گیری فازی ارزیابی گزینه ها
- گام دوم: تعیین مقدار بهینه هر معیار
- گام سوم: محاسبه ماتریس تصمیم نرمال فازی
- گام چهارم: محاسبه ماتریس تصمیم نرمال شده وزن دار فازی
- گام پنجم: تعیین مقادیر بهینه برای هر گزینه
- گام ششم: محاسبه درجه مطلوبیت هر گزینه

گام هفتم: رتبه‌بندی گزینه‌ها

نتایج به‌دست‌آمده از تکنیک آراس فازی به‌منظور رتبه‌بندی راهکارها، در جدول شماره ۵ آمده است.

جدول ۵. نتایج حل تکنیک آراس فازی

گزینه‌ها	Si			Defuzzify Si	رتبه‌بندی بر اساس Si	Ki	رتبه‌بندی بر اساس Ki
	l	M	u				
A1	۰/۰۰۴۸۷	۰/۰۰۸۸	۰/۰۱۴۸۵	۰/۰۰۹۵۱	۵	۰/۶۹۱۸۱	۵
A2	۰/۰۰۵۹۶	۰/۰۱۰۲۵	۰/۰۱۶۶۶	۰/۰۱۰۹۵	۲	۰/۷۹۷۱۶	۲
A3	۰/۰۰۳۸۳	۰/۰۰۷۱۴	۰/۰۱۲۳۵	۰/۰۰۷۷۸	۸	۰/۵۶۵۸	۸
A4	۰/۰۰۲۹۴	۰/۰۰۵۶۲	۰/۰۰۹۸۷	۰/۰۰۶۱۵	۱۱	۰/۴۴۲۲۷	۱۱
A5	۰/۰۰۳۷۲	۰/۰۰۶۹۴	۰/۰۱۲۰۱	۰/۰۰۷۵۶	۹	۰/۵۴۹۸۳	۹
A6	۰/۰۰۷۴۱	۰/۰۱۲۸۳	۰/۰۲۰۹۸	۰/۰۱۳۷۴	۱	۱	۱
A7	۰/۰۰۴۷۲	۰/۰۰۸۵۲	۰/۰۱۴۳۸	۰/۰۰۹۲۱	۶	۰/۶۷۰۰۶	۶
A8	۰/۰۰۴۵۴	۰/۰۰۷۹۳	۰/۰۱۳۰۶	۰/۰۰۸۵۱	۷	۰/۶۱۹۵۳	۷
A9	۰/۰۰۵۷۶	۰/۰۰۹۹	۰/۰۱۶۱	۰/۰۱۰۵۹	۳	۰/۷۷۰۵۳	۳
A10	۰/۰۰۵۲۹	۰/۰۰۹۳۳	۰/۰۱۵۴۷	۰/۰۱۰۰۳	۴	۰/۷۲۹۷۲	۴
A11	۰/۰۰۲۹۴	۰/۰۰۵۷۸	۰/۰۱۰۳۳	۰/۰۰۶۳۵	۱۰	۰/۴۶۲۱۶	۱۰
A0	۰/۰۰۷۴۱	۰/۰۱۲۸۳	۰/۰۲۰۹۸	۰/۰۱۳۷۴	---	۱	---

همان‌طور که از نتایج این جدول مشخص است، بر پایه تکنیک آراس فازی، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه) دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها هستند و راهکار نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک اولویت سوم را دارد.

۵. اولویت‌بندی نهایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد بر اساس روش کپلند

رتبه هریک از گزینه‌ها در تکنیک‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره (تحلیل شبکه فازی، ویکور فازی و آراس فازی) در این تحقیق، به شرح جدول شماره ۶ است. برای تعیین اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش کپلند، ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها به‌صورت جدول شماره ۷ ایجاد شده و پس از مجموع سطری و ستونی آراء اکثریت، تفاضل مجموع سطری و ستونی نیز محاسبه شده است. لازم به ذکر است که روش کپلند بر اساس تفاضل مجموع سطری و ستونی، گزینه‌ها را اولویت‌بندی می‌کند.

جدول ۶. رتبه بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش های تحلیل شبکه فازی، ویکور فازی و آراس فازی

گزینه ها	روش تحلیل شبکه فازی	روش ویکور فازی	روش آراس فازی
A1	۲	۸	۵
A2	۸	۳	۲
A3	۴	۱	۸
A4	۹	۹	۱۱
A5	۶	۱۱	۹
A6	۱	۶	۱
A7	۳	۷	۶
A8	۱۱	۱۰	۷
A9	۱۰	۲	۳
A10	۷	۵	۴
A11	۵	۴	۱۰

جدول ۷. بررسی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش کپ لند (ماتریس مقایسات زوجی)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	مجموع سطری	تفاضل مجموع سطری و ستونی
A1	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۷	۳
A2	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۸	۵
A3	۰	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۷	۴
A4	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۱	-۸
A5	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-۸
A6	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱۰	۱۰
A7	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۵	۰
A8	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	-۸
A9	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۷	۴
A10	۱	۰	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۵	۰
A11	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۴	-۲
مجموع ستونی	۴	۳	۳	۹	۹	۰	۵	۹	۳	۵	۶	--	--

بر اساس نتایج به دست آمده از روش کپلند، ترتیب اولویت راهکارهای کاهش آب بدون درآمد به صورت جدول شماره ۸ است.

جدول ۸. اولویت‌بندی نهایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد با استفاده از روش کپلند

اولویت	راهکار	مولفه
۱	مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)	A6
۲	نوسازی جایگزینی مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه	A2
۳	تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک	A3
۳	نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک	A9
۴	استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B)	A1
۵	استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV)	A7
۵	تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر	A10
۶	برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیرهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده	A11
۷	کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری	A4
۷	استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی	A5
۷	درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک	A8

باتوجه به روش کپلند، اولویت‌بندی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد به شرح زیر است:

$$A6 > A2 > A3 = A9 > A1 > A7 = A10 > A11 > A4 = A5 = A8$$

باتوجه به نتایج جدول ۸ می‌توان بیان نمود که راهکارهای کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی و درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک، اولویت‌های یکسانی دارند و نسبت به سایر راهکارها از اولویت کمتری برخوردارند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اقدامات مربوط به مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) نسبت به سایر راهکارها از اولویت بالاتری برخوردار است. به عبارتی می‌توان بیان نمود که عامل نشت از لوله‌ها و اتصالات مهم‌ترین عامل در بروز آب بدون درآمد است و از آنجاکه در هر حالت نشت آب اتفاق خواهد افتاد ضرورت کنترل پایش و مقابله با آن مهم‌ترین راهکار در کاهش آب بدون درآمد خواهد بود. اینجاست که می‌توان به نقش مدیریت نشت نسبت به سایر راهکارهای کاهش آب بدون درآمد اشاره کرد. لازم به ذکر است که بیان شود هر کدام از راهکارهای شناسایی شده در جایگاه خود مهم و ضروری هستند و نمی‌توان بیان کرد که بدون توجه به آن گزینه می‌توان در راه رسیدن کاهش آب بدون درآمد موفق بود.

بحث

برای شناسایی راهکارهای کاهش آب بدون درآمد، محقق در ابتدا از طریق تحقیقات گذشته به بررسی راهکارهای بالقوه پرداخته و سپس از تحلیل عاملی تأییدی برای تأیید روش‌های مذکور استفاده کرده است. برای شناسایی عوامل مؤثر، از روش‌های زیر استفاده شده است.

- ادبیات تحقیق و میزان فراوانی معرفی شاخص
- نظرات ۳ نفر از اساتید دانشگاهی که زمینه تحقیقاتی آنها مرتبط بوده است.
- نظرات ۱۴ نفر از مدیران شرکت های آبفا که دارای تحصیلات تکمیلی (حداقل کارشناسی ارشد) بوده و سابقه کاری بالای ۲۰ سال را در این حوزه دارند.
- براین اساس ۱۱ راهکار زیر جهت کاهش آب بدون درآمد شناسایی شد:

- درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک
 - نوسازی جایگزینی مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب کمر بند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه
 - برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دایمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیرهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده
 - مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر
 - استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B)
 - تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک
 - تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر
 - استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و غیرصلب برای کاهش صدمات فیزیکی .
 - نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک .
 - استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) جهت کاهش احتمال نشت
 - کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج های فشاری
- برای اجرای روش‌های آماری و محاسبه آماره آزمون مناسب و استنتاج منطقی درباره فرضیه های پژوهش مهم ترین عمل قبل از هر اقدامی، انتخاب روش آماری مناسب برای پژوهش است برای این منظور آگاهی از توزیع داده ها از اولویت اساسی برخوردار است. در این راستا در پژوهش حاضر، از آزمون معتبر کولموگروف اسمیرنوف برای بررسی فرض نرمال بودن داده‌های پژوهش استفاده شده است. این آزمون برای گرفتن مجوز لازم جهت استفاده از رگرسیون و ضریب همبستگی که در مدل‌یابی معادلات ساختاری وجود دارد، اعمال می‌گردد تا نرمال بودن اطلاعات اثبات گردد. در این آزمون باتوجه‌به فرضیات زیر، نرمال بودن داده ها بررسی می‌شود:

داده ها دارای توزیع نرمال هستند: H_0

داده ها دارای توزیع نرمال نیستند: H_1

باتوجه‌به آزمون کولموگروف اسمیرنوف اگر سطح معنی‌داری برای کلیه متغیرها بزرگ‌تر از سطح آزمون ۰/۰۵ باشد، توزیع داده‌ها نرمال است. از آنجایی که سطح معناداری آزمون کولموگروف - اسمیرنوف برای تمامی متغیرهای پژوهش بزرگ‌تر از مقدار ۰/۰۵ است (بین ۰/۱۴ تا ۰/۸۶) در نتیجه دلیلی برای رد فرض صفر وجود ندارد و تمامی متغیرهای مورد بررسی در پژوهش حاضر دارای توزیع نرمال هستند.

به‌منظور سنجش روایی، روش‌های گوناگونی وجود دارد که در این پژوهش باتوجه به اینکه راهکارهای کاهش آب بدون درآمد دارای ابعاد گوناگون بوده و هریک از این ابعاد دارای مؤلفه های خاص خود می‌باشند، از روایی همگرایی که جزئی از روایی سازه است، استفاده شده است. نتایج حاصله نشان داد که مقدار میانگین واریانس استخراج شده تمامی شاخص‌های پژوهش بالاتر از مقدار ۰/۵ (بین ۰/۵۱۱ تا ۰/۵۹۱) است. بنابراین روایی همگرایی سؤالات پرسش‌نامه مورد قبول است. در این تحقیق، جهت برازش مدل پژوهش و آزمون تحلیل عاملی تأییدی (تأیید تأثیر راهکارها) از روش مدل‌یابی معادلات ساختاری به کمک نرم‌افزار اسمارت پی ال اس استفاده شده است. به عبارتی تحلیل عاملی تأییدی، به‌منظور بیان تأثیر راهکارها انجام شده است.

در تحلیل عاملی تأییدی اگر مقدار آماره آزمون T-Value هر متغیر، بزرگ‌تر از ۱/۹۶ و کوچکتر از ۱/۹۶ باشد، مدل از برازش خوبی برخوردار است و به عبارتی از تقریبی معقول از جامعه برخوردار می‌باشد. پس از تعیین مدل اندازه گیری به‌منظور ارزیابی مدل مفهومی تحقیق و همچنین اطمینان یافتن از وجود یا عدم وجود رابطه علی میان متغیرهای تحقیق و بررسی تناسب داده های مشاهده شده با مدل مفهومی تحقیق، هریک از راهکارها به‌عنوان یک فرضیه در نظر گرفته می‌شود.

همچنین پس از شناسایی راهکارها، عوامل شناسایی شده با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره فازی (که در فصل قبل معرفی شدند) رتبه‌بندی شده و نتایج حاصل از آنها را به کمک روش کپلند اولویت‌بندی شدند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، بر اساس هدف اصلی تحقیق یعنی، مطالعه و بررسی شیوه‌ها و روش‌های کاهش آب بدون درآمد، ۱۱ راهکار بالقوه شامل درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و هرگونه تغییرات بعدی در پرونده مشترک، نوسازی جایگزینی مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه)، برنامه‌ریزی جهت خواندن منظم و دائمی کنتورهای مشترکین، کیفیت افراد کنتورخوان، مسیرهای خواندن کنتور مشترکین و کنترل کیفیت آمار خوانده شده، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر)، استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B)، تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک، تعدیل و یکنواخت کردن فشار شبکه توزیع در محدوده ۳ تا ۵ اتمسفر، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر و غیرصلب برای کاهش صدمات فیزیکی، نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک، استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) جهت کاهش احتمال نشت و کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری شناسایی شده اند.

پس از شناسایی راهکارهای بالقوه کاهش آب بدون درآمد، این راهکارهای شناسایی شده با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (روش تحلیل فرایند شبکه، روش ویگور و روش آراس) رتبه‌بندی شده و نهایتاً نتایج حاصل از آنها به کمک روش کپلند اولویت‌بندی شد. بر پایه تکنیک تحلیل شبکه، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و استفاده از کنتورهای بادقت بالاتر (کنتور کلاس C به جای کنتور کلاس B) دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها بودند و استفاده از شیرهای فشارشکن (PRV) اولویت سوم را داشت. بر پایه تکنیک ویگور، تست دوره‌ای کنتورهای اشتراک و نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک دارای بالاترین اولویت در بین دیگر گزینه‌ها بودند و راهکار نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه) اولویت سوم را داشت. همچنین بر پایه تکنیک آراس فازی، مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) و نوسازی و جایگزینی دوره‌ای مصالح نامرغوب با مصالح نو و مرغوب در قسمت‌های مختلف انشعاب (کمربند انشعاب، شیر شبکه، لوله انشعاب، شیر انشعاب، اتصالات انشعاب، شیر قطع و وصل و شیر یک‌طرفه) دارای اولویت اول و دوم در بین دیگر گزینه‌ها بودند و راهکار نظارت دقیق بر پیمانکاری‌ها و نصب لوله‌ها در زیر خاک اولویت سوم را داشت. نهایتاً نتایج اولویت‌بندی نهایی با روش کپلند نشان داد که اقدامات مربوط به مدیریت نشت در لوله‌ها و انشعابات (کنترل غیرفعال نشت، کنترل فعال نشت، بازرسی مستمر، پایش نشت، تعویض یا تعمیر) نسبت به سایر راهکارها از اولویت بالاتری برخوردار است. به عبارتی می‌توان بیان نمود که عامل نشت از لوله‌ها و اتصالات مهم‌ترین عامل در بروز آب بدون درآمد است و از آنجا که در هر حالت نشت آب اتفاق خواهد افتاد ضرورت کنترل پایش و مقابله با آن مهم‌ترین راهکار در کاهش آب بدون درآمد خواهد بود. همچنین راهکارهای کنترل تلمبه جهت جلوگیری از بروز پدیده ضربه قوچ و موج‌های فشاری، استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر برای کاهش صدمات فیزیکی و درج کلیه اطلاعات مربوط به مشترک، ملک، انشعاب و کنتور و تغییرات بعدی در پرونده مشترک اولویت‌های یکسانی داشتند و نسبت به سایر راهکارها از اولویت کمتری برخوردار بودند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

قهرمانی، امین الله، ذوالفقاری، حسن، و معصوم پور سماکوش، جعفر. (۱۴۰۱). الگوهای گردشی تراز دریا و ارتباط آن‌ها با رودخانه‌های جوی تأثیرگذار بر بارش‌های شدید ایران. *نشریه جغرافیا و توسعه ناحیه ای*، (۴) ۲۰، ۶۶-۳۹. <https://doi.org/10.22067/jgrd.2022.68440.1008>

قصابی، زهرا. و فتاحی، ابراهیم. (۱۴۰۰). طبقه‌بندی الگوهای گردش جوی روزانه در خاورمیانه و ایران. *مجله پژوهش های اقلیم شناسی*، (۴۵) ۱۴۰، ۱۴۲-۱۲۷. https://clima.irimo.ir/article_132211.html

شکفته، محمدرضا، جلیلی قاضی زاده، محمدرضا، و یزدی، جعفر. (۱۳۹۹). تئوری شناسایی محدوده‌ی نشت در نواحی مجزای مجازی شبکه‌های توزیع آب با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی. *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، (۳) ۱۶، ۶۲-۴۷. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.4.2>

References

- Alvisi, S., & Franchini, M. (2009). Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 135(6), 426-439. [http://dx.oi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-496\(2009\)135:6\(426\)](http://dx.oi.org/10.1061/(ASCE)0733-496(2009)135:6(426))
- Beuken, R.H.S., Lavooij, C.S.W., Bosch, A., & Schaap, P.G. (2008). Low leakage in the Netherlands confirmed. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1-8. [http://dx.oi.org/10.1061/40941\(247\)174](http://dx.oi.org/10.1061/40941(247)174)
- Bozkurt, C., Firat, M., Abdullah, A.T.E.Ş., Yilmaz, S., & Özdemir, Ö. (2022). Strategic water loss management: current status and new model for future perspectives. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(2), 310-322. <https://dx.oi.org/10.14744/sigma.2022.00035>
- Cassidy, J., Barbosa, B., Damião, M., Ramalho, P., Ganhão, A., Santos, A., & Feliciano, J. (2021). Taking water efficiency to the next level: digital tools to reduce non-revenue water. *Journal of Hydroinformatics*, 23(3), 453-465. <http://dx.oi.org/10.2166/hydro.2020.072>
- Chawira, M., Hoko, Z., & Mhizha, A., (2022). Partitioning non-revenue water for Juru Rural Service Centre, Goromonzi District, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103113-25. <http://dx.oi.org/10.1016/j.pce.2022.103113>
- Fang, Q., Zhang, J., Xie, C., & Yang, Y. (2019). Detection of multiple leakage points in water distribution networks based on convolutional neural networks. *Water Supply*, 19(8), 2231-2239. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2019.105>
- Fallahi, H., Jalili Ghazizadeh, M., Aminnejad, B., & Yazdi, J. (2021). Leakage detection in water distribution networks using hybrid feedforward artificial neural networks. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 70(5), 637-653. <http://dx.oi.org/10.2166/aqua.2021.140>
- Farley, M., & Liemberger, R. (2005). Developing a non-revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(1), 41-50. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2005.0006>
- Farouk, A.M., Rahman, R.A., Romali, N.S. (2021). Non-revenue water reduction strategies: a systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 181-199. <http://dx.doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0071>
- Favardin, P., Lepelley, D., & Serais, J. (2002). Borda rule, Copeland method and strategic manipulation. *Review of Economic Design*, 7, 213-228. <http://dx.oi.org/10.1007/s100580200073>
- Ghahramani, A., Zolfaghari, H., & Masoompour Samakosh, J. (2022). Sea Level Circulation Patterns and Their Relationship with Atmospheric Rivers Affecting Heavy Rainfall in Iran. *Journal of Geography and Regional Development*, 20(4), 66-39. (In Persian) <https://doi:10.22067/jgrd.2022.68440.1008>
- Ghassabi, Z., & Fattahi, E. (2021). Classification of atmospheric circulation patterns in the Middle East and Iran. *Journal of Climate Research*, 1400(45), 127-142. (In Persian) https://clima.irimo.ir/article_132211.html
- Gul, M., Celik, E., Aydin, N., Gumus, A.T., & Guneri, A.F. (2016). A state of the art literature review of VIKOR and its fuzzy extensions on applications. *Applied Soft Computing*, 46, 60-89. <http://dx.oi.org/10.1016/j.asoc.2016.04.040>
- Güngör-Demirci, G., Lee, J., Keck, J., Guzzetta, R., & Yang, P. (2018). Determinants of non-revenue water for a water utility in California. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 67(3), 270-278. <http://dx.oi.org/10.2166/aqua.2018.152>

- Gupta, A., & Kulat, K.D. (2018). A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water resources management*, 32(10), 3247-3269. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-018-1985-6>
- Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z., & Fan, J. (2021). Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123611-25. <http://dx.oi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123611>
- Jang, D., & Choi, G. (2017). Estimation of non-revenue water ratio for sustainable management using artificial neural network and Z-score in Incheon, Republic of Korea. *Sustainability*, 9(11), 1933-1947. <http://dx.oi.org/10.3390/su9111933>
- Jin, T., & Zhou, Z.Y. (2014). Multiple Leakage Detection and Localization Method Based on Bayesian Theory and Genetic Algorithm. In *Applied Mechanics and Materials*, 635, 924-927. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.924>
- Kanakoudis, V., & Gonelas, K. (2016). Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: from theory to practice. *Desalination and Water Treatment*, 57(25), 11436-11446. <http://dx.oi.org/10.1080/19443994.2015.1049967>
- Lai, C.H., Tan, D.T., Roy, R., Chan, N.W., & Zakaria, N.A. (2020). Systems thinking approach for analysing non-revenue water management reform in Malaysia. *Water Policy*, 22(2), 237-251. <http://dx.oi.org/10.2166/wp.2020.165>
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 831-837. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2018.129>
- Liemberger, R., & Marin, P. (2006). The Challenge of Reducing Non-Revenue Water in Developing Countries--How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. Water supply and sanitation sector board discussion paper series, *The World Bank Publications*, Washington, DC. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/385761468330326484/pdf/394050Reducing1e0water0WSS81PUBLIC1.pdf>
- Liemberger, R. (2010). Recommendations for initial non-revenue water assessment. *IWA Water Loss*, 1, 1-13. <https://documents1.worldbank.org/curated/fr/385761468330326484/pdf/394050Reducing1e0water0WSS81PUBLIC1.pdf>
- Lijuan, W., Hongwei, Z., & Zhiguang, N. (2012). Leakage prediction model based on RBF neural network. In *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*, Springer, 451-458. http://dx.oi.org/10.1007/978-3-642-03718-4_56
- Majidi Khalilabad, N., Mollazadeh, M., Akbarpour, A., & Khorashadizadeh, S. (2018). Leak detection in water distribution system using non-linear Kalman filter. *Iran University of Science & Technology*, 8(2), 169-180. <http://ijoce.ust.ac.ir/article-1-336-en.html>
- Mardani, A., Zavadskas, E.K., Govindan, K., Amat Senin, A., & Jusoh, A. (2016). VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, 8(1), 37-49. <http://dx.oi.org/10.3390/su8010037>
- McKenzie, R.S., Siquilaba, Z.N., & Wegelin, W. (2012). The state of non-revenue water in world. Pretoria. Water Research Commission, Johannesburg, South Africa. <https://www.rc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/TT%20522-12.pdf>
- Nasara, M.A., Zubairu, I., Jagaba, A.H., Azare, A.A., Yerima, Y.M., & Yerima, B. (2021). Assessment of Non-Revenue Water Management Practices in Nigeria (A Case Study of Bauchi State Water and Sewerage Cooperation). *American Journal of Engineering Research*, 10(5), 390-401. <https://www.jer.org/papers/Vol-10-issue-5/ZU1005390401.pdf>

- Paramasivam, S.S.S.S., Kumaran, D., & Natarajan, H. (2020). Taguchi additive ratio assessment (ARAS) method in multi-criteria decision making: a case study for treated drill tools performance. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 12(1), 114-121.
https://ijmmt.ro/vol12no12020/15_Sundar_Singh_Sivam_Sundarlingam_Paramasivam.pdf
- Pérez-Pérez, E.D.J., López-Estrada, F.R., Valencia-Palomo, G., Torres, L., Puig, V., & Mina-Antonio, J. D. (2021). Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. *Control Engineering Practice*, 107, 104677-90. <http://dx.oi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677>
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D.A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45. <http://dx.oi.org/10.1080/15730621003610878>
- Rahman, A., Jahan, S., Yildirim, G., Alim, M.A., Haque, M.M., Rahman, M.M., & Kausher, A.H.M., (2022). A Review and Analysis of Water Research, Development, and Management in Bangladesh. *Water*, 14(12), 1834. <https://doi.org/10.3390/w14121834>
- Rojek, I., & Studzinski, J. (2019). Detection and localization of water leaks in water nets supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities. *Sustainability*, 11(2), 518-534. <http://dx.oi.org/10.3390/su11020518>
- Saari, D.G., & Merlin, V.R. (1996). The Copeland method: I.: relationships and the dictionary. *Economic theory*, 8, 51-76. <http://dx.oi.org/10.1007/s001990050077>
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., Saaty, T.L., & Vargas, L.G. (2013). The analytic network process, *Springer US*, 367, 124780. http://dx.doi.org/10.1007/0-387-33987-6_1
- Sabale, R., Venkatesh, B., & Jose, M. (2023). Sustainable water resource management through conjunctive use of groundwater and surface water: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 1-12. <http://dx.oi.org/10.1007/s41062-022-00992-9>
- Shekofteh, M. R., Jalili Ghazizadeh, M., & Yazdi, J. (2020). Theoretical identification of leakage areas in virtual district metered areas of water distribution networks using the artificial neural network. *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 47-62. (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1399.16.3.4.2>
- Shravani, D., Prajwal, Y.R., Prapulla, S.B., Salanke, N.G.R., Shobha, G., & Ahmad, S.F. (2019). A machine learning approach to water leak localization. *International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solution*, 4, 1-6. <http://dx.oi.org/10.1109/CSITSS47250.2019.9031010>
- Sipahi, S., & Timor, M. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management decision*, 48(5), 775-808. <http://dx.doi.org/10.1108/00251741011043920>
- Şişman, E., & Kızılöz, B. (2020). Artificial neural network system analysis and Kriging methodology for estimation of non-revenue water ratio. *Water Supply*, 20(5), 1871-1883. <http://dx.oi.org/10.2166/ws.2020.095>
- Şişman, E., & Kızılöz, B. (2020). Trend-risk model for predicting non-revenue water: an application in Turkey. *Utilities Policy*, 67, 101137-48. <http://dx.oi.org/10.1016/j.jup.2020.101137>
- Steffelbauer, D.B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., & Piller, O. (2022). Pressure-leak duality for leak detection and localization in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021106-17. [http://dx.oi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001515](http://dx.oi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001515)

- Tabesh, M., Roozbahani, A., Roghani, B., Faghihi, N.R., & Heydarzadeh, R. (2018). Risk assessment of factors influencing non-revenue water using Bayesian networks and fuzzy logic. *Water Resources Management*, 32(11), 3647-3670. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-018-2011-8>
- Vermersch, M., & Rizzo, A. (2008). Designing an action plan to control non-revenue water. *Water*, 21, 39-41. <http://prowat2.bworks.com/f/WS1+-+Designing+an+action+plan+to+control+NRW.pdf>
- Zavadskas, E.K., & Turskis, Z. (2010). A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making. *Technological and economic development of economy*, 16(2), 159-172. <https://www.esea.com/journal/Technological-and-Economic-Development-1392-8619>