Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ
Phần A: Khoa học tự nhiên, Công nghệ và Môi trường
ISSN 1859-2333 | e-ISSN 2815-5599

DOI:10.22144/ctujos.2026.216

ĐÁNH GIÁ HIỆN TRẠNG VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP GIẢM THẤT THOÁT NƯỚC TẠI CÔNG TY CỔ PHẦN CẤP NƯỚC TRÀ NÓC - Ô MÔN, THÀNH PHỐ CẦN THƠ

Phan Nhứt Khang[1,2], Trịnh Công Đoàn[1,2], Đặng Như Ý[3], Võ Quốc Thành[3] và Huỳnh Vương Thu Minh[3*]

[1]Sinh viên ngành Kỹ thuật Cấp thoát nước Khóa 48, Khoa Môi trường và Tài nguyên thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
[2]Công ty Cổ phần Cấp nước Trà Nóc – Ô Môn, Việt Nam
[3]Khoa Môi trường và Tài nguyên Thiên nhiên, Đại học Cần Thơ, Việt Nam
**Tác giả liên hệ (Corresponding author): hvtminh@ctu.edu.vn*

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 31/12/2025
Sửa bài (Revised): 30/01/2026
Duyệt đăng (Accepted): 28/08/2026

Title: *Assessment of the current status and proposed solutions for reducing non-revenue water (nrw) in Tra Noc – O Mon water supply joint stock company, Can Tho city*

Author(s): *Phan Nhut Khang[1,2], Trinh Cong Doan[1,2], Dang Nhu Y[3], Vo Quoc Thanh[3] and Huynh Vuong Thu Minh[3*]*

Affiliation(s): *[1]Student, Water Supply and Sewerage Engineering Program (Class 48), College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam; [2]Tra Noc – O Mon Water Supply Joint Stock Company, Viet Nam; [3]College of Environment and Natural Resources, Can Tho University, Viet Nam*

TÓM TẮT

Nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá hiện trạng và đề xuất giải pháp giảm thất thoát nước (NRW) tại Công ty Cổ phần Cấp nước Trà Nóc – Ô Môn. Dữ liệu trong giai đoạn 2018 – 2024 được phân tích bằng kiểm định Pettitt để nhận diện xu hướng và biến động NRW. Kết quả cho thấy tỷ lệ NRW giảm dần nhưng vẫn cao, đặc biệt tại Ô Môn với mức trung bình 13,86%. Đồng thời, phương pháp phân tích thứ bậc (Analytic Hierarchy Process – AHP) được sử dụng nhằm xác định mức độ ưu tiên của các giải pháp giảm thất thoát. Kết quả AHP từ 15 chuyên gia cho thấy tiêu chí kỹ thuật có trọng số lớn nhất, và giải pháp kiểm soát rò rỉ chủ động được ưu tiên cao nhất (0,227). Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng việc triển khai đồng bộ các giải pháp kỹ thuật và quản lý là cần thiết để đưa tỷ lệ NRW xuống dưới 10% vào năm 2030. Kết quả đóng góp cơ sở khoa học cho việc lập kế hoạch đầu tư và nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống cấp nước.

Từ khóa: *Cấp nước đô thị, kiểm soát rò rỉ, nước không doanh thu, phương pháp phân tích thứ bậc (AHP), quản lý áp lực, thất thoát nước cấp*

ABSTRACT

This study evaluates the current status of Non-Revenue Water (NRW) and proposes solutions to reduce water losses at Tra Noc – O Mon Water Supply Joint Stock Company. Data from 2018 – 2024 were analyzed using the Pettitt test to identify trends and variations in NRW. The results indicate that although NRW has gradually decreased, it remains high, particularly in O Mon with an average rate of 13.86%. In addition, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to determine the priority level of NRW reduction solutions. AHP results from 15 experts showed that the technical criterion has the highest weight, and proactive leak control is the top-priority solution (0.227). The study highlights that implementing an integrated set of technical and managerial measures is essential to reduce NRW to below 10% by 2030. The findings provide a scientific basis for investment planning and for improving the operational efficiency of the water supply system.

Keywords: *Analytic Hierarchy Process (AHP), leak control, Non-Revenue Water, pressure management, urban water supply, water loss*

1. GIỚI THIỆU

Nước sạch là hạ tầng thiết yếu bảo đảm sức khỏe cộng đồng và phát triển kinh tế - xã hội. Trong bối cảnh đô thị hóa, công nghiệp hóa cùng với tác động của biến đổi khí hậu, các hệ thống cấp nước đô thị đồng thời đáp ứng nhiều yêu cầu khắt khe hơn, bao gồm mở rộng phạm vi dịch vụ, bảo đảm chất lượng và an toàn cấp nước, duy trì tính liên tục, ổn định áp lực, đồng thời tối ưu chi phí vận hành và đầu tư. Đối với khu vực Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) nói chung và Thành phố Cần Thơ nói riêng, điều kiện thủy văn - địa chất phức tạp và sự phát triển nhanh của phụ tải sử dụng nước làm cho nhiệm vụ vận hành ổn định hệ thống cấp nước ngày càng gặp nhiều thách thức hơn. Trong bối cảnh đó, thất thoát và thất thu nước sạch được xem là nước không doanh thu (NRW-Non Revenue Water), trở thành một trong những thách thức lớn nhất đối với các hệ thống cấp nước đô thị. NRW bao gồm phần nước đã được khai thác và xử lý nhưng không mang lại doanh thu do rò rỉ trên mạng lưới cấp nước, thất thu thương mại hoặc các sai lệch trong quản trị – đo đếm. Tỷ lệ NRW cao không chỉ làm giảm hiệu quả khai thác công trình, làm tăng chi phí năng lượng và bảo trì, mà còn suy giảm năng lực tài chính của đơn vị cấp nước, tính bền vững lâu dài của các đơn vị cấp nước, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển. Vì vậy, kiểm soát NRW được xem là một trụ cột trong quản lý vận hành bền vững ngành nước, đặc biệt ở các quốc gia đang phát triển (Kingdom et al., 2006). Thất thoát nước là một trong những thách thức lớn nhất đối với các hệ thống cấp nước đô thị trên toàn cầu. Theo khung đánh giá của Hiệp hội Nước Quốc tế (IWA) (2024), thất thoát nước được chia thành ba nhóm chính: (1) thất thoát vật lý (real losses) do rò rỉ, vỡ ống và sự cố kỹ thuật; (2) thất thoát thương mại (apparent losses) do sai số đo đếm, gian lận, đấu nối trái phép; và (3) nước tiêu thụ hợp pháp nhưng không được ghi thu. Cách phân loại này hiện là tiêu chuẩn quốc tế để đánh giá hiệu quả vận hành và hoạch định chiến lược giảm thất thoát. Theo cách tiếp cận của IWA trong quản lý tổn thất nước, NRW cần được lượng hóa và phân tách theo các cấu phần này để nhận diện đúng bản chất và nguyên nhân gây thất thoát, từ đó thiết kế giải pháp can thiệp phù hợp và tránh áp dụng các biện pháp kỹ thuật tốn kém cho những vấn đề chủ yếu mang tính thương mại – quản trị (Lambert, 2003). Các nghiên cứu quốc tế về cấp nước đô thị tập trung mạnh vào chủ đề chính là quản lý NRW, tối ưu hóa vận hành mạng lưới và đảm bảo cấp nước an toàn dựa trên quản lý rủi ro toàn diện. Những xu hướng này chủ yếu phát triển từ các tổ chức như IWA, Tổ chức Y tế Thế giới (World Health Organization - WHO) và các học giả nổi tiếng trong ngành. Kết quả các nghiên cứu nước ngoài đóng vai trò nền tảng trong việc định hình các thực hành tiên tiến trên toàn cầu, đồng thời là cơ sở tham khảo quan trọng để vận dụng vào bối cảnh Việt Nam.

Trên thế giới, các nghiên cứu về giảm thất thoát nước trong hệ thống cấp nước đô thị ngày càng tiếp cận NRW được xem là bài toán đa mục tiêu, yêu cầu phối hợp giải pháp kỹ thuật, quản lý, tài chính và xã hội. Trong điều kiện nguồn lực hạn chế, các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDA), đặc biệt phương pháp phân tích thứ bậc (Analytic Hierarchy Process – AHP), đã được sử dụng rộng rãi để lượng hóa ưu tiên và hỗ trợ lựa chọn can thiệp/giải pháp phù hợp với bối cảnh từng đơn vị cấp nước. Tuy nhiên, các nghiên cứu quốc tế cũng chỉ ra rằng kết quả phân bổ trọng số giữa các tiêu chí và giải pháp phụ thuộc rất mạnh vào đặc điểm mạng lưới, điều kiện vận hành và năng lực quản trị của từng hệ thống, do đó khó có thể suy rộng hoặc áp dụng máy móc giữa các khu vực.

Tại Việt Nam, giảm thất thoát, thất thu nước sạch đã được định hướng ở tầm chính sách thông qua Chương trình quốc gia chống thất thoát, thất thu nước sạch theo Quyết định số 2147/QĐ-TTg, với mục tiêu kéo giảm tỷ lệ thất thoát. Tuy nhiên, ở các doanh nghiệp cấp nước, việc lựa chọn và sắp xếp thứ tự ưu tiên các giải pháp giảm NRW trong thực tiễn vẫn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm quản lý, yêu cầu cấp bách trước mắt hoặc ràng buộc về nguồn lực. Trong điều kiện nguồn lực đầu tư có hạn, thực tiễn cho thấy các chương trình giảm NRW hiệu quả thường được triển khai theo tổ hợp giải pháp: (i) thiết lập khu vực quản lý/đồng hồ tổng (DMA) để kiểm soát theo không gian, (ii) quản lý áp lực và chủ động phát hiện rò rỉ, (iii) quản lý tài sản và thay thế ống theo rủi ro, (iv) cải thiện chất lượng đo đếm, dữ liệu khách hàng, quy trình ghi–thu và (v) lựa chọn cơ chế triển khai phù hợp như hợp đồng theo kết quả (performance-based contracts) nhằm gắn trách nhiệm nhà thầu/đơn vị thực hiện với chỉ tiêu giảm NRW (Kingdom et al., 2006, 2018). Các nghiên cứu trong nước tập trung vào đánh giá hiện trạng, phân tích kỹ thuật – kinh tế và xác định mức thất thoát hợp lý, thay vì lượng hóa thứ tự ưu tiên giải pháp bằng các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí. Điển hình, kết quả nghiên cứu của Tuyền (2021) đã tổng hợp và phân tích các giải pháp công nghệ và quản lý nhằm giảm thất thoát nước sạch tại một số doanh nghiệp cấp nước, nhấn mạnh vai trò của phân vùng DMA, dò tìm rò rỉ chủ động, quản lý áp lực và ứng dụng GIS/SCADA; tuy nhiên, việc lựa chọn

giải pháp vẫn mang tính định tính, chưa có công cụ lượng hóa ưu tiên giữa các phương án. Tương tự, An và Hòa (2022) đã áp dụng phương pháp xác định mức thất thoát kinh tế (Economic Level of Leakage – ELL) cho mạng lưới cấp nước Gia Định, kết hợp cân bằng nước và phân tích chi phí – lợi ích để xác định ngưỡng thất thoát hợp lý; nghiên cứu này tập trung vào việc xác định mức mục tiêu kinh tế. Ngoài ra, Dũng và Quốc (2025) đã sử dụng mô hình thủy lực EPANET kết hợp với phân tích kinh tế – kỹ thuật để đánh giá hiện trạng và đề xuất giải pháp giảm thất thoát nước tại Công ty Cổ phần Cấp nước Tân Hòa. Kết quả cho thấy các giải pháp như khoanh vùng DMA, kiểm soát rò rỉ chủ động và quản lý áp lực mang lại hiệu quả rõ rệt; tuy nhiên, việc lựa chọn giải pháp ưu tiên vẫn dựa trên phân tích từng giải pháp riêng lẻ, các phương pháp MCDA/AHP chưa được áp dụng để lượng hóa và so sánh mức độ ưu tiên một cách có hệ thống. Từ thực tiễn đó có thể nhận ra một lỗ hổng nghiên cứu đó là thiếu các nghiên cứu tình huống ứng dụng MCDA/AHP gắn với dữ liệu vận hành dài hạn tại doanh nghiệp cấp nước đô thị, nhằm minh bạch hóa cơ sở lựa chọn giải pháp giảm NRW theo bối cảnh địa phương và hỗ trợ lập kế hoạch đầu tư theo lộ trình. Khoảng trống này càng rõ nét tại khu vực ĐBSCL, nơi hệ thống cấp nước chịu tác động đồng thời của điều kiện tự nhiên đặc thù, mạng lưới có tuổi thọ và tiêu chuẩn kỹ thuật không đồng nhất, cùng với áp lực phát triển đô thị – công nghiệp nhanh.

Công ty Cổ phần Cấp nước Trà Nóc – Ô Môn, Thành phố Cần Thơ là một trường hợp điển hình cho những thách thức được đề cập. Khu vực cấp nước của công ty có đặc trưng phụ tải đan xen dân cư – sản xuất – dịch vụ, với mạng lưới phân phối phát triển qua nhiều giai đoạn, tồn tại các tuyến ống đã được xây dựng lâu năm, biến động áp lực và các vấn đề liên quan đến đo đếm, quản lý khách hàng. Trong bối cảnh đó, bài toán NRW có thể biểu hiện khác nhau theo khu vực, bao gồm: rò rỉ ngầm khó nhận biết, biến động áp lực làm gia tăng nguy cơ bể ống, cũng như các vấn đề liên quan đến đo đếm và quản lý khách hàng, đòi hỏi cách tiếp cận đánh giá và lựa chọn giải pháp dựa trên bằng chứng dữ liệu.

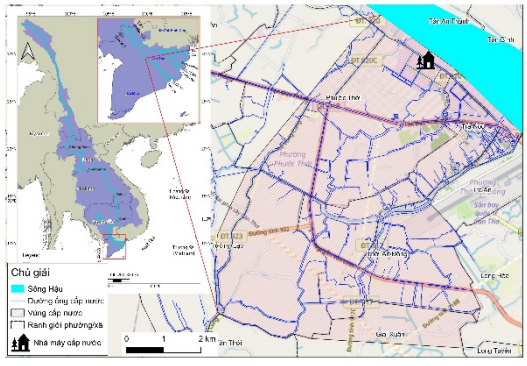
Trên cơ sở tổng hợp tài liệu về quản lý thất thoát nước (Farley & Trow, 2003; Thornton & Lambert, 2005; UN-Habitat, 2012; Serafeim et al., 2022; IWA, 2024), các giải pháp giảm NRW thường được nhóm theo bốn khía cạnh: (i) kỹ thuật (kiểm soát dò rò rỉ, tối ưu áp lực, cải tạo/thay thế ống), (ii) quản lý (thiết lập DMA, phân tích MNF và giám sát thời gian thực bằng GIS/SCADA/AMI), (iii) tài chính (chi phí đầu tư - vận hành và hiệu quả kinh tế của can thiệp) và (iv) xã hội - chính sách (truyền thông, chế tài chống vi phạm, cơ chế giá và thu tiền). Các khía cạnh này được sử dụng làm cơ sở xây dựng hệ tiêu chí và phương án trong mô hình AHP của nghiên cứu.

Vì vậy, nghiên cứu được thực hiện nhằm đánh giá hiện trạng NRW theo cấu phần (thất thoát vật lý và thất thoát thương mại), gắn với phân tích biến động theo không gian và thời gian, đồng thời ứng dụng kết hợp phân tích chuỗi thời gian và phương pháp ra quyết định đa tiêu chí AHP để lượng hóa mức độ ưu tiên các giải pháp giảm thất thoát. Trên cơ sở đó, mục đích của nghiên cứu này là (i) đánh giá hiện trạng và xu thế biến động NRW tại Công ty Cổ phần Cấp nước Trà Nóc – Ô Môn trên cơ sở dữ liệu vận hành giai đoạn 2018 – 2024 và (ii) lượng hóa thứ tự ưu tiên các giải pháp giảm NRW thông qua đánh giá chuyên gia nhất quán, làm cơ sở khoa học cho việc lập kế hoạch đầu tư và triển khai các can thiệp giảm thất thoát theo lộ trình, góp phần nâng cao hiệu quả và tính bền vững của hệ thống cấp nước đô thị.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Công ty Cổ phần Cấp nước Trà Nóc – Ô Môn phục vụ cấp nước cho 04 phường gồm: phường Thới An Đông, phường Phước Thới, phường Ô Môn, và phường Thới Long và 05 xã gồm: xã Trường Thành, xã Thới Lai, xã Đông Thuận, xã Cờ Đỏ và xã Thạnh Phú (Hình 1). Công ty đang quản lý và phân phối cung cấp nước từ các nhà máy nước khai thác từ nguồn nước mặt ở các sông trên địa bàn, có tổng công suất khai thác 39,900 m^3/ngày đêm tại 04 nhà máy nước.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu

2.2. Kiểm định phi tham số Pettitt's test

Pettitt (1979) đã giới thiệu một phép thử thống kê phi tham số dựa trên thứ hạng để phát hiện các

điểm thay đổi trong một chuỗi dữ liệu. Giả sử chuỗi dữ liệu $\{X_t\}$ với t = 1, 2,…, T. Tại một thời điểm τ ($1 \le \tau < T1$), nếu xuất hiện điểm thay đổi thì chuỗi được chia thành hai đoạn: đoạn 1 ($X_1,\ldots,X\tau$) có hàm phân phối F1(X) và đoạn 2 ($X\tau+1,\ldots,X_T$) có hàm phân phối F2(X).$X_1X_2X_TF_1(X_t)t = 1\tau F_2(X_t)t = \tau + 1T$

Do đó, các giả thuyết được kiểm chứng là:

$$\begin{cases} H_0: F_1(X) = F_2(X) \text{ (không có điểm thay đổi)} \\ H_1: F_1(X) \neq F_2(X) \text{ (có ít nhất một điểm thay đổi)} \end{cases} \quad (1)$$

Để xác định điểm đột phá, kiểm định Pettitt sử dụng thống kê Ut,T, được xây dựng từ thứ hạng của các quan sát giữa hai nhóm dữ liệu. Thống kê này tương tự với thống kê Mann–Whitney (Mann, 1945) cho hai nhóm, được nêu bởi Pettitt (1979):

$$U_{t.T} = \sum_{i=1}^{t} \sum_{j=t+1}^{T} sgn(X_i - X_j). 1 \le t < T \quad (2)$$

$$sgn(x) = \begin{cases} 1 & if\ x > 0 \\ 0 & if\ x = 0 \\ -1 & if\ x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Một thời điểm *t* được xem là ứng viên điểm chuyển đổi khi giá trị thống kê |Ut,T| đạt mức lớn nhất trên toàn chuỗi; thời điểm đó được ký hiệu là τ. Nói cách khác, ttt là biến chạy dùng để dò tìm, còn τ là điểm thay đổi được xác định từ kết quả tối đa hóa này. Điểm τ có khả năng là điểm chuyển đổi khi nó thỏa mãn phương trình sau:

$$K_T = U_{t.T} = max|U_{t,T}|. 1 \le t < T \quad (4)$$

Pettitt (1979) giới thiệu phương trình (5) để tính giá trị p của kiểm định một cách gần đúng:

$$p \approx 2. \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2)}\right) \quad (5)$$

Do đó, với mức ý nghĩa thống kê α (trong đó α là xác suất chấp nhận sai lầm loại I, thường chọn α = 0,05), nếu p < α, thì giả thuyết không, giả thuyết cho rằng hai phân bố này tương tự nhau bị bác bỏ (Pettitt, 1979).

2.3. Phương pháp phân tích thứ bậc AHP

Saaty (1980) đã phát triển phương pháp Quy trình Phân tích Thứ bậc (Analytic Hierarchy Process – AHP) như một công cụ hỗ trợ ra quyết định đa tiêu chí, đặc biệt hữu ích trong các tình huống có sự kết hợp giữa yếu tố định tính và định lượng. AHP cấu trúc vấn đề thành một hệ thống thứ bậc gồm mục tiêu tổng quát, các tiêu chí đánh giá và các phương án lựa chọn. Thông qua so sánh cặp đôi, AHP xác định mức độ ưu tiên tương đối giữa các yếu tố (Saaty, 1980). Phương pháp có nhiều ưu điểm: (i) phân tách vấn đề thành ba cấp bậc rõ ràng; (ii) linh hoạt kết hợp tiêu chí định tính và định lượng, bao gồm cả các tiêu chí khó đo lường như "tác động xã hội" hay "mức độ chấp nhận" (Saaty, 1977); (iii) kiểm tra độ tin cậy và độ nhất quán: Khả năng đánh giá tính nhất quán trong nhận định của các chuyên gia bằng chỉ số CR (Consistency Ratio – tỷ lệ nhất quán), được tính từ chỉ số nhất quán CI và chỉ số ngẫu nhiên RI, trong đó CR < 0,1 được xem là chấp nhận được, là một đặc điểm quan trọng của AHP (Saaty, 1980, 2008), điều này làm cho kết quả so sánh hợp lý và đáng tin cậy hơn và (iv) tính minh bạch cao, khi AHP không chỉ đề xuất lựa chọn tối ưu mà còn thể hiện mức đóng góp của từng tiêu chí vào quyết định.

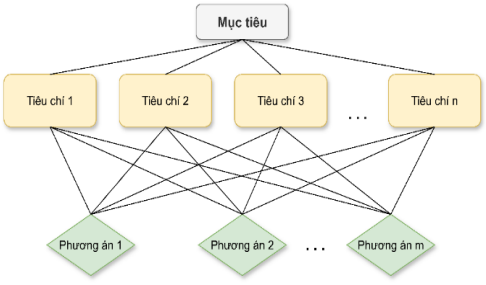
AHP được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, chẳng hạn như quy hoạch đô thị, quản lý rủi ro tài chính, lựa chọn công nghệ, quản lý chuỗi cung ứng và ra quyết định liên quan đến y tế và sức khỏe (Forman & Selly, 2001; Vaidya & Kumar, 2006). Phương pháp này đặc biệt phù hợp với các vấn đề mà ý kiến và đánh giá của chuyên gia có ảnh hưởng lớn đến giá trị của các yếu tố.

2.3.1. Xây dựng mô hình phân cấp

Trước tiên, cấu trúc phân cấp (hierarchical structure) cần được xác định và xây dựng cho bài toán đưa ra quyết định. Việc thiết kế cấu trúc phân cấp rõ ràng là nền tảng để bảo đảm tính hợp lý của toàn bộ quá trình tính toán trọng số và xếp hạng độ phù hợp của các phương án.

a. Nguyên tắc cấu trúc phân cấp

Quy trình AHP chia bài toán thực tế thành các cấp liên kết theo quan hệ phân cấp từ tổng thể đến chi tiết (Saaty, 1977). Hình 2 thể hiện cấu trúc thông thường của AHP bao gồm ba phân cấp chính.



Hình 2. Sơ đồ mô tả cấu trúc phân cấp của AHP

Trong đó:

Cấp 1 - Mục tiêu chung hay mục tiêu của nghiên cứu;

Cấp 2 - Các tiêu chí đánh giá có ảnh hưởng trực tiếp đến mục tiêu tổng thể. Một số tiêu chí có thể được chia thành các tiêu chí con cần thiết để thể hiện các đặc điểm cụ thể của vấn đề;

Cấp 3 – Các phương án lựa chọn: là tập hợp các lựa chọn cần so sánh và đánh giá.

b. Quy trình lựa chọn tiêu chí cho nghiên cứu

Các tiêu chí được lựa chọn trong nghiên cứu được thực hiện theo quy trình sau:

– Lược khảo tài liệu khoa học: Các tiêu chí đã được sử dụng trong các nghiên cứu cùng lĩnh vực đã được tổng hợp.

– Phỏng vấn và tham vấn chuyên gia: Việc thu thập những ý kiến của 15 chuyên gia trong lĩnh vực cấp thoát nước và quản lý thất thoát nước (14 chuyên gia đến từ các đơn vị cấp nước tại Cần Thơ và 1 chuyên gia tư vấn) được tiến hành nhằm bổ sung hoặc điều chỉnh tiêu chí cho phù hợp với bối cảnh của nghiên cứu.

– Sàng lọc và thống nhất tiêu chí: Các tiêu chí trùng lặp hoặc kém quan trọng được loại bỏ. Tiêu chí "có ảnh hưởng đáng kể" được xác định dựa trên lược khảo tài liệu, ý kiến chuyên gia và mức độ tác động của tiêu chí đó đến tỷ lệ thất thoát nước (NRW). Nghiên cứu chỉ giữ lại những tiêu chí có ảnh hưởng đáng kể đến mục tiêu chung.

Trên cơ sở lược khảo tài liệu và ý kiến chuyên gia, nghiên cứu xây dựng mô hình AHP gồm một mục tiêu (ưu tiên giải pháp giảm thất thoát nước), bốn tiêu chí đánh giá và bảy phương án so sánh.

– Tiêu chí kỹ thuật (C1): mức độ tác động trực tiếp đến giảm thất thoát (vật lý/biểu kiến), ổn định áp lực và độ tin cậy cấp nước.

– Tiêu chí quản lý (C2): mức độ hỗ trợ tổ chức triển khai, giám sát và ra quyết định (hệ thống dữ liệu, quy trình, năng lực vận hành).

– Tiêu chí tài chính (C3): nhu cầu chi phí đầu tư - vận hành và hiệu quả kinh tế kỳ vọng (chi phí trên m³ nước tiết kiệm, khả năng hoàn vốn).

– Tiêu chí xã hội (C4): mức độ chấp nhận và tuân thủ của khách hàng/cộng đồng, yếu tố công bằng và tác động đến hành vi sử dụng nước.

Các phương án (P1-P7) được xác định trên cơ sở các nhóm giải pháp phổ biến trong tài liệu và phù hợp điều kiện thực tế của khu vực nghiên cứu:

P1: Kế hoạch kiểm soát dò tìm rò rỉ chủ động (nghe rò, logger/thiết bị dò rò và sửa chữa kịp thời).

P2: Quản lý áp lực trên hệ thống mạng lưới (PRV, điều khiển theo giờ cao điểm - thấp điểm).

P3: Hệ thống quản lý phân vùng DMA, theo dõi lưu lượng - áp lực và phân tích MNF để khoanh vùng bất thường.

P4: Cải tạo, nâng cấp và thay thế đường ống xuống cấp.

P5: Thay đồng hồ đến hạn kiểm định và nâng cao chất lượng đo đếm (bao gồm AMR/AMI khi phù hợp).

P6: Tăng cường giám sát bằng SCADA /AMR /AMI, tích hợp dữ liệu (ví dụ GIS) và đào tạo nâng cao năng lực quản lý - vận hành.

P7: Tuyên truyền, chống hành vi vi phạm (đấu nối trái phép/can thiệp đồng hồ), kết hợp chính sách giá và hiện đại hóa công tác thu tiền.

2.3.2. Ma trận so sánh cặp

Ma trận so sánh cặp là thành phần trọng yếu trong quy trình phân tích thứ bậc, chúng hỗ trợ các nhà quản lý trong việc đưa ra quyết định bằng cách cho phép đánh giá có hệ thống tầm quan trọng tương đối của các tiêu chí hoặc phương án nhờ vào việc so sánh theo từng cặp (Saaty, 1987). Phương pháp tiếp cận này làm giảm thiểu những sai lệch chủ quan khi đánh giá riêng biệt từng tiêu chí và đảm bảo mối quan hệ rõ ràng giữa các tiêu chí (Saaty, 2008). Trước tiên, ma trận vuông $n \times n$ được tạo ra với n là số lượng tiêu chí (cấp 2) hoặc số lượng phương án (cấp 3). Trong đó, mỗi ô của ma trận là sự so sánh giữa thành phần (tiêu chí hoặc phương án) i với j, được thể hiện ở Bảng 1 và thường được so sánh trên thang đo 1 đến 9 (Saaty, 1977).

Bảng 1. Ma trận so sánh cặp để tính toán trọng số giữa các yếu tố.

i \ j	1	2	3	…	n
1	1	a_{12}	a_{13}	…	a_{1n}
2	$1/a_{12}$	1	a_{23}	…	a_{2n}

i \ j	1	2	3	…	n
3	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$	1	…	a_{3n}
…	…	…	…	…	…
n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	$1/a_{3n}$	…	1

(Nguồn: T. L. Saaty, 1977)

2.3.3. Trọng số của các thành phần trong ma trận

Sau khi hoàn tất phép so sánh từng cặp, bước tiếp theo trong AHP là tính toán trọng số ưu tiên cho từng tiêu chí hoặc phương án. Các trọng số này phản ánh mức độ quan trọng tương đối của từng thành phần đối với mục tiêu tổng thể. Có nhiều cách để xác định trọng số trong ma trận so sánh cặp, trong đó hai phương pháp được sử dụng phổ biến nhất là phương pháp vectơ riêng (Eigenvector Method) và phương pháp trung bình nhân (Geometric Mean Method). Hai phương pháp này đều được Saaty (1980) đề xuất và phát triển trong các công trình nghiên cứu nền tảng của ông về AHP.

a. Phương pháp vectơ riêng

Đây là phương pháp tính trọng số truyền thống của Analytical Hierarchy Process (AHP). Vectơ của từng ma trận so sánh cặp sẽ mô tả trọng số tương đối của các yếu tố được so sánh. Trong trường hợp ma trận so sánh cặp A có n phần tử, vectơ riêng $\vec{x}$ cũng được coi là ma trận trọng số, theo công thức (6) (Saaty, 1977).

$$A\,\vec{x} = \lambda_{max}\,\vec{x} \qquad (6)$$

Trong đó: A là ma trận so sánh cặp $n \times n$; $\vec{x}$ là ma trận trọng số (vectơ riêng của ma trận A) và λ_{max} là giá trị riêng lớn nhất của ma trận A.

b. b. Phương pháp trung bình nhân (GMM)

Phương pháp trung bình nhân, hay còn gọi là phương pháp xấp xỉ, là phương pháp thay thế đơn giản hơn bằng cách sử dụng giá trị trung bình nhân của từng hàng trong ma trận so sánh cặp để tính trọng số. Với tiêu chí i thì trọng số w_i của tiêu chí đó được xác định bởi công thức (2).

Trong đó, $a_{i,j}$ là chỉ số so sánh của tiêu chí i với tiêu chí j

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^{n} a_{i,j}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n} a_{k,j}\right)^{1/n}} \qquad (7)$$

2.3.4. Kiểm tra tính nhất quán

Một bước quan trọng nữa của AHP là việc đánh giá tính nhất quán của các đánh giá chuyên gia. Vì việc so sánh từng cặp vốn mang tính chủ quan, nên có thể phát sinh sự không nhất quán - ví dụ, nếu tiêu chí A được ưu tiên hơn B, B được ưu tiên hơn C, nhưng C được ưu tiên hơn A sẽ thể hiện sự không nhất quán. Để đảm bảo độ tin cậy của kết quả, chúng ta sử dụng tỷ lệ nhất quán (Consistency Ratio - CR).

Việc đánh giá tính nhất quán của các đánh giá từ chuyên gia là một bước quan trọng của AHP. Sự không nhất quán có thể xảy ra khi từng cặp tiêu chí vốn được so sánh một cách chủ quan theo mỗi chuyên gia. Chỉ số nhất quán (Consistency Index - CI) định lượng mức độ nhất quán trong ma trận so sánh từng cặp và được định nghĩa theo công thức (8).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \qquad (8)$$

Trong đó, λ_{max} biểu thị giá trị riêng lớn nhất của ma trận so sánh và n biểu thị số lượng tiêu chí hoặc phương án. Một ma trận hoàn toàn nhất quán cho kết quả $\lambda_{max} = n$, dẫn đến $CI = 0$.

Tỷ lệ nhất quán CR được so sánh chỉ số nhất quán CI với chỉ số ngẫu nhiên (Random Index - RI) (Bảng 2) đại diện cho chỉ số nhất quán trung bình của các ma trận nghịch đảo được tạo ngẫu nhiên có cùng kích thước $n \times n$ được thể hiện ở công thức số (9).

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (9)$$

Bảng 2. Chỉ số ngẫu nhiên

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Giá trị RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

(Saaty, 1980)

Giá trị CR dưới 0.1 cho thấy mức độ nhất quán có thể chấp nhận và sử dụng trong việc ra quyết định, trong khi các giá trị trên 0.1 cho thấy các so sánh của các chuyên gia cần được xem xét lại.

2.3.5. Tổng hợp kết quả trọng số

Sau khi việc xác định trọng số ưu tiên cho từng tiêu chí và chứng minh rằng tất cả các tiêu chí đều nhất quán được thực hiện, cuối cùng là kết quả được tổng hợp để đánh giá và xếp hạng các lựa chọn. Cũng như bước so sánh cặp ở các tiêu chí, từng phương án được đánh giá trọng số đối với mỗi tiêu chí bằng phương pháp tương tự. Trọng số tổng thể của một phương án được tính bằng cách tổng các tích của trọng số tiêu chí và trọng số tương ứng của các phương án cho từng tiêu chí (Saaty, 1977).

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot v_{ij} \qquad (10)$$

Trong đó: S_i là trọng số tổng thể của phương án i, w_j là trọng số của tiêu chí vij là mức độ ưu tiên của phương án i theo tiêu chí j và n là số lượng tiêu chí. Các phương án sau đó được xếp hạng theo trọng số tổng thể của chúng, với tỉ số cao nhất cho thấy phương án thuận lợi nhất.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hiện trạng và nguyên nhân gây thất thoát nước, giai đoạn 2018 - 2024

Tỷ lệ thất thoát nước tại hai trạm cấp nước và hai nhà máy nước được trình bày ở Hình 3. Kết quả cho thấy tỷ lệ thất thoát nước có xu hướng giảm trong giai đoạn 2018 - 2024 tại tất cả các đơn vị nghiên cứu. Việc phân tích kiểm định Pettitt giúp xác định các thời điểm thay đổi có ý nghĩa trong chuỗi số liệu theo tháng. Cụ thể, tại Nhà máy nước (NMN) Trà Nóc, tỷ lệ thất thoát giảm từ 11,0% trong giai đoạn 01/2018 - 02/2022 xuống 9,2% trong giai đoạn 03/2022 - 12/2024; tại NMN Ô Môn, tỷ lệ này giảm từ 15,0% (01/2018-03/2022) xuống 12,2% (04/2022 - 12/2024). Đối với các trạm cấp nước, trạm Thới Lai ghi nhận mức giảm từ 12,4% (01/2018 - 06/2021) xuống 10,4% (07/2021 - 12/2024), trong khi trạm Cờ Đỏ giảm từ 9,5% (01/2018 - 06/2020) xuống 7,5% (07/2020 - 12/2024).

Xu thế giảm thất thoát nước trong giai đoạn 2018 – 2024 gắn liền với việc triển khai các biện pháp quản lý và kỹ thuật nhằm kiểm soát thất thoát trên toàn hệ thống. Các biện pháp chủ yếu bao gồm rà soát, cải tạo và thay thế từng phần các tuyến ống cũ hoặc thường xuyên xảy ra sự cố; tăng cường công tác bảo trì, sửa chữa rò rỉ đột xuất và định kỳ; đẩy mạnh hoạt động dò tìm rò rỉ chủ động và kiểm soát áp lực mạng lưới. Bên cạnh đó, một số khu vực đã được tổ chức theo mô hình phân vùng quản lý mạng lưới (District Metered Area – DMA), góp phần theo dõi lưu lượng, phát hiện sớm các bất thường và đánh giá hiệu quả các biện pháp can thiệp.

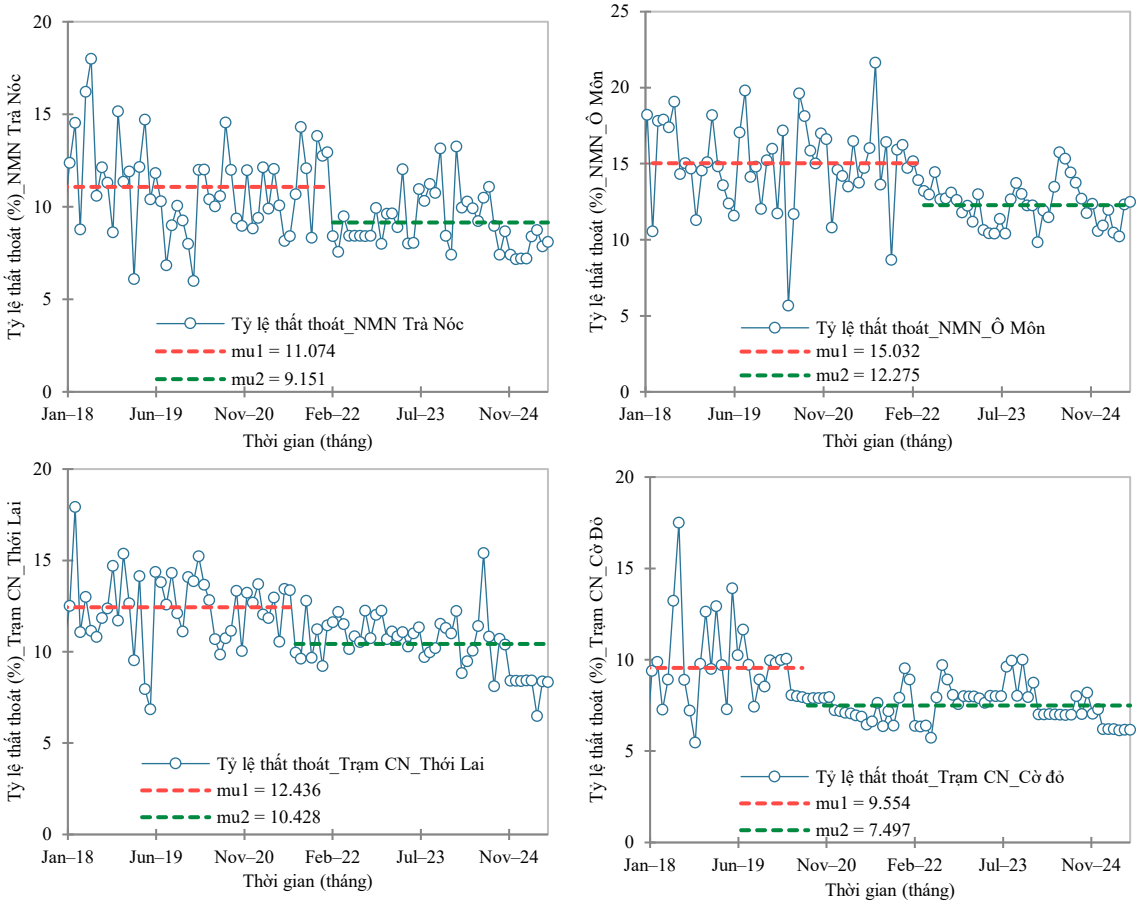
Song song với các giải pháp kỹ thuật, công tác giảm thất thoát vô hình được thực hiện thông qua kiểm định và thay thế đồng hồ nước không đạt yêu cầu, rà soát dữ liệu tiêu thụ và xử lý các trường hợp đấu nối trái phép. Công tác quản lý vận hành được cải thiện nhờ cập nhật hồ sơ hiện trạng mạng lưới và tăng cường phối hợp giữa bộ phận nhà máy, mạng lưới và giám sát chất lượng nước, qua đó nâng cao hiệu quả phát hiện và xử lý sự cố.

Mặc dù vậy, mức độ giảm thất thoát có sự khác biệt rõ rệt giữa các khu vực. Tỷ lệ thất thoát tại trạm cấp nước Thới Lai và Cờ Đỏ giảm nhanh hơn so với NMN Trà Nóc và Ô Môn, chủ yếu do mạng lưới phân phối có quy mô nhỏ, cấu trúc đơn giản, phần lớn đường ống mới, đường kính nhỏ và được chôn ở độ sâu phù hợp, làm giảm nguy cơ rò rỉ và thuận lợi cho việc phát hiện, sửa chữa sự cố với chi phí thấp. Số lượng tuyến ống và khách hàng ít cũng giúp việc khoanh vùng cô lập, tạm ngưng cấp nước và triển khai thi công được thực hiện nhanh chóng.

Ngược lại, mạng lưới cấp nước tại khu vực Trà Nóc và Ô Môn có phạm vi rộng, nhiều tuyến ống đường kính lớn đã vận hành lâu năm, nằm sâu hoặc trong các khu vực thường xuyên ngập nước, dẫn đến nguy cơ rò rỉ cao và khó khăn trong việc phát hiện vị trí bể ống. Đây đồng thời là khu vực đô thị – công nghiệp với mật độ dân cư cao, nhiều hoạt động thi công hạ tầng kỹ thuật và tải trọng giao thông lớn, thường xuyên tạo ra các tác động ngoại lực bất lợi đối với hệ thống. Công tác sửa chữa tại các khu vực này còn bị hạn chế về thời gian do yêu cầu duy trì cấp nước cho các khu công nghiệp hoặc chỉ có thể triển khai vào ban đêm, khiến thời gian khắc phục kéo dài. Những yếu tố trên làm cho tốc độ giảm thất thoát tại Trà Nóc và Ô Môn chậm hơn, mặc dù đã có nhiều nỗ lực trong quản lý và cải tạo mạng lưới.

Đáng chú ý, Nhà máy nước Ô Môn không chỉ duy trì tỷ lệ thất thoát ở mức cao mà còn có mức độ biến động lớn trong suốt giai đoạn nghiên cứu, phản ánh tính bất ổn của hệ thống. Trong khi đó, trạm cấp nước Cờ Đỏ thể hiện sự ổn định vượt trội với giá trị độ lệch chuẩn thấp nhất (1,93), cho thấy tỷ lệ thất thoát nước tại đây được duy trì tương đối đồng đều quanh một mức thấp trong toàn bộ giai đoạn phân tích. Tỷ lệ thất thoát cao tại nhà máy nước Ô Môn có thể được giải thích rằng tỷ lệ phần trăm thất thoát nước và thất thoát theo thể tích có tương quan thuận rất mạnh với sự biến động tiêu thụ nước. Đặc biệt, trong điều kiện áp lực mạng lưới thay đổi, khi nhu cầu tiêu thụ giảm, áp lực tăng làm trầm trọng hơn

các điểm rò rỉ hiện hữu (Pathirane et al., 2024). Ngoài ra, quy mô dân số đô thị và chiều dài mạng lưới phân phối là hai nhân tố chính làm tăng NRW (Sousa et al., 2025). Điều này cho thấy chiến lược giảm thất thoát tại các khu vực nghiên cứu cần chú trọng hơn vào kiểm soát áp lực chủ động và quản lý tài sản dài hạn thay vì chỉ sửa chữa từng sự cố xảy ra.



Hình 3. Tỷ lệ thất thoát nước tại các NMN và trạm CN, giai đoạn 2018 - 2024.

Chú thích: mu1 và mu2 lần lượt là giá trị thất thoát nước trung bình ở giai đoạn 1 và giai đoạn 2.

Nhằm đạt được mục tiêu giảm thất thoát nước trong giai đoạn từ năm 2025 đến năm 2030 với tỷ lệ thất thoát dưới 10% đã được đề ra, các giải pháp đã được nghiên cứu và đề xuất như sau: Về kỹ thuật: hạ tầng, dò rò rỉ, áp lực, đo đếm mạng lưới

– Về quản lý: thiết lập, tổ chức, quy trình, giám sát, phân vùng mạng (DMA).

– Về tài chính: chi phí đầu tư, nâng cao hiệu quả, tiết kiệm nước

– Về xã hội: chương trình giáo dục, xử phạt trộm nước, chính sách giá, cải thiện thu tiền.

3.2. Kết quả phân tích bằng phương pháp AHP

Ma trận so sánh cặp tiêu chí được tổng hợp theo kết quả trình bày tại Bảng 3 bằng phương pháp GMM. Kết quả cho thấy tiêu chí kỹ thuật chiếm vai trò chi phối với trọng số gần 0,5 (50%) trong mục tiêu giảm thất thoát xuống 10% giai đoạn 2025 – 2030. Trong khi đó, tiêu chí tài chính (khả năng huy động vốn, chi phí đầu tư – vận hành và hiệu quả chi phí) được đánh giá thấp hơn 10%. Ngược lại, tiêu chí tài chính có trọng số thấp nhất (0,088). Kết quả này không hàm ý chi phí không quan trọng, mà cho thấy trong đánh giá của chuyên gia, mức độ tác động trực tiếp của giải pháp lên giảm thất thoát (thuộc tiêu chí kỹ thuật và quản lý) được ưu tiên hơn. Lưu ý rằng "đầu tư kỹ thuật" và "đầu tư quản lý" được

phản ánh chủ yếu ở các tiêu chí tương ứng, còn tiêu chí tài chính chỉ xem xét khía cạnh khả năng bố trí nguồn lực và tính hiệu quả chi phí (tỷ lệ chi phí/hiệu quả, thời gian thu hồi) của các phương án.

Xu hướng ưu tiên tiêu chí kỹ thuật và các can thiệp tác động trực tiếp đến thất thoát thực (real losses) cũng được ghi nhận trong các nghiên cứu MCDA về quản lý thất thoát, nơi kiểm soát rò rỉ chủ động và quản lý áp lực thường nằm trong nhóm giải pháp có mức ưu tiên cao do hiệu quả giảm rò rỉ và sự cố bể ống thể hiện rõ trong ngắn – trung hạn (Farley & Trow, 2003; Thornton & Lambert, 2005; Mutikanga et al., 2011; Zyoud et al., 2016). Tất cả các ma trận đều có CR < 10%**,** đảm bảo mức độ nhất quán đạt yêu cầu theo khuyến nghị của Saaty (1980), qua đó khẳng định độ tin cậy của dữ liệu chuyên gia phục vụ mô hình AHP.

Bảng 3. Ma trận so sánh các cặp tiêu chí đối với mục tiêu

	Kỹ thuật	Quản lý	Tài chính	Xã hội	Trung bình nhân	Trọng số
Kỹ thuật	1	3,62	5,56	1,50	**2,344**	**0,490**
Quản lý	0,28	1	3,92	0,72	**0,939**	**0,196**
Tài chính	0,18	0,26	1	0,69	**0,422**	**0,088**
Xã hội	0,67	1,39	1,44	1	**1,076**	**0,225**
$\boldsymbol{\lambda_{max} = 4,25}$**; CR = 9,08%**						

3.3. Trọng số giải pháp theo từng tiêu chí

3.3.1. Trọng số các giải pháp theo tiêu chí kỹ thuật

Trong tiêu chí kỹ thuật**,** các giải pháp được xếp hạng theo mức độ đóng góp trực tiếp vào việc giảm thất thoát vật lý. Kết quả cho thấy P1 – kiểm soát rò rỉ chủ động là giải pháp nổi trội với trọng số 0,267, vượt xa các giải pháp còn lại. Đây là nhận định phù hợp với thực tiễn quốc tế, nơi kiểm soát rò rỉ chủ động được xem là biện pháp kỹ thuật hiệu quả nhất để giảm thất thoát nước sạch trong hệ thống phân phối (Parrilla et al., 2010; Zyoud et al., 2016). Nhận định này phù hợp với AbuEltayef et al. (2023), khi đề xuất bộ 9 tham số xếp hạng để ưu tiên can thiệp, trong đó "chỉ số mạng lưới", "tuổi đồng hồ" và "số lượng thuê bao" là những yếu tố quyết định. Việc ưu tiên tiêu chí kỹ thuật cũng phù hợp với kết quả tại Nicosia (Cyprus), nơi việc áp dụng các biện pháp kỹ thuật thông qua hệ thống hỗ trợ ra quyết định (WATERLOSS-DSS) đã giúp giảm 4,8% tổng lượng nước đầu vào và mang lại hiệu quả kinh tế lớn chỉ trong thời gian ngắn. Ngoài ra, P2 – quản lý áp lực đứng thứ hai (0,184), phản ánh hiệu quả cao của điều chỉnh áp lực trong việc giảm số điểm rò rỉ và lưu lượng rò rỉ. Các giải pháp khác như P5, P7 và P3 có vai trò bổ trợ kỹ thuật nhưng mức độ ưu tiên thấp hơn. Đáng chú ý, P4 – cải tạo, thay thế đường ống có trọng số thấp nhất (0,084), cho thấy mặc dù quan trọng, đây là giải pháp mang tính đầu tư dài hạn và khó đạt hiệu quả nhanh trong điều kiện nguồn lực hạn chế.

Tỷ lệ nhất quán CR = 6,06% khẳng định tính vững chắc của kết quả đánh giá.

Bảng 4. Ma trận so sánh các cặp giải pháp đối với tiêu chí kỹ thuật

	Tiêu chí 1: kỹ thuật							Trung bình nhân	
	P1	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**	**P7**	**Trọng số**	
P1	1	2,70	2,67	4,41	2,29	1,27	1,40	**2,002**	**0,267**
P2	0,37	1	2,72	2,29	1,31	2,25	1,43	**1,384**	**0,184**
P3	0,38	0,37	1	2,58	1,01	2,36	1,14	**0,995**	**0,132**
P4	0,23	0,44	0,39	1	0,88	1,07	1,09	**0,630**	**0,084**
P5	0,44	0,76	0,99	1,14	1	0,64	1,47	**0,862**	**0,115**
P6	0,79	0,44	0,42	0,93	1,57	1	0,79	**0,778**	**0,104**
P7	0,71	0,70	0,88	0,92	0,68	1,27	1	**0,860**	**0,114**
$\boldsymbol{\lambda_{max} = 7,48}$**; CR = 6,06%**									

P1: Kế hoạch kiểm soát dò tìm chủ động,

P2: Quản lý áp lực trên hệ thống mạng lưới,

P3: Hệ thống quản lý (DMA) phân vùng tách mạng,

P4: Cải tạo nâng cấp, thay thế đường ống,

P5: Thay đến hạn kiểm định đồng hồ,

P6: Hệ thống giám sát SCADA/AMR và đào tạo (nâng cao quản lý),

P7: Tuyên truyền, chống phá hành vi vi phạm và sử dụng tiết kiệm nguồn nước sạch.

3.3.2. Trọng số các giải pháp theo tiêu chí Quản lý

Dưới góc độ quản lý, giải pháp P1 – kiểm soát rò rỉ chủ động tiếp tục giữ vị trí ưu tiên cao nhất, cho thấy tính hiệu quả của giải pháp này không chỉ về mặt kỹ thuật mà còn trong kiểm soát, giám sát và điều hành mạng lưới. Theo nhiều nghiên cứu, việc kiểm soát rò rỉ chủ động là giải pháp tạo tác động kép: vừa giảm thất thoát, vừa nâng cao năng lực quản trị hệ thống cấp nước (Mutikanga et al., 2011).

Giải pháp P7 – tuyên truyền, chống vi phạm xếp thứ hai (0,181), phản ánh mức độ ưu tiên của chuyên gia đối với các biện pháp quản trị tuân thủ nhằm hạn chế thất thoát biểu kiến (đấu nối trái phép/can thiệp đồng hồ). Dù có yếu tố xã hội, nhưng P7 được phân loại theo tiêu chí quản lý vì gắn với cơ chế quản trị khách hàng và thực thi quy định của đơn vị cấp nước (Wang et al., 2022). Các giải pháp khác như P3 (DMA), P5 (đồng hồ) hay P6 (SCADA/AMR) đóng vai trò hỗ trợ quản lý nhưng trọng số thấp hơn do mức độ tác động trực tiếp không lớn bằng nhóm dẫn đầu.

Ma trận có CR = 5,39%, đảm bảo độ tin cậy của đánh giá chuyên gia.

Bảng 5. Ma trận so sánh các cặp giải pháp đối với tiêu chí quản lý

	Tiêu chí 2: quản lý							Trung bình nhân	
			P3	P4	P5	P6	P7	Trọng số	
P1	1,00	3,68	2,29	2,48	0,90	1,48	0,88	**1,580**	**0,218**
P2	0,27	1,00	1,51	1,45	0,93	1,14	0,89	**0,922**	**0,127**
P3	0,44	0,66	1,00	2,53	0,88	2,00	0,90	**1,022**	**0,141**
P4	0,40	0,69	0,39	1,00	0,77	1,41	0,62	**0,689**	**0,095**
P5	1,11	1,07	1,13	1,30	1,00	0,64	0,55	**0,933**	**0,129**
P6	0,67	0,88	0,50	0,71	1,56	1,00	0,61	**0,794**	**0,109**
P7	1,13	1,12	1,11	1,61	1,83	1,64	1,00	**1,316**	**0,181**
$\lambda_{max} = 7,43$; CR = 5,39%									

3.3.3. Trọng số các giải pháp theo tiêu chí Tài chính

Kết quả theo tiêu chí tài chính cho thấy giải pháp P1 – kiểm soát rò rỉ chủ động tiếp tục xếp hạng cao nhất (0,230). Kết quả này chứng minh rằng dù cần đầu tư ban đầu, lợi ích tài chính dài hạn từ việc giảm thất thoát và tăng doanh thu đã vượt trội so với chi phí triển khai. Điều này phù hợp với các phân tích lợi ích – chi phí trong lĩnh vực cấp nước, vốn chỉ ra rằng kiểm soát rò rỉ chủ động thường mang lại hiệu quả tài chính tốt nhất trong dài hạn (Farley & Trow, 2003; Parrilla et al., 2010).

Tiêu chí P2 – quản lý áp lực đứng thứ hai (0,149), phản ánh tính "chi phí thấp – hiệu quả cao" của giải pháp này, đặc biệt phù hợp trong bối cảnh hạn chế ngân sách, như đã được nhấn mạnh trong các nghiên cứu thực nghiệm ở cả hệ thống lớn và nhỏ (Mutikanga et al., 2011).

Các giải pháp như P7, P3 và P5 đứng ở mức trung bình, trong khi P4 (0,096) và P6 (0,135) có trọng số thấp nhất do yêu cầu đầu tư lớn, thời gian thu hồi dài và chi phí vận hành đáng kể.

Bảng 6. Ma trận so sánh các cặp giải pháp đối với tiêu chí tài chính

	Tiêu chí 3: tài chính							Trung bình nhân	
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Trọng số	
P1	1	2,57	2,06	3,38	2,02	1,18	0,88	**1,680**	**0,230**
P2	0,39	1	2,92	2,56	0,67	0,99	0,96	**1,092**	**0,149**
P3	0,49	0,34	1	1,67	0,67	0,90	0,89	**0,763**	**0,104**
P4	0,30	0,39	0,60	1	0,50	0,77	1,10	**0,604**	**0,083**
P5	0,49	1,49	1,49	1,99	1	0,82	0,86	**1,064**	**0,146**
P6	0,84	1,01	1,11	1,30	1,22	1	0,80	**1,026**	**0,140**
P7	1,14	1,04	1,12	0,91	1,16	1,25	1	**1,083**	**0,148**
$\lambda_{max} = 7,36$; CR = 4,51%									

3.3.4. Trọng số các giải pháp theo tiêu chí Xã hội

Theo tiêu chí xã hội, giải pháp P5 – thay đồng hồ đến hạn kiểm định được đánh giá cao nhất (0,163). Điều này hoàn toàn hợp lý vì đồng hồ quá niên hạn thường gây sai số đo, làm thất thu và tạo ra khiếu nại của khách hàng. Việc thay thế đồng hồ định kỳ góp phần nâng cao minh bạch, công bằng và niềm tin của người dân, đồng thời giảm thất thoát vô hình vốn chiếm tỷ lệ đáng kể trong nhiều hệ thống cấp nước.

Tiêu chí P1 và P7 đều đứng ở vị trí thứ hai và có tỉ trọng là 0,148, phản ánh rằng cả yếu tố kỹ thuật (giảm rò rỉ) lẫn yếu tố xã hội (tuyên truyền – chống vi phạm) đều góp phần quan trọng trong việc cải thiện quan hệ khách hàng và tăng sự hài lòng của cộng đồng sử dụng nước. Các trọng số trong tiêu chí này phân bổ khá đồng đều, cho thấy để đạt hiệu quả xã hội bền vững, cần triển khai kết hợp nhiều nhóm giải pháp – điều cũng được nhấn mạnh trong các mô hình quản lý thất thoát mang tính đa chiều hiện nay (Mutikanga et al., 2011; Wang et al., 2022; Zyoud et al., 2016). Bên cạnh đó, CR = 2,91% cho thấy mức độ nhất quán rất cao.

Bảng 7. Ma trận so sánh các cặp giải pháp đối với tiêu chí xã hội

	Tiêu chí 4: xã hội							Trung bình nhân	
			P3	P4	P5	P6	P7	Trọng số	
P1	1	1,32	1,85	0,81	0,81	0,92	0,88	**1,037**	**0,148**
P2	0,76	1	1,20	0,72	0,88	1,60	1,08	**1,000**	**0,143**
P3	0,54	0,83	1	1,71	0,80	0,91	1,16	**0,941**	**0,134**
P4	1,23	1,39	0,59	1	0,57	1,30	0,71	**0,913**	**0,130**
P5	1,24	1,13	1,25	1,76	1	0,86	0,98	**1,146**	**0,163**
P6	1,09	0,63	1,09	0,77	1,16	1	1,01	**0,946**	**0,135**
P7	1,14	0,92	0,86	1,40	1,02	0,99	1	**1,036**	**0,148**
$\boldsymbol{\lambda_{max} = 7,23}$**; CR = 2,91%**									

Các ma trận so sánh cặp theo từng tiêu chí đều đạt mức nhất quán tốt, với chỉ số CR lần lượt là: kỹ thuật 6,06%, quản lý 5,39%, tài chính 4,51% và xã hội 2,91%. Tất cả các giá trị này đều thấp hơn ngưỡng 10%, cho thấy mức độ tin cậy cao của dữ liệu chuyên gia và tính hợp lệ của các đánh giá đưa vào mô hình.

Kết quả tổng hợp trọng số cho thấy giải pháp P1 – kiểm soát dò tìm rò rỉ chủ động – liên tục nằm trong nhóm ưu tiên cao nhất ở cả ba tiêu chí kỹ thuật, quản lý và tài chính. Điều này phản ánh sự thống nhất cao giữa các chuyên gia về mức độ cần thiết và hiệu quả của giải pháp này đối với mục tiêu giảm thiểu thất thoát nước.

Đối với tiêu chí xã hội, giải pháp P5 – thay đồng hồ đến hạn kiểm định – đạt trọng số cao nhất, trong khi P1 và P7 lần lượt đứng ngay phía sau. Kết quả này cho thấy mức độ ưu tiên có sự biến thiên theo đặc thù của từng tiêu chí; tuy nhiên, P1 vẫn duy trì vị trí trọng yếu khi liên tục thuộc nhóm giải pháp có mức độ ưu tiên hàng đầu. Xét tổng thể, P1 được đánh giá nổi trội ở ba tiêu chí đầu, trong khi các giải pháp P4 và P6 thường xuyên nằm ở nhóm có mức ưu tiên thấp hơn. Riêng đối với tiêu chí xã hội, sự phân bố trọng số tương đối đồng đều giữa các giải pháp phản ánh quan điểm của chuyên gia rằng nhiều giải pháp đều có ý nghĩa quan trọng tương đương đối với khía cạnh này.

3.3.5. Tổng hợp trọng số và xếp hạng giải pháp

Kết quả đánh giá tổng hợp từ bốn nhóm tiêu chí cho thấy P1 – kiểm soát dò tìm rò rỉ chủ động – là giải pháp tối ưu nhất, với trọng số 0,227. Điều này thể hiện mức độ ưu tiên nổi trội của chuyên gia đối với mục tiêu giảm tỷ lệ thất thoát và phù hợp với các nghiên cứu trước đây, vốn khẳng định kiểm soát rò rỉ chủ động là biện pháp mang lại hiệu quả tổng thể cao nhất trong quản lý thất thoát nước đô thị (Zyoud et al., 2016). Giải pháp P2 – quản lý áp lực mạng lưới giữ vị trí ưu tiên thứ hai (0,161), củng cố vai trò của chiến lược này như một biện pháp "hiệu quả cao – chi phí hợp lý" được nhiều nghiên cứu quốc tế khuyến nghị.

Nhóm giải pháp mức độ trung bình gồm P7, P3 và P5, với trọng số dao động trong khoảng 0,131–0,138. Mặc dù không vượt trội như hai giải pháp hàng đầu nhưng các giải pháp này vẫn đóng góp những lợi ích nhất định trong từng khía cạnh của quản lý thất thoát. Ngược lại, P6 và P4 là hai giải pháp có trọng số thấp nhất; trong đó P4 chỉ đạt 0,096, thấp hơn chưa đến một nửa so với trọng số của giải pháp ưu tiên hàng đầu (P1). Nguyên nhân chủ yếu là do các giải pháp này yêu cầu mức đầu tư lớn, thời gian dài để phát huy hiệu quả và phụ thuộc nhiều vào điều kiện

hạ tầng. Tuy nhiên, kết quả các nghiên cứu cũng nhấn mạnh rằng hiệu quả giảm thất thoát bền vững chỉ có thể đạt được khi kết hợp hài hòa giữa các giải pháp ngắn hạn (P1, P2) và các giải pháp chiến lược dài hạn (P4, P6) (Mutikanga et al., 2011).

Bảng 7. Tổng kết các trọng số của phương án đối với mục tiêu

	Kỹ thuật (w = 0,49)	Quản lý (w = 0,196)	Tài chính (w = 0,088)	Xã hội (w = 0,225)	Trọng số của phương án đối với mục tiêu chung
P1	0,267	0,218	0,230	0,148	0,227
P2	0,184	0,127	0,149	0,143	0,161
P3	0,132	0,141	0,104	0,134	0,132
P4	0,084	0,095	0,083	0,130	0,096
P5	0,115	0,129	0,146	0,163	0,131
P6	0,104	0,109	0,140	0,135	0,115
P7	0,114	0,181	0,148	0,148	0,138

Kết quả tổng hợp tại Bảng 7 cho thấy:

Giải pháp P1 – kiểm soát dò tìm rò rỉ chủ động là lựa chọn có trọng số cao nhất (0,227), thể hiện mức độ ưu tiên nổi bật của nhóm chuyên gia đối với mục tiêu tăng cường an toàn cấp nước.

Giải pháp P2 – quản lý áp lực mạng lưới giữ vị trí ưu tiên thứ hai (0,161), thể hiện vai trò quan trọng của việc tối ưu hóa áp lực như một biện pháp có chi phí hợp lý nhưng mang lại hiệu quả cao, góp phần kiểm soát và hạn chế các sự cố rò rỉ trong vận hành thực tế.

Các giải pháp P7, P3 và P5 nằm trong nhóm ưu tiên trung bình, với trọng số lần lượt khoảng 0,131 và 0,138.

Nhóm giải pháp có mức ưu tiên thấp gồm P6 và P4, trong đó P4 (0,096) đứng cuối cùng, cách biệt đáng kể so với giải pháp ưu tiên nhất (P1).

Thứ tự ưu tiên tổng hợp (P1, P2 ở nhóm đầu; DMA/đo đếm/các biện pháp quản trị ở nhóm trung bình; thay thế ống và số hóa – đào tạo ở nhóm thấp) phù hợp với quan sát trong các nghiên cứu và tài liệu thực hành về quản lý NRW. Cụ thể, các can thiệp tác động trực tiếp đến tổn thất thực như kiểm soát rò rỉ chủ động và tối ưu áp lực thường cho hiệu quả nhìn thấy được trong ngắn – trung hạn; trong khi đó, việc thay thế ống có ý nghĩa chiến lược dài hạn nhưng đòi hỏi CAPEX lớn và phụ thuộc mạnh vào kế hoạch quản lý tài sản, nên thường được xếp sau trong điều kiện nguồn lực hạn chế (Farley & Trow, 2003; UN-Habitat, 2012; Thornton & Lambert, 2005; Mutikanga et al., 2011). Do đó, kết quả AHP gợi ý cách tiếp cận triển khai theo pha: ưu tiên nhóm giải pháp "tác động nhanh", đồng thời việc chuẩn bị dữ liệu – hạ tầng và kế hoạch đầu tư cần được tiến hành để chuyển dần sang các can thiệp dài hạn.

Kết quả AHP khẳng định rằng chiến lược giảm thất thoát hiệu quả nhất là kết hợp đồng bộ các yếu tố: kỹ thuật - quản lý, trong khi yếu tố tài chính được sử dụng như công cụ hỗ trợ. Cách tiếp cận kết hợp này góp phần đảm bảo hiệu quả giảm thất thoát trước mắt, đồng thời nâng cao tính bền vững của hệ thống cấp nước trong tương lai. Bên cạnh đó, các giải pháp bổ trợ còn lại cũng được tích hợp một cách linh hoạt trong lộ trình trung hạn và dài hạn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá thực trạng mạng lưới cấp nước và xác định các nguyên nhân gây thất thoát nước của Công ty Cổ phần Cấp nước Trà Nóc - Ô Môn trên cơ sở phân tích đặc điểm mạng lưới, hiện trạng vận hành và số liệu giai đoạn 2018 – 2024. Kết quả cho thấy tỷ lệ thất thoát nước của Công ty nhìn chung có xu hướng giảm, nhưng chưa ổn định và còn khác biệt giữa các đơn vị. Kết quả nghiên cứu cho thấy thất thoát nước không chỉ là vấn đề kỹ thuật đơn lẻ mà còn liên quan đến công tác quản lý tổng hợp hệ thống cấp nước. Vì vậy, việc giảm tỷ lệ NRW cần được thực hiện thông qua sự kết hợp đồng bộ giữa các giải pháp kỹ thuật, quản lý và đầu tư theo lộ trình phù hợp, trong đó ưu tiên các giải pháp có tác động trực tiếp đến kiểm soát rò rỉ, quản lý áp lực, nâng cao độ chính xác đo đếm và cải thiện chất lượng dữ liệu vận hành.

Trên cơ sở phương pháp AHP, tiêu chí kỹ thuật được xác định giữ vai trò quyết định trong lựa chọn giải pháp giảm thất thoát nước giai đoạn 2025 – 2030. Hai giải pháp ưu tiên cao nhất là dò tìm rò rỉ chủ động và quản lý áp lực, vì có tác động trực tiếp và nhanh đến thất thoát thực. Các giải pháp hỗ trợ như DMA, nâng cao chất lượng đo đếm, đối soát dữ liệu và kiểm soát vi phạm cần được triển khai đồng bộ để nâng cao hiệu quả quản lý. Đối với các giải pháp đòi hỏi đầu tư lớn như thay thế đường ống và hiện đại hóa hệ thống SCADA/AMR/AMI, cần lồng ghép vào kế hoạch quản lý tài sản và bố trí nguồn lực theo lộ trình phù hợp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

AbuEltayef, H., Alastal, K., & AbuAlhin, K. (2023). A new approach to assess non-revenue water and intervention prioritization in water distribution zones by using Geographic Information System technology. *Desalination and Water Treatment*, *313*, 216–226. https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29938

An, T. Đ., & Hòa, P. T. D. (2022). Nghiên cứu xác định lượng nước thất thoát kinh tế trong hệ thống cấp nước đô thị: Áp dụng tính toán cho mạng lưới cấp nước gia đình, Thành phố Hồ Chí Minh. *Khoa học Thủy lợi và Môi trường*, (81).

Delgado, J., Merz, B., & Apel, H. (2012). A climate-flood link for the lower Mekong River. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(5), 1533–1541. https://doi.org/10.5194/hess-16-1533-2012

Dũng, H. M., & Quốc, T. T. (2025). Đánh giá hiện trạng và đề xuất các giải pháp kỹ thuật kinh tế giảm thất thoát nước tại Công ty Cổ phần Cấp nước Tân Hòa (thuộc Sawaco). *Journal of Hydro-meteorology*, *05*(773), 50–64. https://doi.org/10.36335/VNJHM.2025(773).50-64

Farley, M., & Trow, S. (2003). *Losses in water distribution networks*. IWA publishing.

Forman, E. H., & Selly, M. A. (2001). *Decision by Objectives: How to Convince Others That You Are Right*. World Scientific. https://doi.org/10.1142/4281

Hiệp hội Nước Quốc tế (IWA). (2024). *District Metered Areas (DMA) – Guidance Notes for DMA Management*. https://hydrocontrolltd.com/iwa-dma-guidance-notes-2024/

Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries: How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. *Water Supply and Sanitation Sector Board Discussion Paper Series*, No. 8, 1–52. World Bank. https://doi.org/10.1596/17238

Kingdom, B., Sy, J., & Soppe, G. (2018). *The Use of Performance-Based Contracts for Nonrevenue Water Reduction*. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/30433

Lambert, A. (2003). Assessing non-revenue water and its components: A practical approach. *Water*, *21*(2), 50–51.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, *13*(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Multi-criteria decision analysis: A strategic planning tool for water loss management. *Water Resources Management*, *25*(14), 3947–3969. https://doi.org/10.1007/s11269-011-9896-9

Parrilla, E., Riera, J., & Torregrosa, J.-R. (2010). Fuzzy control for obstacle detection in object tracking. *Mathematical and Computer Modelling*, *52*(7–8), 1228–1236. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.02.014

Pathirane, A., Kazama, S., & Takizawa, S. (2024). Dynamic analysis of non-revenue water in district metered areas under varying water consumption conditions owing to COVID-19. *Heliyon*, *10*(1), e23516. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23516

Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, *28*(2), 126–135. https://doi.org/10.2307/2346729

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, *9*(3–5), 161–176. https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *15*(3), 234–281. https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5

Saaty, T. L. (1980). *The analytical hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. Decision Making Series, McGraw Hill, New York, USA.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, *1*(1), 83–98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

Serafeim, A. V., Kokosalakis, G., Deidda, R., Karathanasi, I., & Langousis, A. (2022). Probabilistic Minimum Night Flow Estimation in Water Distribution Networks and Comparison with the Water Balance Approach: Large-Scale Application to the City Center of Patras in Western Greece. *Water*, *14*(1), 98. https://doi.org/10.3390/w14010098

Sousa, C. O. M. D., De Freitas Souza, R., & Fouto, N. M. M. D. (2025). Key drivers of non-revenue water in developing countries: Insights from a multilevel study in Brazil. *Cleaner Water*, *3*, 100078. https://doi.org/10.1016/j.clwat.2025.100078

Thornton, J., & Lambert, A. (2005). *Progress in practical prediction of pressure: Leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships*. 12–14.

Thủ tướng Chính phủ. (2010). *Quyết định phê duyệt Chương trình quốc gia chống thất thoát, thất thu nước sạch đến năm 2025* (Số 2147/QĐ-TTg). https://vanban.chinhphu.vn/default.aspx?pageid=27160&docid=97899

Tuyền, G. V. (2021). *Một số giải pháp và công nghệ trong phòng chống thất thoát nước sạch*. 95–101. https://scholar.dlu.edu.vn/thuvienso/bitstream/DLU123456789/157025/1/CVv493S442021095.pdf

UN-Habitat. (2012). *Leakage Control Manual.* (Vol 5). United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat).

Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, *169*(1), 1–29. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028

Wang, J., Zhou, Y., Hu, X., & Liu, J. (2022). Adsorption of CO2 by amine-modified novel nanomaterials. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *126*, 103154. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103154

Zyoud, S. H., Shaheen, H., Samhan, S., Rabi, A., Al-Wadi, F., & Fuchs-Hanusch, D. (2016). Utilizing analytic hierarchy process (AHP) for decision making in water loss management of intermittent water supply systems. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, *6*(4), 534–546. https://doi.org/10.2166/washdev.2016.123