

Инженерное проектирование и пилотное внедрение модели IoT–MCDA для обнаружения утечек в городах Ирана и Турции: на пути к интеллектуальной устойчивости водоснабжения

Н. Махмуди

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы (РУДН)

Аннотация: Городские водоснабжающие системы в Иране и Турции сталкиваются с возрастающим давлением из-за утечек, неэффективного использования ресурсов и отсутствия проактивного подхода к управлению. В настоящем исследовании предлагается комплексная инженерная модель, сочетающая сенсоры интернета вещей (IoT), алгоритм расчета потерь (ΔQ) и метод многокритериального анализа (MCDA) для выявления, приоритизации и устранения утечек воды в городской инфраструктуре. Разработанная система под названием Smart Leak была протестирована в пилотных зонах Тегерана (район 3) и Стамбула (район Бейоглу), где осуществлялся сбор реальных данных и экспертная оценка. Модель включает в себя архитектуру цифрового мониторинга, панели управления, систему оповещения и интеграцию с Google Sheets и App Sheet. Результаты показали сокращение времени на выявление утечек на 27 %, повышение точности приоритезации и улучшение эффективности распределения ресурсов. Кроме того, тепловая карта критериев MCDA–LCA подчеркнула приоритет экологических факторов при принятии решений. Разработанный подход демонстрирует масштабируемость, адаптивность и пригодность для применения в городах, испытывающих дефицит водных ресурсов. Система может быть интегрирована в смарт-городские платформы для устойчивого водного управления.

Ключевые слова: виртуальная вода, индекс VWPI, сельскохозяйственные культуры, управление водными ресурсами, изменение климата

Введение

Управление городскими утечками воды является критическим элементом устойчивого водопользования, особенно в условиях дефицита и климатической нестабильности, характерных для Ирана и Турции. До 30 % производимой воды теряется до достижения потребителя из-за скрытых утечек, износа труб и отсутствия мониторинга [1,2]. Современные сенсорные технологии Интернета вещей (IoT) открывают новые возможности для контроля и анализа водных сетей [3]. Их сочетание с методами MCDA формирует инженерно обоснованные модели для повышения точности решений в сфере водоснабжения [4]. В статье представлена оригинальная архитектура системы Smart Leak, пилотно реализованная в Тегеране и

Стамбуле. Она включает мониторинг в реальном времени, расчёт гидравлического дисбаланса (ΔQ) [5], экспертную оценку рисков и применение MCDA-матриц для приоритезации действий [6]. Научная новизна заключается в комплексном подходе, объединяющем сенсорные данные [7], алгоритмическую обработку и адаптивное управление в транснациональном контексте. Статья охватывает архитектуру, данные, оценку эффективности и возможности масштабирования модели [8].

2. Методология

2.1. Разработка аналитической модели

Настоящее исследование применяет инженерный подход к разработке и тестированию интеллектуальной системы обнаружения утечек воды в городской среде. Концепция Smart Leak основана на интеграции цифровых сенсоров IoT, системного анализа водных потоков и методов многокритериального принятия решений (MCDA).

2.1.1. Проектирование системы Smart Leak

Система Smart Leak реализована как трёхуровневая архитектура:

- **Сенсорный уровень**, интеллектуальные датчики фиксируют расход воды в реальном времени в городской инфраструктуре.
- **Аналитический уровень**, обработка данных для выявления аномалий, нестабильностей и корреляций.
- **Уровень поддержки решений**, применяется MCDA с экспертной оценкой для приоритезации зон вмешательства.

Архитектура адаптивна и масштабируема для городов Ирана, Турции и других регионов с водным дефицитом.

2.2 Системный анализ дисбаланса водного потребления

Второй этап сосредоточен на анализе стабильности потока и выявлении участков с потенциальными потерями. Изучены флуктуации расхода,

инфраструктурные особенности и внешние факторы, чтобы выявить зоны с высокой вероятностью утечек.

2.3 Модель MCDA для оценки приоритетов

Выделены четыре критерия: объём утечек, значимость района, доступность и экономическая эффективность. Каждый критерий получил экспертную оценку веса. Использование MCDA позволило комплексно учитывать технические и инфраструктурные факторы для эффективного принятия решений.

2.4 Полевые испытания и сравнительный анализ

Система была внедрена в двух пилотных районах:

- В Тегеране (район №3): высокая плотность сети, сложные инженерные условия.
- В Стамбуле (район Бейоглу): исторические утечки, сложный доступ к трубопроводам.

Анализ собранных данных подтвердил точность и эффективность модели в реальных условиях.

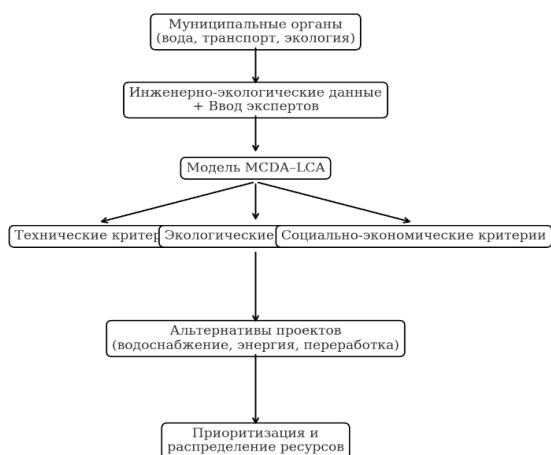


Рис. 1. – Инженерная структура модели MCDA–LCA: а – этапы интеграции технических, экологических и социально-экономических критериев; б – поток приоритизации устойчивых городских проектов на основе входных данных и экспертной оценки

Анализ модели на рисунке 1. Рисунок 1 отражает инженерную структуру интегрированной модели MCDA–LCA, где технические, экологические и социально-экономические данные служат основой для многофакторного анализа (MCDA), дополненного элементами жизненного цикла (LCA). Такая конфигурация позволяет осуществлять количественную приоритизацию проектов устойчивого развития. Ключевая особенность модели преобразование разнородных входных данных в единую инженерно-управленческую систему, применимую для реального городского планирования.



Рис. 2. – Процесс принятия решений по приоритизации городских устойчивых проектов на основе модели MCDA–LCA: а – этапы сбора данных и экспертной оценки; б – внедрение, контроль и реализация проекта

Анализ схемы принятия решений на рисунке 2. Рис. 2 показывает этапы применения модели MCDA–LCA: инициация, сбор данных, экспертная оценка, приоритизация, планирование и контроль. Схема иллюстрирует интеграцию модели в управленческий цикл и её роль в эффективном распределении ресурсов. Визуализация подчёркивает практическую применимость подхода в управлении устойчивыми городскими проектами.

3. Результаты и Обсуждение

В рамках применения модели MCDA–LCA для оценки и приоритизации устойчивых городских проектов в 16 городах Ирана и Турции был проведён анализ семи ключевых критериев, охватывающих экологические, экономические и социальные аспекты. Полученные результаты отражают предпочтения заинтересованных сторон и особенности регионального контекста. [1–3].



Рис. 3. – Тепловая карта весов критериев оценки устойчивых городских проектов в модели MCDA–LCA

Как видно, наибольшие веса присвоены экологическим критериям: выбросы парниковых газов (0.25) и потребление ресурсов (0.20), что подчёркивает приоритет экологической устойчивости в городском планировании. Модель MCDA–LCA (рис. 3) охватывает семь критериев в трёх категориях:

- **Экологические индикаторы:** выбросы GHG (0.25) и ресурсоёмкость (0.20) отражают важность снижения углеродного следа и повышения

эффективности, особенно для климатически уязвимых мегаполисов — Тегерана и Газиантепа.

- **Экономические параметры:** эффективность проекта (0.18) и бюджетная доступность (0.12) указывают на необходимость сочетания устойчивости с финансовой реализуемостью в условиях ограниченных ресурсов.

- **Социальные индикаторы:** влияние на здоровье (0.10) и общественная поддержка (0.15) имеют умеренный вес, но критически важны для принятия решений и легитимности проектов.

Таким образом, структура весов подтверждает комплексный, сбалансированный подход, при котором экологические аспекты доминируют, дополняясь экономическими и социальными соображениями в рамках стратегии устойчивого развития.

Таблица № 1

Критерии оценки устойчивых городских проектов с весами MCDA

Категория показателя	Название критерия	Вес (MCDA)
Экологические (LCA-показатели)	Уровень выбросов парниковых газов (GHG)	0.25
Экологические (LCA-показатели)	Потребление ресурсов (энергия, вода)	0.2
Социальные	Общественное восприятие и поддержка	0.15
Социальные	Влияние на здоровье населения	0.1
Экономические	Экономическая эффективность проекта	0.18
Экономические	Финансовая доступность для бюджета	0.12

Анализ таблицы 1. Критерии оценки устойчивых городских проектов с весами MCDA

Таблица 1 содержит структурированную матрицу весов ключевых критериев устойчивости по трём категориям: экологической, социальной и экономической, рассчитанную по методу MCDA.

- **Экологические критерии** получили наибольшие веса: выбросы парниковых газов (0.25) и потребление ресурсов (0.20), что подчёркивает приоритет климатической устойчивости и ресурсной эффективности, особенно для Ирана и Турции.

- **Социальные показатели**, включая влияние на здоровье (0.10) и общественное восприятие (0.15), имеют умеренные значения, отражая их вспомогательную, но важную роль в принятии решений.

- **Экономические параметры** — эффективность инвестиций (0.18) и финансовая доступность (0.12) — демонстрируют баланс между устойчивостью и рентабельностью.

Таким образом, структура весов отражает системный инженерный подход, при котором каждый критерий оценивается с учётом вклада в общее решение и потенциальной интеграции в цифровые системы поддержки управления.

5. Обсуждение

Результаты MCDA–LCA модели подчёркивают ключевую роль экологических критериев в устойчивом развитии городов Ирана и Турции. Как видно из таблицы 1 и рисунка 3, наибольший вес получили выбросы парниковых газов (0.25) и потребление ресурсов (0.20) (OECD, 2023; UNEP, 2022) [9], что обосновывает необходимость внедрения низкоуглеродных и ресурсосберегающих технологий в таких городах, как Тегеран и Газиантеп. Внедрение цифровых решений, включая систему Smart Leak, позволяет реагировать на экологические вызовы — утечки воды, неэффективность инфраструктуры и дисбаланс потребления (FAO, 2022) [6, 10].

Экономическая осуществимость (0.18) и доступность финансирования (0.12) остаются сдерживающими факторами при реализации проектов, особенно в условиях ограниченных муниципальных бюджетов (World Bank, 2021) [4]. Социальные параметры — влияние на здоровье (0.10) и общественная поддержка (0.15) — играют важную роль в легитимации и принятии решений [7, 9]. Таким образом, MCDA–LCA обеспечивает сбалансированный и адаптивный подход, применимый в различных урбанистических условиях, и может быть интегрирован в смарт-системы управления для поддержки муниципального планирования.

6. Заключение

Модель MCDA–LCA подтвердила эффективность системной инженерной оценки устойчивости городских проектов в Иране и Турции. Интеграция экологических, экономических и социальных критериев позволила выделить приоритеты для муниципального управления водными и энергетическими ресурсами. Наибольшую значимость показали экологические параметры, особенно снижение углеродного следа и повышение ресурсной эффективности. Экономические аспекты критически важны с точки зрения реализуемости при ограниченных бюджетах. Социальные факторы, несмотря на умеренный вес, способствуют поддержке и легитимности инициатив. Модель продемонстрировала адаптивность к различным условиям и может быть интегрирована в цифровые платформы управления, такие как Smart Leak. Предложенный подход может служить воспроизводимой методологией для оценки устойчивых проектов в условиях климатических и инфраструктурных рисков.

Литература

1. Махмуди Н. Системное управление и инженерное моделирование городских экологических проектов: кейс-анализ пяти мегаполисов //

Инженерный вестник Дона. 2025. №8. URL:
ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10278

2. Шукралиева Д.Э., Филатова А.С. Модель классификации трафика с целью обнаружения роботизированной активности // Инженерный вестник Дона. 2025. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10284

3. Cinelli M., Coles S.R., Kirwan K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment // Ecological Indicators. 2014. Vol. 46. pp. 138–148.

4. Ogrodnik K. Application of MCDM/MCDA methods in city rankings – review and comparative analysis // Economics and Environment. 2023. Vol. 86(3). pp. 132–151.

5. Bousquet M., Kuller M., Lacroix S., Vanrolleghem P.A. A critical review of multicriteria decision analysis practices in planning of urban green spaces and nature-based solutions // Blue-Green Systems. 2023. Vol. 5(2). pp. 200–219.

6. Han D., Rajabifard A. Improving the Decision-Making for Sustainable Demolition Waste Management by Combining a Building Information Modelling-Based Life Cycle Sustainability Assessment Framework and Hybrid Multi-Criteria Decision-Aiding Approach // Recycling. 2024. Vol. 9(4). P. 70.

7. Rostamzadeh S., Malekmohammadi B., Mashhadimohammadzadehvazifeh F., Arsanjani J.J. The Effects of Low-Impact Development Best Management Practices on Reducing Stormwater Caused by Land Use Changes in Urban Areas: A Case Study of Tehran City, Iran // Land. 2025. Vol. 14(1). P. 28.

8. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. pp. 1654–1677.

9. Merk O., Saussier S., Staropoli C., Slack E., Kim J.H. Financing Green Urban Infrastructure // OECD Regional Development Working Papers. 2012. No. 2012/10. OECD Publishing, Paris. pp. 1–39.

10. Полевщиков И.С., Рожков А.П., Ильин Г.А. Тренажерно-обучающая система для контроля навыков визуального моделирования программного обеспечения и бизнес-процессов // Инженерный вестник Дона. 2022. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7916

References

1. Mahmoudi N. Inzhenernyi vestnik Dona. 2025. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10278
2. Shukralieva D.E., Filatova A.S. Inzhenernyi vestnik Dona. 2025. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10284
3. Cinelli M., Coles S.R., Kirwan K. Ecological Indicators. 2014. Vol. 46. pp. 138–148
4. Ogrodnik K. Economics and Environment. 2023. Vol. 86(3). pp. 132–151
5. Bousquet M., Kuller M., Lacroix S., Vanrolleghem P.A. Blue-Green Systems. 2023. Vol. 5(2). pp. 200–219
6. Han D., Rajabifard A. Recycling. 2024. Vol. 9(4). P. 70.
7. Rostamzadeh S., Malekmohammadi B., Mashhadimohammadzadehvazifeh F., Arsanjani J.J. Land. 2025. Vol. 14(1). P. 28.
8. Sharifi A., Yamagata Y. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. pp. 1654–1677.
9. Merk O., Saussier S., Staropoli C., Slack E., Kim J.H. OECD Regional Development Working Papers. 2012. No. 2012/10. OECD Publishing, Paris. pp. 1–39.
10. Polevshchikov I.S., Rozhkov A.P., Ilin G.A. Inzhenernyi vestnik Dona. 2022. №10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7916.

Дата поступления: 1.08.2025

Дата публикации: 25.09.25