Disaster Prevention and Management Knowledge

Summer 2026. Vol 16. Issue 2

Research Paper

Vulnerability Assessment of Urban Water and Wastewater Physical Assets Under Man-made Disaster Scenarios: A Case Study of Hamedan City, Iran

Ali Vejdani Nozar[1], *Saeed Givehchi[1], Bahram Malekmohammadi[1]

1. Department of Disasters Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation Vejdani Nozar, A., Givehchi, S., & Malekmohammadi, B. (2026). [Vulnerability Assessment of Urban Water and Wastewater Physical Assets Under Man-made Disaster Scenarios: A Case Study of Hamedan City, Iran (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, *16*(2):174-213. https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.799.1

https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.799.1

ABSTRACT

Background and objective In recent years, the vulnerability of critical infrastructures to disasters, particularly man-made disasters, has become an important concern in disaster management and passive defense. Historical evidence shows that the vulnerability of critical urban assets can seriously undermine community security and resilience. Among these urban assets, impairment of water and wastewater systems, which are responsible for providing safe drinking water, sanitary sewage disposal, and its treatment, can have severe and irreversible social consequences, including public unrest. This study aims to develop an optimal pattern for assessing the vulnerability of water and wastewater systems' physical assets to man-made disasters in Hamedan, Iran. In recent years, the vulnerability of critical infrastructures to disasters, particularly man-made disasters, has become an important concern in disaster management and passive defense. Historical evidence shows that the vulnerability of critical urban assets can seriously undermine community security and resilience. Among these urban assets, impairment of water and wastewater systems, which are responsible for providing safe drinking water, sanitary sewage disposal, and its treatment, can have severe and irreversible social consequences, including public unrest. This study aims to develop an optimal pattern for assessing the vulnerability of water and wastewater systems' physical assets to man-made disasters in Hamedan, Iran.

Methods In this study conducted in Hamadan city, data were collected using the library method and interviews with experts. First, the layout map of the assets under study was drawn using Google Earth Pro software. After defining the evaluation criteria and preparing a questionnaire, the experts' opinions were compiled, and the criteria weights, vulnerability assessment, and asset ranking were analyzed using the Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives (SECA) decision-making method in the Lingo software. Finally, ArcGIS software was used to prepare the vulnerability zoning map for the assets.

Results System redundancy, safety and security weaknesses, and system dependency were the top three factors influencing vulnerability. By asset type, water treatment plants, water pumping stations, and surface water resources had highest rank in vulnerability. Pattern validation under three scenarios of explosion, industrial hazards, and environmental contamination showed that water treatment plants had the highest vulnerability scores in the first two scenarios, while surface water resources ranked first in the third scenario.

Conclusion The results confirm the reliability of the proposed pattern for the vulnerability of Hamadan's water and wastewater systems' assets.

Keywords Vulnerability, Man-made disasters, Urban assets, Water and wastewater, Hamedan

Article Info:

Received: 14 Aug 2025

Accepted: 30 Sep 2025

Available Online: 01 Apr 2026

* ***Corresponding Author:***

Saeed Givehchi, Associate Professor.

Address: Department of Disasters Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

Tel: +98 (912) 7622143

E-mail: givehchi@ut.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

A city cannot be considered sustainable unless it has the capacities and capabilities to reduce vulnerability and the impacts of disasters and can respond creatively to change (Otto-Zimmermann & Balbo, 2012). In the contemporary era, human communities—including cities—have generally been established and expanded in locations that remain vulnerable to various natural and human-induced hazards. Infrastructure development and the increasing interdependence and complexity of urban systems have further intensified this vulnerability. In this context, the vulnerability of a city's important, sensitive, and critical infrastructure and assets, combined with the potential occurrence of various threats, may lead to the inefficiency of the urban system during a disaster. Consequently, it can intensify public dissatisfaction—thereby generating a social crisis—and disrupt urban functions under emergency conditions. From this perspective, although potential threats to and vulnerabilities of urban assets may initially appear to constitute serious obstacles to development, it can be argued that, if—prior to the occurrence of disasters—comprehensive disaster management and a futures-oriented approach are adopted, and the probable hazards facing a city are identified while its assets are assessed and classified in terms of vulnerability, threats and vulnerabilities can be recognized not only as constraints but also as a basis for identifying latent potentials and capacities arising from disasters as opportunities for development. Subsequently, strategies can be proposed to prevent threats, reduce vulnerability, mitigate adverse impacts, and capitalize on existing opportunities to pursue regional sustainable development objectives. In this regard, the United States National Water Resources Organization defines vulnerability as weaknesses in security that, in the face of specific threats, may interrupt or disrupt service delivery. Similarly, Australian emergency management authorities define vulnerability as the degree of susceptibility and resilience of a community and its environment to hazards. In other words, vulnerability refers to system or community's propensity to sustain physical or non-physical damage as a result of any threat. Another definition describes vulnerability as a condition that makes individuals, systems, or the social fabric susceptible to, and adversely affected by, the consequences of a hazard. Such conditions may be physical, social, economic, environmental, or related to management processes (Mashhadi, 2015). Accordingly, in the specific context of urban issues, urban vulnerability refers to any weakness in an asset that enables a threat to damage or destroy that asset, lifeline, or infrastructure. Vulnerabilities may result from deficiencies in management, physical security, or operational procedures (Hellstrom, 2007; Givehchi, 2018). In fact, the consequences of attacks against infrastructure and assets by assumed threats are analyzed and evaluated based on the vulnerability level of the infrastructure in question (Jalali Farahani, 2013).

Problem statement

Although extensive research has examined urban risk assessment in relation to specific hazards—particularly natural hazards—less attention has been paid to studies in disaster management and passive defense that assess the vulnerability of urban assets to various human-induced disasters. Accordingly, developing an optimal framework for assessing the vulnerability of urban assets to human-induced disasters is an important issue in disaster management and passive defense and plays a significant role in urban planning.

In this context, the following issues constitute the main concerns of the present study:

1. How can the criteria for assessing the vulnerability of the physical assets of the infrastructure examined in this study be ranked?

2. What priorities are indicated by the vulnerability ranking of the physical assets of the target infrastructure in the study area?

3. Based on the vulnerability assessment of human-induced threats, how can the assets of the urban system under investigation be ranked?

Literature review

Kays et al. (2025) investigated flood-induced damage propagation and cascading failures in interdependent transportation and stormwater networks to identify asset vulnerabilities. Their study employed the SEFR model and two-dimensional flood simulation data generated with HEC-RAS (Kays et al., 2025).

Çal and Ciravoğlu (2025) developed an indicator-based framework for identifying building vulnerability indicators in response to sea-level rise and flooding in coastal urban areas. Their framework interprets the key vulnerability factors in relation to architectural design decisions. The research adopted a mixed methodology comprising a literature review and the Delphi method, with participation from 18 experts in architecture, urban planning, and civil engineering (Çal & Ciravoğlu, 2025).

In their systematic review entitled "cascading failures in urban infrastructure systems: a comprehensive review of disaster-chain mechanisms", Lu et al. (2025) proposed an integrated framework for understanding interdependencies, data-related challenges, and methodological limitations. By combining expert-based approaches, Bayesian networks, complex networks, numerical simulation, scenario simulation, and remote sensing, the study analyzed the vulnerability of urban engineering systems to cascading effects arising from natural hazards, including earthquakes, floods, fires, frost, and land subsidence (Lu et al., 2025).

Carbonelli et al. (2024) introduced a novel method, the building risk assessment method (BRAM), to analyze the risk posed to structures by explosive and unconventional terrorist attacks, including chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRNe) threats. The method is based on the quantitative and qualitative assessment of three key components: threat (T), vulnerability (V), and exposure (E) (Carbonelli et al., 2024).

Liu et al. (2024) proposed an integrated method for assessing urban-area risks from chemical leakage incidents within the integrated urban risk assessment (IURA) framework. This framework combines chemical-hazard simulation using Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) with social-vulnerability assessment based on GC-TOPSIS (Liu et al., 2024).

Guan et al. (2022) developed a method for assessing the risk of industrial-accident consequences and human vulnerability in urban areas and tested it in a small city in China (Guan et al., 2022). Boakye et al. (2022), by examining various natural and human-induced hazards and their effects on assets, emphasized the importance of evaluating the consequences of past disasters and forecasting their potential future impacts (Boakye et al., 2022). In his book: The role of critical infrastructure protection in national security, Lewis (2020) introduced the principles of infrastructure protection and applied the risk analysis and management for critical asset protection (RAMCAP) and mission-based risk assessment (MBRA) methods to assess and analyze risks arising from natural and human-induced threats (Lewis, 2020). Fabbri and Wood (2019) introduced and evaluated an accident-damage analysis module to assess the consequences of industrial accidents under different scenarios (Fabbri & Wood, 2019). Using a scenario-analysis approach, Kulba et al. (2017) identified critical assets, emergency situations, and management strategies for reducing human-induced hazards (Kulba et al., 2017). Lee et al. (2010) developed a five-stage program for assessing security vulnerability to chemical terrorism. The program includes asset identification, threat assessment, vulnerability analysis, risk assessment, and countermeasure development (Lee et al., 2010).

In Iran, numerous studies have assessed threats to and vulnerabilities of critical infrastructure, particularly water-supply systems. These studies include those conducted by Kazemi and Golestaneh (2014), Mashhadi and Aminivarki (2015), Modiri et al. (2016), Taghinejad and Zonemat Kermani (2016), Roodbari et al. (2017), Bakhshi Shadmehri et al. (2020), Feizi et al. (2020), Sheikhal i et al. (2020), and Omidvar and Vajdani Nozar (2021). Using methods, such as RAMCAP, AHP, ANP, HAZOP, SPSS, and risk matrices, these studies have focused on identifying threats, assessing vulnerabilities, and analyzing potential consequences. However, Fadaei's (2023) comprehensive review of 86 studies conducted between 2014 and 2023 on threats to and vulnerabilities of drinking-water supply systems in Iran indicates that, despite the identification of various emerging threats, comprehensive studies assessing the feasibility of threats, vulnerabilities, and their associated consequences remain insufficient (Fadaei, 2023).

Synthesis of the literature and the research gap

An analysis of the literature and the research gap, based on a review of international and Iranian studies, indicates that the assessment of threats to and vulnerabilities of critical infrastructure—particularly water infrastructure and dependent systems—has generally been conducted through four principal approaches:

1. Numerical modeling and simulation, including methods, such as Susceptible-Exposed-Flooded-Recovered (SEFR), Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS), and ALOHA. These approaches have been used primarily in international studies and to analyze natural phenomena, such as floods, earthquakes, and chemical leaks.

2. Indicator-based frameworks and hybrid methods, including RAMCAP, MBRA, BRAM, and IURA. These approaches integrate quantitative and qualitative data and facilitate multidimensional analysis of threats, vulnerability, and consequences.

3. Analytical and expert-based methods, including AHP, ANP, HAZOP, and the Delphi method. These methods have been used mainly to prioritize threats in specific environments.

4. Systematic and analytical review studies have been conducted to classify threats, identify vulnerability patterns, and develop general conceptual frameworks.

International studies have examined a notable diversity of hazards, including both natural and human-induced hazards, and have made extensive use of advanced simulation and scenario-modeling techniques. These studies have frequently addressed the integrated assessment of the three components of risk—threat, vulnerability, and consequences—and have also considered interdependencies among infrastructure systems.

In contrast, although Iranian studies have actively addressed threat identification and vulnerability assessment in urban water systems, they present several limiting features:

● Geographical and scale limitations: Most studies have been confined to a single city or a specific infrastructure component, such as a reservoir or dam.

● Absence of comprehensive and integrated assessment: Most studies examine only one or two risk components, and they do not adequately incorporate complete relationship among threat, vulnerability, and consequences.

● Limited use of simulation and scenario-based data: Most studies have relied on survey-based methods and statistical analyses, while model-based data have been used to a lesser extent.

● Shortage of locally adapted frameworks: Many studies have merely adopted international methods, such as RAMCAP or CARVER, with limited adaptation to local conditions and contextual characteristics.

Therefore, the principal research gap is the lack of a comprehensive, integrated, and locally adapted framework for ranking the vulnerability of urban physical assets to human-induced disasters. Such a framework should consider threat the characteristics, asset vulnerability, functional significance, and the potential consequences of disruption within the urban system.

Methods

Hamadan, a cold, mountainous city, in Western Iran with covering an area of approximately 72 km² and a population of 554,406, is the capital of Hamadan Province. The city center is situated at 48°51′ east longitude and 34°79′ north latitude, on the slopes of Mount Alvand. The city's elevation varies from approximately 1,750 to 2,100 meters above sea level across different areas, making it one of the highest-elevation urban areas in the country (Figure 1). The critical assets examined in this study comprise the city's water and wastewater infrastructure, which supplies drinking water and collects urban wastewater. The water and wastewater infrastructure includes water-supply sources; four water-treatment plants; 18 primary ground-level and elevated storage reservoirs; 12 water-pumping stations; approximately 200 km of primary water-trans-

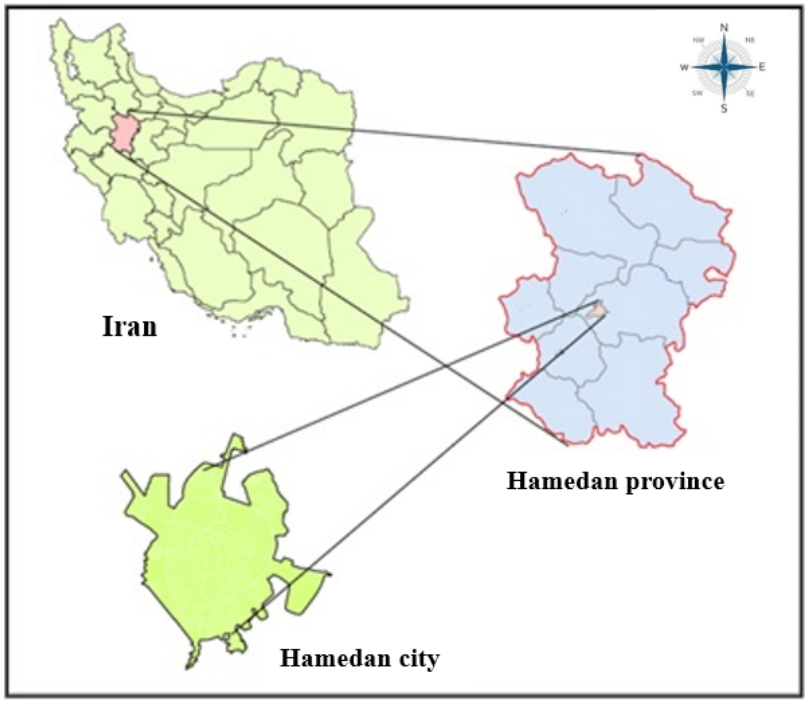


Figure 1. Geographical location of Hamadan City, Iran (Hamadan Municipality, 2017)

Table 1. General list of urban water and wastewater infrastructure assets (Behsaaz Ravesh Engineering Company, 2023)

Asset	Code	Description in Hamadan City, Iran
Surface-water sources	D1	Supply approximately 72.5% of the city's drinking water through rivers and two dams
Groundwater sources	D2	Supply approximately 27.5% of the city's drinking water through 61 wells
Water-treatment plants	D3	Four water-treatment plants: Ekbatan, Beheshti, Alvand, and Sheykhi Jan
Water-storage reservoirs	D4	Eighteen primary ground-level and elevated reservoirs
Water-pumping stations	D5	Twelve water-pumping stations
Water-transmission pipelines	D6	Approximately 293 km of transmission pipelines, including primary and secondary lines
Water-distribution network	D7	More than 1,000 km of water-distribution network
Wastewater-collection network	D8	More than 260 km of wastewater-collection network
Wastewater-transmission pipelines	D9	37 km of wastewater-transmission pipelines
Wastewater-treatment plant	D10	One wastewater-treatment plant

mission pipelines; 93 km of secondary water-transmission pipelines; more than 1,000 km of water-distribution networks; 260 km of wastewater-collection networks; 37 km of wastewater-transmission pipelines; and one wastewater-treatment plant (Table 1 and Figure 2).

The city's drinking-water demand is approximately 1,800 L/s. Of this amount, approximately 72.5% is supplied by surface-water sources through two storage dams, while less than 27.5% comes from groundwater sources through 61 wells.

In this study, the vulnerability of Hamadan's water and wastewater assets to human-induced disasters was assessed using information from documentary sources and interviews with subject-matter experts. First, the spatial-location map of the assets under investigation was developed using Google Earth Pro, as shown in Figure 2. Following the definition of assessment criteria and development of the questionnaire, expert opinions were synthesized. The criteria were weighted, asset vulnerability was assessed, and the assets were ranked using the simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA) decision-making method in the LINGO software environment. Finally, ArcGIS was used to prepare vulnerability-zoning maps for the assets.

In multi-criteria decision-making (MCDM) methods, such as SECA, the optimal number of experts for weighting criteria and ranking alternatives depends on the problem's complexity and the selected method. Vaidya and Kumar (2006) stated that, depending on criteria complexity, a panel of 3 to 10 experts may be sufficient. Skulmoski et al. (2007) considered 7 to 12 experts appropriate for moderately complex problems involving 5 to 8 criteria. Overall, recent studies suggest that the optimal number of experts generally ranges from 5 to 20 individuals (Taherdoost, 2023; Sotoudeh-Anvari, 2023).

For questionnaire-based data collection, this study recruited 20 experts from a target population comprising faculty members, specialists, technical experts, and managers in urban planning, urban design, urban management, disaster management, passive defense, and water and wastewater services. The results of the questionnaire reliability and validity analyses are as follows:

- To determine questionnaire reliability, Cronbach's α was calculated as 0.837, indicating good internal consistency. This suggests that the six criteria are internally coherent and demonstrate high measurement reliability.

- To assess data adequacy for factor analysis, the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) value was calculated as 0.812, indicating excellent sampling adequacy. In addition, the significance of Bartlett's test of sphericity ($P<0.001$) indicates that correlations among the variables were suitable for factor analysis.

- All criteria demonstrated very good factor loadings, exceeding 0.70, on a single factor. This result indicates satisfactory construct validity and shows that all six criteria strongly measure a single, unidimensional construct: overall vulnerability. This finding is fully consistent with the theoretical structure of the questionnaire, in which all criteria are considered components of the same phenomenon, namely vulnerability.

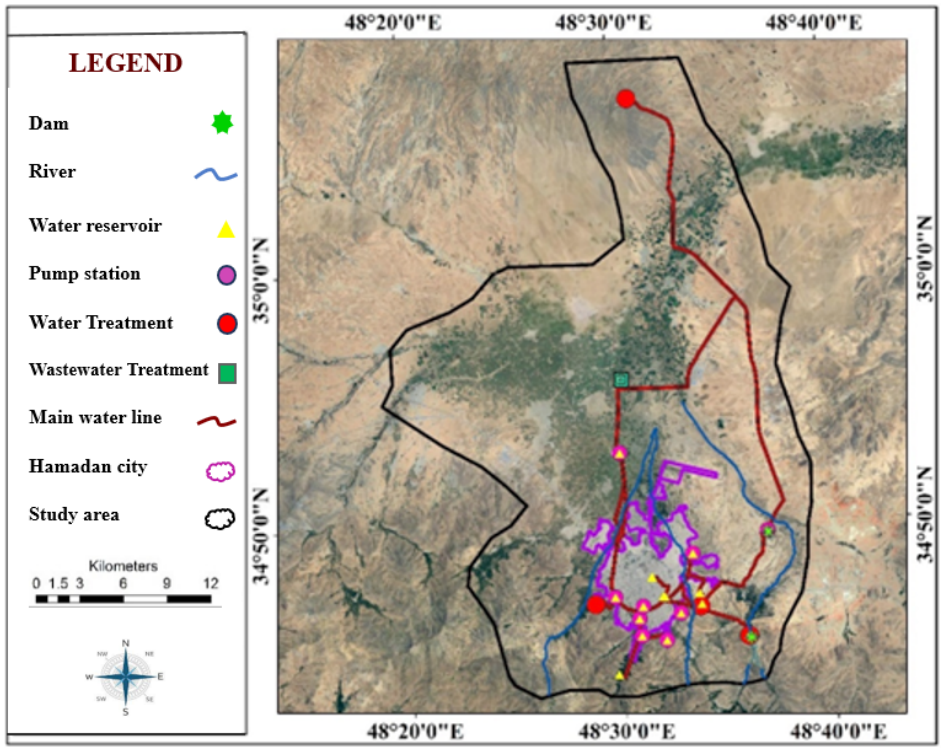


Figure 2. Map of the study area and critical water and wastewater assets in Hamadan City, Iran

Moreover, the criteria used to assess the vulnerability of urban water and wastewater physical assets to human-induced disasters were derived from the doctoral dissertation entitled "A framework for assessing consequences affecting urban assets under scenario-based human-induced disasters: the case of Hamadan City". After their initial identification and selection through a review of the theoretical foundations and related literature, the criteria were finalized using the fuzzy Delphi method, as follows:

- Inherent weakness (V1): This criterion refers to the intrinsic susceptibility of an infrastructure component or asset to damage, destruction, or functional disruption when exposed to hazards or threats. Inherent weakness is conceptually the opposite of structural strength.

- Safety and security weakness (V2): This criterion reflects inadequate consideration of safety principles in the construction and commissioning of an asset, as well as insufficient attention to its appropriate protection and security.

- Location (V3): Locating an asset in high-risk areas or near high-risk assets can increase its vulnerability, even when the asset has adequate structural strength. Such conditions may also increase the likelihood of damage propagation and impacts on other assets.

- System complexity (V4): Complexity refers to the characteristics used to describe infrastructure and assets, including their form, configuration, topology, and architecture. The more complex these characteristics are, and the greater the interconnections among system components, the more vulnerable the infrastructure or asset is likely to be.

- System interdependency (V5): System interdependency refers to the relationships and mutual effects among the performance or failure of the primary and secondary components of an infrastructure or asset, as well as its relationships with other infrastructures and assets. This criterion encompasses both internal and external interdependencies. Greater interdependency increases as asset's complexity and vulnerability and may cause failures to propagate across other components and assets. System interdependencies may be functional, physical, geographical, logical—particularly dependence on human-resource performance—or informational. The modernization of society, characterized by interconnections and mutual influences among various assets, is a principal driver of system interdependency. These interdependencies, in turn, generate infrastructure and asset complexity, which constitutes a major source of vulnerability, consequences, and risk when disasters occur.

● Redundancy (V6): Redundancy refers to provisions embedded in infrastructure and assets that support continued operation or compensate for failure when disruptions or damage occur (Vajdani Nozar, 2025).

The principal difference between the SECA method used in this study and other comparable methods is that, in many conventional ranking approaches, criterion weights are first calculated using a separate weighting method and then introduced into the ranking model as inputs. In SECA, however, criterion weighting and alternative ranking are performed simultaneously. This characteristic can improve the coherence and precision of the assessment results. Furthermore, SECA accommodates both qualitative and quantitative criteria, which enhances its flexibility in addressing complex decision-making problems (Keshavarz-Ghorabaee et al., 2018).

The steps of the SECA method are presented below.

Formation of the decision framework

The first step in multi-criteria decision-making methods is to construct the decision framework. The decision framework is a row–column matrix in which the columns represent the decision criteria and the rows represent the alternatives to be ranked. Each cell of the matrix contains the evaluation of an alternative with respect to a particular criterion.

Normalization of the decision framework

In this stage, Equation 1 is used to normalize beneficial criteria, whereas Equation 2 is used for cost criteria. In these equations, i denotes the row and j denotes the column of the decision framework. The BC includes beneficial or positive criteria, while NC includes cost or negative criteria:

1&2.

$$X_{ij}^{N}=\begin{cases}\dfrac{X_{ij}}{\max_k X_{kj}} & \text{if} \quad j \in BC,\\ \dfrac{\min_k X_{kj}}{X_{ij}} & \text{if} \quad j \in NC,\end{cases}$$

Formulation of the optimization model

Suppose that

$V_j=[X_{ij}^{N}]_{n\times 1}$ represents the vector associated with the j-th criterion. The standard deviation of each vector, σj, indicates the internal variability of the information contained in that vector. To obtain the inter-criteria information in the decision framework, the correlation between every pair of vectors must be calculated. In this context, rjl denotes the correlation between the j-th and l-th criterion vectors. The overall value of πj represents the degree of conflict between the j-th criterion and the other criteria and is calculated using Equation 3:

3.

$$\pi_j=\sum_{l=1}^{m}(1-r_{jl})$$

An increase in the variability of a criterion vector, σj, and an increase in the degree of divergence between criterion j and the other criteria, πj, indicate a greater importance—or weight—for that criterion. Accordingly, the normalized values of σj and πj are defined as reference points for determining the criterion weights. These values are calculated using Equations 4 and 5:

4.

$$\sigma_j^{N}=\frac{\sigma_j}{\sum_{l=1}^{m}\sigma_l}$$

5.

$$\pi_j^{N}=\frac{\pi_j}{\sum_{l=1}^{m}\pi_l}$$

Based on the above explanation, the following multi-objective optimization model is formulated:

6.

$$\text{Max } S_i=\sum_{j=1}^{m} W_j X_{ij}^{N},\quad \forall_i \in \{1,2,\ldots n\}$$

7.

$$\text{Min } \lambda_b=\sum_{j=1}^{m}(W_j-\sigma_j^{N})^2$$

8.

$$\text{Min } \lambda_c=\sum_{j=1}^{m}(W_j-\pi_j^{N})^2$$

9.

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^{m} W_j=1$$

10.

$$\leq 1 \ , \forall_j \in \{1,2,\ldots,m\} W_j$$

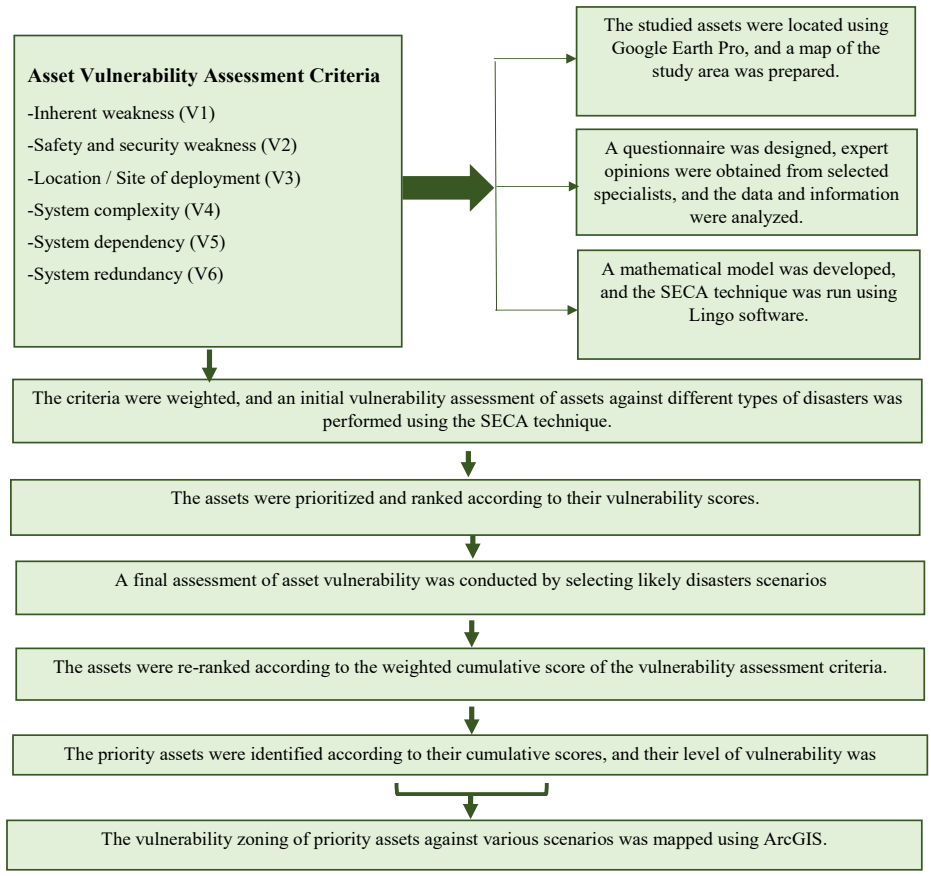


Figure 3. Vulnerability assessment model for urban physical assets in the face of different types of disasters

11.

$$\geq , \forall_j \ \epsilon \ \{1,2,\ldots,m\} W_j$$

Equation 6 maximizes the overall performance of each alternative. Equations 7 and 8 minimize the deviations of the criterion weights from their reference points based on standard deviation and correlation, respectively. Equation 9 ensures that the sum of the criterion weights is equal to one. Equations 10 and 11 constrain the criterion weights to the interval between ε\varepsilonε and 1. Here, ε\varepsilonε is considered a small positive parameter representing the lower bound of the criterion weights. The above multi-objective model can be transformed into a single-objective model. According to Equation 12, the minimum overall performance score of the alternatives is maximized. Since deviations from the reference points must be minimized, they are subtracted from the objective function using the coefficient β\betaβ. This coefficient represents the importance assigned to achieving the reference points for the criterion weights. Equation 13 defines a lower bound for the overall performance score of each alternative, Si. Equation 14 calculates the weighted sum of the normalized decision-matrix entries. Equations 15 and 16 calculate the total squared deviations of the criterion weights from the reference points based on the standard deviation and correlation measures, respectively. Equation 17 specifies that the sum of the weights must equal one, while Equations 18 and 19 constrain the resulting weights to the interval from 0 to 1, that is, to be greater than zero as well.:

12.

$$\text{Max } Z = \lambda_a - \beta(\lambda_b + \lambda_c),$$

13.

$$\text{s.t. } \lambda_a \leq S_i , \ \forall_i \ \epsilon \ \{1,2,\ldots n\}$$

14.

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} W_j X_{ij}^{N} , \quad \forall_i \ \epsilon \ \{1,2,\ldots n\}$$

15.

$$\lambda_b = \sum_{j=1}^{m} (W_j - \sigma_j^N)^2,$$

16.

$$= \sum_{j=1}^{m} (W_j - \pi_j^N)^2 \lambda_c$$

17.

$$= 1 \sum_{j=1}^{m} W_j$$

18.

$$W_j \leq 1 \ , \forall_j \ \epsilon \ \{1,2,\ldots,m\}$$

19.

$$W_j \geq \ , \forall_j \ \epsilon \ \{1,2,\ldots,m\}$$

Definition of the variables in Equations 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, and 19.

The definitions of the variables used in Equations 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, and 19 are presented below:

λ_a: minimum score of each alternative

λ_b: total deviation of each criterion weight from the normalized standard deviation

λ_c: total deviation of each criterion weight from the normalized correlation

β: subtraction coefficient from the overall objective function

W_j: weight of criterion

X_{ijN}: normalized entry in row i and column j of the initial decision matrix

S_i: score of each alternative

m: number of criteria

ε: small positive parameter

r_{jl}: correlation between the j-th and l-th vectors

It should be noted that, in this study, expert judgments were used to analyze the criteria related to the vulnerability assessment of urban water and wastewater assets in response to human-induced disasters and to prepare the data. Accordingly, based on the qualitative description of each criterion, a five-point scale from 1 to 5 was employed, as shown in Table 2. After designing and distributing the questionnaire to the experts, the required data were collected. The responses were then aggregated using the arithmetic mean and used in the SECA analysis. In addition, the vulnerability levels (V) of the assets in response to human-induced disasters were defined and applied in the assessment based on expert opinions as follows:

Low level: $1 \leq V \leq 2$

Moderate level: $2 < V \leq 3$

High level: $3 < V \leq 4$

Critical level: $4 < V \leq 5$

Moreover, since one of the aims of the research is to present a model that, in addition to achieving its practical objective, can also be generalized to similar studies in other regions, the assessment model used in this study was developed by adapting and synthesizing existing research and previous studies, some of which were also reviewed in this work, as shown in Figure 3.

Results

Considering the comprehensive list of urban water and wastewater system assets in Table 2 and their identification and spatial distribution within the study area (Figure 2), the asset vulnerability criteria were weighted. These criteria included inherent weakness, safety and security weakness, location, complexity, system dependency, and redundancy. Subsequently, the assets were classified according to their vulnerability to human-made disasters using the SECA method and LINGO software. To this end, a decision matrix comprising 10 assets and 6 criteria was initially developed based on expert judgments and the synthesized information collected. In this matrix, the rows represent the ten assessed assets, whereas the columns correspond to the six vulnerability criteria.

Thereafter, following the SECA method equations, the decision matrix was normalized, the values of π_j were calculated, and the normalized values of σ_j and π_j were determined. Tables 3, 4, 5, and 6 present the results of these procedures.

Subsequently, a nonlinear optimization model was formulated based on the optimization framework specified in Equations 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, and 19, and solved using LINGO software. In this model, the optimization procedure was performed for β values ranging from 0.1 to 7. For each run, the weights of the criteria and the scores assigned to each intentional human-made disaster threat were estimated. Tables 7 and 8 present the estimated criterion weights and threat scores for different values of β. Figures 4 and 5 show these results.

Table 2. Criteria for assessing the vulnerability of urban water and wastewater assets to human-induced disasters

Criterion Impact Level	Criterion	Qualitative Description	Score
Very low	Inherent weakness	The asset has an adequate inherent level of resistance and structural strength against various threats; it complies with relevant standards and strengthening principles and is regularly inspected and updated.	1
	Safety and security weakness	The asset's safety and security measures comply with relevant standards and appropriate practices and are regularly inspected and updated.	
	Location	The asset is located such that, if it is damaged, the potential for damage to spread beyond its immediate location is very low.	
	System complexity	The asset consists of a single component; therefore, it has very low complexity.	
	System interdependency	The asset is largely self-reliant and has very limited dependency on other assets; its failure does not disrupt the operation of other assets.	
	Redundancy	In the event of asset failure or damage, an automatic replacement or backup is available.	
Low	Inherent weakness	The asset's inherent resistance and structural strength against various threats comply with relevant standards and strengthening principles; however, inspection and monitoring are performed only periodically.	2
	Safety and security weakness	The asset's safety and security measures are based on applicable standards and appropriate practices; however, they are inspected and monitored only periodically.	
	Location	The asset is located such that, if it is damaged, the potential for damage to spread beyond its immediate location is low.	
	System complexity	The asset consists of a limited number of components; therefore, it has low complexity.	
	System interdependency	The components of the asset have limited interdependency with one another and with other assets; if damaged, the asset causes only minor disruption to the functioning of other assets.	
	Redundancy	A replacement or backup is available in the event of damage; however, bringing it into operation requires some time.	
Moderate	Inherent weakness	Although the asset's inherent resistance and structural strength against various threats comply with relevant standards and strengthening principles, they are not inspected or monitored.	3
	Safety and security weakness	Although the asset's safety and security measures are based on relevant standards and appropriate practices, they are not inspected or monitored.	
	Location	The asset is located such that, if it is damaged, the potential for damage to spread beyond its immediate location is moderate.	
	System complexity	The asset consists of a considerable number of components; therefore, it has moderate complexity.	
	System interdependency	The components of the asset have considerable interdependency with one another and with other assets; if damaged, the asset causes moderate disruption to the functioning of other assets.	
	Redundancy	Although a replacement or backup is available in the event of damage, it has not been planned or arranged in advance.	
High	Inherent weakness	The asset's inherent resistance and structural strength against various threats are not at an ideal level, and the asset has exceeded its useful service life.	4
	Safety and security weakness	The asset's safety and security measures are traditional or outdated.	
	Location	The asset is located such that, if it is damaged, the potential for damage to spread beyond its immediate location is high.	
	System complexity	The asset consists of numerous components; therefore, it has high complexity.	
	System interdependency	The components of the asset have high interdependency with one another and with other assets; if damaged, the asset causes substantial disruption to the functioning of other assets.	
	Redundancy	No replacement or backup is available in the event of damage, and repairing the asset is time-consuming.	
Very high	Inherent weakness	The asset lacks an acceptable level of inherent resistance and structural strength against various threats and has substantially exceeded its useful service life.	5
	Safety and security weakness	The asset's safety and security measures are traditional, fail to comply with relevant principles, and exhibit evident deficiencies.	
	Location	The asset is located such that, if it is damaged, the potential for damage to spread beyond its immediate location is very high.	
	System complexity	The asset consists of a very large number of components; therefore, it has very high complexity.	
	System interdependency	The components of the asset have very high interdependency with one another and with other assets; if damaged, the asset causes very substantial disruption to the functioning of other assets.	
	Redundancy	No replacement or backup is available in the event of damage, and repair of the asset depends on foreign countries.	

Table 3. Decision matrix

Decision matrix	V1	V2	V3	V4	V5	V6
D1	3.3	3.7	3.2	3.2	3.5	2.5
D2	1.9	2.7	1.2	1.3	2.1	1.1
D3	4.2	3.9	4.7	4.8	4.6	3.9
D4	2.2	2.3	3.9	2.7	3.1	3.4
D5	4.0	3.3	3.6	4.2	3.9	3.4
D6	2.9	2.8	2.8	3.0	3.3	3.5
D7	3.1	2.2	2.6	2.7	2.1	4.0
D8	2.3	2.3	2.4	2.1	1.8	4.0
D9	2.4	2.5	2.0	2.1	1.9	3.5
D10	3.0	2.6	2.2	3.0	2.8	4.2

As indicated by both the tables and figures, the results converge at values of β>4, with only negligible subsequent variations. Therefore, β=4 was considered the convergence value, at which the criterion weights and asset vulnerability scores stablize the problem under investigation. Accordingly, the final criterion weights and the asset vulnerability scores were estimated at β=4. Tables 9 and 10 present the corresponding results, and Figures 6 and 7 graphically show the results. Among the evaluation criteria, redundancy received the highest priority, with a weight of 0.2467. Safety and security weaknesses and dependency ranked second and third, respectively. With regard to the assessed assets, water treatment plants ranked first in vulnerability, followed by water pumping stations in second place and surface water resources in third place.

Discussion

Finally, in line with the study's main objective, the final vulnerability assessment of Hamedan City's water and wastewater assets against human-made disasters was conducted under three plausible scenarios: explosion, industrial hazards, and environmental pollution. By incorporating the weighting coefficients of the assessment criteria and obtaining updated expert judgments, the results were derived as presented in Tables 11, 12, and 13. These find-

Table 4. Normalized decision matrix

Normalized matrix	V1	V2	V3	V4	V5	V6
D1	0.786	0.949	0.681	0.667	0.761	0.595
D2	0.452	0.692	0.255	0.271	0.457	0.262
D3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.929
D4	0.524	0.590	0.830	0.563	0.674	0.810
D5	0.952	0.846	0.766	0.875	0.848	0.810
D6	0.690	0.718	0.596	0.625	0.717	0.833
D7	0.738	0.564	0.553	0.563	0.457	0.952
D8	0.548	0.590	0.511	0.438	0.391	0.952
D9	0.571	0.641	0.426	0.438	0.413	0.833
D10	0.714	0.667	0.468	0.625	0.609	1.000

Table 5. Values of πj

Values of π_j	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
V1	0.000	0.249	0.303	0.051	0.192	0.622	1.417
V2	0.249	0.000	0.434	0.274	0.168	1.173	2.298
V3	0.303	0.434	0.000	0.138	0.162	0.602	1.639
V4	0.051	0.274	0.138	0.000	0.092	0.555	1.110
V5	0.192	0.168	0.162	0.092	0.000	0.888	1.502
V6	0.622	1.173	0.602	0.555	0.888	0.000	3.839

ings were then implemented in the GIS environment, and the spatial vulnerability zoning maps of Hamedan's urban water and wastewater assets were produced, as shown in Figures 8, 9, and 10.

The results indicate that, for explosion (Scenario 1) and industrial hazards (scenario 2), the city's water treatment plants ranked first, with a score of 4.1865, and, according to the defined vulnerability levels, fell within the critical category. In the case of environmental pollution (scenario 3), however, the surface water resources ranked first with a score of 3.6969 and were classified within the high vulnerability level, indicating the need for safety measures and vulnerability-reduction actions.

Conclusion

In this study, the vulnerability of the water and wastewater assets of Hamedan City—one of the most important cities in western Iran—to human-made disasters was assessed using an optimization-model-based approach. The results of the preliminary vulnerability assessment of the physical assets of the water and wastewater system, conducted using the integrated simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA)– geographic information system method, indicated that, among the vulnerability assessment criteria, system redundancy, with a weight of 0.2467, safety and security weakness, with a weight of 0.1806, and system dependency, with a weight of 0.1532, ranked first to third, respectively. Among the physical assets, water treatment plants, water pumping stations, and surface water resources ranked first to third in terms of vulnerability, respectively.

To validate the proposed operational model, the vulnerability of Hamedan's water and wastewater assets was reassessed under three plausible scenarios: explosion, industrial hazards, and environmental pollution. The results showed that the city's water treatment plants, with a score of 4.1865, constituted the highest-priority asset and ranked first under both the explosion scenario (scenario 1) and the industrial hazards scenario (scenario 2). under the environmental pollution scenario (scenario 3), surface water resources, with a score of 3.6969, were identified as the highest-priority asset and ranked first.

The consistency of these findings with the preliminary assessment results, as well as with field observations and findings from other available studies, demonstrates the accuracy and validity of the model applied in this research.

Table 6. Normalized values of πj and σj

Normalized values of π_j and σ_j	Normal σj	Normal
V1	0.1522	0.1200
V2	0.1298	0.1947
V3	0.1824	0.1388
V4	0.1784	0.0941
V5	0.1719	0.1272
V6	0.1853	0.3252

Table 7. Criterion weights for different values of β

Criteria Weights	β											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	4	5	6	7
V1	0.1462	0.1926	0.1810	0.1697	0.1630	0.1496	0.1425	0.1219	0.1395	0.1388	0.1383	0.1380
V2	0.6734	0.5188	0.4071	0.3459	0.3092	0.2357	0.1990	0.2124	0.1806	0.1769	0.1745	0.1727
V3	0.0010	0.0010	0.0413	0.0711	0.0890	0.1248	0.1427	0.1111	0.1517	0.1534	0.1546	0.1555
V4	0.0010	0.0010	0.0303	0.0568	0.0727	0.1045	0.1204	0.1052	0.1283	0.1299	0.1310	0.1317
V5	0.0912	0.2123	0.1986	0.1863	0.1790	0.1643	0.1569	0.1137	0.1532	0.1525	0.1520	0.1517
V6	0.0873	0.0743	0.1418	0.1701	0.1872	0.2212	0.2384	0.3357	0.2467	0.2484	0.2496	0.2504

Table 8. Vulnerability scores of assets for different values of β

Vulnerable Resource Score	β											
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	4	5	6	7
D1	0.8766	0.8508	0.8124	0.7910	0.7782	0.7525	0.7397	0.7295	0.7333	0.7320	0.7312	0.7305
D2	0.5971	0.5631	0.5101	0.4793	0.4608	0.4239	0.4053	0.3989	0.3961	0.3943	0.3931	0.3922
D3	0.9938	0.9947	0.9899	0.9879	0.9867	0.9843	0.9831	0.9762	0.9825	0.9824	0.9823	0.9822
D4	0.6074	0.6117	0.6350	0.6474	0.6549	0.6697	0.6772	0.6892	0.6809	0.6816	0.6821	0.6825
D5	0.8585	0.8641	0.8580	0.8542	0.8519	0.8473	0.8449	0.8412	0.8438	0.8436	0.8434	0.8433
D6	0.7236	0.7207	0.7212	0.7187	0.7172	0.7141	0.7127	0.7297	0.7119	0.7117	0.7116	0.7116
D7	0.6135	0.6036	0.6288	0.6388	0.6448	0.6568	0.6628	0.7020	0.6658	0.6664	0.6668	0.6671
D8	0.5971	0.5663	0.5863	0.5931	0.5972	0.6054	0.6095	0.6590	0.6115	0.6119	0.6122	0.6124
D9	0.6263	0.5929	0.5953	0.5925	0.5908	0.5875	0.5859	0.6258	0.5850	0.5849	0.5847	0.5847
D10	0.6974	0.6882	0.7017	0.7043	0.7058	0.7089	0.7105	0.7514	0.7113	0.7114	0.7115	0.7116

Table 9. Ranking of asset vulnerability assessment criteria based on their obtained weights

Criterion	Criterion Code	Weight	Rank
Inherent weakness	V1	0.1395	5
Safety and security weakness	V2	0.1806	2
Location	V3	0.1517	4
Complexity	V4	0.1283	6
Dependency	V5	0.1532	3
Redundancy	V6	0.2467	1

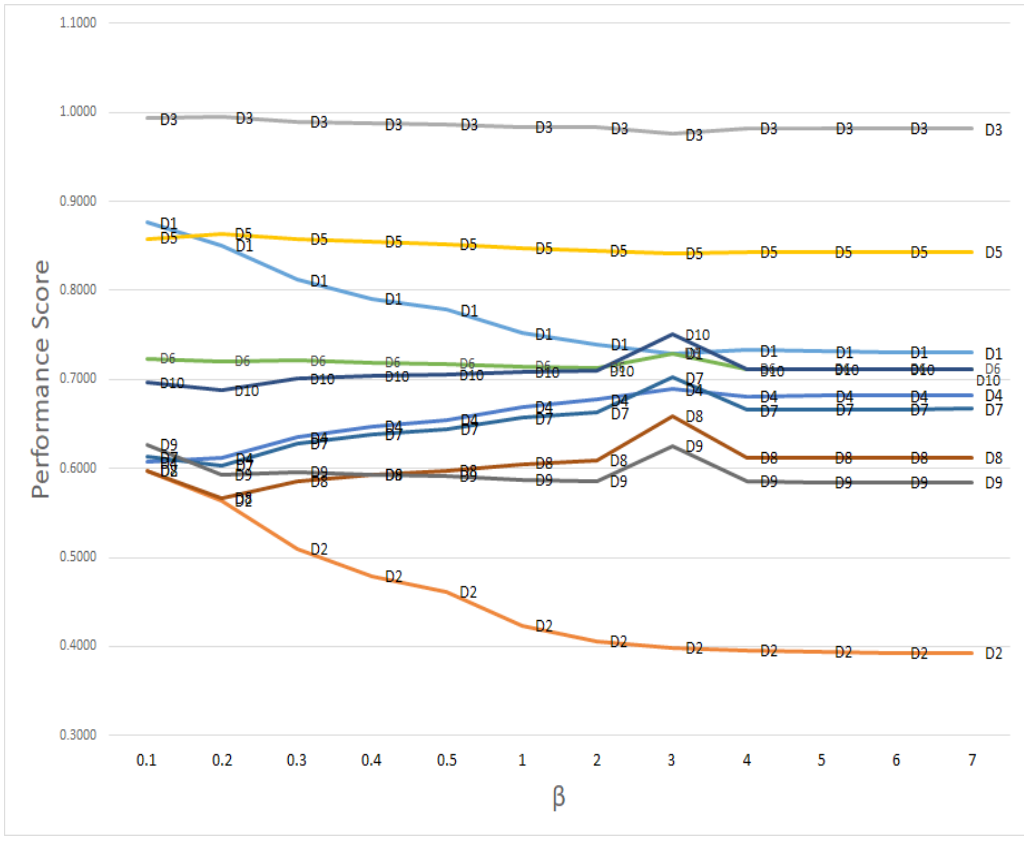


Figure 4. Variations in criterion weights for different values of β

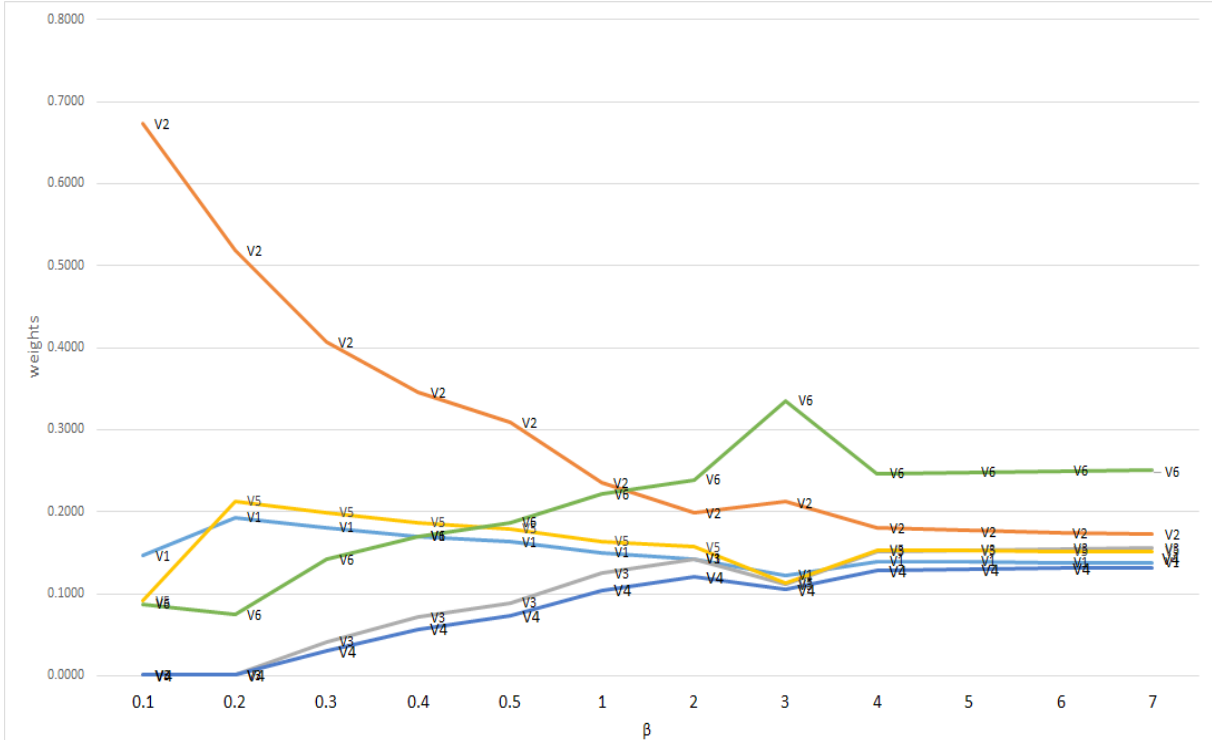


Figure 5. Variations in vulnerability scores of assets for different values of β

Table 10. Initial vulnerability scores and rankings of assets

Asset	Code	Score	Rank
Surface water resources	D1	0.7333	3
Groundwater resources	D2	0.3961	10
Water treatment plants	D3	0.9825	1
Water storage reservoirs	D4	0.6809	6
Water pumping stations	D5	0.8438	2
Water transmission lines	D6	0.7119	4
Water distribution network	D7	0.6658	7
Wastewater collection network	D8	0.6115	8
Wastewater transmission lines	D9	0.5850	9
Wastewater treatment plants	**D10**	**0.7113**	**5**

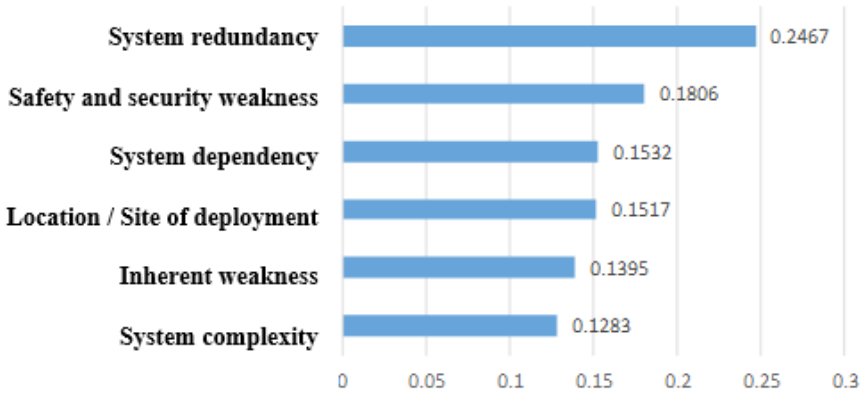


Figure 6. Ranking of asset vulnerability assessment criteria based on their obtained weights

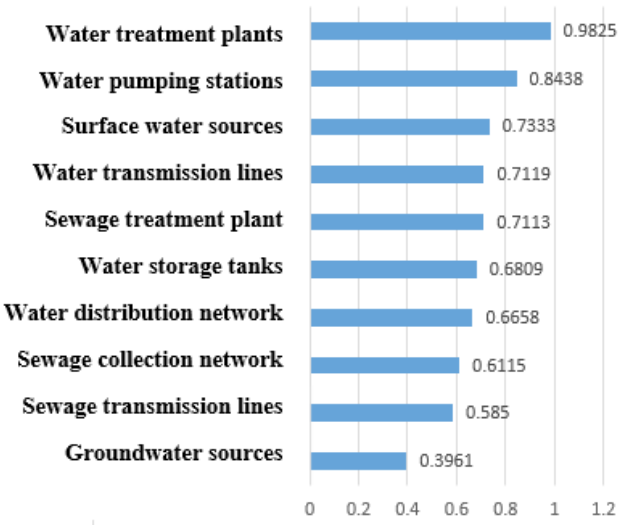


Figure 7. Initial ranking of assets based on vulnerability and obtained scores

Table 11. Final vulnerability assessment of Hamedan urban water and wastewater assets in response to explosion (scenario 1)

Hazard / Threat	Assets	Intrinsic Vulnerability	Safety and Protective Vulnerability	Location	System Complexity	System Dependency	Redundancy	Vulnerability Level Low: 1≤V≤2 Moderate: 2<V≤3 High: 3<V≤4 Critical: 4<V≤5	Asset Ranking (Rank)
		0.1395	0.1806	0.1517	0.1283	0.1532	0.2467	Final Score	
Man-made – explosion	Surface water sources	3	4	3	3	3	2	2.9339	5
	Groundwater sources	2	3	2	3	3	2	2.4621	8
	Water treatment plants	4	4	5	5	5	3	4.1865	1
	Water storage reservoirs	2	3	4	3	3	3	3.0122	4
	Water pumping stations	4	3	4	5	5	4	4.1009	2
	Water transmission lines	2	2	3	3	3	3	2.6799	6
	Water distribution network	2	2	3	2	2	4	2.6451	7
	Wastewater collection network	2	2	2	2	2	3	2.2467	9
	Wastewater transmission lines	2	2	2	2	2	3	2.2467	10
	Wastewater treatment plant	3	3	3	3	3	5	3.4934	3

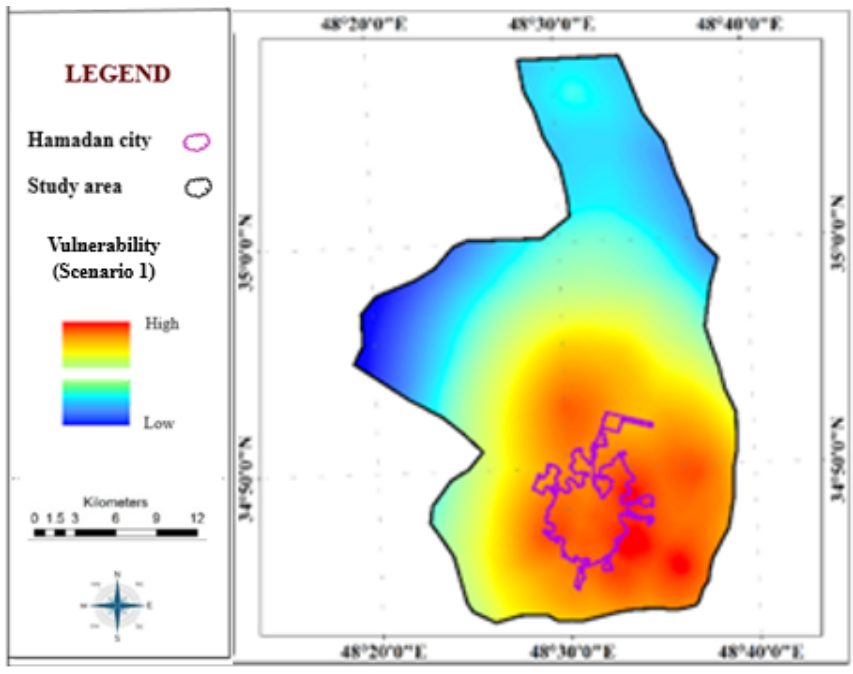


Figure 8. Vulnerability zoning map of Hamedan's urban water and wastewater assets in response to explosion (scenario 1)

Table 12. Final assessment of the vulnerability of Hamedan City's water and wastewater assets to industrial hazards (scenario 2)

Hazard/ Threat	Assets	Intrinsic Vulnerability	Safety and Protective Vulnerability	Location	System Complexity	System Dependency	Redundancy	Vulnerability Level Low: 1≤V≤2 Moderate: 2<V≤3 High: 3<V≤4 Critical: 4<V≤5	Asset Ranking (Rank)
		0.1395	0.1806	0.1517	0.1283	0.1532	0.2467	Final Score	
Man-made – industrial hazards	Surface water sources	4	4	3	3	3	2	3.0734	4
	Groundwater sources	2	1	2	3	3	2	2.1009	9
	Water treatment plants	4	4	5	5	5	3	4.1865	1
	Water storage reservoirs	2	2	4	3	3	3	2.8316	5
	Water pumping stations	4	3	4	5	5	4	4.1009	2
	Water transmission lines	2	2	2	3	3	3	2.5282	6
	Water distribution network	1	2	3	2	2	4	2.5056	7
	Wastewater collection network	1	2	2	2	2	3	2.1072	8
	Wastewater transmission lines	1	2	1	2	2	3	1.9555	10
	Wastewater treatment plant	3	3	2	3	3	5	3.3417	3

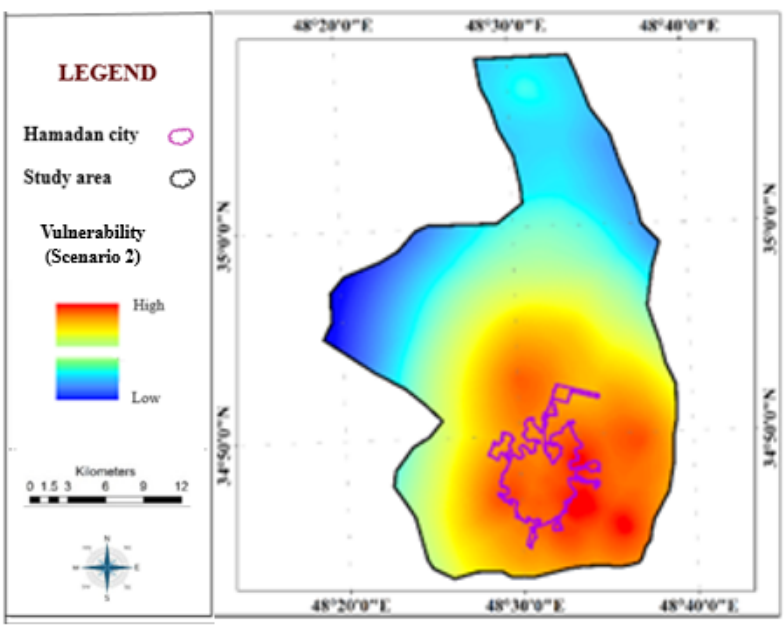


Figure 9. Vulnerability zoning map of Hamedan's urban water and wastewater assets in response to industrial hazards (scenario 2)

Table 13. Final assessment of the vulnerability of Hamedan City's water and wastewater assets to environmental pollution (scenario 3)

Hazard / Threat	Assets	Intrinsic Vulnerability	Safety and Protective Vulnerability	Location	System Complexity	System Dependency	Redundancy	Vulnerability Level Low: 1≤V≤2 Moderate: 2<V≤3 High: 3<V≤4 Critical: 4<V≤5	Asset Ranking (Rank)
		0.1395	0.1806	0.1517	0.1283	0.1532	0.2467	Final Score	
Intentional man-made – environmental pollution	Surface water sources	5	5	5	3	3	2	3.6969	1
	Groundwater sources	3	2	2	3	3	2	2.4210	5
	Water treatment plants	3	3	3	5	5	3	3.5630	2
	Water storage reservoirs	2	1	2	3	3	3	2.3476	6
	Water pumping stations	3	1	1	5	5	4	3.1451	3
	Water transmission lines	2	1	1	3	3	3	2.1959	7
	Water distribution network	2	1	1	2	2	4	2.1611	8
	Wastewater collection network	1	1	1	2	2	3	1.7749	9
	Wastewater transmission lines	1	1	1	2	2	3	1.7749	10
	Wastewater treatment plant	1	1	1	3	3	5	2.5498	4

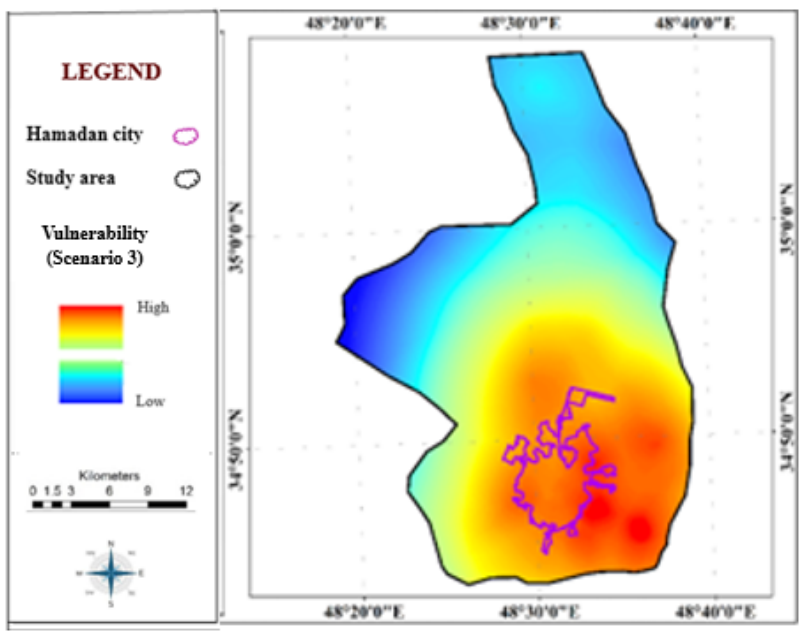


Figure 10. Vulnerability zoning map of Hamedan's urban water and wastewater assets in response to environmental pollution (scenario 3)

Furthermore, based on the implementation of the model in Hamedan City, the main innovations of the proposed model are as follows:

1. Identification of context-specific vulnerability assessment criteria and their weighting through a multistage screening process based on expert judgments.

2. Application of the simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA) method as an indigenous Iranian method for assessing the vulnerability of assets to disasters.

3. Development of a new structure and process for scenario formulation.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

In this study, all ethical principles were observed. No experiments on human or animal samples were conducted. Therefore, no ethical approval code was needed.

Funding

This article was extracted from a doctoral dissertation in Disaster Engineering at the University of Tehran. This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authors' contributions

Conceptualization, methodology, investigation, data collection, and formal analysis, and initial draft preparation: Ali Vejdani Nozar; review and editing: Saeed Givehchi and Bahram Malekmohammadi; Supervision and project administration: Saeed Givehchi; Final approval: All authors.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors thank all experts who participated in this study for providing valuable information and insights.

فصلنامه علمی
دانش پیشگیری و مدیریت بحران

مقاله پژوهشی

ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی آب و فاضلاب شهری در مواجهه سناریومحور با سوانح انسان‌ساخت با مطالعه موردی شهر همدان

علی وجدانی نوذر[۱]، *سعید گیوه‌چی[۱]، بهرام ملک‌محمدی[۱]

۱. گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Use your device to scan and read the article online

Citation Vejdani Nozar, A., Givehchi, S., & Malekmohammadi, B. (2026). [Vulnerability Assessment of Urban Water and Wastewater Physical Assets Under Man-made Disaster Scenarios: A Case Study of Hamedan City, Iran (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, *16*(2):174-213. https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.799.1

https://doi.org/10.22034/DPMK.16.2.799.1

چکیده

زمینه و هدف در سال‌های اخیر، آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی در برابر سوانح، به‌ویژه حوادث انسان‌ساز به یکی از موضوعات محوری در مدیریت بحران و پدافند غیرعامل تبدیل شده است. شواهد تاریخی نشان می‌دهد شکنندگی دارایی‌های حیاتی شهری می‌تواند به‌طور جدی امنیت و تاب‌آوری جوامع را تضعیف کند. دراین‌میان، سیستم‌های آب و فاضلاب شهری که مسئول تأمین آب شرب سالم، تخلیه بهداشتی فاضلاب و تصفیه آن است، از مهم‌ترین زیرساخت‌ها به شمار می‌روند و آسیب آن‌ها اغلب پیامدهای شدید و جبران‌ناپذیری از جمله بروز ناآرامی‌های اجتماعی به همراه دارد. این پژوهش با هدف ارائه یک الگوی بهینه، به ارزیابی اولیه آسیب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی سیستم آب و فاضلاب شهر همدان در برابر سوانح انسان‌ساخت می‌پردازد.

روش در این تحقیق جهت ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت با جمع‌آوری اطلاعات از طریق منابع کتابخانه‌ای و مصاحبه با صاحب‌نظران، در ابتدا نقشه جانمایی دارایی‌های موردمطالعه توسط نرم‌افزار Google Earth Pro ترسیم گردید و متعاقب تعریف معیارهای ارزیابی و تهیه پرسش‌نامه، نقطه نظرات خبرگان جمع‌بندی و وزن‌دهی معیارها، ارزیابی آسیب‌پذیری و رده‌بندی دارایی‌ها با استفاده از روش تصمیم‌گیری ارزیابی همزمان معیار و گزینه SECA در محیط نرم‌افزار Lingo موردبررسی و تحلیل قرار گرفت و درنهایت به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌ها از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است.

یافته‌ها یافته‌ها نشان می‌دهد معیارهای افزونگی سیستم (وزن ۰/۲۴۶۷)، ضعف ایمنی و حفاظتی (۰/۱۸۰۶) و وابستگی سیستم (۰/۱۵۳۲) به‌ترتیب بالاترین اولویت را در آسیب‌پذیری دارند. ازنظر نوع دارایی، تصفیه‌خانه‌های آب، ایستگاه‌های پمپاژ و منابع آب سطحی به‌ترتیب بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

نتیجه‌گیری اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در سه سناریوی انفجار، حوادث صنعتی و آلودگی محیطی نشان داد در دو سناریوی اول، تصفیه‌خانه‌های آب با امتیاز ۴/۱۸۶۵ و در سناریوی سوم، منابع آب سطحی با امتیاز ۳/۶۹۶۹ بالاترین اولویت آسیب‌پذیری را دارند. تطابق نتایج با ارزیابی اولیه، مشاهدات میدانی و مطالعات پیشین، صحت و قابلیت اعتماد مدل پیشنهادی را تأیید می‌کند.

کلیدواژه‌ها آسیب‌پذیری، سوانح انسان‌ساخت، دارایی‌های شهری، آب و فاضلاب، همدان

اطلاعات مقاله:
تاریخ دریافت: ۲۳ مرداد ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۰۸ مهر ۱۴۰۴
تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۵

* **نویسنده مسئول:**
سعید گیوه‌چی
نشانی: تهران، دانشگاه تهران، دانشکده محیط زیست، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست.
تلفن: ۷۶۲۲۱۴۳ (۹۱۲) ۹۸+
پست الکترونیکی: givehchi@ut.ac.ir

Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-By-NC: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

یک شهر مادامی که فاقد ظرفیت‌ها و توانمندی‌های لازم برای کاهش آسیب‌پذیری و پیامدهای ناشی از بحران‌ها باشد و نتواند به‌طور خلاقانه به تغییرات پاسخ دهد، نمی‌تواند در زمره شهرهای پایدار قرار گیرد (اوتو-زیمرمن و بالبو، ۲۰۱۲). جوامع انسانی ازجمله شهرها در عصر کنونی معمولاً در مکان‌هایی برپا و گسترش یافته‌اند که همواره از جانب انواع سوانح اعم از طبیعی و انسان‌ساخت به‌دلیل توسعه زیرساخت‌ها و وابستگی و پیچیدگی آن‌ها در معرض آسیب قرار دارند، دراین‌خصوص آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها و دارایی‌های مهم، حساس و حیاتی یک شهر همراه با امکان‌پذیری انواع تهدیدات در زمان وقوع سبب ناکارآمدی سامانه شهری و درنتیجه تشدید نارضایتی عمومی (بحران اجتماعی) و اختلال عملکردی در شرایط اضطرار می‌گردد. با این دیدگاه هرچند تهدیدات و آسیب‌پذیری احتمالی دارایی‌های شهری در نگاه اول یک مانع جدی برای توسعه است؛ لیکن می‌توان اذعان کرد اگر قبل از وقوع سوانح با مدنظر قراردادن مدیریت جامع بحران و رویکرد آینده‌پژوهی، ضمن شناخت سوانح محتمل یک شهر، آسیب‌پذیری دارایی‌های آن را ارزیابی و رده‌بندی کنیم، با شناخت تهدیدات و آسیب ها به‌عنوان موانع، پتانسیل و ظرفیت‌های بالقوه ناشی از سوانح را به‌عنوان فرصتی برای رسیدن به توسعه نیز می‌توان شناسایی نمود و متعاقب آن، راهکارهایی در راستای پیشگیری از تهدید، کاهش آسیب‌پذیری و تقلیل پیامد و همچنین بهره‌جویی از فرصت‌های موجود در راستای رسیدن به اهداف توسعه پایدار منطقه‌ای ارائه نمود.

در این راستا شرکت ملی منابع آب آمریکا، آسیب‌پذیری را نقاط ضعفی در امنیت می‌داند که در برابر تهدیدهای معین می‌تواند ارائه خدمات را دچار وقفه و اختلال کند؛ یا براساس تعریف سازمان وضعیت اضطراری استرالیا، آسیب‌پذیری به‌عنوان درجه حساسیت و برگشت‌پذیری جامعه و محیط در برابر خطرها تعریف می‌شود. به‌عبارتی استعداد پذیرش آسیب ناشی از هرگونه تهدید به‌صورت فیزیکی یا غیر فیزیکی برای یک سامانه یا جامعه را آسیب‌پذیری گویند. در تعریف دیگر، آسیب‌پذیری شرایطی تعریف شده است که باعث می‌شود افراد، سامانه یا پیکره جامعه در برابر آثار سوء یک مخاطره تأثیرپذیر باشند و آسیب ببینند و این شرایط می‌تواند فیزیکی، اجتماعی، اقتصادی، محیطی و یا مربوط به فرآیندهای مدیریتی باشد (مشهدی، ۱۳۹۴). لذا به‌طور ویژه درخصوص مسائل شهری، آسیب‌پذیری شهری به هر گونه ضعف در یک دارایی که این امکان را به یک تهدید می‌دهد تا توانایی آسیب و ایجاد خسارت به یک دارایی، شریان‌های حیاتی و یا زیرساخت‌ها را ایجاد نماید، اطلاق می‌شود. آسیب‌پذیری‌ها می‌تواند نتیجه ضعف در مدیریت، ضعف در امنیت فیزیکی یا شیوه‌های عملیاتی باشند (هلستروم، ۲۰۰۷؛ گیوه چی، ۱۳۹۷).

درواقع می‌توان گفت تبعات مورد هدف قرار گرفتن زیرساخت‌ها و دارایی‌ها توسط تهدیدهای مفروض، براساس میزان آسیب‌پذیری زیرساخت مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد (جلالی فراهانی، ۱۳۹۲).

بیان مسئله

در راستای ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های شهری در مواجهه با سوانح، هرچند تحقیقات گسترده‌ای درزمینه، ارزیابی ریسک شهری در مواجهه با یک مخاطره خاص (بیشتر از نوع مخاطرات طبیعی) وجود دارد؛ لیکن به مطالعاتی که در حوزه مدیریت بحران و پدافند غیرعامل صرفاً به ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های شهری در مواجهه با انواع سوانح انسان ساخت بپردازد، کمتر توجه شده است؛ لذا می‌توان بیان کرد که در راستای مدیریت بحران و پدافند غیرعامل، ارائه الگوی بهینه ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های شهری در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت به‌عنوان یک مسئله مهم همواره نقش بسزایی در برنامه‌ریزی شهری دارد. با این تفسیر، از دیگر مسائل مهم تحقیق پیش رو می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

۱. رده‌بندی معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی زیرساخت موردمطالعه در این تحقیق چگونه است؟

۲. رده‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی زیرساخت هدف در منطقه موردمطالعه بیانگر چه اولویت‌هایی است؟

۳. برحسب ارزیابی آسیب‌پذیری تهدیدات انسان‌ساخت؛ رده‌بندی دارایی‌های سیستم موردمطالعه شهری چگونه است؟

پیشینه تحقیق

کیز و همکاران (۲۰۲۵) با هدف شناسایی آسیب‌پذیری دارایی‌ها، به بررسی انتشار آسیب و خرابی‌های آبشاری ناشی از سیل در شبکه‌های وابسته حمل‌ونقل و آب‌های سطحی پرداخته‌اند. در این پژوهش، از مدل SEFR و داده‌های شبیه‌سازی دوبعدی سیل با نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شد (کیس و همکاران، ۲۰۲۵؛ چال و جیراوغلو، ۲۰۲۵). با تمرکز بر تعیین شاخص‌های آسیب‌پذیری ساختمان‌ها در برابر افزایش سطح دریا و سیلاب در مناطق ساحلی شهری، چارچوبی مبتنی بر شاخص ارائه کرده‌اند که عوامل کلیدی آسیب‌پذیری را در تصمیمات طراحی معماری تفسیر می‌کند. روش تحقیق آن‌ها ترکیبی از مرور ادبیات و روش دلفی با مشارکت ۱۸ متخصص در حوزه‌های معماری، برنامه‌ریزی شهری و مهندسی عمران بود (چال و جیراوغلو، ۲۰۲۵).

لو و همکاران (۲۰۲۵) در مرور نظام‌مند خود با عنوان «شکست‌های آبشاری در سیستم‌های زیرساخت شهری: مروری جامع بر مکانیسم‌های زنجیره فاجعه» چارچوبی یکپارچه برای

درک وابستگی‌های متقابل، چالش‌های داده‌ای و محدودیت‌های روش‌شناختی ارائه کرده‌اند. این مطالعه با ترکیب روش‌های مبتنی بر دانش خبرگان، شبکه‌های بیزی، شبکه‌های پیچیده، شبیه‌سازی عددی، شبیه‌سازی سناریو و سنجش از دور، آسیب‌پذیری سیستم‌های مهندسی شهری را در برابر اثرات آبشاری ناشی از مخاطرات طبیعی (زلزله، سیل، آتش‌سوزی، یخبندان و فرونشست زمین) تحلیل کرده است (لو و همکاران، ۲۰۲۵). کربونلی و همکاران (۲۰۲۴) روشی نوین با عنوان روش ارزیابی ریسک ساختمان[1] (BRAM)برای تحلیل ریسک حملات تروریستی انفجاری و غیرمتعارف (CBRNe) به سازه‌ها معرفی کرده‌اند. این روش بر ارزیابی کمی و کیفی سه مؤلفه کلیدی شامل تهدید[2] (T)، آسیب‌پذیری[3] (V) و مواجهه[4] (E) استوار است (کاربونلی و همکاران، ۲۰۲۴). لیو و همکاران (۲۰۲۴) در چارچوب ارزیابی یکپارچه ریسک شهری[5] (IURA)روشی یکپارچه برای ارزیابی ریسک مناطق شهری ناشی از حوادث نشت مواد شیمیایی ارائه کرده‌اند که مبتنی بر ترکیب شبیه‌سازی مخاطرات شیمیایی (ALOHA) و سنجش آسیب‌پذیری اجتماعی (GC-TOPSIS) است (لیو و همکاران، ۲۰۲۴).

گان و همکاران (۲۰۲۲) روشی برای ارزیابی ریسک پیامدهای حوادث صنعتی و آسیب‌پذیری انسانی در مناطق شهری توسعه دادند و آن را برای یک شهر کوچک در چین آزمون کردند (گوان و همکاران، ۲۰۲۲). بواکیه و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی انواع خطرات طبیعی و انسان‌ساخت و پیامدهای آن‌ها بر دارایی‌ها، بر اهمیت ارزیابی پیامدهای سوانح گذشته و پیش‌بینی پیامدهای محتمل تأکید کرده‌اند (بوآکیه و همکاران، ۲۰۲۲). لوئیس (۲۰۱۵) در کتاب «نقش حفاظت زیرساخت‌های حیاتی در امنیت ملی» پس از معرفی اصول حفاظت از زیرساخت‌ها، از دو روش تحلیل و مدیریت ریسک برای حفاظت از دارایی‌های حیاتی[6] (RAMCAP) و (MBRA) برای ارزیابی و تحلیل ریسک ناشی از تهدیدات طبیعی و انسان‌ساخت استفاده کرده است (لوئیس، ۲۰۱۵).

فابری و وود (۲۰۱۹) ماژول تحلیل خسارت حوادث را به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی پیامدهای حوادث صنعتی در سناریوهای مختلف معرفی و ارزیابی کرده‌اند (فابری و وود، ۲۰۱۹). کولبا و همکاران (۲۰۱۷) با رویکرد تحلیل سناریویی به شناسایی دارایی‌های حیاتی، موقعیت‌های اضطراری و راهکارهای مدیریتی برای کاهش خطرات انسان‌ساخت پرداخته‌اند (کولبا و همکاران، ۲۰۱۷). لی و همکاران (۲۰۱۰) برنامه‌ای پنج‌مرحله‌ای برای ارزیابی آسیب‌پذیری امنیتی در برابر تروریسم شیمیایی طراحی کرده‌اند که شامل شناسایی دارایی، ارزیابی تهدید، تحلیل آسیب‌پذیری، ارزیابی خطرپذیری و اقدامات متقابل است (لی و همکاران ۲۰۱۰).

در ایران، پژوهش‌های متعددی به ارزیابی تهدیدات و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی به‌ویژه سامانه‌های آب‌رسانی پرداخته‌اند؛ از جمله کاظمی و گلستانه (۱۳۹۳)، مشهدی و امینی ورکی (۱۳۹۴)، مدیری و همکاران (۱۳۹۵)، تقی‌نژاد و ذونعمت کرمانی (۱۳۹۵)، رودباری و همکاران (۱۳۹۶)، بخشی شادمهری و همکاران (۱۳۹۹)، فیضی و همکاران (۱۳۹۹)، شیخعلی و همکاران (۱۳۹۹) و امیدوار و وجدانی نوذر (۱۴۰۰). این پژوهش‌ها با بهره‌گیری از روش‌هایی چون RAMCAP، AHP، SPSS، HAZOP، ANP و ماتریس ریسک به شناسایی تهدیدات، ارزیابی آسیب‌پذیری و تحلیل پیامدهای محتمل پرداخته‌اند.

بااین‌حال، مرور جامع فدایی (۲۰۲۳) بر ۸۶ مطالعه انجام‌شده بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ در حوزه تهدیدات و آسیب‌پذیری‌های سیستم تأمین آب آشامیدنی در ایران نشان می‌دهد با وجود شناسایی انواع تهدیدات نوظهور، مطالعات فراگیر برای ارزیابی امکان‌پذیری تهدیدات، آسیب‌پذیری‌ها و پیامدهای ناشی از آن‌ها همچنان ناکافی است (فدایی، ۲۰۲۳).

درواقع تحلیل پیشینه تحقیق و شکاف پژوهشی با مرور مطالعات بین‌المللی و داخلی نشان می‌دهد ارزیابی تهدیدات و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی، به‌ویژه در حوزه آب و سامانه‌های وابسته، تاکنون در قالب چهار رویکرد اصلی انجام شده است:

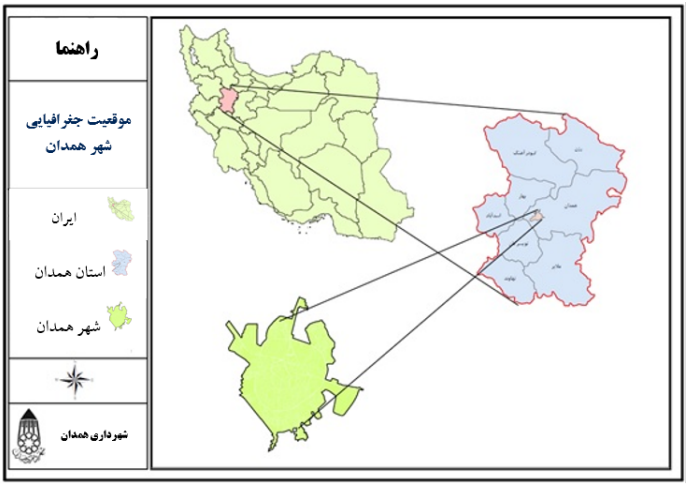
مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی (مانند HEC-RAS، SEFR، ALOHA) که عمدتاً در مطالعات خارجی و برای پدیده‌های طبیعی نظیر سیل، زلزله و نشت مواد شیمیایی به کار رفته است.

چارچوب‌های مبتنی بر شاخص و روش‌های ترکیبی (مانند IURA، BRAM، MBRA، RAMCAP) که امکان تلفیق داده‌های کمی و کیفی و تحلیل چندبُعدی تهدید، آسیب‌پذیری و پیامد را فراهم می‌آورند.

روش‌های تحلیلی-کارشناسی (مانند HAZOP، ANP، AHP، روش دلفی) که بیشتر برای اولویت‌بندی تهدیدات در محیط‌های خاص به کار گرفته شده‌اند.

مطالعات مرور نظام‌مند و تحلیلی که با هدف دسته‌بندی تهدیدات، شناسایی الگوهای آسیب‌پذیری و ارائه چارچوب‌های کلی انجام شده‌اند.

1. Building Risk Assessment Method (BRAM)
2. Threat (T)
3. Vulnerability (V)
4. Exposure (E)
5. Integrated Urban Risk Assessment
6. Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection (RAMCAP)



تصویر ۱. موقعیت جغرافیایی شهر همدان (شهرداری همدان، ۱۳۹۶)

در مطالعات بین‌المللی، تنوع مخاطرات بررسی‌شده (طبیعی و انسان‌ساخت) و بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی و مدل‌سازی سناریو قابل‌توجه است. این مطالعات اغلب به ارزیابی یک‌پارچه سه مؤلفه ریسک (تهدید، آسیب‌پذیری وپیامد) پرداخته‌اند و وابستگی‌های متقابل بین زیرساخت‌ها را نیز در نظر گرفته‌اند.

درمقابل، مطالعات داخلی گرچه در زمینه شناسایی تهدیدات و ارزیابی آسیب‌پذیری سامانه‌های آب شهری فعال بوده‌اند، اما چند ویژگی محدودکننده دارند:

- محدودیت جغرافیایی و مقیاس مطالعه

اغلب مطالعات به یک شهر یا یک زیرساخت خاص (مانند مخزن یا سد) محدود شده‌اند.

- فقدان ارزیابی جامع و یکپارچه

در اکثر پژوهش‌ها تنها یک یا دو مؤلفه ریسک بررسی شده و پیوند کامل بین تهدید، آسیب‌پذیری و پیامد لحاظ نشده است.

- استفاده محدود از داده‌های شبیه‌سازی و سناریوسازی

بیشتر پژوهش‌ها بر روش‌های نظرسنجی و تحلیل آماری تکیه داشته‌اند و داده‌های مدل‌محور کمتر به کار گرفته شده است.

- کمبود چارچوب‌های بومی‌سازی‌شده

بسیاری از مطالعات صرفاً روش‌های بین‌المللی مانند RAM-CAP یا CARVER را اقتباس کرده و تطبیق آن‌ها با شرایط و ویژگی‌های بومی کمتر صورت گرفته است.

روش

شهر سرد و کوهستانی همدان با مساحتی در حدود ۷۲ کیلومترمربع و جمعیتی بالغبر ۵۵۴ هزار و ۴۰۶ نفر به‌عنوان مرکز استان همدان، در غرب کشور ایران واقع شده است، مرکز این شهر در طول جغرافیایی ۴۸ درجه ۵۱ دقیقه و در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۷۹ دقیقه در دامنه کوه الوند قرار دارد؛ ارتفاع این شهر از سطح دریا بین ۱۷۵۰ متر تا ۲۱۰۰ متر در نقاط مختلف آن متفاوت است و یکی از مرتفع‌ترین مناطق کشور محسوب می‌شود (تصویر شماره ۱). در این شهر دارایی‌های حیاتی موردمطالعه زیرساخت آب و فاضلاب به‌منظور تأمین آب شرب و همچنین جمع‌آوری فاضلاب شهر برگرفته از منابع تأمین آب (میزان مصرفی آب شرب شهر در حدود ۱۸۰۰ لیتر بر ثانیه است که از این میزان حدود ۷۲/۵درصد از طریق آب‌های سطحی با دو سد ذخیره و کمتر از ۲۷/۵ درصد از طریق آب‌های زیرزمینی با ۶۱ حلقه چاه تأمین می‌شود)، چهار باب تصفیه‌خانه آب، ۱۸ مخزن اصلی به‌صورت زمینی و هوایی، ۱۲ ایستگاه پمپاژ آب، در حدود ۲۰۰ کیلومتر خط اصلی انتقال آب، ۹۳ کیلومتر خط فرعی انتقال آب، بالغ بر ۱۰۰۰ کیلومتر شبکه توزیع آب، ۲۶۰ کیلومتر شبکه جمع‌آوری فاضلاب، ۳۷ کیلومتر خط انتقال فاضلاب و یک باب تصفیه‌خانه فاضلاب است (جدول شماره ۱) (تصویر شماره ۲).

در این تحقیق جهت ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت با جمع‌آوری اطلاعات از طریق منابع کتابخانه‌ای و مصاحبه با صاحب‌نظران، در ابتدا نقشه جانمایی دارایی‌های موردمطالعه توسط نرم‌افزار Google Earth Pro طبق تصویر شماره ۲، ترسیم گردید و متعاقب تعریف معیارهای ارزیابی و تهیه پرسش‌نامه، نقطه نظرات خبرگان جمع‌بندی و وزن‌دهی معیارها، ارزیابی

جدول ۱. لیست کلی دارایی‌های زیرساخت آب و فاضلاب شهری (شرکت مهندسی بهساز روش، ۱۴۰۲)

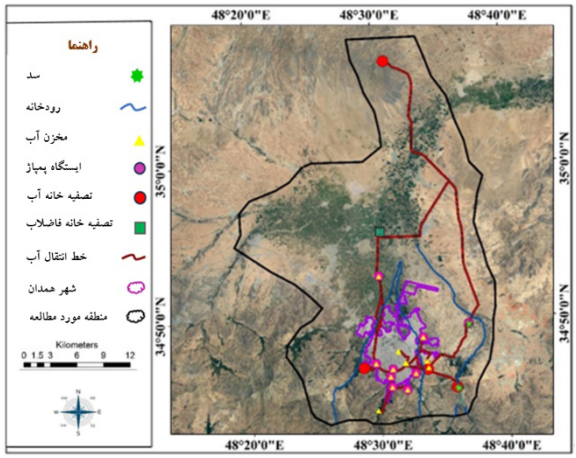
نام دارایی	کد	توضیحات در شهر همدان
منابع آب سطحی	D1	تأمین‌کننده ۷۲/۵ درصد آب شرب از طریق رودخانه‌ها و دو سد
منابع آب زیرزمینی	D2	تأمین‌کننده ۲۷/۵ درصد آب شرب از طریق ۶۱ حلقه چاه
تصفیه‌خانه‌های آب	D3	چهار باب تصفیه‌خانه آب (اکباتان، بهشتی، الوند و شیخی جان)
مخازن ذخیره آب	D4	دارای ۱۸ مخزن اصلی زمین و هوایی
ایستگاه‌های پمپاژ آب	D5	دارای ۱۲ ایستگاه پمپاژ آب
خطوط انتقال آب	D6	در حدود ۲۹۳ کیلومتر خط انتقال آب (تجمیعی خط اصلی و فرعی)
شبکه توزیع آب	D7	بالغبر ۱۰۰۰ کیلومتر شبکه توزیع آب
شبکه جمع‌آوری فاضلاب	D8	بالغبر ۲۶۰ کیلومتر شبکه جمع‌آوری فاضلاب
خطوط انتقال فاضلاب	D9	۳۷ کیلومتر خط انتقال فاضلاب
تصفیه‌خانه فاضلاب	D10	یک باب تصفیه‌خانه فاضلاب

آسیب‌پذیری و رده‌بندی دارایی‌ها با استفاده از روش تصمیم‌گیری ارزیابی هم‌زمان معیار و گزینه[7] SECA در محیط نرم‌افزار Lingo موردبررسی و تحلیل قرار گرفت و درنهایت به‌منظور تهیه نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌ها از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده است.

در روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره[8] MCDM همچون SECA، تعداد بهینه خبرگان برای وزن‌دهی معیارها و رتبه‌بندی گزینه‌ها به پیچیدگی مسئله و روش انتخابی بستگی دارد. وایدیا و کومار (۲۰۰۶)، در مطالعه خود بیان می کنند بسته به پیچیدگی معیارها تعداد ۳ تا ۱۰ خبره کفایت می کند (ویدیا و کومار، ۲۰۰۶). اسکالموسکی و همکاران (۲۰۰۷) تعداد ۷ تا ۱۲ خبره را برای مسائل با پیچیدگی متوسط ۵ تا ۸ معیاره مناسب می‌داند. درکل، مطالعات اخیر نشان می‌دهند تعداد بهینه خبرگان معمولاً بین ۵ تا ۲۰ نفر متغیر است (طاهردوست، ۱۴۰۱؛ ستوده‌انوری، ۱۴۰۱). در این تحقیق برای جمع‌آوری اطلاعات از طریق پرسش‌نامه، تعداد ۲۰ خبره با جامع هدفی که شامل اساتید، متخصصین، کارشناسان و مدیران حوزه برنامه‌ریزی شهری، شهرسازی، مدیریت شهری، مدیریت بحران و پدافند غیرعامل و آب و فاضلاب بود، استفاده شد که نتایج تحلیل پایایی و روایی پرسش‌نامه به شرح زیر است:

- جهت تعیین پایایی پرسش‌نامه، مقدار آلفای کرونباخ ۰/۸۳۷ نشان‌دهنده پایایی خوب برای پرسش‌نامه است. این بدان معناست که معیارهای شش‌گانه به‌طور داخلی هماهنگ هستند و قابلیت اعتماد اندازه‌گیری بالایی دارند.

7. Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives (SECA)
8. Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)



تصویر ۲. نقشه محدوده موردمطالعه و دارایی‌های حیاتی آب و فاضلاب شهر همدان

- در راستای بررسی کفایت داده‌ها برای تحلیل عاملی مقدار KMO[9] پرسش‌نامه ۰/۸۱۲ است که نشان‌دهنده کفایت عالی نمونه‌گیری است. همچنین معناداری آزمون بارتلت[10] ($P<0/001$) نشان می‌دهد همبستگی بین متغیرها برای انجام تحلیل عاملی مناسب است.

- همه معیارها بار عاملی بسیار خوبی (بالاتر از ۰/۷) روی یک عامل واحد دارند. این نتیجه نشان می‌دهد پرسش‌نامه از روایی سازه مطلوبی برخوردار است و تمامی شش معیار به‌طور قوی یک مفهوم واحد و یک بعدی به نام «آسیب‌پذیری کلی» را اندازه‌گیری می‌کنند. این یافته با ساختار نظری پرسش‌نامه که همه معیارها را جزیی از یک پدیده (آسیب‌پذیری) می‌داند، کاملاً همخوانی دارد.

همچنین برای ارزیابی آسب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی آب و فاضلاب شهری در مواجهه با سوانح انسان ساخت از معیارهایی که برحسب مطالعات جامع رساله دکتری «الگوی ارزیابی پیامدهای مؤثر بر دارایی‌های شهری، در مواجهه سناریو محور با سوانح انسان ساخت - مطالعه موردی شهر همدان» متعاقب شناسایی و انتخاب اولیه آن‌ها براساس مرور مبانی نظری و پیشینه مطالعات مرتبط از روش دلفی فازی به شرح ذیل به دست آمده، استفاده شده است:

ضعف ذاتی (V1)

مفهوم واقعی ضعف ذاتی یک زیرساخت یا دارایی آن است که تحت تأثیر مخاطره یا تهدیدات خراب شده و یا عملکرد آن دچار اختلال شود، درواقع ضعف ذاتی متضاد استحکام است.

ضعف ایمنی و حفاظتی (V2)

عدم توجه به اصول ایمنی احداث و راه‌اندازی یک دارایی و همچنین بی‌توجهی به نحوه حفاظت مطلوب از آن بیانگر ضعف ایمنی و حفاظتی آن دارایی است.

محل استقرار (V3)

مسلماً احداث یک دارایی در مناطق پر خطر و یا نزدیکی آن‌ها به دارایی‌های با ریسک بالا؛ آسیب‌پذیری آن دارایی را (حتی اگر از استحکام کافی برخوردار باشد) بالا برده و احتمال گسترش آسیب و تأثیر بر سایر دارایی‌ها نیز وجود دارد.

پیچیدگی سیستمی (V4)

پیچیدگی مقدمه‌ای است برای توصیف تئوری‌های موجود زیرساخت‌ها و دارایی‌ها؛ همچون فرم، شکل، توپولوژی و معماری آن‌ها که هرچه این تئوری‌ها پیچیده تر و وابستگی آن‌ها بیشتر باشد، زیرساخت و دارایی آسیب‌پذیرتر خواهد بود.

-وابستگی سیستمی (V5)

وابستگی یک زیرساخت یا دارایی بیانگر ارتباط و تأثیر عملکرد یا عدم عملکرد اجزای فرعی و اصلی آن برهم و همچنین بر سایر زیرساخت‌ها و دارایی‌ها است (وابستگی درونی و بیرونی) که هرچه وابستگی یک دارایی بیشتر باشد؛ پیچیدگی و آسیب‌پذیری آن نیز بیشتر شده و در سایر اجزاء و دارایی‌ها نیز گسترش می‌یابد. در این خصوص انواع وابستگی سیستمی به شرح وابستگی عملکردی، وابستگی فیزیکی، وابستگی جغرافیایی، وابستگی منطقی (وابستگی عملکرد نیروی انسانی) و وابستگی اطلاعاتی است. مدرن بودن جامعه (یعنی داشتن ارتباطات و تأثیرپذیری انواع دارایی‌ها از هم) دلیل اصلی وابستگی سیستمی و وابستگی‌ها علت پیچیدگی زیرساخت‌ها و دارایی‌ها در یک جامعه است که این پیچیدگی نیز منشأ اصلی آسیب‌پذیری‌ها، پیامدها و ریسک در مواجهه با سوانح می‌باشد.

افزونگی (V6)

به تمهیداتی در زیرساخت‌ها و دارایی‌ها اطلاق می‌شود که در صورت ایجاد خرابی یا اختلال آن‌ها را پشتیبانی می‌کند (وجدانی نوذر، ۱۴۰۴).

ضمناً تفاوت روش به‌کاررفته SECA در این تحقیق با بقیه روش‌ها این است؛ در روش‌های مشابه جهت رتبه‌بندی گزینه‌ها، وزن معیارها در ابتدا با روش ثانویه دیگری محاسبه‌شده و سپس به‌عنوان ورودی به این روش‌ها داده می‌شود؛ اما در روش SECA هم‌وزن معیار و هم رتبه‌بندی گزینه‌ها باهم صورت می‌گیرد. این مزیت باعث ایجاد دقت بیشتر و نتایج بهتر در محاسبات می‌شود. ازطرفی ورودی این روش هم معیارهای کیفی و هم کمی را شامل می‌شود که این مورد نیز انعطاف‌پذیری این روش را افزایش می‌دهد (کشاورز-قربایی و همکاران، ۲۰۱۸).

روش SECA

در ادامه گام‌های روش SECA به شرح ذیل است:

تشکیل چارچوب تصمیم

اولین گام در روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه تشکیل چارچوب تصمیم است چارچوب تصمیم یک چارچوب سطری - ستونی است که ستون‌ها، معیارهای تصمیم‌گیری و سطرها، گزینه‌های مسئله است که قصد رتبه‌بندی آن راداریم. هرکدام از سلول‌های این چارچوب تصمیم ارزیابی هر گزینه نسبت به هر معیار است.

9. Kaiser-Meyer-Olkin
10. Bartlett

نرمال‌سازی چارچوب تصمیم

در این بخش برای نرمال‌سازی معیارهای مثبت از فرمول شماره ۱ و برای معیارهای منفی از فرمول شماره ۲ استفاده می‌شود. در این فرمول i معرف سطر و j معرف ستون در چارچوب تصمیم است. همچنین BC شامل معیارهای هستند که جنبه سود (یا معیار مثبت) دارند و NC شامل معیارهایی هستند که جنبه هزینه (یا منفی) دارند.

1 & 2.

$$X_{ij}^{N} = \begin{cases} \dfrac{X_{ij}}{\max_k X_{kj}} & \text{if} \quad j \in BC, \\ \dfrac{\min_k X_{kj}}{X_{ij}} & \text{if} \quad j \in NC, \end{cases}$$

تشکیل الگوی بهینه‌سازی

فرض کنید $V_j=[X_{ij}^{N}]_{(n\times1)}$ معرف بردار j امین معیار می‌باشد. انحراف‌معیار هر بردار (σj) نشان‌دهنده تغییرات درونی اطلاعات بردار است. برای اخذ اطلاعات بین معیاری در چارچوب تصمیم باید همبستگی بین هر زوج بردار محاسبه شود. که rjl معرف همبستگی بین j و l امین بردار است. درمجموع مقدار (πj) میزان تضاد بین j امین معیار و دیگر معیارها را نشان می‌دهد که از فرمول شماره ۳ به دست می‌آید.

3. $\pi_j=\sum_{l=1}^{m}(1-r_{jl})$

افزایش تغییرپذیری در بردار یک معیار (σj)، و همچنین افزایش میزان درجه اختلاف میان معیار j و معیارهای دیگر (πj)، اهمیت (وزن) معیار را افزایش می‌دهد. براین‌اساس، مقادیر نرمال‌شده (σj) و (πj) به‌عنوان نقاط مرجع برای وزن معیارها تعریف می‌شود. این مقادیر را می‌توان به‌صورت فرمول‌های شماره ۴ و ۵ محاسبه کرد:

4. $\sigma_j^{N}=\dfrac{\sigma_j}{\sum_{l=1}^{m}\sigma_l}$

5. $\pi_j^{N}=\dfrac{\pi_j}{\sum_{l=1}^{m}\pi_l}$

باتوجه‌به توضیحات ارائه‌شده الگوی بهینه چندهدفه زیر ارائه می‌شود.

6. $\text{Max } S_i=\sum_{j=1}^{m} W_j X_{ij}^{N}, \quad \forall_i \in \{1,2,\dots n\}$

7. $\text{Min } \lambda_b=\sum_{j=1}^{m}(W_j-\sigma_j^{N})^2$

8. $\text{Min } \lambda_c=\sum_{j=1}^{m}(W_j-\pi_j^{N})^2$

9. $\text{s.t.} \sum_{j=1}^{m} W_j = 1$

10. $\leq 1 \ , \forall_j \in \{1,2,\dots,m\} W_j$

11. $\geq \ , \forall_j \in \{1,2,\dots,m\} W_j$

فرمول شماره ۶، عملکرد کلی هر گزینه را افزایش می‌دهد و فرمول‌های شماره ۷ و ۸، انحراف‌معیارها و همبستگی‌های وزن را از نقاط مرجع برای هر معیار به حداقل می‌رساند. فرمول شماره ۹ تضمین می‌کند مجموع وزن‌ها برابر با ۱ است. فرمول‌های شماره ۱۰ و ۱۱ وزن معیارها را برای برخی مقادیر در فاصله ۱ تا ε تعیین می‌کنند. ε یک متغیر مثبت کوچک در نظر گرفته‌شده به‌عنوان معیار پایینی برای وزن معیار است. الگوی چند هدفِ بالا را می‌توان به الگوی تک هدفه تبدیل کرد. باتوجه‌به عملکردِ هدف الگو براساس فرمول شماره ۱۲ حداقل امتیاز کلی عملکرد گزینه‌ها به حداکثر می‌رسد. ازآنجاکه انحراف از نقاط مرجع باید حداقل باشد، آن‌ها از عملکرد هدف با ضریب B تفریق می‌شوند. این ضریب بر اهمیت دستیابی به نقاط مرجع معیارهای وزن تأثیر می‌گذارد. فرمول شماره ۱۳ یک مقدار حداقل از نمره عملکرد کلی هر گزینه (Si) را مشخص می‌کند. فرمول شماره ۱۴ مجموع ضرب وزن هر معیار را در درایه چارچوب نرمال محاسبه می‌کند. فرمول‌های شماره ۱۵ و ۱۶ مجموع انحراف‌معیارهای وزن را از نقاط مرجع (انحراف‌معیار و همبستگی) برای هر معیار را به دست می‌آورد. فرمول شماره ۱۷ مشخص می‌کند جمع وزن‌ها برابر با ۱ باشد؛ و فرمول‌های شماره ۱۸ و ۱۹ مشخص می‌کند وزن به‌دست‌آمده باید بین (۰) و (۱) باشد یعنی از (۰) بیشتر هم باشد.

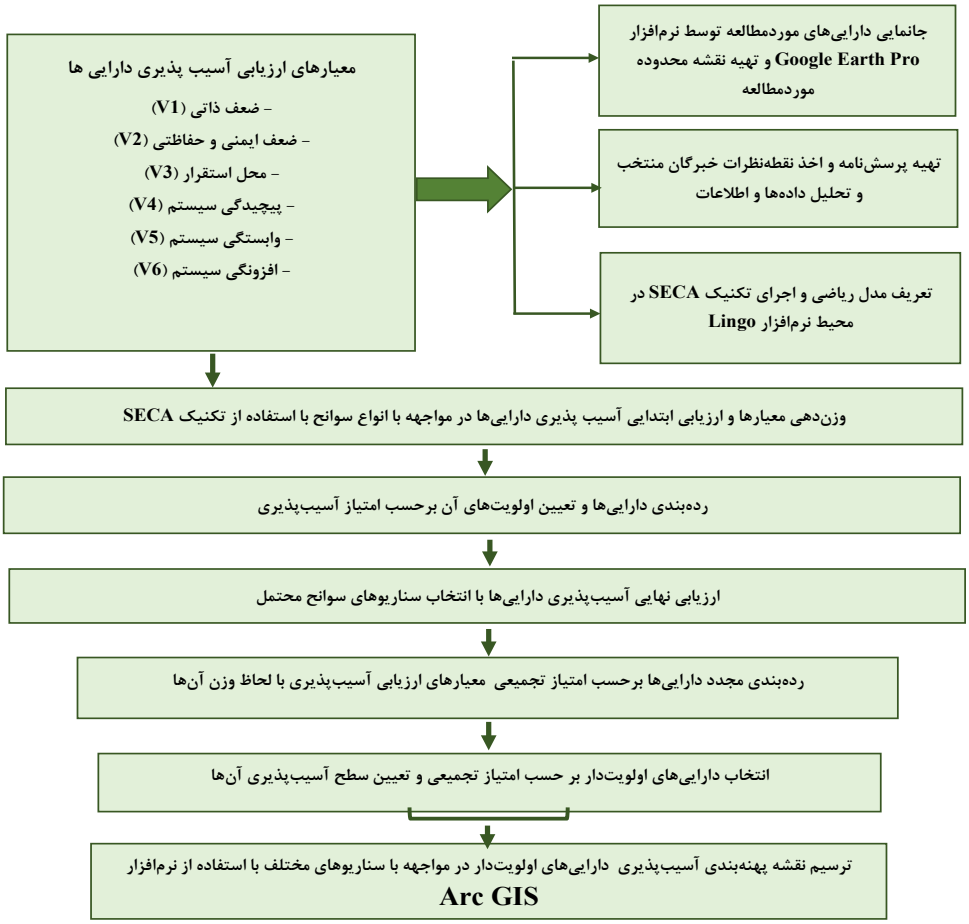
12. $\text{Max } Z = \lambda_a - \beta(\lambda_b + \lambda_c),$

13. $\text{s.t.} \quad \lambda_a \leq S_i \ , \quad \forall_i \in \{1,2,\dots n\}$

14. $S_i=\sum_{j=1}^{m} W_j X_{ij}^{N} \ , \quad \forall_i \in \{1,2,\dots n\}$

15. $\lambda_b=\sum_{j=1}^{m}(W_j-\sigma_j^{N})^2,$

16.



تصویر ۳. الگوی ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی شهری در مواجهه با انواع سوانح

$$= \sum_{j=1}^{m}(W_j - \pi_j^N)^2\lambda_c$$

17.

$$=1\sum_{j=1}^{m} W_j$$

18.

$$W_j \leq 1 \ , \forall_j \ \epsilon \ \{1,2,\ldots,m\}$$

19.

$$W_j \geq \ , \forall_j \ \epsilon \ \{1,2,\ldots,m\}$$

تعریف متغیرها در فرمول‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ در زیر آورده شده است.

λ_a= حداقل امتیاز هر گزینه

λ_b= مجموع فاصله وزن هر معیار از انحراف‌معیار نرمال

λ_c= مجموع فاصله وزن هر معیار از همبستگی نرمال

β= ضریب تفریق از هدف کلی

W_j= وزن هر معیار

X_{ij}^N= درایه نرمال سطر i و ستون j در چارچوب اولیه

S_i= امتیاز هر گزینه

m = تعداد معیارها

ε = پارامتر مثبت کوچک

r_{jl}= همبستگی بین j و l امین بردار

در این پژوهش برای تحلیل معیارهای مرتبط به ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهری در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت و آماده‌سازی داده‌ها؛ طبق نظرات کارشناسی در راستای اختصاص امتیاز به معیارها (برحسب توصیف کیفی معیار) از طیف ۱ تا ۵ مطابق جدول شماره ۲ استفاده‌شده به‌نحوی‌که پس از تهیه پرسش‌نامه و توزیع آن در بین خبرگان؛ اطلاعات بر این مبنا از آن‌ها اخذ و نتایج به‌صورت میانگین حسابی برآورد و در تحلیل SECA مورداستفاده قرار می‌گیرد و همچنین سطوح ارزیابی آسیب‌پذیری (V) دارایی‌ها در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت باتوجه‌به اعمال نقطه نظرات خبرگان به شرح ذیل تعریف و در ارزیابی مورداستفاده قرارگرفته است:

- سطح پایین (۱≤V≤۲)
- سطح متوسط (۲<V≤۳)
- سطح بالا (۳<V≤۴)

جدول ۲. معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهری در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت

کمیت	توصیف کیفی معیار	معیار	تأثیر معیارها
۱	درجه مقاومت و استحکام ذاتی دارایی در برابر انواع تهدیدات؛ طبق استاندارد و اصول مقاوم‌سازی است و همواره چک و به‌روز می‌شود.	ضعف ذاتی	خیلی پائین
	تمهیدات ایمنی و حفاظتی دارایی براساس استاندارد و روش‌های مناسب بوده و همواره چک و به‌روز می‌شود.	ضعف ایمنی و حفاظتی	
	محل استقرار دارایی طوری است که در صورت آسیب به خود دارایی، امکان گسترش آسیب به خارج از محل بسیار پایین است.	محل استقرار	
	دارایی یک جزء است، به‌عبارتی از پیچیدگی خیلی کمی برخوردار است.	پیچیدگی سیستمی	
	دارایی به خود وابسته است و از وابستگی بسیار کمی به سایر دارایی‌ها برخوردار است و در صورت آسیب به اختلال عملکرد سایر دارایی‌های منجر نمی‌شود.	وابستگی سیستمی	
	در صورت آسیب به دارایی، جایگزین به‌صورت اتوماتیک وجود دارد.	افزونگی	
۲	درجه مقاومت و استحکام ذاتی دارایی در برابر انواع تهدیدات؛ طبق استاندارد و اصول مقاوم‌سازی است لیکن هر از گاهی چک و کنترل می‌شود.	ضعف ذاتی	پائین
	تمهیدات ایمنی و حفاظتی دارایی براساس استاندارد و روش‌های مناسب بوده لیکن هرازگاهی چک و کنترل می‌شود.	ضعف ایمنی و حفاظتی	
	محل استقرار دارایی طوری است که در صورت آسیب به خود دارایی، امکان گسترش آسیب به خارج از محل در حد پایین است.	محل استقرار	
	دارایی از اجزای تشکیل‌دهنده کمی تشکیل شده است، به‌عبارتی از پیچیدگی کمی برخوردار است.	پیچیدگی سیستمی	
	اجزای تشکیل‌دهنده دارایی از وابستگی کمی به هم و به سایر دارایی‌ها برخوردار است و در صورت آسیب به اختلال عملکرد کم سایر دارایی‌ها منجر می‌شود.	وابستگی سیستمی	
	در صورت آسیب به دارایی، جایگزین وجود دارد و راه‌اندازی آن کی وقت می‌برد.	افزونگی	
۳	هرچند درجه مقاومت و استحکام ذاتی دارایی در برابر انواع تهدیدات؛ طبق استاندارد و اصول مقاوم‌سازی است لیکن چک و کنترل نمی‌شود.	ضعف ذاتی	متوسط
	هرچند تمهیدات ایمنی و حفاظتی دارایی براساس استاندارد و روش‌های مناسب بوده لیکن چک و کنترل نمی‌شود.	ضعف ایمنی و حفاظتی	
	محل استقرار دارایی طوری است که در صورت آسیب به خود دارایی، امکان گسترش آسیب به خارج از محل در حد متوسط است.	محل استقرار	
	دارایی از اجزای تشکیل‌دهنده قابل‌توجه‌ای تشکیل شده است، به‌عبارتی از پیچیدگی متوسطی برخوردار است.	پیچیدگی سیستمی	
	اجزای تشکیل‌دهنده دارایی وابستگی قابل‌توجه‌ای به هم و به سایر دارایی‌ها دارد و در صورت آسیب به اختلال عملکرد متوسط سایر دارایی‌ها منجر می‌شود.	وابستگی سیستمی	
	در صورت آسیب به دارایی، هرچند جایگزین وجود دارد، لیکن از قبل برنامه‌ریزی نشده است.	افزونگی	
۴	درجه مقاومت و استحکام ذاتی دارایی در برابر انواع تهدیدات؛ به‌صورت ایدئال نمی‌باشد و از عمر مفید دارایی نیز گذشته است.	ضعف ذاتی	بالا
	تمهیدات ایمنی و حفاظتی دارایی به‌صورت سنتی است.	ضعف ایمنی و حفاظتی	
	محل استقرار دارایی طوری است که در صورت آسیب به خود دارایی، امکان گسترش آسیب به خارج از محل در حد بالا است.	محل استقرار	
	دارایی از اجزای تشکیل‌دهنده زیادی تشکیل شده است، به‌عبارتی از پیچیدگی بالایی برخوردار است.	پیچیدگی سیستمی	
	اجزای تشکیل‌دهنده دارایی وابستگی زیادی به هم و به سایر دارایی‌ها دارد و در صورت آسیب به اختلال عملکرد زیاد سایر دارایی‌ها منجر می‌شود.	وابستگی سیستمی	
	در صورت آسیب به دارایی، جایگزینی وجود ندارد و تعمیر دارایی زمان‌بر است.	افزونگی	
۵	دارایی فاقد مقاومت و استحکام ذاتی قابل‌قبول در برابر انواع تهدیدات است و از عمر مفید دارایی نیز خیلی گذشته است.	ضعف ذاتی	خیلی بالا
	تمهیدات ایمنی و حفاظتی دارایی به‌صورت سنتی و بدون توجه به اصول مرتبط است و خلأهایی نیز در آن مشهود است.	ضعف ایمنی و حفاظتی	
	محل استقرار دارایی طوری است که در صورت آسیب به خود دارایی، امکان گسترش آسیب به خارج از محل در حد بسیار بالا است.	محل استقرار	
	دارایی از اجزای تشکیل‌دهنده خیلی زیادی تشکیل شده است، به‌عبارتی از پیچیدگی بسیار بالایی برخوردار است.	پیچیدگی سیستمی	
	اجزای تشکیل‌دهنده دارایی وابستگی خیلی زیادی به هم و به سایر دارایی‌ها دارد و در صورت آسیب به اختلال عملکرد خیلی زیاد سایر دارایی‌ها منجر می‌شود.	وابستگی سیستمی	
	در صورت آسیب به دارایی، جایگزینی وجود ندارد و تعمیر دارایی وابسته به کشورهای خارجی است.	افزونگی	

جدول ۳. ماتریس تصمیم

ماتریس تصمیم	V1	V2	V3	V4	V5	V6
D1	۳/۳	۳/۷	۳/۲	۳/۲	۳/۵	۲/۵
D2	۱/۹	۲/۷	۱/۲	۱/۳	۲/۱	۱/۱
D3	۴/۲	۳/۹	۴/۷	۴/۸	۴/۶	۳/۹
D4	۲/۲	۲/۳	۳/۹	۲/۷	۳/۱	۳/۴
D5	۴/۰	۳/۳	۳/۶	۴/۲	۳/۹	۳/۴
D6	۲/۹	۲/۸	۲/۸	۳/۰	۳/۳	۳/۵
D7	۳/۱	۲/۲	۲/۶	۲/۷	۲/۱	۴/۰
D8	۲/۳	۲/۳	۲/۴	۲/۱	۱/۸	۴/۰
D9	۲/۴	۲/۵	۲/۰	۲/۱	۱/۹	۳/۵
D10	۳/۰	۲/۶	۲/۲	۳/۰	۲/۸	۴/۲

جدول۴. ماتریس نرمال

ماتریس نرمال‌شده	V1	V2	V3	V4	V5	V6
D1	۰/۷۸۶	۰/۹۴۹	۰/۶۸۱	۰/۶۶۷	۰/۷۶۱	۰/۵۹۵
D2	۰/۴۵۲	۰/۶۹۲	۰/۲۵۵	۰/۲۷۱	۰/۴۵۷	۰/۲۶۲
D3	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۲۹
D4	۰/۵۲۴	۰/۵۹۰	۰/۸۳۰	۰/۵۶۳	۰/۶۷۴	۰/۸۱۰
D5	۰/۹۵۲	۰/۸۴۶	۰/۷۶۶	۰/۸۷۵	۰/۸۴۸	۰/۸۱۰
D6	۰/۶۹۰	۰/۷۱۸	۰/۵۹۶	۰/۶۲۵	۰/۷۱۷	۰/۸۳۳
D7	۰/۷۳۸	۰/۵۶۴	۰/۵۵۳	۰/۵۶۳	۰/۴۵۷	۰/۹۵۲
D8	۰/۵۴۸	۰/۵۹۰	۰/۵۱۱	۰/۴۳۸	۰/۳۹۱	۰/۹۵۲
D9	۰/۵۷۱	۰/۶۴۱	۰/۴۲۶	۰/۴۳۸	۰/۴۱۳	۸/۳۳۰
D10	۰/۷۱۴	۰/۶۶۷	۰/۴۶۸	۰/۶۲۵	۰/۶۰۹	۱/۰۰۰

جدول ۵. مقادیر

مقادیر j_π	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
V1	۰/۰۰۰	۰/۲۴۹	۰/۳۰۳	۰/۰۵۱	۰/۱۹۲	۰/۶۲۲	۱/۴۱۷
V2	۰/۲۴۹	۰/۰۰۰	۰/۴۳۴	۰/۲۷۴	۰/۱۶۸	۱/۱۷۳	۲/۲۹۸
V3	۰/۳۰۳	۰/۴۳۴	۰/۰۰۰	۰/۱۳۸	۰/۱۶۲	۰/۶۰۲	۱/۶۳۹
V4	۰/۰۵۱	۰/۲۷۴	۰/۱۳۸	۰/۰۰۰	۰/۰۹۲	۰/۵۵۵	۱/۱۱۰
V5	۰/۱۹۲	۰/۱۶۸	۰/۱۶۲	۰/۰۹۲	۰/۰۰۰	۰/۸۸۸	۱/۵۰۲
V6	۰/۶۲۲	۱/۱۷۳	۰/۶۰۲	۰/۵۵۵	۰/۸۸۸	۰/۰۰۰	۳/۸۳۹

جدول ۶. مقادیر و σj نرمال

مقادیر نرمال‌شده π_j و σ_j	σj نرمال	نرمال
V1	۰/۱۵۲۲	۰/۱۲۰۰
V2	۰/۱۲۹۸	۰/۱۹۴۷
V3	۰/۱۸۲۴	۰/۱۳۸۸
V4	۰/۱۷۸۴	۰/۹۴۱
V5	۰/۱۷۱۹	۰/۱۲۷۲
V6	۰/۱۸۵۳	۰/۳۲۵۲

جدول ۷. وزن معیارها ازای مقادیر مختلف

وزن معیارها	β										
	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
V1	۰/۱۴۶۲	۰/۱۹۲۶	۰/۱۸۱۰	۰/۱۶۹۸	۰/۱۶۳۰	۰/۱۴۹۶	۰/۱۴۲۵	۰/۱۲۱۹	۰/۱۳۹۵	۰/۱۳۸۸	۰/۱۳۸۳	۰/۱۳۸۰
V2	۰/۶۷۳۴	۰/۵۱۸۸	۰/۴۰۷۱	۰/۳۴۵۹	۰/۳۰۹۲	۰/۲۳۵۷	۰/۱۹۹۰	۰/۲۱۲۴	۰/۱۸۰۶	۰/۱۷۶۹	۰/۱۷۴۵	۰/۲۷۲۷
V3	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۴۱۳	۰/۰۷۱۱	۰/۰۸۹۰	۰/۱۲۴۸	۰/۱۴۲۷	۰/۱۱۱۱	۰/۱۵۱۷	۰/۱۵۳۴	۰/۱۵۴۶	۰/۱۵۵۵
V4	۰/۰۰۱۰	۰/۰۰۱۰	۰/۰۳۰۳	۰/۰۵۶۸	۰/۷۲۷	۰/۱۰۴۵	۰/۱۲۰۴	۰/۱۰۵۲	۰/۱۲۸۳	۰/۱۲۹۹	۰/۱۳۱۰	۰/۱۳۱۷
V5	۰/۰۹۱۲	۰/۲۱۲۳	۰/۱۹۸۶	۰/۱۸۶۳	۰/۱۷۹۰	۰/۱۶۴۳	۰/۱۵۶۹	۰/۱۱۳۷	۰/۱۵۳۲	۰/۱۵۲۵	۰/۱۵۲۰	۰/۱۵۱۷
V6	۰/۰۸۷۳	۰/۰۷۴۳	۰/۱۴۱۸	۰/۱۷۰۱	۰/۱۸۷۲	۰/۲۲۱۲	۰/۲۳۸۴	۰/۲۳۵۷	۰/۲۴۶۷	۰/۲۴۸۴	۰/۲۴۹۶	۰/۲۵۰۴

جدول ۸. امتیاز منابع آسیب‌پذیر به‌ازای مقادیر مختلف

امتیاز منابع آسیب‌پذیر	β											
	۰/۱	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
D1	۰/۸۷۶۶	۰/۸۵۰۸	۰/۸۱۲۴	۰/۷۹۱۰	۰/۷۷۸۲	۰/۷۵۲۵	۰/۷۳۹۷	۰/۷۲۹۵	۰/۷۳۳۳	۰/۷۳۲۰	۰/۷۳۱۲	۰/۷۳۰۵
D2	۰/۵۹۷۱	۰/۵۶۳۱	۰/۵۱۰۱	۰/۴۷۹۳	۰/۴۶۰۸	۰/۴۲۳۹	۰/۴۰۵۳	۰/۳۹۸۹	۰/۳۹۶۱	۰/۳۹۴۳	۰/۳۹۳۱	۰/۳۹۲۲
D3	۰/۹۹۳۸	۰/۹۹۴۷	۰/۹۸۹۹	۰/۹۸۷۹	۰/۹۸۷۶	۰/۹۸۴۳	۰/۹۸۳۱	۰/۹۷۶۲	۰/۹۸۲۵	۰/۹۸۲۴	۰/۹۸۲۳	۰/۹۸۲۲
D4	۰/۶۰۷۴	۰/۶۱۱۷	۰/۶۳۵۰	۰/۶۴۷۴	۰/۶۵۴۹	۰/۶۶۹۷	۰/۶۷۷۲	۰/۶۸۹۲	۰/۶۸۰۹	۰/۶۸۱۶	۰/۶۸۲۱	۰/۶۸۲۵
D5	۰/۸۵۸۵	۰/۸۶۴۱	۰/۸۵۸۰	۰/۸۵۴۲	۰/۸۵۱۹	۰/۸۴۷۳	۰/۸۴۴۹	۰/۸۴۱۲	۰/۸۴۳۸	۰/۸۴۳۶	۰/۸۴۳۴	۰/۸۴۳۳
D6	۰/۷۲۳۶	۰/۷۲۰۷	۰/۷۲۱۲	۰/۷۱۸۷	۰/۷۱۷۲	۰/۷۱۴۱	۰/۷۱۲۷	۰/۷۲۹۷	۰/۷۱۱۹	۰/۷۱۱۷	۰/۷۱۱۶	۰/۷۱۱۶
D7	۰/۶۱۳۵	۰/۶۰۳۶	۰/۶۲۸۸	۰/۶۳۸۸	۰/۶۴۴۸	۰/۶۵۶۸	۰/۶۶۲۸	۰/۷۰۲۰	۰/۶۶۵۸	۰/۶۶۶۴	۰/۶۶۶۸	۰/۶۶۷۱
D8	۰/۵۹۷۱	۰/۵۶۶۳	۰/۵۸۶۳	۰/۵۹۳۱	۰/۵۹۷۲	۰/۶۰۵۴	۰/۶۰۹۵	۰/۶۵۹۰	۰/۶۱۱۵	۰/۶۱۱۹	۰/۶۱۲۲	۰/۶۱۲۴
D9	۰/۶۲۶۳	۰/۵۹۲۹	۰/۵۹۵۳	۰/۵۹۲۵	۰/۵۹۰۸	۰/۵۸۷۵	۰/۵۸۵۹	۰/۶۲۵۸	۰/۵۸۵۰	۰/۵۸۴۹	۰/۵۸۴۷	۰/۵۸۴۷
D10	۰/۶۹۷۴	۰/۶۸۸۲	۰/۷۰۱۷	۰/۷۰۴۳	۰/۷۰۵۸	۰/۷۰۸۹	۰/۷۱۰۵	۰/۷۵۱۴	۰/۷۱۱۳	۰/۷۱۱۴	۰/۷۱۱۵	۰/۷۱۱۶

جدول ۹. رده‌بندی معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌ها برحسب وزن اکتسابی

نام معیار	کد معیار	وزن	رتبه
ضعف ذاتی	V1	۰/۱۳۹۵	۵
ضعف ایمنی و حفاظتی	V2	۰/۱۸۰۶	۲
محل استقرار	V3	۰/۱۵۱۷	۴
پیچیدگی	V4	۰/۱۲۸۳	۶
وابستگی	V5	۰/۱۵۳۲	۳
افزونگی	V6	۰/۲۴۶۷	۱

جدول ۱۰. امتیاز و رده‌بندی ابتدایی دارایی‌ها بر مبنای آسیب‌پذیری

نام دارای‌ی	کد	امتیاز	رتبه
منابع آب سطحی	D1	۰/۷۳۳۳	۳
منابع آب زیرزمینی	D2	۰/۳۹۶۱	۱۰
تصفیه خانه های آب	D3	۰/۹۸۲۵	۱
مخازن ذخیره آب	D4	۰/۶۸۰۹	۶
ایستگاه های پمپاژ آب	D5	۰/۸۴۳۸	۲
خطوط انتقال آب	D6	۰/۷۱۱۹	۴
شبکه توزیع آب	D7	۰/۶۶۵۸	۷
شبکه جمع آوری فاضلاب	D8	۰/۶۱۱۵	۸
خطوط انتقال فاضلاب	D9	۰/۵۸۵۰	۹
تصفیه خانه فاضلاب	D10	۰/۷۱۱۳	۵

- سطح بحرانی (V≥۵>۴)

ضمناً ازآنجایی که یکی از اهداف پژوهش‌ها ارائه الگویی است که بتواند ضمن برآورد هدف کاربردی، قابل‌تعمیم به انجام مطالعات مشابه در تمامی مناطق باشد، در این تحقیق الگوی ارزیابی به‌کاررفته برحسب تطبیق با تحقیقات و پژوهش‌های موجود که برخی از آن‌ها در این پژوهش نیز مورد بررسی قرارگرفته است، به شرح تصویر شماره ۳ می‌باشد.

یافته‌ها

با نگاهی به لیست کلی دارایی‌های سیستم آب و فاضلاب شهری (جدول شماره ۲) و احصای این دارایی‌ها در منطقه موردمطالعه (تصویر شماره ۲)؛ وزن‌دهی معیارهای مرتبط در این تحقیق (ضعف ذاتی، ضعف ایمنی و حفاظتی، محل استقرار، پیچیدگی، وابستگی و افزونگی سیستمی) و همچنین رده‌بندی دارایی‌ها برحسب آسیب‌پذیری در مواجهه با سوانح انسان ساخت از طریق روش SECA و کاربرد نرم‌افزار لینگو[11] انجام می‌شود، بدین منظور در ابتدا ماتریس تصمیم ۶×۱۰ (سطر شامل ۱۰ دارایی و ستون شامل ۶ معیار) برحسب نقطه نظرات و اطلاعات جمع‌بندی شده خبرگان تشکیل و سپس با استفاده از روابط مشخص، نرمال‌سازی ماتریس، تعیین مقدار π_j، تعیین مقادیر نرمال σ_j و π_j به‌ترتیب در قالب جداول شماره ۳، ۴، ۵ و ۶ برآورد می گردد.

در ادامه با استفاده از الگوی بهینه‌سازی که در فرمول‌های شماره ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مشخص‌شده است، یک الگوی بهینه‌سازی غیرخطی تشکیل و توسط نرم‌افزار لینگو حل می‌گردد در این الگو به‌ازای مقادیر از ۰/۱ تا ۷ الگو اجرا شده و در هر بار اجرا وزن معیارها و امتیاز هریک از تهدیدات سوانح انسان‌ساخت عمدی برآورد می‌شود. برآوردها به‌ازای مقادیر مختلف وزن معیارها و امتیاز تهدیدات به‌ترتیب در جداول شماره ۷ و ۸ نمایش داده شده و همچنین به‌صورت نمودار در تصاویر

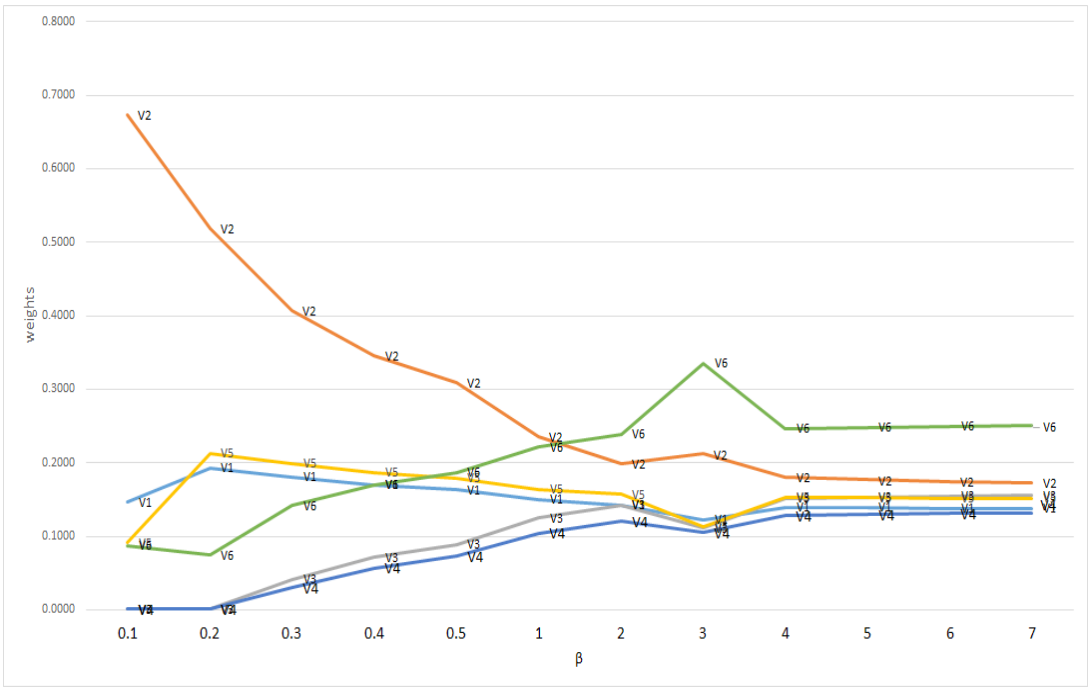
11. Lingo

جدول ۱۱. ارزیابی نهایی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با انفجار (سناریو اول)

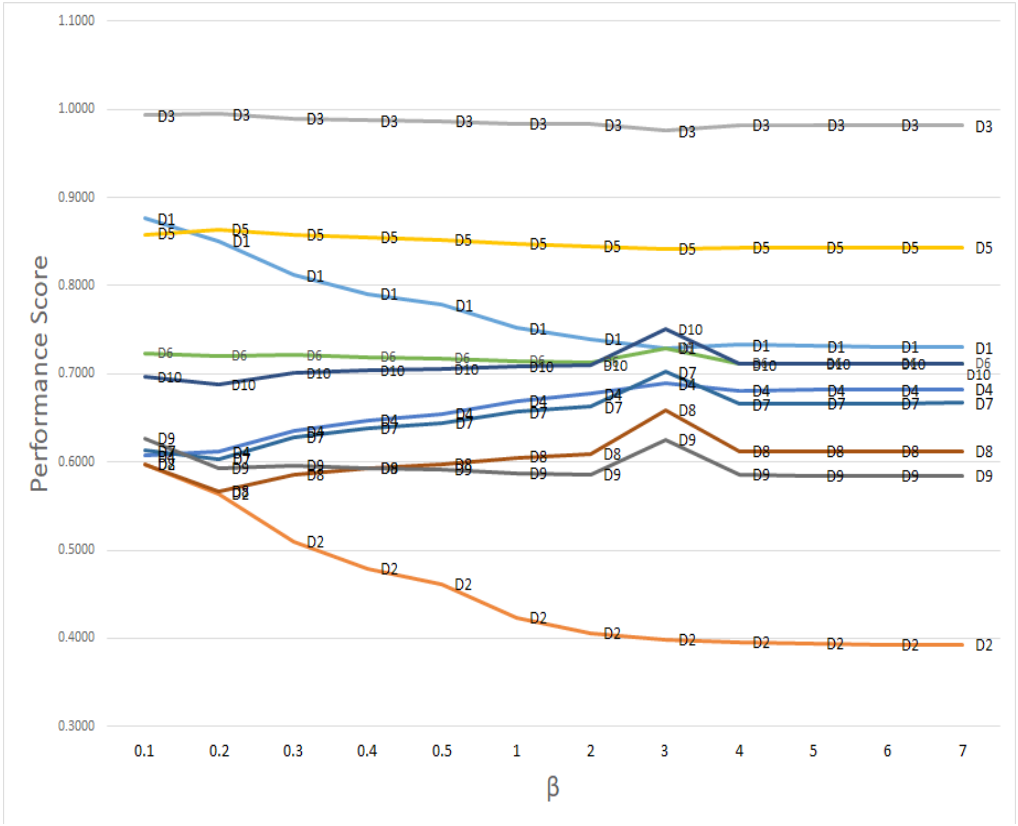
مخاطره - تهدید	دارایی‌ها	شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری						سطح آسیب‌پذیری	رده‌بندی دارایی‌ها (رتبه)
		ضعف ذاتی	ضعف ایمنی و حفاظتی	محل استقرار	پیچیدگی سیستمی	وابستگی سیستمی	افزونگی	پایین: (۱≥V≥۲) متوسط: (۲>V≥۳) بالا: (۳>V≥۴) بحرانی: (۴>V≥۵)	
		۰/۱۳۹۵	۰/۱۸۰۶	۰/۱۵۱۷	۰/۱۲۸۳	۰/۱۵۳۲	۰/۲۴۶۷	امتیاز نهایی	
انسان‌ساخت - انفجار	منابع آب سطحی	۳	۴	۳	۳	۳	۲	۲/۹۳۳۹	۵
	منابع آب زیرزمینی	۲	۳	۲	۳	۳	۲	۲/۴۶۲۱	۸
	تصفیه‌خانه‌های آب	۴	۴	۵	۵	۵	۳	۴/۱۸۶۵	۱
	مخازن ذخیره آب	۲	۳	۴	۳	۳	۳	۳/۰۱۲۲	۴
	ایستگاه‌های پمپاژ آب	۴	۳	۴	۵	۵	۴	۴/۱۰۰۹	۲
	خطوط انتقال آب	۲	۲	۳	۳	۳	۳	۲/۶۷۹۹	۶
	شبکه توزیع آب	۲	۲	۳	۲	۲	۴	۲/۶۴۵۱	۷
	شبکه جمع‌آوری فاضلاب	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۲/۲۴۶۷	۹
	خطوط انتقال فاضلاب	۲	۲	۲	۲	۲	۳	۲/۲۴۶۷	۱۰
	تصفیه‌خانه فاضلاب	۳	۳	۳	۳	۳	۵	۳/۴۹۳۴	۳

جدول ۱۲. ارزیابی نهایی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با مخاطرات صنعتی (سناریو دوم)

مخاطره - تهدید	دارایی‌ها	شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری						سطح آسیب‌پذیری	رده‌بندی دارایی‌ها (رتبه)
		ضعف ذاتی	ضعف ایمنی و حفاظتی	محل استقرار	پیچیدگی سیستمی	وابستگی سیستمی	افزونگی	پایین: (۱≥V≥۲) متوسط: (۲>V≥۳) بالا: (۳>V≥۴) بحرانی: (۴>V≥۵)	
		۰/۱۳۹۵	۰/۱۸۰۶	۰/۱۵۱۷	۰/۱۲۸۳	۰/۱۵۳۲	۰/۲۴۶۷	امتیاز نهایی	
انسان‌ساخت - مخاطرات صنعتی	منابع آب سطحی	۴	۴	۳	۳	۳	۲	۳/۰۷۳۴	۴
	منابع آب زیرزمینی	۲	۱	۲	۳	۳	۲	۲/۱۰۰۹	۹
	تصفیه‌خانه‌های آب	۴	۴	۵	۵	۵	۳	۴/۱۸۶۵	۱
	مخازن ذخیره آب	۲	۲	۴	۳	۳	۳	۲/۸۳۱۶	۵
	ایستگاه‌های پمپاژ آب	۴	۳	۴	۵	۵	۴	۴/۱۰۰۹	۲
	خطوط انتقال آب	۲	۲	۲	۳	۳	۳	۲/۵۲۸۲	۶
	شبکه توزیع آب	۱	۲	۳	۲	۲	۴	۲/۵۰۵۶	۷
	شبکه جمع‌آوری فاضلاب	۱	۲	۲	۲	۲	۳	۲/۱۰۷۲	۸
	خطوط انتقال فاضلاب	۱	۲	۱	۲	۲	۳	۱/۹۵۵۵	۱۰
	تصفیه‌خانه فاضلاب	۳	۳	۲	۳	۳	۵	۳/۳۴۱۷	۳



تصویر ۴. تغییرات وزن معیارها به‌ازای مقادیر مختلف



تصویر ۵. تغییرات امتیاز منابع آسیب‌پذیر به‌ازای مقادیر مختلف

جدول ۱۳. ارزیابی نهایی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با آلودگی محیطی (سناریو سوم)

مخاطره - تهدید	دارایی‌ها	شاخص‌های ارزیابی آسیب‌پذیری						سطح آسیب‌پذیری	رده‌بندی دارایی‌ها (رتبه)
		ضعف ذاتی	ضعف ایمنی و حفاظتی	محل استقرار	پیچیدگی س‌یستمی	وابستگی س‌یستمی	افزونگی	پایین: (۱≥V≥۲) متوسط: (۲>V≥۳) بالا: (۳>V≥۴) بحرانی: (۴>V≥۵)	
		۰/۱۳۹۵	۰/۱۸۰۶	۰/۱۵۱۷	۰/۱۲۸۳	۰/۱۵۳۲	۰/۲۴۶۷	امتیاز نهایی	
انسان‌ساخت عمدی – آلودگی محیطی	منابع آب سطحی	۵	۵	۵	۳	۳	۲	۳/۶۹۶۹	۱
	منابع آب زیرزمینی	۳	۲	۲	۳	۳	۲	۲/۴۲۱۰	۵
	تصفیه‌خانه‌های آب	۳	۳	۳	۵	۵	۳	۳/۵۶۳۰	۲
	مخازن ذخیره آب	۲	۱	۲	۳	۳	۳	۲/۳۴۷۶	۶
	ایستگاه‌های پمپاژ آب	۳	۱	۱	۵	۵	۴	۳/۱۴۵۱	۳
	خطوط انتقال آب	۲	۱	۱	۳	۳	۳	۲/۱۹۵۹	۷
	شبکه توزیع آب	۲	۱	۱	۲	۲	۴	۲/۱۶۱۱	۸
	شبکه جمع‌آوری فاضلاب	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۱/۷۷۴۹	۹
	خطوط انتقال فاضلاب	۱	۱	۱	۲	۲	۳	۱/۷۷۴۹	۱۰
	تصفیه‌خانه فاضلاب	۱	۱	۱	۳	۳	۵	۲/۵۴۹۸	۴

شماره ۴ و ۵ نیز مشخص است.

همان‌طور که هم جداول و هم نمودارها نشان می‌دهد از مقادیر β=۴>β، نمودارها همگرا شده‌اند و تغییرات زیادی ندارند پس می‌توان β=۴ را مقدار همگراشده در نظر گرفت که وزن معیارها و امتیاز منابع آسیب‌پذیر در این مقدار برای مسئله ثابت می‌باشد. پس در مقدار β=۴ وزن نهایی معیارها و همچنین امتیازات نهایی منابع آسیب‌پذیر برآورد و نتایج به‌ترتیب در جدول شماره ۹ و ۱۰ و به‌صورت نموداری در تصاویر شماره ۶ و ۷ نشان داده شده است. براین‌اساس در بین معیارها، افزونگی با وزن ۰/۲۴۶۷ اولویت اول را کسب کرده است. ضعف ایمنی و حفاظتی اولویت دوم و وابستگی اولویت سوم را کسب کرده است. در بین منابع آسیب‌پذیر نیز، تصفیه‌خانه‌های آب رتبه اول و ایستگاه های پمپاژ آب رتبه دوم و منابع آب سطحی رتبه سوم را کسب کرده است.

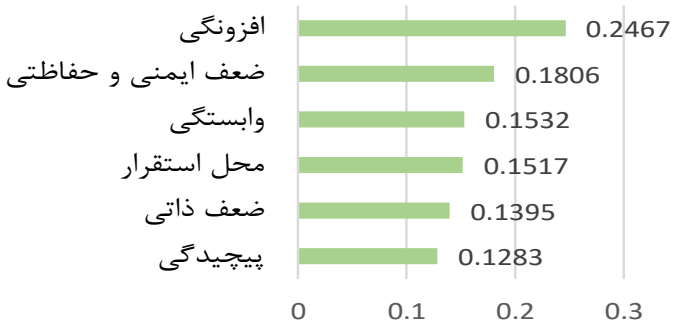
بحث

درنهایت در راستای هدف اصلی پژوهش، ارزیابی نهایی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با سوانح انسان ساخت در قالب سه سناریوی محتمل یعنی انفجار، مخاطرات صنعتی و آلودگی محیطی با مدنظر قرار دادن ضرایب وزنی معیارهای ارزیابی و اخذ نقطه نظرات مجدد از خبرگان به شرح جداول شماره ۱۱، ۱۲ و ۱۳ برآورد و با پیاده‌سازی آن در محیط GIS نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهری همدان طبق تصاویر شماره ۸، ۹ و ۱۰ مشخص شدند. نتایج نشان می‌دهد تصفیه‌خانه‌های آب شهر در مواجهه با انفجار (سناریو اول) و مخاطرات صنعتی (سناریو دوم) با کسب امتیاز ۴/۱۸۶۵ در رتبه اول و برحسب تعریف سطوح آسیب‌پذیری در سطح بحرانی قرار گرفته است و در مواجهه با آلودگی محیطی (سناریو سوم) این منابع آب سطحی است که با امتیاز ۳/۶۹۶۹ در رتبه اول و برحسب تعریف سطوح آسیب‌پذیری در سطح بالا قرار دارد که نیازمند انجام اقدامات ایمنی و کاهش آسیب‌پذیری هستند.

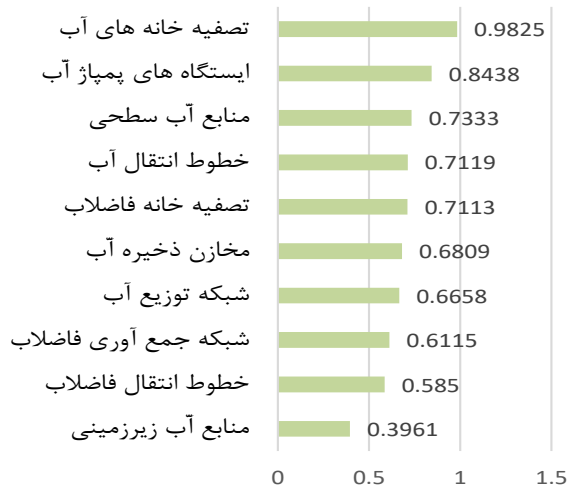
نتیجه‌گیری

در این مطالعه آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان (به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شهرهای منطقه غرب ایران) در مواجهه با سوانح انسان‌ساخت با رویکرد معرفی الگوی بهینه مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج ارزیابی ابتدایی آسیب‌پذیری دارایی‌های فیزیکی سیستم آب‌وفاضلاب شهر موردمطالعه با استفاده از روش ترکیبی تحلیلی SECA-GIS[12] نشان داد. از بین معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری، افزونگی سیستم با وزن ۰/۲۴۶۷، ضعف ایمنی و حفاظتی با وزن ۰/۱۸۰۶ و وابستگی سیستمی با وزن ۰/۱۵۳۲

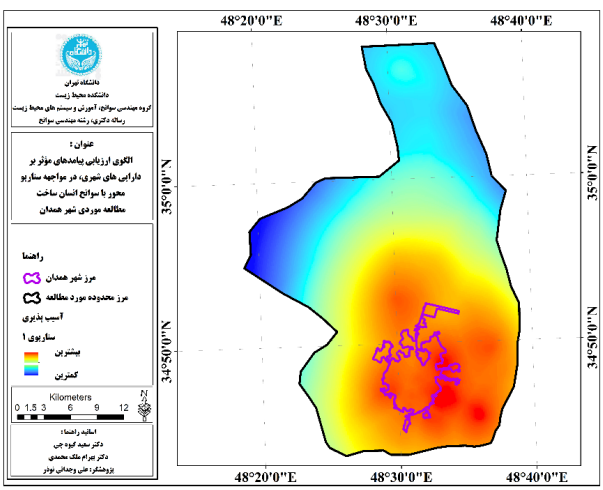
12. Simultaneous Evaluation of Criteria and Alternatives - Geographic Information System



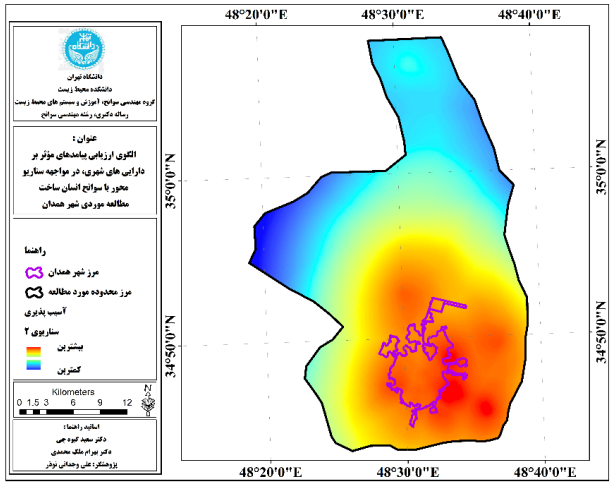
تصویر ۶. رده‌بندی معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌ها برحسب وزن اکتسابی)



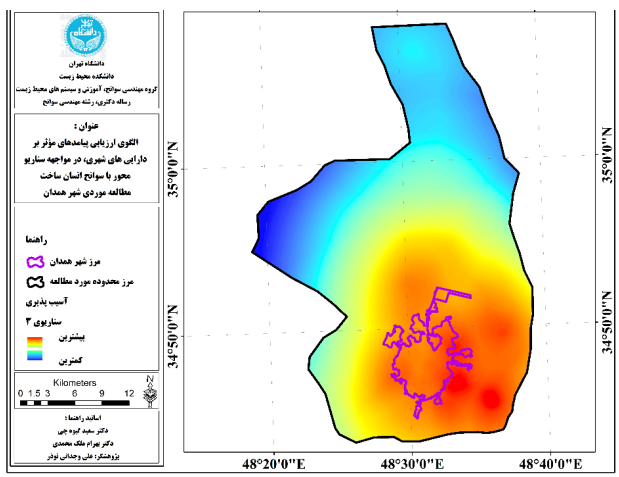
تصویر ۷. رده بندی ابتدایی دارایی‌ها بر مبنای آسیب‌پذیری و برحسب امتیاز اکتسابی



تصویر ۸. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با انفجار (سناریو اول)



تصویر ۹. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با مخاطرات صنعتی (سناریو دوم)



تصویر ۱۰. نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر همدان در مواجهه با آلودگی محیطی (سناریو سوم)

به‌ترتیب اولویت اول تا سوم را به خود اختصاص داده و از بین دارایی‌های فیزیکی نیز تصفیه‌خانه‌های آب، ایستگاه‌های پمپاژ آب و منابع آب سطحی به‌ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم آسیب‌پذیری قرار دارند. در ادامه در راستای اعتبارسنجی الگوی کاربردی، آسیب‌پذیری دارایی‌های آب و فاضلاب شهر مورد مطالعه مجدداً در قالب سه سناریوی محتمل یعنی انفجار، مخاطرات صنعتی و آلودگی محیطی در شهر مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصله بیانگر امتیاز ۴/۱۸۶۵ تصفیه‌خانه‌های آب شهر به‌عنوان دارایی اولویت دار و رتبه یک در مواجهه با انفجار (سناریو اول) و مخاطرات صنعتی (سناریو دوم) و امتیاز ۳/۶۹۶۹ منابع آب‌های سطحی به‌عنوان دارایی اولویت دار و رتبه یک در مواجهه با آلودگی محیطی (سناریو سوم) بود که تطبیق این نتایج با یافته‌های ارزیابی ابتدایی و همچنین مشاهدات عینی و سایر مطالعات موجود بیانگر دقت و صحت الگوی مورداستفاده در این پژوهش است. ضمناً براساس پیاده‌سازی الگو در شهر همدان، اهم نوآوری این الگو به شرح ذیل است:

۱- شناسایی معیارهای ارزیابی منطبق با موضوع و وزن‌دهی آن‌ها باتوجه‌به غربالگری چند مرحله‌ای برحسب نقطه نظرات خبرگان.

۲- کاربرد روش SECA به‌عنوان یک روش بومی و ایرانی برای ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی‌ها در مواجهه با سوانح.

۳- ارائه ساختار و فرآیند جدید برای تدوین سناریو.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

در این مطالعه، تمامی اصول اخلاقی رعایت شد. هیچ‌گونه آزمایشی بر روی نمونه‌های انسانی یا حیوانی انجام نشد؛ ازاین‌رو، نیازی به دریافت کد تأییدیه اخلاقی نبود.

حامی مالی

این مقاله برگرفته از رساله دکتری در رشته مهندسی سوانح از دانشگاه تهران است. این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی و روش‌شناسی، انجام پژوهش و گردآوری داده‌ها و تحلیل رسمی و پیش‌نویس اولیه مقاله: علی وجدانی نوذر؛ نگارش -بازبینی و ویرایش: سعید گیوه‌چی و بهرام ملک محمدی؛ نظارت و مدیریت پروژه: سعید گیوه‌چی؛ تأیید نسخه نهایی: تمامی نویسندگان.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از تمامی متخصصانی که با ارائه اطلاعات و بینش‌های ارزشمند در این مطالعه مشارکت کردند، تشکر می‌کنند.

References

Bakhshy,F., Zarghani, S. H., & Kharazmi, O. A. (2020). [Analysis of Vulnerable Elements of the Cities Water Infrastructure against Terrorist Threats (Persian)]. *Geopolitics Quarterly, 16*(2), 32-57. [Link]

Behsaz Ravesh Engineering Company. (2023). [Operational plan for water and wastewater emergencies in Hamedan (Persian)]. Tehran:Behsaz Ravesh Engineering Company.

Boakye, J., Murphy, C., Gardoni, P., & Kumar, R. (2022). Which consequences matter in risk analysis and disaster assessment? *International Journal of Disaster Risk Reduction, 71,* 102740. [DOI:10.1016/j.ijdrr.2021.102740]

Carbonelli, M., Quaranta, R., Gaudio, P., Di Giovanni, D., Xerri, G. P., & Malizia, A., et al. (2024). Building risk assessment methodology for explosive and non-conventional terrorist attacks. *The European Physical Journal Plus, 139,* 669. [DOI:10.1140/epjp/s13360-024-05422-6]

Çal, I., & Ciravoglu, A. (2025). Determining vulnerability indicators of buildings for sea-level rise and floods in urban coastal areas. *Sustainability, 17*(1), 27. [DOI:10.3390/su17010027]

Fadaei, A. (2023). Study of Contaminants in Iranian Drinking Water and their Health Outcomes: A Review. *Pollution, 9*(4), 1450-1474. [DOI:10.22059/POLL.2023.356999.1839]

Fabbri, L., & Wood, M. P. (2019). Accident Damage Analysis Module (ADAM): Novel European Commission tool for consequence assessment-Scientific evaluation of performance. *Process Safety and Environmental Protection, 129,* 249-263. [DOI:10.1016/j.psep.2019.07.007]

Feyzi, E., Naghavi, M., & Fakhraei, H.(2020). [Risk Assessment of Hydroelectric Concrete Dams Using Combined FEMA and RAM-CAP Method with Passive Defense Approach, Case Study: Leero Concrete Dam (Persian)]. *Passive Defense, 11*(2), 83-94. [Link]

Givehchi, S. (2018). [*A methodology for identifying, ranking, and assessing threats and hazards in the field of infrastructure* (Persian)]. Tehran: University of Tehran. [Link]

Guan, W., Liu, Q., & Dong, C. (2022). Risk assessment method for industrial accident consequences and human vulnerability in urban areas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 76,* 104745. [DOI:10.1016/j.jlp.2022.104745]

Hamadan Municipality. (2017). [*Hamadan comprehensive urban plan: Base map of the plan* (Persian)]. Hamadan: Hamadan Municipality.

Hellstrom, T. (2007). Critical infrastructure and systemic vulnerability: Towards a planning framework. *Safety Science, 45*(3), 415-430. [DOI:10.1016/j.ssci.2006.07.007]

Jalali Farahani, G. (2012). [*Methods and models for estimating threats in passive defense* (Persian)].Tehran: Imam Hossein University Press. [Link]

Kays, H. M. I., Sadri, A. M., Muraleetharan, K. K., Harvey, P. S., & Miller, G. A. (2025). Modeling flood propagation and cascading failures in interdependent transportation and stormwater networks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection, (48),* 100741. [DOI:10.1016/j.ijcip.2025.100741]

Kazemi Balgeshiri, M. J., & Golestaneh, M. (2014). [A study of passive defense in water storage tanks and their transmission lines (Persian)]. *Passive Defense Quarterly, 5*(4), 19–50. [Link]

Keshavarz-Ghorabaee, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2018). Simultaneous evaluation of criteria and alternatives (SECA) for multi-criteria decision-making. *Informatica, 29*(2), 265-280. [DOI:10.15388/Informatica.2018.167]

Kulba, V., Bakhtadze, N., Zaikin, O., Shelkov, A., & Chernov, I. (2017). Scenario analysis of management processes in the prevention and the elimination of consequences of man-made disasters. *Procedia Computer Science, 112,* 2066-2075. [DOI:10.1016/j.procs.2017.08.247]

Lee, Y., Kim, J., Kim, J., Kim, J., & Moon, I. (2010). Development of a risk assessment program for chemical terrorism. *Korean Journal of Chemical Engineering, 27*(2), 399-408. [DOI:10.1007/s11814-010-0094-x]

Lewis, T. G. (2015). *Critical infrastructure protection in homeland security : Defending a networked nation.* Hoboken, New Jersey : Wiley. [Link]

Liu, J., Tan, L., & Ma, Y. (2024). An integrated risk assessment method for urban areas due to chemical leakage accidents. *Reliability Engineering & System Safety, 247,* 110091. [DOI:10.1016/j.ress.2024.110091]

Lu, Z., Yan, D., Jiang, H., Xue, H., & Xu, Z. D. (2025). Cascading failures in urban infrastructure systems: A comprehensive review of disaster chain mechanisms. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, 4*(3), 100157. [DOI:10.1016/j.iintel.2025.100157]

Mashhadi, H., & Amini Varki, S. (2015). [Developing and presenting a model for threat assessment, vulnerability assessment, and risk analysis of critical infrastructures with an emphasis on passive defense (Persian)]. *Journal of Emergency Management, 4*(7), 69-85. [Link]

Modiri, M., Ahadnejad, M., & Hosseini, S. A. (2017). [Risk management in human-made crises with a passive defense approach: A case study of Tehran Metropolis (Persian)]. *Journal of Urban Research and Planning, 7*(27),163-182. [Link]

Omidvar, B., & Vejdani Nozar, A. (2021). [Qualitative risk assessment of critical water infrastructure: A case study of a city's water supply system (Persian)]. Paper presented at *12th International Congress on Civil Engineering*, Mashhad, Iran.

Otto-Zimmermann, K., & Balbo, A. (2012). The global adaptation community expands its scope. In K. Otto-Zimmermann (Eds), *Resilient cities 2* (pp. 3-8). Dordrecht: Springer. [DOI:10.1007/978-94-007-4223-9_1]

Roudbari, S., Nekouei, M. A., & Taherkhani, R. (2017). [Assessment of the vulnerability of water supply system components (Persian)]. *Journal of Engineering and Construction Management, 1*(2), 32–36. [Link]

Sheykhali, M., & Emamzadeh, S. S. (2020). [The study of risk management of water and wastewater facilities using combined method Ahp and Ramcap (Persian)]. *Sharif Journal of Civil Engineering, 36.2*(2.2), 81-91. [DOI:10.24200/j30.2019.52458.2473]

Skulmoski, G. J., Hartman, F. T., & Krahn, J. (2007). The Delphi Method for Graduate Research. *Journal of Information Technology Education: Research, 6,* 1-21. [DOI:10.28945/199]

Sotoudeh-Anvari, A. (2023). Root Assessment Method (RAM): A novel multi-criteria decision making method and its applications in sustainability challenges. *Journal of Cleaner Production, 423,* 138695. [DOI:10.1016/j.jclepro.2023.138695]

Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-criteria decision making (MCDM) methods and concepts. *Encyclopedia, 3*(1), 77-87. [DOI:10.3390/encyclopedia3010006]

Taghinejad, A., & Zonnemat-Kermani, M. (2016). [*Using the RAM-CAP approach to assess the vulnerability of dams and water transmission lines to natural hazards and weapon-related threats* (Persian]. Paper presented at: The National Conference on Passive Defense and Sustainable Development, Tehran, Iran, 15 October, 2016. [Link]

Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research, 169*(1), 1-29. [DOI:10.1016/j.ejor.2004.04.028]

Vejdani Nozar, A. (2025). [A model for assessing the impacts on urban assets under scenario-based human-made disasters: A case study of Hamedan (Persian)] [PhD dissertation]. Tehran: University of Tehran.

This Page Intentionally Left Blank