



Flood Risk Zoning in Vulnerable Components of the Water Supply System of Kashan City

Issa Ilyati¹, Mahmood Akbari^{2*}

1. PhD. Student in Earth Sciences, Groundwater Orientation, Dept. of Earth Sciences, Faculty of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran (Corresponding Author) Makbari@kashanu.ac.ir



<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.502819.3463>

Original Paper

Abstract

The aim of this study is to assess flood risk zoning for the water supply system of Kashan City, including the wells, storage tanks, and transmission and distribution pipelines. To this end, the sub-catchments affecting the water supply system were first identified, and the runoff from each sub-catchment was calculated using the SCS rainfall-runoff model. By inputting the characteristics of the runoff hydrograph of each sub-catchment, two-dimensional hydraulic modeling was conducted in the identified waterways using HEC-RAS 2D software, and the flow characteristics, including depth and velocity, were calculated for a flood with 50-year return period. Subsequently, the flood hazard index was determined for the flood-prone components of the system. On the other hand, the vulnerability index of the components of the water supply system was determined using five indicators: extent and area of influence, possibility of replacement, possibility of reconstruction or repair, relative economic value, and degree of dependency. Subsequently, the flood risk for each component of the water supply system was calculated using the hazard and vulnerability indices, and a risk zone map was created for each component. The results showed that in the water supply system of Kashan City, there are 22 wells with a risk index ranging from 61.8 to 120.6, 7 storage tanks with a risk index ranging from 66 to 126, and 31 kilometers of transmission and distribution pipelines, including the Zayandeh Rud water transfer line, with a risk index ranging from 11 to 102 at flood risk. By identifying the higher-risk components, priorities were established for implementation to reduce flood risk, and solutions were proposed to mitigate vulnerability, decrease flood hazards, and ultimately reduce the risks associated with the components of the Kashan city water supply system.

Keywords:
Flood Risk, Zoning,
Water Supply System,
HEC-RAS, SCS.



Received: Sep. 10, 2024
Revised: Oct. 3, 2024
Accepted: Nov. 12, 2024

To cite this article:

Ilyati, I. and Akbari, M., 2024. Flood risk zoning in vulnerable components of the water supply system of Kashan City. *Water and Wastewater*, 35(4), 113-131.
<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.502819.3463>.

© The Author(s).

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

Use your device to scan and read the article online



1. Introduction

The climate change observed in recent years has exacerbated the risk of flooding across the country. Among the counties of Isfahan province, Isfahan, Ardestan, and Kashan have experienced the highest frequency of flood events. Kashan, due to its location in a flood-prone plain, is particularly susceptible to flooding. Between 1951 and 2001, floods in Kashan resulted in 1512 fatalities, with 90% of these casualties attributed to the flood of July 21, 1956 (Moayeri and Entezari, 2008).

Flood hazard and risk maps are essential tools that provide readily understandable and actionable information about flood inundation for planners and stakeholders.

The majority of research on flood mapping has focused on delineating flood hazard zones, with comparatively less attention paid to the development of flood risk maps. In the limited studies that have addressed flood risk, qualitative modeling approaches have primarily been employed to generate risk maps.

In contrast to previous studies, this research employs a hybrid quantitative-qualitative modeling approach for flood risk zoning. Specifically, quantitative modeling, utilizing hydrological and hydraulic models, is used for flood hazard zoning, while qualitative modeling, based on relevant qualitative criteria, is used for vulnerability assessment. Another distinctive feature of this study is its focus on flood risk zoning for water supply system components, whereas previous studies have primarily focused on floodplains or urban areas. Furthermore, the use of the two-dimensional model in HEC-RAS software version 6.2 offers a novel capability to calculate flood inundation extents, flow velocities, and depths using the RAS Mapper tool, without the need for the HEC-geo-RAS extension or software such as ArcMap.

2. Methodology

This research aims to develop a flood risk zoning map for the water supply system of Kashan. The study comprises three main stages:

1-Hydrological rainfall-runoff modeling and estimation of peak flood discharge for the return periods of interest.

2-Hydraulic flow modeling and generation of flood hazard maps for the identified watercourses.

3-Identification of vulnerable components of the water supply system and development of a flood risk zoning map for these components.

The study flowchart is illustrated in Fig. 1.

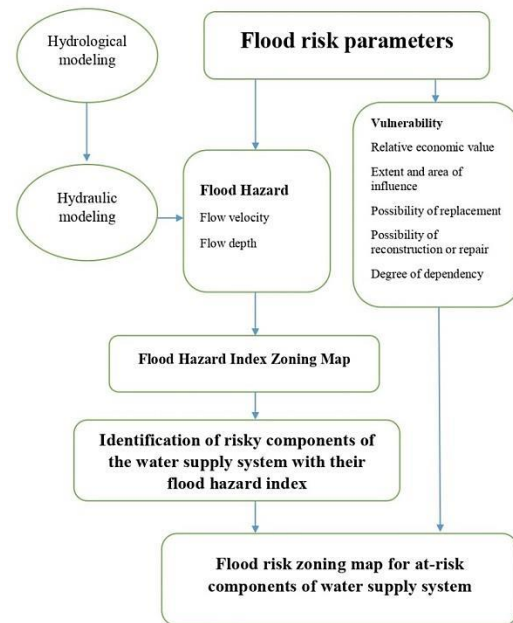


Fig. 1. Structure of the research methodology

For hydrological rainfall-runoff modeling, 24-hour maximum rainfall data from meteorological stations within the study area are collected. Data homogeneity and length sufficiency are verified using statistical tests in SPSS software, and rainfall depths for different return periods are estimated. Based on the calculated design rainfall, and using the characteristics of the watersheds, the design flood with different return periods can be calculated. To analyze watershed characteristics, stream networks and watershed boundaries are delineated using Digital Elevation Model¹ data in ArcGIS software, and related parameters such as watershed area, main channel length, elevation difference, main channel slope, and time of concentration are calculated. The runoff coefficient (CN) is calibrated using HEC-HMS software and data from available hydrometric stations. Finally, by calculating runoff depth and time of concentration, the probable maximum discharge and outflow hydrograph from each sub-basin are calculated.

For hydraulic flow modeling, the calculated discharge, flow boundary conditions, computational cell size, and Manning's roughness coefficient are input into the two-dimensional HEC-RAS hydraulic model. Flow velocity and depth are then calculated for each cell for different return periods. Hazard classification in this study follows the Australian Emergency Management Handbook² risk zoning approach, as

¹ Digital Elevation Model (DEM)

² Australian Emergency Management Handbook (AEMH)



recommended by Regulation No. 821. Accordingly, the hazard index (H) is determined by multiplying flow depth (D) by flow velocity (v), as shown in Equation 1

$$H = D \cdot V \quad (1)$$

Considering the flood hazard map from the previous stage and the geographical location of various water supply system components, including wells, storage tanks, transmission and distribution pipelines, components at risk of flooding are identified. To determine the vulnerability level, the report on determining the level of importance of water supply facilities in Kashan city, which was previously prepared, is used.

The vulnerability index (Vu) for the various components of the Kashan water supply system ranges from zero to twenty-five. Considering the flood hazard index and the vulnerability index of the various components, the risk index (R), of each component, according to Publication 821, is determined from Equation 2

$$R = H \cdot Vu \quad (2)$$

Note that the absolute value of the risk index does not have a specific meaning and is only used as a relative basis for comparing the risk of different components.

3. Discussion and results

From the 62 wells in the system for which geographic locations were obtained, 22 wells are exposed to flood risk. Based on the potential hazard levels and the vulnerability of each well, the associated risk for each well has been calculated. The calculated risk index values range from 61.8 to 120.6. Fig. 2 illustrates the flood risk zoning map for the system's wells.

In the Kashan water system, there are 18 storage tanks, constructed of concrete and metal, and implemented in both elevated and ground configurations. Based on the flood risk map and vulnerability assessments, 7 tanks located in the northeast, west, and south of Kashan are at risk of flooding, exhibiting risk indices ranging from 66 to 126. The flood risk zoning map for these tanks is displayed in Fig. 3.

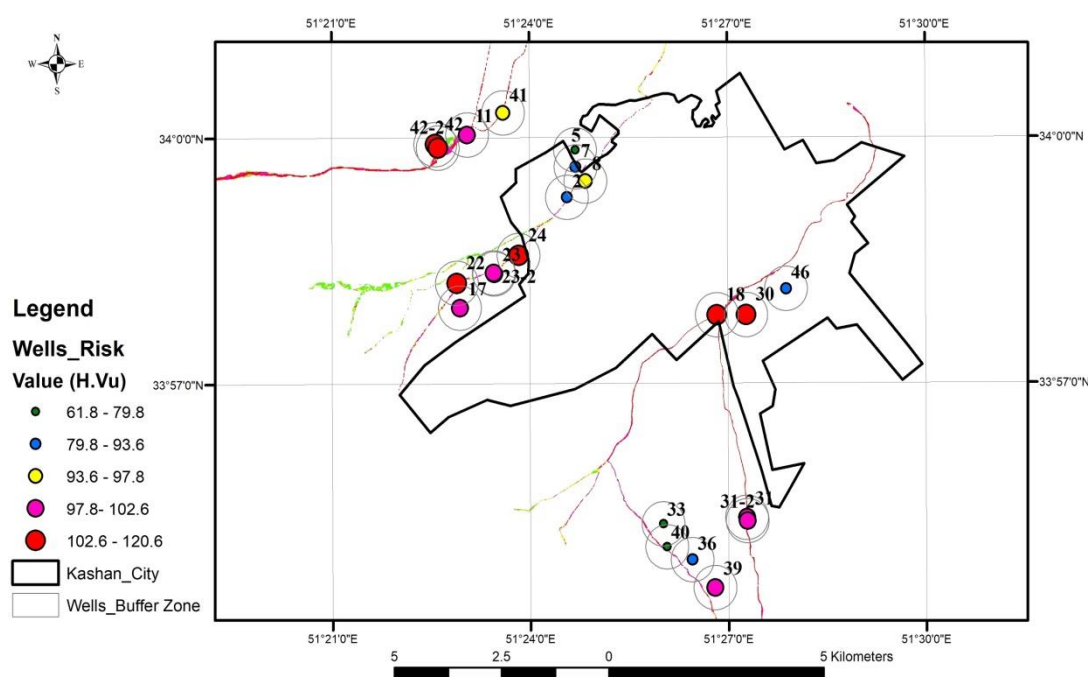


Fig. 2. Flood risk zoning map of wells for the flood with 50-year return period



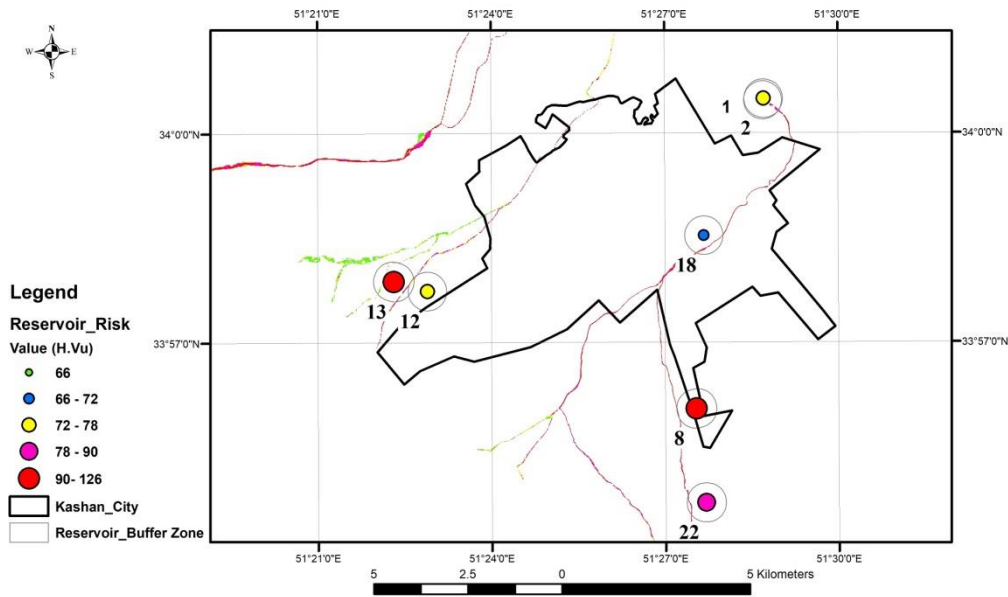


Fig. 3. Flood risk zoning map of storage tanks for the flood with 50-year return period

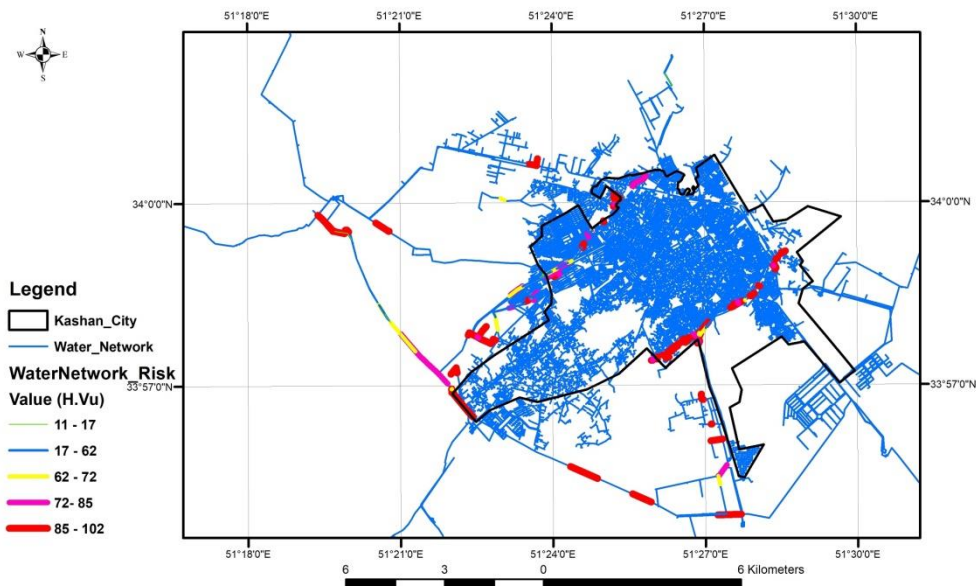


Fig. 4. Flood risk zoning map of water transmission and distribution lines for the flood with 50-year return period

The water distribution and transmission network in Kashan includes consumer distribution lines, main transmission lines between tanks, wells, and the distribution network, as well as the Zayandeh Rud water transfer line to Kashan. The total length of the distribution and transmission network in Kashan is approximately 1000 kilometers. Additionally, the Zayandeh Rud water transfer line to Kashan stretches about 190 kilometers, with 32 kilometers of this line being studied, located downstream of the identified sub-basins.

Fig. 4 presents the flood risk zoning map for the components of the water transmission and distribution lines. It shows that approximately 31 kilometers of the network and transmission lines are exposed to flooding, with 6.5 kilometers of this length associated with the Zayandeh Rud water transfer line within the study area. Further investigations indicate that about 21 kilometers of the flood-prone lines have a diameter greater than 200 millimeters, while 10 kilometers have a diameter of less than 200 millimeters.

Table 1 provides additional information regarding the lengths of the networks and the



Table 1. Summary of flood risk index classification for different components of water supply lines of Kashan city

Risk index	Total length of components at risk (meters)	Type of components at risk
11-17	1739	Transmission lines - Distribution network - Zayandeh Rud line
17-62	6333	Transmission lines - Distribution network
62-72	4194	Transmission - Zayandeh Rud line
72-85	5762	Transmission lines - Distribution network
85-102	13294	Transmission lines - Distribution network - Zayandeh Rud line

functionality of the flood-risked lines, categorized by their risk classification.

The results indicate that although many components of the transmission and distribution lines fall into the high-risk category according to the hazard index (which is the product of depth and velocity of flood at each pixel), only those sections with higher vulnerability exhibit a greater flood risk. Therefore, to implement preventive measures, these components should be prioritized.

After identifying vulnerable components and assessing the associated risks, possible measures to mitigate flooding and make these vulnerable areas resistant will be examined. These measures can be divided into two categories: structural and non-structural measures. Structural measures include the construction of barriers and levees along flood paths, the establishment of diversion routes for floodwaters, the construction of flood dispersion systems, and the use of corrective embankments or storage dams to reduce peak flood discharge, among others. These actions aim to decrease both the hazard levels and ultimately the flood risk to the system. Non-structural measures also include a variety of management measures such as: watershed and land use management, planning and management along rivers and streams, flood forecasting and warning, preventive and protective measures in flood-prone areas, etc., which can be effective in reducing flood damage.

4. Conclusions

In this study, flood risk assessment in the Kashan water supply system was conducted to facilitate management, prevention, and protective actions before flood events. The initial step involved hydrological computations to determine runoff and flood discharge rates from upstream sub-basins leading to the system. Employing a 50-year return period, two-dimensional (2D) hydraulic flood modeling was performed using HEC-RAS software within the identified watercourse channels. Per Regulation No. 821, flood hazard zoning was based on a hazard index equivalent to the product of flood depth and velocity, and a flood hazard map was generated. By integrating the hazard index with the vulnerability index of system components, derived from the report on determining the level of importance of water supply facilities in Kashan city, the associated risk for each component was calculated.

The results indicated that 22 out of 62 wells and 7 out of 18 storage reservoirs in Kashan are exposed to a 50-year return period flood risk. Furthermore, approximately 24.5 kilometers of the 1000-kilometer water supply network and transmission lines, along with 6.5 kilometers of the 32-kilometer Zayandeh Rud water transfer line within the study area, are at risk of flooding. For each of these components, the risk was computed, and flood risk zoning maps were generated.

Based on these findings, the priority of components for implementing protective and preventive measures against flood risks within the Kashan water supply system was determined. The necessary measures could include actions aimed at reducing the magnitude of flood hazards or decreasing the vulnerability of the components.

This research effectively demonstrated the utility of the 2D HEC-RAS model for extracting flood hazard maps. It provides a comprehensive roadmap from the initial acquisition of rainfall data, through hydrological rainfall-runoff modeling, hydraulic flood flow modeling, flood velocity and depth calculations, flood hazard mapping, to the calculation of risk for each component and the development of flood risk zoning maps for the water supply system components.

Future research could explore alternative hydrological modeling methods, as well as other software tools capable of hydraulic modeling.





پهنه‌بندی ریسک سیلاب در اجزای آسیب‌پذیر سامانه آبرسانی شهر کاشان

عیسی ایلیاتی^۱، محمود اکبری^{۲*}

۱- دانشجوی دکترای علوم زمین گرایش آب‌های زیرزمینی، بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
 ۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران (نویسنده مسئول) Makbari@kashanu.ac.ir

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.502819.3463>

مقاله پژوهشی

چکیده

هدف از این پژوهش، پهنه‌بندی ریسک سیلاب برای سامانه آبرسانی شهر کاشان شامل چاه‌ها، مخازن ذخیره و خطوط انتقال و توزیع آب بود. به این منظور ابتدا زیرحوضه‌های مؤثر بر سامانه آب شناسایی و دبی حاصل از هر زیرحوضه با استفاده از مدل بارش-رواناب SCS محاسبه شد. با ورود مشخصات هیدروگراف سیلاب خروجی هر زیرحوضه، مدل‌سازی هیدرولیکی در بستر مسیل‌های شناسایی شده در نرم‌افزار HEC-RAS 2D انجام شد و مشخصات جریان شامل عمق و سرعت رواناب برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ ساله محاسبه شد. سپس شاخص خطر سیلاب برای اجزای سامانه که در معرض خطر سیل قرار داشتند، تعیین شد. از طرف دیگر میزان شاخص آسیب‌پذیری اجزاء سامانه آبرسانی بر مبنای ۵ شاخص گسترده و حوزه نفوذ، امکان جایگزینی، امکان بازسازی یا تعمیر، ارزش نسبی اقتصادی و شدت وابستگی مشخص شد. در ادامه ریسک سیلاب هر یک از اجزاء سامانه آب با استفاده از میزان شاخص خطر و شاخص آسیب‌پذیری محاسبه شد و نقشه پهنه‌بندی ریسک برای اجزاء در معرض خطر سیلاب ارائه شد. نتایج نشان داد در سامانه آبرسانی شهر کاشان، تعداد ۲۲ حلقه چاه با شاخص ریسک بین ۶۱/۸ تا ۱۲۰/۶، تعداد ۷ مخزن ذخیره با شاخص ریسک بین ۱۲۶ تا ۳۱ کیلومتر از خطوط شبکه آبرسانی و انتقال و خط انتقال زاینده‌رود با شاخص ریسک بین ۱۱ تا ۱۰۲ در معرض ریسک سیلاب قرار دارند. با شناخت اجزاء با ریسک بالاتر، اولویت‌های اجرایی برای کاهش خطر سیلاب مشخص شد و راهکارهایی به منظور کاهش آسیب‌پذیری، کاهش خطر سیلاب و در نهایت کاهش ریسک مترتب بر اجزاء سامانه آب شهر کاشان ارائه شد.

واژه‌های کلیدی:

ریسک سیلاب،
پهنه‌بندی، سامانه
آبرسانی، HEC-RAS
SCS



دریافت: ۱۴۰۳/۷/۲۰

اصلاح: ۱۴۰۳/۷/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۲

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



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

ایلیاتی، ع، اکبری، م، ۱۴۰۳، پهنه‌بندی ریسک سیلاب در اجزای آسیب‌پذیر سامانه آبرسانی شهر کاشان.

آب و فاضلاب، ۳۵(۴)، ۱۳۱-۱۱۳.

<https://doi.org/10.22093/wwj.2025.502819.3463>

© The Author(s).

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

۱- مقدمه

تغییرات اقلیمی رخ داده در سال‌های اخیر باعث تشدید خطر سیلاب در کل کشور شده است. در ۴۰ سال گذشته بیشتر از ۳۷۰۰ واقعه سیل در کشور به ثبت رسیده است که از این بین ۵۲ درصد آن مربوط به ۱۰ سال اخیر است (Sarai et al., 2020). در سیل سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ از بین ۳۱ استان کشور، ۲۵ استان دچار سیل شده و ۲۳۵ شهر خسارت دیده‌اند (Ebrahimipour et al., 2021).

بیشترین تعداد سیل در بین شهرستان‌های استان اصفهان مربوط به شهرستان‌های اصفهان، اردستان و کاشان بوده است. شهرستان کاشان به واسطه قرارگیری در دشت سیلابی همراه در معرض وقوع سیلاب قرار داشته است، به طوری که در بین سال‌های ۱۳۳۰ تا ۱۳۸۰ واقعه سیلاب تعداد ۱۵۱۲ کشته در کاشان برجای گذاشته که ۹۰ درصد کل تلفات مربوط به سیل ۱۳۳۵/۴/۳۰ بوده است (Moayeri and Entezari, 2008). در سیل تیرماه سال ۱۳۸۶ در بخش‌های مرکزی، قمصر و برزک کاشان خسارتی بالغ بر ۴۶۷ میلیارد ریال رخ داد که از این مقدار ۲۹ میلیارد ریال به تأسیسات آب و فاضلاب شهری، ۱۴ میلیارد ریال به تأسیسات امور آب منطقه‌ای و ۱۲ میلیارد ریال به تأسیسات آب و فاضلاب روستایی خسارت وارد شده است؛ بنابراین برنامه‌ریزی و انجام اقدامات پیشگیرانه قبل از وقوع سیل در این منطقه لازم و ضروری است. این اقدامات می‌تواند بر اساس نقشه‌های خطر و ریسک مترتب بر هر جزء سامانه اولویت‌بندی شوند تا به صورت مؤثر کارایی داشته باشند.

نقشه‌های خطر و خطرپذیری سیل از انواع نقشه‌های سیل هستند که اطلاعات سیلاب در یک منطقه را به صورت نقشه‌هایی گویا و کاربردی در اختیار برنامه‌ریزان و ذی‌نفعان قرار می‌دهد. در حقیقت مدیریت سیل و شرایط بحرانی ناشی از وقوع آن بدون در اختیار داشتن نقشه‌های سیلاب امکان‌پذیر نیست. ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین نقشه‌های سیل، نقشه‌های پهنه یا گستره سیل است که می‌تواند برای دوره بازگشت‌های مختلف ارائه شود؛ اما پهنه سیل به تنهایی بیانگر میزان خطر سیل و یا آسیب‌پذیری منطقه در برابر سیلاب نیست. عواملی مانند سرعت جریان، عمق جریان، تمرکز جمعیت در حاشیه رودخانه‌ها، کاربری اراضی واقع در سیلاب دشت‌ها، استقرار صنایع در مسیر عبور سیلاب و سازه‌های زیربنایی مهم در معرض خطر سیل بیانگر میزان خطر و بروز خسارت سیل

است که باید در مدیریت سیلاب و ارائه راهکارهای کاهش خسارات سیل مدنظر قرار شود. چنانچه عواملی که به آن اشاره شد در نقشه‌های سیلاب منعکس شود، نقشه‌های تهیه شده به نام نقشه‌های خطرپذیری یا ریسک سیل شناخته می‌شوند. این نوع نقشه‌ها، ابزاری ضروری برای نشان دادن میزان خطرات و آسیب‌پذیری در یک منطقه هستند و درک صحیح از میزان خطرپذیری، بهترین راهکار برای رویارویی با سیل و کاهش میزان آسیب ناشی از سیل ارائه می‌دهد.

در بناهایی مانند سامانه‌های آب‌رسانی خطر سیل می‌تواند شامل غرقاب شدن، آب شستگی، مدفون شدن و شکسته شدن خطوط ارتباطی باشد که تحت تأثیر پارامترهای عمق و سرعت در پهنه سیل‌گیر است. پارامترهای هیدرولیکی سیلاب با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS قابل استخراج است. در عمده پژوهش‌های گذشته استفاده از مدل‌سازی با نرم‌افزار HEC-RAS به منظور تعیین پهنه سیلابی بوده است.

پناهی و حسین‌زاده به منظور تعیین حد سیل‌راه و حاشیه سیل رودخانه دینور در استان کرمانشاه از مدل یک‌بعدی HEC-RAS استفاده کردند. در این پژوهش پردازش داده‌های ژئومتری از طرق الحاقیه HEC-GeoRAS انجام شد. دبی پیک لحظه‌ای ورودی با استفاده از نرم‌افزار Hyfran محاسبه و پهنه سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف شبیه‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی در ۱۳۰ مقطع عرضی استخراج و سیل‌راه و حاشیه سیلاب مشخص شد (Panahi and Hosseinzadeh, 2024).

بای و همکاران نیز قابلیت مدل دو بعدی HEC-RAS را در تهیه نقشه خطر سیلاب در رودخانه قره‌چای رامیان استان گلستان بررسی کردند. در این پژوهش مقدار دبی رخداد سیلابی سال ۱۳۹۷ به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد. ضرایب زبری مائینگ تخمین زده و سپس واسنجی مدل انجام شد. شاخص‌های آماری در ارزیابی مدل نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب مدل بودند. نتایج نشان داد در دوره بازگشت ۱۰۰ سال، با افزایش گستره، عمق و میزان خطر سیلاب، بخش‌هایی از روستای سیدکلاته تحت تأثیر قرار می‌گرفت (Bai et al., 2023).

همچنین الحسین و همکاران در سال ۲۰۲۲ با استفاده از HEC-RAS و HEC-HMS سیلاب رودخانه خازیر در شمال عراق را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار هیدرولوژیکی



بارندگی سالیانه، شیب و کاربری اراضی، به‌عنوان عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب در حوضه در نظر گرفته شدند و با وزن‌دهی به روش تحلیل سلسله مراتبی^۳ و ادغام لایه‌ها در GIS، نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب به دست آمد. نقشه به‌دست‌آمده نسبت به داده‌های سیلاب تاریخی گردآوری شده با استفاده از روش آماری ماتریس درهم‌ریختگی، ارزیابی شد که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای نقشه تولید شده بود. در نقشه به‌دست‌آمده ۳/۷ و ۲/۸ درصد وسعت حوضه به ترتیب در پهنه‌های خطر خیلی زیاد و زیاد سیلاب قرار گرفته است (Nami and Rostami, 2023).

کمالی کفراتی و اسماعیلی نیز به‌منظور شناسایی مناطق مستعد خطر سیل در حوضه آبریز تجن مازندران از روش AHP استفاده کردند. در این پژوهش هفت لایه اطلاعاتی شامل ارتفاع، شیب، فاصله از رودخانه، بارش، جریان تجمعی، لیتولوژی و کاربری اراضی به‌عنوان لایه‌های مؤثر در خطر سیل در نظر گرفته شدند و با استفاده از روش AHP وزن هر لایه محاسبه شد. پس از هم‌پوشانی لایه‌ها نقشه نهایی خطر سیل در پنج گروه بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم تهیه شد که ۲۰ درصد مساحت منطقه جلگه‌ای در کلاس خطر بسیار زیاد و زیاد واقع شده بود (Kamali Kefrati and Ismaili, 2023).

مختاری و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهش مشابه پهنه‌بندی خطر سیلاب را در حوضه آبخیز چلیف‌غریب در الجزایر با استفاده از فرایند AHP انجام دادند و لایه‌های شیب، تراکم زهکشی، نوع خاک، بارندگی، تراکم جمعیت، کاربری اراضی و تراکم سیستم فاضلاب را به‌عنوان لایه‌های مؤثر در نظر گرفتند. نتایج نشان داد ۸ شهر از ۱۵ شهر موجود در حوضه در معرض خطر بالای سیل قرار دارند (Mokhtari et al., 2023).

احمد و همکاران در سال ۲۰۲۴ نیز به بررسی پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از روش AHP مبتنی بر GIS در تریپورای هند پرداختند. در این پژوهش ۹ پارامتر به‌عنوان شاخص خطر انتخاب و پس از امتیازدهی نقشه پهنه‌بندی خطر سیل تهیه شد. نتایج نشان داد ۲۲/۸۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در محدوده پرخطر از نظر سیلاب قرار دارند که بیشترین تراکم زمین‌های کشاورزی و مسکونی نیز در این مناطق هستند (Ahmed et al., 2024).

HEC-HMS نمودارهای هیدروگراف سیل و برآورد حجم سیلاب را انجام دادند. آن‌ها به‌منظور مدل‌سازی و تحلیل خطر سیل، مدل HEC-RAS را با HEC-GeoRAS در ArcGIS ادغام کردند و با تمرکز بر رویدادهای سیل سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۸ مناطق در معرض خطر سیل را بر اساس نقشه طبقه‌بندی عمق سیلاب مشخص کردند. نتایج نشان داد روستاهای نزدیک به دهانه رودخانه با پیامدهای شدیدتر سیل مواجه بودند. این پژوهش اثربخشی HEC-RAS و HEC-HMS را در ارزیابی خطر سیلاب و پیش‌بینی سیل‌های آینده در منطقه نشان داد (AL-Hussein et al., 2022).

در برخی پژوهش‌ها نیز از ادغام مدل‌سازی هیدرولیکی و روش‌های نوین به‌منظور تعیین نقشه خطر استفاده کردند مانند خوش‌کنش و همکاران در سال ۲۰۲۴ که با هدف بهبود پیش‌بینی و تحلیل مخاطرات سیلاب شهری، یک رویکرد نوآورانه را از طریق ادغام مدل‌های پیشرفته هیدرودینامیک با تکنیک‌های یادگیری ماشین^۱ انجام دادند. آن‌ها با مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS شبیه‌سازی دینامیک سیل را انجام دادند و با استفاده از تصاویر با وضوح بالا از لیدار، سناریوهای سیل برای رودخانه تیمز در غرب لندن را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد مدل‌های هیدرودینامیکی دوبعدی نسبت به یک‌بعدی دقت بیشتری در شبیه‌سازی عمق و پهنه سیلاب دارند. همچنین مدل پیشرفته یادگیری ماشین^۲ ET-PCA دقت پیش‌بینی نزدیک به کاملی را با R^2 برابر ۰/۹۹۹ نشان داد. آن‌ها با ادغام داده‌های اجتماعی-اقتصادی، توانستند مناطق آسیب‌پذیر شهری را شناسایی کنند (Khoshkonesh, et al., 2024).

عمده پژوهش‌های انجام شده در تهیه نقشه‌های سیلاب مربوط به تهیه نقشه‌های پهنه خطر سیل است و در خصوص تهیه نقشه‌های ریسک (خطرپذیری) سیلاب پژوهش‌های کمتری انجام شده است. در معدود مطالعات انجام شده در زمینه ریسک سیلاب نیز، نقشه‌های ریسک سیلاب با کمک مدل‌سازی کیفی تهیه شده است. نامی و رستمی پژوهشی به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری سیلاب با رویکرد مبتنی بر GIS-AHP در حوضه آبخیز الموت‌رود انجام دادند. در این پژوهش چهار پارامتر فاصله از رودخانه،

¹ Machine Learning (ML)

² Extra Trees-Principal Component Analysis (ET-PCA)

³ Analytical Hierarchy process (AHP)



سطحی بوده و عمده منبع تأمین آب آن از منابع زیرزمینی و خط انتقال آب زاینده‌رود اصفهان است. تأسیسات سامانه آبرسانی کاشان شامل ۶۲ چاه پمپاژ، ۱۸ مخزن ذخیره زمینی و ۶ مخزن هوایی است. طول شبکه اصلی و فرعی توزیع و انتقال آب در شهر کاشان حدود ۱۰۰۰ کیلومتر است. سامانه آبرسانی شهر کاشان به دلیل قرارگیری در مسیر سیلاب‌های فصلی همواره در معرض خطر سیلاب قرار دارند. موقعیت تأسیسات سامانه آبرسانی کاشان در شکل ۱ نمایش داده شده است.

حوضه آبریز کاشان با مساحت ۶۹۵۰ کیلومتر مربع بین طول‌های جغرافیایی ۵۰/۵۵ تا ۵۲/۱۰ درجه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۳/۳۵ تا ۳۴/۳۰ درجه شمالی واقع شده است. این حوضه از نظر هیدرولوژیکی، در حوضه اصلی آبریز فلات مرکزی و زیر حوضه فرعی دریاچه نمک واقع است.

سامانه آبرسانی شهر کاشان در میانه این حوضه قرار دارد و توسط رواناب‌های زیرحوضه‌های بالادست شهر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. ۱۴ زیرحوضه بالادست که خروجی آنها در مرز ورودی به شهر کاشان (اتوبان کاشان-اصفهان) قرار دارند و سامانه آبرسانی شهر کاشان را تحت تأثیر قرار می‌دهند، با استفاده از نقشه‌های رقومی ارتفاعی در Arcmap و ابزار Hydrology استخراج شدند (شکل ۲).

در این پژوهش برخلاف پژوهش‌های بیان شده، برای پهنه‌بندی ریسک سیلاب، ترکیبی از مدل‌سازی کمی و کیفی استفاده شد. در واقع برای پهنه‌بندی خطر سیلاب از مدل‌سازی کمی و در قالب مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بهره‌گرفته شد و در مدل‌سازی آسیب‌پذیری از مدل‌سازی کیفی و بر اساس معیارهای کیفی مؤثر برای ارزیابی آسیب‌پذیری استفاده شد. دیگر ویژگی خاص این پژوهش این بود که پهنه‌بندی ریسک سیلاب بر روی اجزای سامانه آبرسانی مورد توجه قرار گرفت، درحالی‌که در پژوهش‌های گذشته، پهنه‌بندی ریسک سیلاب در سیلاب‌دشت یا مناطق شهری مدنظر بوده است. علاوه بر این، استفاده از مدل دوبعدی نسخه ۶/۲ نرم‌افزار HEC-RAS قابلیت جدیدی در اختیار قرار داده است که با استفاده از ابزار RAS Mapper و بدون نیاز به افزونه HEC-geo-RAS و نرم‌افزارهایی مانند Arcmap پهنه‌های سیلابی و سرعت و عمق جریان محاسبه می‌شوند.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

شهر کاشان در شمال استان اصفهان و شرق کویر مرکزی ایران واقع شده است. شهرستان کاشان با جمعیت ۳۶۴ هزار نفری پرجمعیت‌ترین شهرستان در استان اصفهان پس از شهرستان اصفهان است. شهر کاشان به دلیل موقعیت اقلیمی فاقد منابع آب

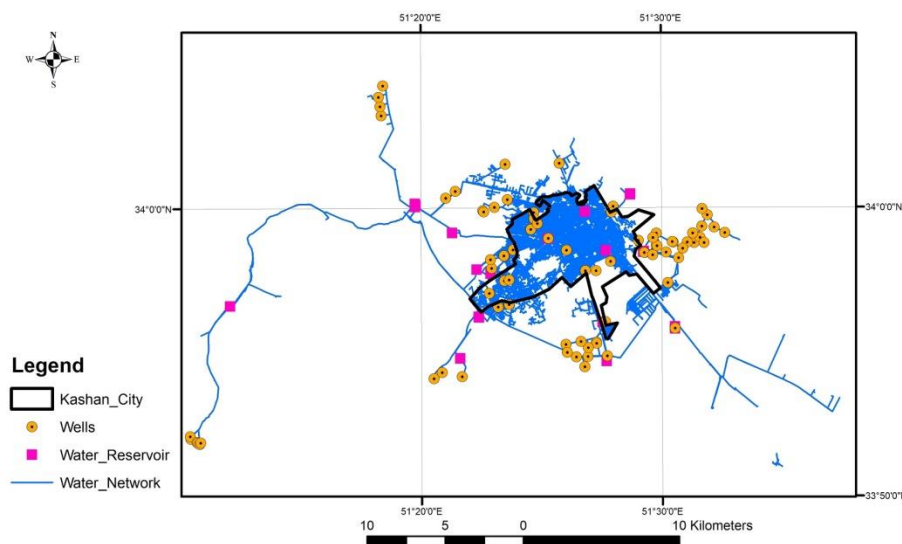


Fig. 1. Location of the water supply system in the city of Kashan

شکل ۱- موقعیت مکانی سامانه آبرسانی شهر کاشان



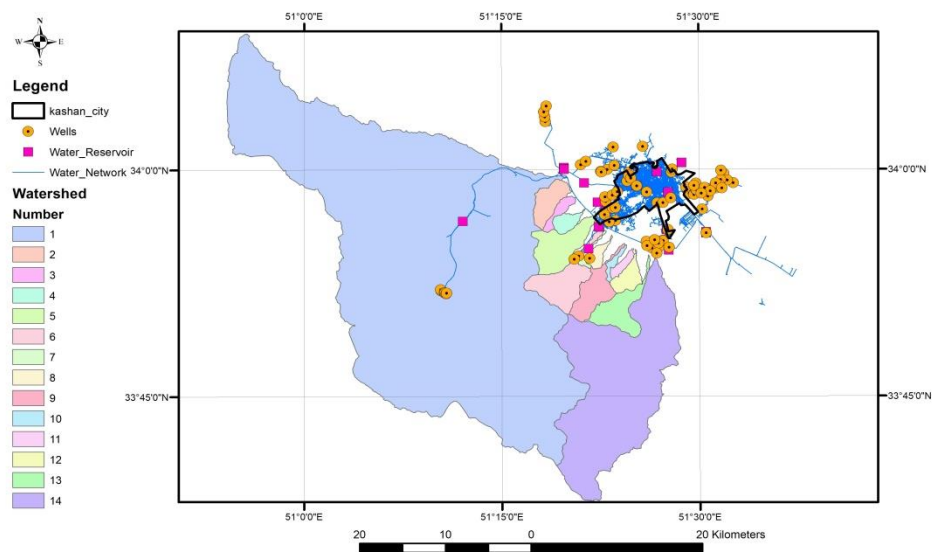


Fig. 2. Identification of upstream sub-catchments of Kashan city affecting the water supply system

شکل ۲- شناسایی زیرحوضه‌های بالادست شهر کاشان مؤثر بر سامانه آبرسانی

شناسایی می‌شوند. در ادامه و با توجه به ارزیابی آسیب‌پذیری تمامی اجزاء که بر اساس ۵ شاخص تعیین شده است، ریسک مترتب بر اجزاء در معرض خطر سیلاب محاسبه می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب و تخمین دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت مدنظر

به‌منظور محاسبه سیلاب‌ها با دوره بازگشت مختلف در هر زیرحوضه از روش‌های هیدرولوژیکی تخمین بارش-رواناب استفاده می‌شود. به‌این منظور ابتدا آمار حداکثر بارش ۲۴ ساعته مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی موجود در محدوده طرح جمع‌آوری می‌شوند. همگنی و کفایت طول داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری و نرم‌افزار SPSS بررسی و تخمین میزان بارش با دوره‌های بازگشت‌های مختلف انجام می‌شود. بر مبنای بارش طرح محاسبه شده و با استفاده از خصوصیات حوضه‌های آبریز، سیلاب طرح با دوره بازگشت مختلف قابل محاسبه است. به‌منظور بررسی خصوصیات حوضه آبریز با استفاده از داده‌های رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار ArcGIS، آبراه‌ها و حوضه‌های آبریز در بردارنده طرح ترسیم و مشخصات مرتبط با حوضه مانند مساحت حوضه، طول آبراه اصلی، اختلاف ارتفاع، شیب آبراه اصلی و زمان تمرکز محاسبه می‌شوند. به‌منظور تخمین ضریب رواناب (CN) نیز به اطلاعات مربوط به کاربری اراضی و گروه

از این زیرحوضه‌ها، زیرحوضه ۱ با مساحت ۹۸۰ کیلومترمربع بیشترین حجم رواناب را به سمت شهر کاشان ایجاد می‌کند. رودخانه سوک چم که در خروجی زیرحوضه ۱ واقع است، بزرگ‌ترین رودخانه حوضه آبریز کاشان است که از ارتفاعات کوه کرکس سرچشمه می‌گیرد و سیلاب‌های مخربی مانند سیلاب سال ۱۳۳۵ ایجاد می‌کند که شهر کاشان، آران و بیدگل و برزک را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۳- روش پژوهش

این پژوهش شامل ۳ مرحله بود:

مرحله اول: مدل‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب و تخمین دبی پیک سیلاب با دوره بازگشت مدنظر
مرحله دوم: مدل‌سازی هیدرولیکی جریان و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر سیل در مسیل‌های شناسایی شده
مرحله سوم: شناسایی اجزاء در معرض خطر سامانه آبرسانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک سیل برای اجزای سامانه
مراحل انجام پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، دو مرحله مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای دستیابی به نقشه خطر سیلاب انجام می‌شود که در ادامه تشریح خواهند شد. سپس با استفاده از نقشه موقعیت اجزاء سامانه آبرسانی شهر کاشان اجزاء در معرض خطر سیلاب



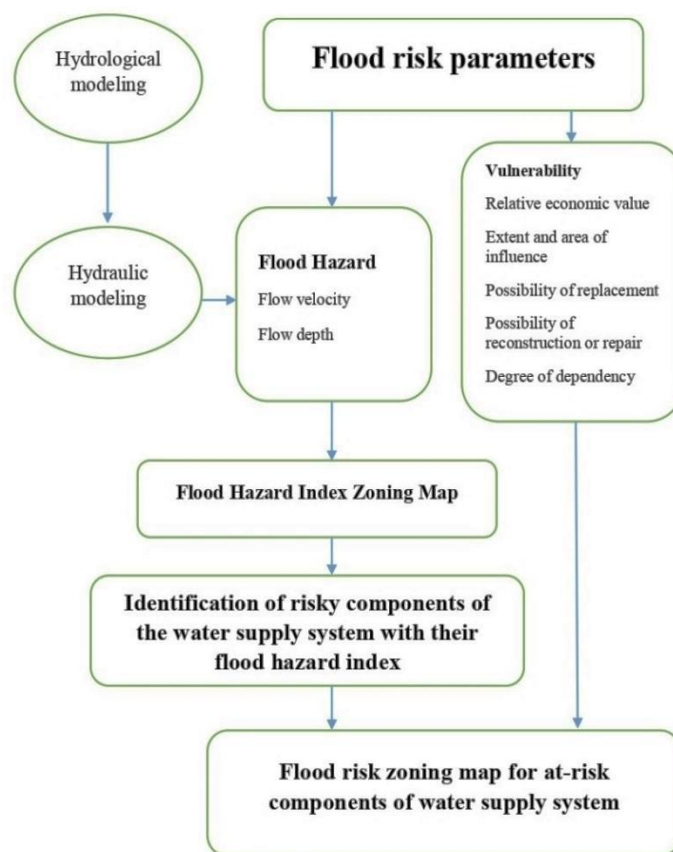


Fig. 3. Structure of the research methodology

شکل ۳- ساختار روش پژوهش

محاسبه شده، شرایط مرزی جریان، اندازه سلول‌های محاسباتی و ضریب زبری مانینگ به مدل هیدرولیکی HEC-RAS دوبعدی، سرعت و عمق رواناب در هر سلول با دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه می‌شود. تخمین ضریب زبری مانینگ بر اساس بازدهی‌های صحرایی و شرایط حاکم بر بستر و حریم آبراهه انجام می‌شود. دسته‌بندی میزان خطر در این پژوهش بر اساس روش ناحیه‌بندی خطر کشور استرالیا و بر اساس توصیه نشریه ۸۲۱ انجام می‌شود. براین اساس، شاخص خطر برابر با حاصل ضرب عمق جریان (D) در سرعت جریان (V) و مطابق معادله ۱ تعیین می‌شود

$$H = D \cdot V \quad (1)$$

بر اساس شاخص خطر محاسبه شده طبق معادله ۱، سطوح خطر در ۶ کلاس طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۱).

هیدرولوژیکی خاک و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه نیاز است. مطالعات سنجش از دور داده‌های ماهواره‌ای و بازدهی‌های میدانی از حوضه آبریز، آبراهه‌ها و ثبت شواهد مربوط به خصوصیات پوشش گیاهی، بافت و نفوذپذیری به تخمین دقیق‌تر ضریب رواناب کمک می‌کند. با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS و اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری موجود، ضریب رواناب (CN) کالیبره می‌شود. در نهایت با محاسبه ارتفاع رواناب و زمان تمرکز حوضه آبریز، حداکثر دبی محتمل و هیدروگراف سیلاب خروجی از هر زیرحوضه آبریز قابل محاسبه است.

۳-۲- مدل‌سازی هیدرولیکی جریان و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر سیل در مسیل‌های شناسایی شده

با حصول حداکثر دبی محتمل با دوره بازگشت‌های مختلف، امکان مدل‌سازی سیلاب در هر آبراهه فراهم می‌شود. با معرفی مقدار دبی



جدول ۱- مقدار سطوح خطر سیل (نشریه ۸۲۱)

Table 1. Flood hazard level values (Regulation No. 821)

Description	Parameter (D*V)	Flood hazard levels
Generally safe for vehicles, people and buildings	$D*V \leq 0.3$	H1
Unsafe for small vehicles	$D*V \leq 0.5$	H2
Unsafe for vehicles, children and elderly	$D*V \leq 0.6$	H3
Unsafe for vehicles and all people	$D*V \leq 1$	H4
Unsafe for vehicles and all people, possible structural damage to all types of buildings	$D*V \leq 4$	H5
Unsafe for vehicles and people. Dangerous for all types of buildings	$D*V > 4$	H6

آسیب‌پذیری (V_u) برای اجزای مختلف سامانه آبرسانی شهر کاشان عددی بین صفر تا ۲۵ است. با توجه به شاخص خطر سیلاب و شاخص آسیب‌پذیری اجزای مختلف، شاخص ریسک هر جزء مطابق نشریه ۸۲۱ از معادله ۲ تعیین می‌شود

$$R = H \cdot V_u \quad (2)$$

دقت شود که عدد به‌دست‌آمده برای شاخص ریسک به‌طور مطلق مفهوم خاصی ندارد و صرفاً به‌صورت نسبی مبنای مقایسه ریسک اجزای مختلف است.

۴- نتایج و بحث

به‌منظور استفاده از مدل بارش رواناب (SCS-CN) داده‌های بارندگی روزانه ایستگاه‌های اطراف از دفتر مطالعات پایه منابع آب دریافت شد و پس از انجام آزمون‌های آماری و تأیید داده‌ها، مناسب‌ترین توزیع آماری بر داده‌های هر ایستگاه شناسایی و حداکثر بارش ۲۴ ساعته برای دوره‌های بازگشت مختلف اندازه‌گیری شد. با ترسیم چندضلعی تیسسن^۱ ایستگاه‌های مورد مطالعه، متوسط حداکثر بارش ۲۴ ساعته در سطح هر یک از زیرحوضه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف به‌دست آمد. ضریب رواناب (CN) زیرحوضه‌ها نیز با توجه به شرایط اقلیمی و نفوذپذیری و کاربری اراضی زیرحوضه‌ها (با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک و زمین‌شناسی) برابر با ۷۲ تخمین زده شد. سپس با استفاده از روش SCS میزان ارتفاع

۳-۳- شناسایی اجزاء در معرض خطر سامانه آبرسانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک سیل برای اجزای سامانه

با توجه به نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب در مرحله قبل و موقعیت جغرافیایی اجزای مختلف سامانه آبرسانی شامل چاه‌ها، مخازن ذخیره، خطوط شبکه انتقال و توزیع آب، اجزای در معرض خطر سیلاب شناسایی می‌شوند. برای تعیین میزان آسیب‌پذیری از گزارش سطح‌بندی اجزای سامانه آبرسانی شهر کاشان که قبلاً تهیه شده است استفاده می‌شود (شرکت مهندسی بهساز روش، گزارش سطح‌بندی تأسیسات آبرسانی شهر کاشان، ۱۳۹۰). (Behsaz, Ravesh Engineering Company, 2011) بر اساس پژوهش انجام شده، از ۵ معیار کیفی گستره و حوزه نفوذ، امکان جایگزینی، امکان بازسازی و تعمیر، ارزش نسبی اقتصادی و شدت وابستگی برای تعیین آسیب‌پذیری استفاده شده است.

منظور از گستره و حوزه نفوذ هر جزء، مساحت و منطقه‌های مرتبط و تعداد مشترکین و جمعیتی است که تحت پوشش عملیاتی آن جزء قرار دارد. منظور از امکان جایگزینی، امکان به‌کارگیری عناصر جایگزین و یا مشابهی است که از سایر منابع، قابل برنامه‌ریزی باشند. منظور از امکان بازسازی یا تعمیر، زمان موردنیاز برای بازسازی یا تعمیر اجزاء اصلی پس از بروز رویداد است. ارزش نسبی اقتصادی بر اساس هزینه‌های موردنیاز برای احداث مشابه دارائی در شرایط موجود تعیین می‌شود و شاخص شدت وابستگی نیز میزان وابستگی اجزاء سامانه به یکدیگر را ارزیابی می‌کند. این شاخص‌ها برای اجزاء سامانه آبرسانی کاشان در گزارش سطح‌بندی موجود است که در این پژوهش به‌منظور تعیین آسیب‌پذیری و ریسک اجزاء استفاده می‌شود. شاخص

¹ Thiessen Polygons



RAS مشخصات عمق و سرعت جریان در هر قسمت از مسیر است.

در این پژوهش برای تعیین شاخص خطر سیلاب از معادله ۱ استفاده شد و بر این اساس نقشه خطر سیلاب در بستر مسیل‌ها به دست آمد. در شهر کاشان سه مسیر زهکشی اصلی شامل مسیل سوک چم، مسیل میرحیدر و مسیل قمصر هستند که پس از عبور از شهر به سمت دریاچه نمک هدایت می‌شوند. در شکل ۴ قسمتی از نتیجه مدل‌سازی شاخص خطر سیلاب در بالادست مسیل سوک چم نمایش داده شده است که از نظر پهنه سیلابی با واقعیات موجود نیز همخوانی دارد.

مدل‌سازی در هر مسیل به صورت جداگانه انجام می‌شود و نقشه‌های خطر سیلاب به نرم‌افزار ArcGIS منتقل می‌شوند. در شکل ۵ نقشه خطر سیلاب در بستر مسیل‌های شناسایی شده و محدوده شهر کاشان نشان داده شده است.

دسته‌بندی میزان خطر در راهنمای شکل ۵ بر اساس روش ناحیه‌بندی خطر کشور استرالیا و بر اساس توصیه نشریه ۸۲۱ انجام شده است. با حصول نقشه خطر سیلاب، قسمت‌هایی از سامانه آب‌رسانی شهر کاشان که در معرض وقوع سیلاب هستند شناسایی می‌شوند. برای اجزایی مانند چاه‌ها و مخازن که به صورت نقطه‌ای و پلیگون دریافت شده‌اند، نقشه‌های حریم (به صورت بافر) تعریف می‌شوند که تلاقی آنها با نواحی خطر سیلاب، بررسی می‌شوند. به منظور دستیابی به ریسک مترتب بر اثر خطر سیلاب و با داشتن شاخص آسیب‌پذیری هر یک از اجزاء، ریسک نهایی مترتب بر هر جزء مطابق معادله ۲ تعیین می‌شود.

رواناب و دبی پیک ایجاد شده در هر زیرحوضه برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. به منظور کالیبره کردن مدل (به طور مشخص تنظیم دقیق تر ضریب CN) از داده‌های ایستگاه هیدرومتری خنچه در خروجی زیرحوضه ۱ استفاده شد. برای این منظور ۱۲ مورد پیک سیلاب ثبت شده در این ایستگاه با بارش متناظر در حوضه آبریز بالادست مدنظر قرار گرفت. سپس هیدروگراف سیلاب محاسبه شده از مدل بارش رواناب و هیدروگراف سیلاب مشاهده شده در ایستگاه هیدرومتری، در نرم‌افزار HEC-HMS با یکدیگر مقایسه شدند و ضریب CN کالیبره شد. در نهایت ضریب رواناب CN برابر ۷۲/۳۵ در نظر گرفته شد. در این پژوهش ارزیابی ریسک سامانه آب‌رسانی برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ ساله مدنظر بود که نتایج مربوط به میزان دبی حداکثر سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ ساله در جدول ۲ (برای زیرحوضه‌های ۱ تا ۱۴ نشان داده شده در شکل ۲) محاسبه شده است.

دبی‌های محاسبه شده به طور مستقیم در مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب استفاده می‌شوند. مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب هر زیرحوضه با استفاده از دبی‌ها و هیدروگراف سیلاب‌های محاسبه شده در نرم‌افزار HEC-RAS دوبعدی انجام می‌شود. سیلاب‌های زیرحوضه‌های بالادست از طریق مسیل‌ها و کانال‌های موجود از سطح شهر کاشان عبور می‌کنند. به منظور مدل‌سازی نیاز است موقعیت این مسیل‌ها شناسایی و به نرم‌افزار HEC-RAS معرفی شوند. سپس مشخصات هیدروگراف سیلاب در مرزهای ورودی مدل که کالورت‌های موجود در اتوبان قم-اصفهان هستند، وارد می‌شوند و مدل‌سازی انجام می‌شود. خروجی مدل دوبعدی HEC-

جدول ۲- دبی حداکثر سیل با دوره بازگشت ۵۰ سال برای هر زیرحوضه (مترمکعب بر ثانیه)

Table 2. Maximum discharge of the flood with the 50-year return period for each sub-watershed (cubic meters per second)

Sub- catchment*	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
Flood discharge	332.17	22.83	9.72	13.02	34.98	29.52	5.16
Sub- catchment	W8	W9	W10	W11	W12	W13	W14
Flood discharge	10.03	29.9	5.12	7.63	19.11	41.07	151

*The location of sub-watersheds 1 to 14 is shown in Fig. 2.



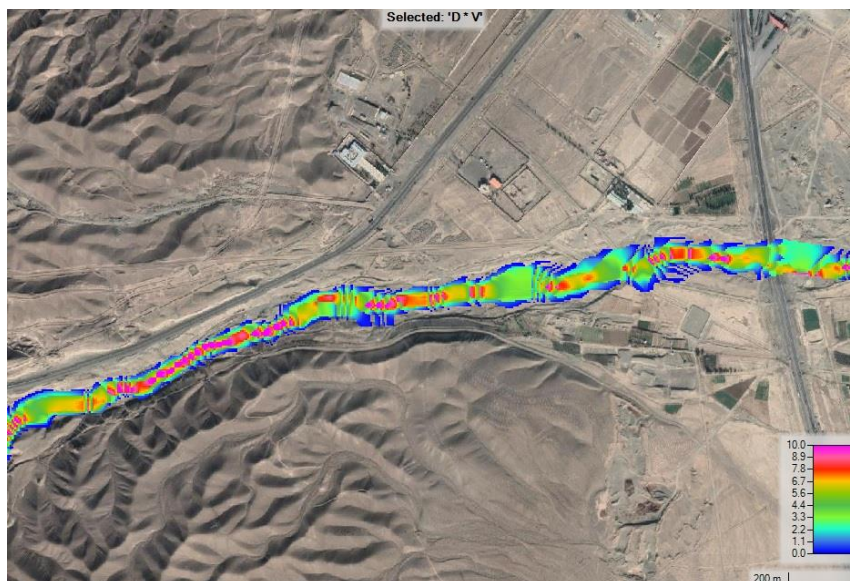


Fig. 4. Flood hazard map, upstream of Sok Cham for the flood with 50-year return period

شکل ۴- نقشه خطر سیلاب در بالادست سوک چم برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ سال

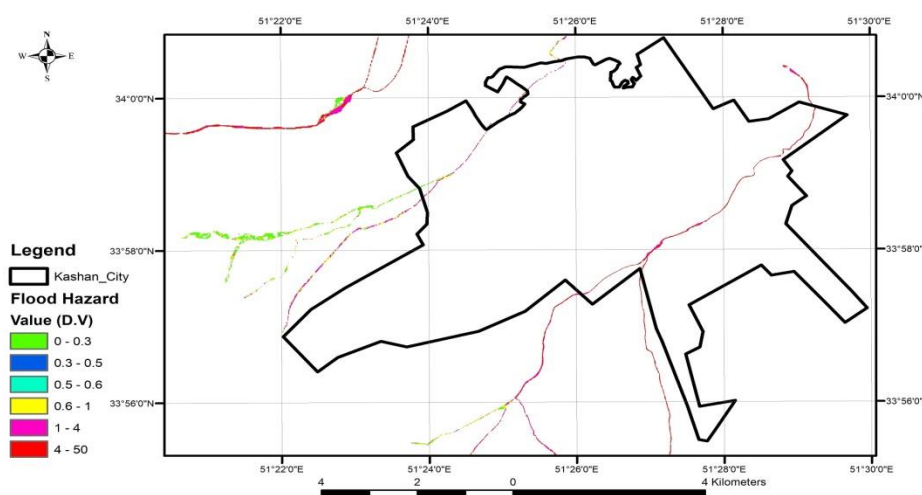


Fig. 5. Flood hazard map of Kashan city for the flood with 50-year return period

شکل ۵- نقشه خطر سیلاب در محدوده شهر کاشان برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ سال

چاه‌های ۲۲، ۳۰ و ۲-۴۲ در موقعیت کنار بلوار امام رضا، نزدیک بلوار ساحلی و کنار دریاچه ناجی آباد، به ترتیب با شاخص ریسک برابر ۱۲۰/۶، ۱۱۴ و ۱۰۸ بیشترین مقدار شاخص ریسک را به خود اختصاص داده‌اند. گرچه بیشترین میزان خطر مؤثر در حریم برای هر سه چاه برابر H6 است، ولی تفاوت میزان آسیب‌پذیری با توجه به پنج شاخص استفاده شده در گزارش سطح‌بندی، باعث تفاوت میزان شاخص ریسک محاسبه شده برای

۴-۱- ریسک سیلاب برای چاه‌های پمپاژ

از ۶۲ چاه موجود در سامانه که موقعیت جغرافیایی آنها دریافت شد، ۲۲ چاه در معرض خطر سیلاب قرار می‌گیرند که با توجه به میزان خطر محتمل و آسیب‌پذیری هر کدام، ریسک مترتب برای هر چاه محاسبه می‌شود. میزان شاخص ریسک محاسبه شده بین ۶۱/۸ تا ۱۲۰/۶ به دست آمد. در شکل ۶ نقشه پهنه‌بندی ریسک سیلاب برای چاه‌های سامانه نشان داده شده است.



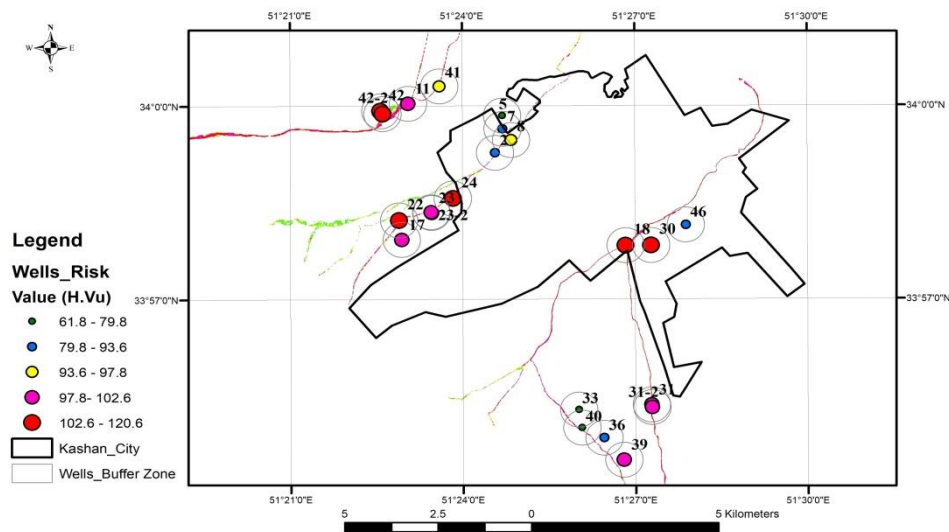


Fig. 6. Flood risk zoning map of wells for the flood with 50-year return period

شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی ریسک چاه‌ها برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ سال

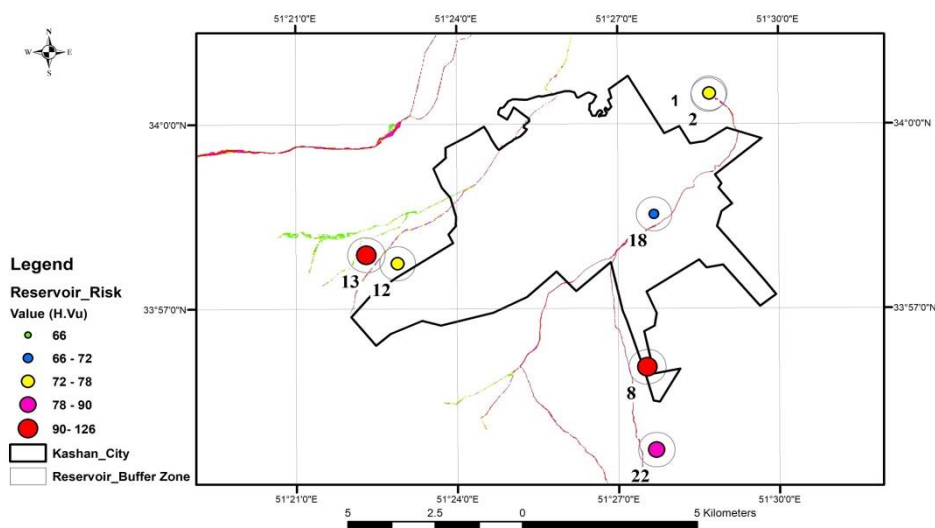


Fig. 7. Flood risk zoning map of storage tanks for the flood with 50-year return period

شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی ریسک مخازن ذخیره برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ سال

ریسک بین ۶۶ تا ۱۲۶ در معرض خطر سیلاب قرار دارند. نقشه پهنه‌بندی ریسک این مخازن در شکل ۷ نمایش داده شده است. مخازن ۱ و ۱۸ با ظرفیت ۳۰۰ و ۱۵۰۰ مترمکعبی، مخازن احداث شده به صورت هوایی هستند که در زمان انجام پژوهش در خارج از مدار بهره‌برداری قرار داشتند. ۵ مخزن دیگر به صورت دفنی، نیمه دفنی و روزمینی اجرا شده‌اند که همگی در مدار بهره‌برداری قرار دارند.

هر کدام شده است.

۴-۲- ریسک سیلاب برای مخازن ذخیره‌سازی

در سامانه آب کاشان ۱۸ مخزن ذخیره‌سازی وجود دارد که از جنس بتنی و فلزی و به صورت هوایی و زمینی اجرا شده‌اند. با توجه به نقشه خطر سیلاب، اجزاء در معرض و میزان آسیب‌پذیری، ۷ مخزن در شمال شرقی، غرب و جنوب شهر کاشان با شاخص



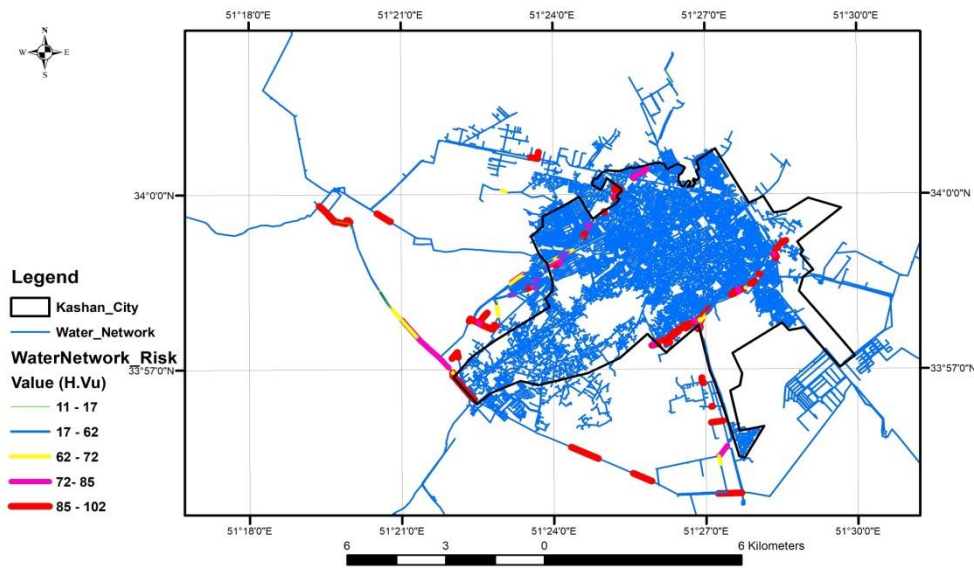


Fig. 8. Flood risk zoning map of water transmission and distribution lines for the flood with 50-year return period

شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی ریسک خطوط انتقال و توزیع آب برای سیل با دوره بازگشت ۵۰ سال

سیلاب، ریسک مترتب بر هر جزء محاسبه شد که میزان شاخص ریسک بین ۱۱ تا ۱۰۲ قرار می‌گیرد. در شکل ۸ نقشه پهنه‌بندی ریسک سیلاب برای اجزاء خطوط انتقال و شبکه توزیع آب نمایش داده شده است. با توجه به نقشه خطر سیلاب، حدود ۳۱ کیلومتر از طول شبکه و خطوط انتقال در معرض سیلاب قرار دارد که ۶/۵ کیلومتر آن مربوط به خط انتقال آب زاینده‌رود واقع در محدوده مورد مطالعه است. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد حدود ۲۱ کیلومتر از خطوط در معرض خطر سیلاب، قطر بالای ۲۰۰ میلی‌متر و ۱۰ کیلومتر از آن، قطر کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر دارند.

جدول ۳ اطلاعات بیشتری از طول‌های شبکه و کارکرد خطوط در معرض خطر سیلاب با توجه به دسته‌بندی ریسک آنها ارائه می‌کند. هر ردیف از این جدول مشخص می‌کند که چه طول و چه جزئی از سامانه در معرض چه میزانی از ریسک قرار دارد. از نظر میزان ریسک، بیشترین شاخص ریسک در محدوده ۸۵ تا ۱۰۲، مربوط به ۱۳۲۹۴ متر از سامانه آب‌رسانی است که در شکل ۸ هم به رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد این بخش از سامانه شامل ۴۰۲۰ متر از خط انتقال زاینده‌رود و ۹۲۷۴ متر از خطوط انتقال و شبکه توزیع شهر کاشان است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد اگرچه مطابق نقشه خطر، شاخص خطر (حاصل ضرب ارتفاع در سرعت سیلاب در هر

مخازن ۸، ۱۳ و ۲۲ به‌عنوان مخزن ۱۰۰۰۰ مترمکعبی تأسیسات RN1، مخزن ۱۰۰۰۰ مترمکعبی تأسیسات ۳ و مخزن ۵۰۰۰ مترمکعبی تأسیسات RS3، به‌ترتیب با شاخص ریسک برابر ۱۲۶، ۱۲۶ و ۹۰، بیشترین میزان شاخص ریسک را به خود اختصاص داده‌اند. این سه مخزن همچنین محل ذخیره‌سازی آب انتقالی از خط انتقال زاینده‌رود هستند. مخزن ۱۳ در غرب شهر کاشان قرار گرفته و مخازن ۸ و ۲۲ در جنوب شهر قرار دارند.

۳-۴- ریسک سیلاب برای شبکه توزیع و انتقال

شبکه توزیع و انتقال آب کاشان شامل خطوط توزیع مشترکین، خطوط انتقال اصلی بین مخازن، چاه‌ها و شبکه توزیع و خط انتقال آب زاینده‌رود به کاشان است.

طول شبکه اصلی و فرعی توزیع و انتقال آب در شهر کاشان حدود ۱۰۰۰ کیلومتر است. همچنین خط انتقال آب زاینده‌رود به کاشان حدود ۱۹۰ کیلومتر است که در این پژوهش ۳۲ کیلومتر از آن که در پایین‌دست زیرحوضه‌های استخراج شده قرار دارند بررسی شد.

آسیب‌پذیری اجزاء شبکه در گزارش سطح‌بندی سامانه آب کاشان به‌صورت کلی برای خطوط انتقال و خطوط توزیع شبکه ارائه شده است. با توجه به اعداد آسیب‌پذیری ارائه شده و میزان خطر



جدول ۳- خلاصه‌ای از دسته‌بندی شاخص ریسک سیلاب اجزای مختلف خطوط آبرسانی شهر کاشان

Table 3. Summary of flood risk index classification for different components of water supply lines of Kashan city

Type of components at risk	Total length of components at risk (meters)	Risk index
Transmission lines - Distribution network - Zayandeh Rud line	1739	11-17
Transmission lines - Distribution network	6333	17-62
Transmission - Zayandeh Rud line	4194	62-72
Transmission lines - Distribution network	5762	72-85
Transmission lines - Distribution network - Zayandeh Rud line	13294	85-102

۴۰۲۰ متر، در تقاطع با مسیل‌ها دارای بیشترین میزان ریسک محاسبه شده است. این خطوط به دلیل اهمیت حیاتی برای سیستم آبرسانی شهر کاشان باید مورد توجه قرار گیرند. از جمله اقدامات حفاظتی برای این اجزاء احداث دال‌های بتنی محافظی است که در عمقی از بستر آب شستگی به صورت مدفون بر روی این خطوط قرار می‌گیرد و از آن در برابر خطر شکستگی محافظت می‌کند. اقدامات غیرسازه‌ای نیز شامل انواع اقدامات مدیریتی مانند آبخیزداری و مدیریت کاربری اراضی، برنامه‌ریزی و مدیریت در مسیر رودخانه‌ها و مسیل‌ها، پیش‌بینی و هشدار سیل و اقدامات پیشگیری و حمایتی در مناطق سیل‌گیر است که می‌توانند در کاهش خسارات ناشی از سیل مؤثر باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور مدیریت، پیشگیری و انجام اقدامات حفاظتی قبل از وقوع سیل، ارزیابی ریسک سیلاب در سامانه آبرسانی کاشان بررسی شد. برای این هدف در ابتدا، با انجام محاسبات هیدرولوژیکی میزان رواناب و دبی سیلاب‌های زیرحوضه‌های بالادست منتهی به سامانه مشخص شد. با در نظر گرفتن دوره بازگشت ۵۰ سال، مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب در بستر مسیل‌های شناسایی شده با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS دوبعدی انجام شد. بر اساس تعریف نشریه ۸۲۱ ناحیه‌بندی نقشه خطر سیلاب بر اساس شاخص خطر معادل حاصل ضرب عمق در سرعت سیلاب در نظر گرفته شد و نقشه خطر سیل تهیه شد. با داشتن شاخص خطر و شاخص آسیب‌پذیری اجزاء که بر اساس

بیکسل) در قسمت‌های زیادی از خطوط انتقال و توزیع در دسته پرخطر قرار دارد، اما فقط آن بخش از خطوط انتقال و توزیع که آسیب‌پذیری بالاتری دارند از ریسک سیلاب بیشتری برخوردار هستند، بنابراین به منظور اتخاذ اقدامات پیشگیرانه باید در اولویت قرار گیرند.

۴-۴- اقدامات مقابله با ریسک سیلاب

با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی ریسک سیلاب، اولویت‌ها به منظور انجام اقدامات حفاظتی و پیشگیرانه مشخص می‌شوند. پس از شناسایی نقاط آسیب‌پذیر و میزان ریسک مترتب بررسی اقدامات ممکن برای مقابله با سیلاب و تقویت نقاط آسیب‌پذیر انجام می‌شود. این اقدامات می‌توانند در دو بخش اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای بررسی شوند. اقدامات سازه‌ای شامل: احداث موانع و سیل‌بند در مسیر سیلاب، ایجاد مسیر انحرافی برای عبور سیلاب، احداث سیستم‌های پخش سیلاب، استفاده از بندهای اصلاحی یا سدهای مخزنی به منظور کاهش دبی پیک سیلاب هستند که به کاهش میزان خطر و در نهایت ریسک سیلاب سامانه منجر می‌شود. سیستم‌های پخش سیلاب در بالادست سوک چم، سفیدآب و بندخاکی دره، از سیستم‌های مؤثری هستند که در منطقه مورد مطالعه وجود دارند و نیاز به حفاظت و رسوب‌زدایی دارند. به طور جزئی در مورد چاه‌ها و مخازن، احداث سازه‌های حفاظتی ۷ شکل و همچنین سکوه‌های ارتفاعی به کاهش ریسک سیلاب منجر می‌شوند. همان‌گونه که نتایج نشان داد از میان خطوط انتقال و توزیع، خطوط انتقال زاینده‌رود به طول



این پژوهش به‌خوبی کارایی مدل دوبعدی HEC-RAS به‌منظور استخراج نقشه‌های خطر سیل را نشان داد. این پژوهش نقشه راه کاملی از مرحله دریافت اطلاعات بارندگی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی بارش-رواناب، مدل‌سازی هیدرولیکی جریان سیلاب، محاسبه سرعت و عمق سیلاب و نقشه خطر سیل تا محاسبه ریسک هر جزء و تهیه نقشه پهنه‌بندی ریسک اجزاء سامانه آبرسانی را ارائه می‌دهد. در پژوهش‌های آینده می‌توان از روش‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی دیگر و همچنین نرم‌افزارهای دیگری که قابلیت مدل‌سازی هیدرولیکی را دارند نیز استفاده کرد.

۶-قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت آب و فاضلاب کاشان به دلیل حمایت‌های مادی و معنوی برای انجام این پژوهش قدردانی کنند.

گزارش سطح‌بندی پدافند غیرعامل سامانه آب کاشان موجود است، میزان ریسک مترتب برای هر جزء محاسبه شد.

نتایج نشان داد ۲۲ حلقه چاه از ۶۲ حلقه چاه موجود و ۷ مخزن ذخیره‌سازی از ۱۸ مخزن موجود در شهر کاشان در معرض خطر سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال قرار دارند. از طرفی از حدود ۱۰۰۰ کیلومتر خطوط انتقال و توزیع شبکه آبرسانی و ۳۲ کیلومتر خط انتقال آب زاینده‌رود واقع در محدوده مورد مطالعه، به ترتیب ۲۴/۵ و ۶/۵ کیلومتر در معرض خطر سیلاب قرار دارد که ریسک هر قسمت محاسبه و نقشه پهنه‌بندی ریسک سیلاب برای هرکدام از این اجزاء ارائه شد. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده اولویت اجزاء برای انجام اقدامات حفاظتی و پیشگیرانه در برابر خطر سیلاب در سامانه آبرسانی کاشان مشخص شد. اقدامات موردنظر نیز می‌تواند شامل اقداماتی برای کاهش میزان خطر سیل و یا کاهش میزان آسیب‌پذیری اجزاء باشد.

References

- Ahmed, I., Nibedita Das (Pan), Debnath, J., Bhowmik, M. and Bhattacharjee, S., 2024. Flood hazard zonation using GIS-based multi-parametric analytical hierarchy process. *Geosystems and Geoenvironment*, 3(2), 100250-100250. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100250>.
- AL-Hussein, A. A. M., Khan, S., Ncibi, K., Hamdi, N., and Hamed, Y., 2022. Flood analysis using HEC-RAS and HEC-HMS: a case study of Khazir River (Middle East-Northern Iraq). *Water*, 14(22), 3779. <https://doi.org/10.3390/w14223779>.
- Bai, M., Tahmasebipour, N., Zeinivand, H., Saadeddin, A. and Kaheh, M., 2023. Investigating the capability of the two-dimensional HEC-RAS model in preparing flood hazard maps in the Qarachay-Ramyar River, Golestan Province. *Scientific Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4-48), 187-203. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.75557.1185>.
- Behsaz Ravesh Engineering Company, 2011. Report on determining the level of importance of water supply facilities in Kashan city. (In Persian).
- Ebrahimipour, M., Ziari, K. and Ardalan, D., 2021. Explaining the model for measuring the physical resilience of river-based cities against flood effects. Case study: Tonekabon city. *Journal of Geographical Spatial Planning, Scientific and Research Quarterly of Golestan University*, 11(41), 43-68. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Kamali Kefrati, S. and Esmaeili, R., 2023. Identification of flood prone areas using analytic hierarchy process (AHP), case study of Tajan Watershed, Mazandaran Province. *Third National Conference on Environmental Changes with Emphasis on Water Resources Management in Coastal Areas, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources*. (In Persian). [\[Link\]](#)
- Khoshkonesh, A., Nazari, R., Nikoo, M. R. and Karimi, M., 2024. Enhancing flood risk assessment in urban areas by integrating hydrodynamic models and machine learning techniques. *Science of The Total Environment*, [online] 952, 175859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175859>.



- Moayeri, M. and Entezari, M., 2008. Floods and a review of floods in Isfahan Province. *Human Settlement Planning Studies*, 3(6), 110-125. (In Persian). [[Link](#)]
- Mokhtari, E. H., Mezali, F., Abdelkebir, B. and Engel, B., 2023. Flood risk assessment using analytical hierarchy process: a case study from the Cheliff-Ghrib watershed, Algeria. *Journal of Water and Climate Change*, [online] 14(3). <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.316>.
- Nami, M. H. and Rostami, M., 2023. Preparing a flood susceptibility map using a GIS-AHP-based approach: case study: Alamut River watershed. *Quarterly Journal of Housing and Rural Environment*, 22(182), 125-138. (In Persian). [[Link](#)]
- Panahi, R. and Hosseinzadeh, M. M., 2024. Determining the floodplain and flood margin of Dinur River using the one-dimensional HEC-RAS model. *Journal of Environmental Studies*, 50(3), 263-280. (In Persian). [[Link](#)]
- Regulation No. 821, *Publication of Guidelines for Preparing Flood Risk Maps*, 2020. National Planning and Budget Organization. (In Persian). [[Link](#)]
- Sarai, B., Talebi, A., Mazidi, A. and Parvizi, S., 2020. Prioritizing the Sardabroud watershed in terms of flood risk using the SWAT model. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(23), 85-98. (In Persian). [[Link](#)]

