



Operationalizing Social Resilience for Riverine Flood Risk Management in Urban Basins

Ali Kiaei, Mehdi Ahmadi *

Department of Civil and Environmental Engineering - Amirkabir University of Technology, Tehran Polytechnic, Tehran, Iran

ABSTRACT: The conventional approach to River Basin Flood Management (RBFM) primarily focuses on enhancing the structural integrity of drainage systems to mitigate the impacts of heavy rainfall events. However, recent floods in urban catchments have revealed the necessity for a more resilient approach that incorporates the consequences of flooding. Resilience in the context of RBFM refers to the system's ability to endure diverse precipitation events, minimize flood damage, and restore normal conditions. This research presents a framework for selecting flood management options within a hierarchical system, with a specific emphasis on social resilience indicators. The study defines resilience by examining the response and recovery behaviors of RBFM systems during varying rainfall events. To implement the framework, a set of indicators related to social response, social recovery capacity, resistance points, and warning points has been established. A hierarchical fuzzy system has been developed to quantify these indicators, accounting for uncertainties in social variables and addressing dimensional inconsistencies. Application of this approach in the Gorganrood River basin demonstrates the efficacy of selected flood risk management options in terms of resilience, as compared to conventional decision-making methods. Analyzing the response-recovery curves for different management options underscores the importance of delineating distinct resilience indicators to evaluate the behavior of RBFM systems following performance failures. The findings of this study suggest that the proposed indicators can serve as decision-making criteria for selecting management options based on the behavior of the river basin system under rainfall events with varying return periods.

Review History:

Received: Jul. 12, 2022

Revised: May. 06, 2023

Accepted: Jun. 15, 2023

Available Online: Jun. 21, 2023

Keywords:

River basin flood management

resilience

social resilience indicators

hierarchical fuzzy system

flood risk management.

1- Introduction

River Basin Flood Management (RBFM) systems, which encompass physical and social vulnerability components such as infrastructure, sensitive points, and inhabitants in flood-prone regions, are susceptible to flood impacts. Inadequacies in existing drainage systems during severe flood events can lead to disruptions and adverse consequences for affected communities [1]. Therefore, it is crucial to improve evaluation indicators and develop resilient drainage systems to enhance the effectiveness of flood management [2, 3].

Resilience refers to the capacity of a system to recover from flood-induced damages and adapt to hazards through response, recovery, and adaptation [3-5]. Quantifying resilience is crucial for reducing disaster impacts, but faces challenges such as uncertainty in vulnerability variables and the subjective nature of judgments concerning response and recovery [6]. Fuzzy set theory can address these challenges and provide clear solutions [7].

This study focuses on assessing the recovery capability of RBFM systems in response to varying rainfall events (Figure 1). Initially, the system exhibits complete recovery capability within its tolerance range. However, as rainfall

intensity increases and drainage management options prove insufficient, the system's response intensifies while recovery capability diminishes. Implementing appropriate measures can enhance the system's recovery capability against future damages. Response-Recovery Curves (RRCs) illustrate these processes, with the intersection point serving as an alert threshold. Beyond this threshold, damages occur that require increased attention as the response surpasses recovery, exacerbating disruptions.

This research aims to quantify social resilience indicators for flood management options in the Gorganrood watershed in Iran. Fuzzy sets are used to analyze vulnerability variables, and a hierarchical fuzzy system is developed for the quantification process. The study's novelty lies in employing a comprehensive set of vulnerability variables and utilizing a hierarchical fuzzy approach to quantify social resilience. Furthermore, the research enables the evaluation of both structural and non-structural flood management options by employing social response-recovery curves for floods with different return periods. In conclusion, this study emphasizes the importance of resilience in RBFM systems and proposes an algorithm for quantifying social resilience through fuzzy

*Corresponding author's email: mehdi.ahmadi@aut.ac.ir



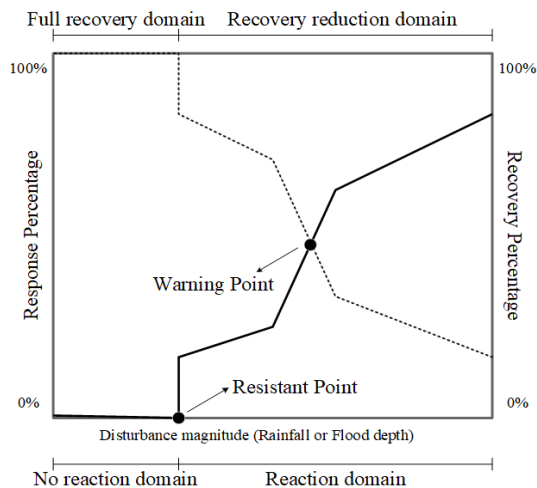


Fig. 1. Schematic of Response curve (solid line)- Recovery curve (dotted line)

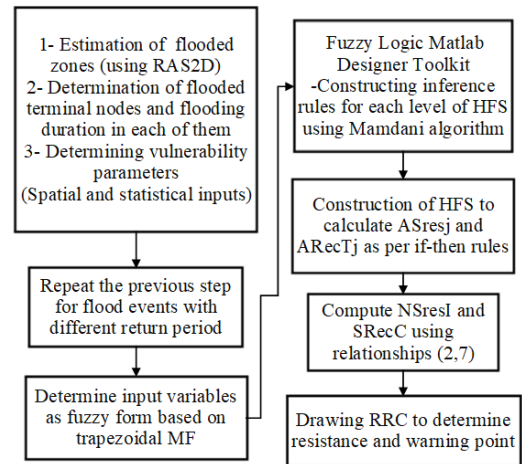


Fig. 2. Methodology for quantifying social resilience

sets and response-recovery curves. Enhancing the resilience of these systems can effectively mitigate flood impacts and improve overall flood management in vulnerable urban areas.

2- Materials and Methods

This study provides a case study on the assessment of social resilience indicators for flood management in the Gorganrood River basin, including both rural and urban areas with different land uses and a complex drainage system. The research focuses on evaluating the effectiveness of an algorithm for quantifying social resilience during flood events. The methodology employed in this study is depicted in Figure 2.

The study employs a RRC-based framework for social resilience indicators, consisting of three main components: social response, social recovery capability, and resilience point. The social response magnitude is determined using a Hierarchical Fuzzy System (HFS), considering the affected areas and node response within the RBFM system. Social recovery is evaluated by calculating the recovery time for flooded nodes using HFS and fuzzy sets, with recovery time intervals categorized (as shown in Table 1). The resilience point is identified by analyzing the maximum rainfall depth at which the response of the RBFM system reaches zero.

Table 1. Definition of fuzzy sets for social response and recovery duration (recompensing and subsidence)

Fuzzy set	Response	Recovery
very low	There are no damages and discomfort conditions	very fast
low	There is no damage and low discomfort conditions	fast
medium	Damages and discomfort conditions are probable	medium
high	Damages is probable and discomfort conditions are intolerable	slow

Vulnerability variables are evaluated using GIS data and 2D simulations, considering different flood management options and rainfall scenarios. Options such as earthen levee (EL), green belt (GB), warning systems (WS), diversion channels (DC), and retention reservoirs (RR) are examined, and their impact on vulnerability variables is assessed. The study also explores the quantification of social indicators using fuzzy membership functions. Normalized social indicators are calculated for various flood events and management options. Rainfall events with return periods of 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years are analyzed to assess social resilience.

3- Results and Discussion

The findings reveal that the retention reservoirs (RR) option generally exhibits the lowest normalized response, except for the 200-year rainfall scenario where the green belt (GB) option performs better. However, compared to the status quo, the RR option reduces the expected social response by approximately 9%. Decision-makers may take this indicator into account when choosing flood management options, although cost considerations often influence the decision-making process.

Additionally, the study examines vulnerability variables related to recovery and calculates the fuzzy recovery indicator. It develops fuzzy systems for different levels and assigns variables, such as inundation recession duration, to fuzzy sets. The recovery capacity is normalized, and response-recovery curves are generated to assess the impact of management options on social resilience indicators.

Overall, the study provides valuable insights into the assessment of social resilience indicators for flood management. It underscores the importance of considering social response, recovery capability, and resilience points in the decision-making process. The findings contribute to a better understanding of the effectiveness of diverse flood management options in reducing vulnerability variables and fostering resilient communities.

4- Conclusion

This study focuses on the social aspects of flood management in river basins and defines resilience as the ability of the River Basin Flood Management (RBFM) system to effectively respond to riverine flood events and restore pre-disturbance conditions. It introduces an algorithm that quantifies social resilience indicators, including response, recovery, resistance point, and warning point. To address uncertainties and relative judgments in quantifying response and recovery, the algorithm incorporates a hierarchical fuzzy system.

A case study conducted in the Gorganrood River basin assesses these indicators for various flood management options. The results demonstrate that the social indicators facilitate the evaluation of the impacts of drainage options on the behavior of urban watersheds under diverse flood conditions. Generally, the Retention Reservoir option is found to be more advantageous, except for one scenario where the Green Belt option exhibits a lower social response.

The proposed algorithm provides a comprehensive approach to evaluating social resilience, considering the population, organizational, and physical characteristics of the RBFM system. It emphasizes the importance of incorporating social indicators into decision-making processes alongside economic and environmental factors. However, determining a single unique value for watershed resilience requires further research, as it involves integrating preferences and weights assigned by decision-makers and stakeholders.

References

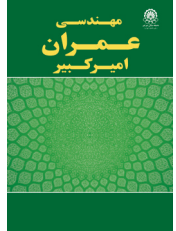
- [1] P. Willems, K. Arnbjerg-Nielsen, J. Olsson, V.T.V. Nguyen, Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings, *Atmospheric research*, 103 (2012) 106-118.
- [2] M.J. Hammond, A.S. Chen, S. Djordjević, D. Butler, O. Mark, Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review, *Urban Water Journal*, 12(1) (2015) 14-29.
- [3] Y.T. Birgani, F. Yazdandoost, Sustainable urban drainage management based on resilience risk management, Ph.D Dissertation, 2016.
- [4] K. de Bruijn, J. Buurman, M. Mens, R. Dahm, F. Klijn, Resilience in practice: Five principles to enable societies to cope with extreme weather events, *Environmental Science & Policy*, 70 (2017) 21-30.
- [5] D. Kuang, K.-H. Liao, Learning from Floods: Linking flood experience and flood resilience, *Journal of environmental management*, 271 (2020) 111-125.
- [6] Q. Zhou, P.S. Mikkelsen, K. Halsnæs, K. Arnbjerg-Nielsen, Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits, *Journal of Hydrology*, 414 (2012) 539-549.
- [7] N. Islam, R. Sadiq, M.J. Rodriguez, A. Francisque, Evaluation of source water protection strategies: a fuzzy-based model, *Journal of environmental management*, 121 (2013) 191-201.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Ali Kiaei, Mehdi Ahmadi, *Operationalizing Social Resilience for Riverine Flood Risk Management in Urban Basins*, Amirkabir J. Civil Eng., 55(7) (2023) 319-322.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21585.7767](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21585.7767)





عملیاتی سازی تاب‌آوری اجتماعی برای سامانه‌های مدیریت ریسک سیلاب رودخانه‌ای در حوضه آبریز شهری

علی کیائی، مهدی احمدی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران .

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۱
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

کلمات کلیدی:

مدیریت سیلاب حوضه آبریز رودخانه‌ای
تاب‌آوری
شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی
تحلیل فازی سلسله مراتبی
مدیریت ریسک سیلاب

خلاصه: دیدگاه رایج در مدیریت سیلاب حوضه آبریز رودخانه‌ای (RBFM) بر افزایش امنیت سامانه‌های زهکشی در مواجهه با بارندگی‌های شدید تأکید دارد. وقوع سیل‌های اخیر در حوضه‌های آبریز شهری، توجه به رویکردی تاب‌آور که علاوه بر سطح ایمنی، به پیامدهای سیلاب نیز نظر دارد را ضروری می‌سازد. تاب‌آوری را می‌توان توانایی یک سامانه RBFM برای مقاومت در برابر بارش‌های مختلف، کاهش آسیب‌های ناشی از سیل و بازگشت به حالت عادی تعریف کرد. مطالعه حاضر، با هدف بهبود سامانه زهکشی شهر گنبد کاووس، چارچوبی سلسله مراتبی برای انتخاب گزینه‌های مدیریت سیلاب بر اساس شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی پیشنهاد می‌کند. در این مطالعه، با تمرکز بر جنبه‌های اجتماعی، تاب‌آوری به عنوان رفتار سامانه از منظر پاسخ و بازیابی در اثر رخدادهای مختلف بارندگی در نظر گرفته شده است. برای همین منظور، شاخص‌های پاسخ اجتماعی، توانایی بازیابی اجتماعی، نقطه مقاومت و نقطه هشدار برای عملیاتی کردن چارچوب پیشنهادی تعریف شده است. برای لحاظ کردن عدم قطعیت پارامترهای آسیب‌پذیری و جلوگیری از ناسازگاری ابعادی، سیستم به صورت فازی سلسله مراتبی توسعه یافت. استفاده از این رویکرد در حوضه آبریز رودخانه گرگانرود برای ارزیابی اثربخشی گزینه‌های مدیریت سیلاب از منظر تاب‌آوری نشان داد با لحاظ کردن شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی، گزینه‌های مؤثرتری نسبت به تصمیم‌گیری‌های سنتی قابل انتخاب است. مقایسه منحنی‌های پاسخ-بازیابی برای گزینه‌های مختلف مدیریتی نشان داد تعریف شاخص‌های مختلف تاب‌آوری به منظور تعیین رفتار سامانه RBFM پس از شکست عملکرد اهمیت زیادی دارد. نتایج این مطالعه نشان داد می‌توان از شاخص‌های ارائه شده به عنوان معیارهای انتخاب گزینه‌های متنوع مدیریتی بر اساس رفتار سامانه RBFM تحت رخدادهای بارندگی مختلف استفاده کرد.

۱- مقدمه

زهکش RBFM، از گوره‌ها و کانال‌های انحراف گرفته تا BMPها، معمولاً با استفاده از شاخص‌هایی مانند توانایی کاهش حجم رواناب و کاهش میزان بار آلاینده [۱، ۲] یا کاهش ریسک اقتصادی سیل [۳، ۴] ارزیابی و طراحی می‌شوند. علیرغم شبیه‌سازی خصوصیات مختلف سیلاب که در طراحی گزینه‌های مدیریتی زهکشی استفاده می‌شوند [۵]، این سامانه‌ها به دلیل وجود عدم قطعیت‌های بارش ممکن است در برابر رخدادهای شدید بیش از ظرفیت طراحی، آسیب‌پذیر باشند [۶]. اختلال در عملکرد عادی گزینه‌های زهکش در حوضه آبریز می‌تواند پیامدهای نامطلوبی را برای سامانه‌های RBFM به همراه داشته باشد. این آسیب‌ها شامل خسارت به ساختمان‌ها و دارایی‌ها تا مشکلات برای افراد به دلیل ازدحام ترافیک سنگین و اختلال در تجارت، اشتغال و خدمات اضطراری آنها می‌باشد که منجر به واکنش‌ها و بازخوردهای منفی در جامعه آسیب دیده می‌شود. این واکنش‌ها بسته به

یک سامانه مدیریت ریسک سیلاب رودخانه‌ای (RBFM)، از نظر جغرافیایی مناطق در معرض خطر در سواحل رودخانه‌ها، اطراف سازه‌های انتقال یا اقدامات BMP^۲ تخریب شده را در بر می‌گیرد. این مناطق و اقدامات به شدت تحت تأثیر پیامدهای سیلاب رودخانه‌ای^۳ می‌باشند. چنین سامانه‌ای متشکل از مؤلفه‌های فیزیکی- اجتماعی آسیب‌پذیری، از جمله گزینه‌های مدیریتی حوضه، جاده‌ها، خیابان‌ها، ساختمان‌ها، مزارع، فضاها، باز، نقاط حساس (مانند مدارس، بیمارستان‌ها، مراکز خدمات عمومی و اضطراری و غیره) و افرادی است که در این مناطق ساکن یا شاغل هستند. سامانه‌های

- 1 River Basin Flood Management
- 2 Best Management Practices
- 3 Fluvial flood

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mehdi.ahmadi@aut.ac.ir



مختلف اتخاذ شده است [۵، ۱۰]. اولی بر دوام^۲ (نه پایداری^۳) یک سامانه در یک محدوده جذب^۴، دور از هر حالت تعادل متمرکز است [۱۸]. این دیدگاه بر وجود بیش از یک محدوده جذب و توانایی یک سامانه برای ماندن در محدوده قبلی و وارد نشدن به حوزه دیگر تأکید می‌کند. هولینگ و مف مبتنی بر این دیدگاه، تاب‌آوری را به عنوان توانایی یک سامانه برای جذب آشفتگی‌ها و پافشاری بر وضعیت قبل تعریف می‌کنند [۱۸]. در مقابل، تعریف دوم بر تمایل یک سامانه برای بازگشت به حالت پایدار، به محض حرکت موقتی از انتهای یک محدوده جذب به حالت تقریباً متعادل تأکید دارد. در این دیدگاه، تاب‌آوری به عنوان توانایی یک سامانه برای مقاومت و بازگشت به تعادل قبلی پس از یک آشفتگی تعریف می‌شود [۱۹].

در مدیریت سیلاب، دی‌برین و همکاران با در نظر گرفتن واکنش یک سامانه به یک آشفتگی، تاب‌آوری را به عنوان "سهولت بازیابی سامانه از آسیب‌های ناشی از یک آشفتگی" تعریف کردند [۲۰]. بازیابی در اینجا لزوماً به معنای بازگشت به همان وضعیت قبل از سیل نیست، اما می‌توان آن را به عنوان بازگشت به وضعیت عادی یا حتی بهتر تعبیر کرد [۲۰]. کانگ و لیاو استدلال کردند که تاب‌آوری حوضه‌های آبریز رودخانه‌ای را نمی‌توان با تاب‌آوری مهندسی تعریف کرد، بلکه باید آن را به عنوان ظرفیت تحمل سیلابی شدن و به طور کلی ظرفیت سازماندهی مجدد یک منطقه در هنگام خسارت فیزیکی و آسیب‌های اجتماعی-اقتصادی تعریف کرد [۱۳، ۲۱]. در واقع، تاب‌آوری توانایی یک سامانه اجتماعی برای واکنش و بازیابی از آسیب‌های وارده است؛ به طوری که یک سامانه اجتماعی را قادر می‌سازد تا هم سازماندهی مجدد یا تغییر کند و هم واکنش به مخاطره را فرا گیرد [۲۲]. در این تحقیق با الهام از این تعاریف، تاب‌آوری به عنوان ظرفیت سامانه‌های RBFM برای پاسخ به آسیب‌های ناشی از سیلاب و بازگشت سریع به وضعیت قبل از رخداد آسیب‌ها در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت بازیابی نیز به متغیرهای فیزیکی، اقتصادی و اجتماعی سامانه بستگی دارد که RBFM را قادر می‌سازند تا عملکرد عادی خود را بعد از وقوع آسیب وارده حفظ کند یا سازماندهی مجدد بیابد. عملیاتی‌سازی این تعریف مستلزم اندازه‌گیری تاب‌آوری حوضه آبریز در برابر سیلاب است [۲۱، ۲۳]. این کمی‌سازی می‌تواند کارایی تاب‌آوری را جهت کاهش آسیب‌های ناشی از بلایا افزایش دهد. روند کمی‌سازی را می‌توان با تحلیل پاسخ‌های یک سامانه به آشفتگی یعنی تحلیل آسیب‌پذیری حوضه آبریز در مواجهه با رخداد

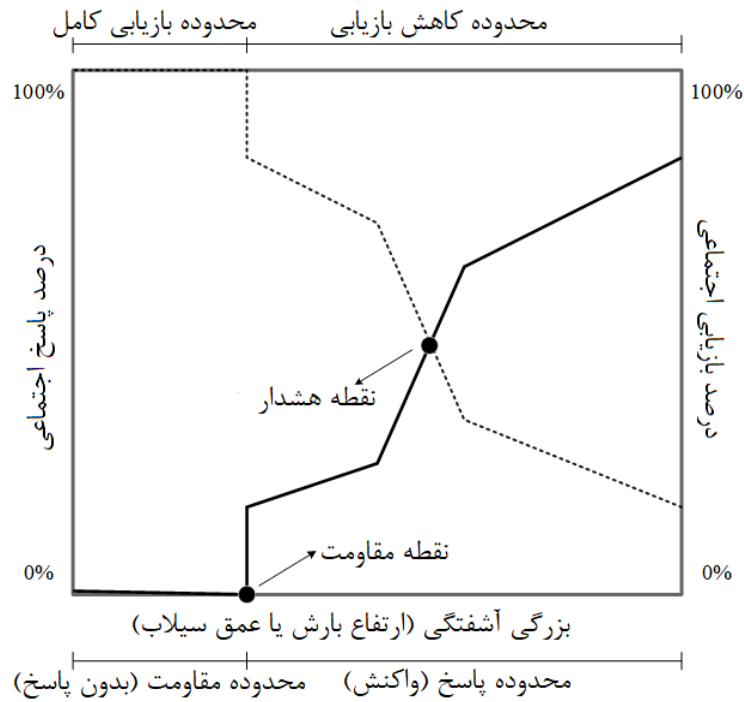
متغیرهای جمعیتی، سازمانی و کاربری اراضی، از یک سامانه RBFM به سامانه دیگر متفاوت است. هرچند حفاظت مطلق در برابر آسیب‌های ناشی از سیلاب امکان‌پذیر نیست، اما تقویت شاخص‌های ارزیابی و طراحی سامانه‌های زهکش با استفاده از مفاهیمی نظیر افزایش تاب‌آوری جهت لحاظ کردن رفتار سامانه مدیریتی در برابر آسیب‌های سیلاب رودخانه‌ای ضروری به نظر می‌رسد [۷، ۸]. تاب‌آوری در دو دهه اخیر در بین برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان در مدیریت حوضه آبریز شهری^۱ مورد توجه قرار گرفته است، با این حال، عملیاتی کردن آن نیاز به درک روشن از مفهوم تاب‌آوری و نحوه ارتباط آن با متغیرهای آسیب‌پذیری حوضه آبریز دارد [۹-۱۱].

واژه تاب‌آوری اولین بار توسط هولینگ (۱۹۷۳) برای سامانه‌های اکولوژیکی تعریف شد که در ادامه توسط ادگر (۲۰۰۰) به سامانه‌های اجتماعی و اجتماعی-اکولوژیکی تعمیم داده شد [۵]. با الهام از این تعاریف، تئوری‌های مختلفی برای رویکردهای تاب‌آور مدیریت سیلاب در حوضه‌های رودخانه‌ای ارائه شده است [۱۲، ۱۳]. در برخی پژوهش‌ها ارزیابی کیفی گزینه‌هایی برای افزایش تاب‌آوری حوضه آبریز شهری مد نظر قرار گرفته است [۱۴]. برخی مطالعات نیز تلاش کرده‌اند با شبیه‌سازی یک بعدی پیامدهای سیل با مدل‌هایی چون HEC-RAS، MIKE (River Two-dimensional) TUFLOW، (Analysis System Sedimentation and River) SRH، (Unsteady FLOW Composites Channel Hydraulics) CCHE و (Hydraulics lic Engineering) شاخص‌هایی را برای انعکاس کمی اثربخشی اقدامات در افزایش تاب‌آوری در برابر سیل، با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی-اکولوژی در حوضه‌های رودخانه‌ای [۱۲، ۱۵، ۱۶] و جنبه‌های فنی-اقتصادی در سامانه‌های زهکش شهری [۸] توسعه دهند. اما گستردگی شاخص‌های ارائه شده و مشکلات موجود در مدل‌سازی تاب‌آوری جوامع، چالش‌هایی مانند بی‌توجهی به بزرگی آشفتگی شبیه‌سازی شده در تحلیل تاب‌آوری، نبود شاخص‌های عملی برای سامانه RBFM، نسبی بودن متغیرهای آسیب‌پذیری و ناسازگاری ابعادی به علت تعداد زیاد متغیرهای آسیب‌پذیری را در کمی‌سازی جنبه اجتماعی تاب‌آوری RBFM در برابر پیامدهای مخاطرات طبیعی ایجاد می‌کند [۳].

تاب‌آوری طبق تعریف مک‌دانلیز و همکاران یک مفهوم چند رشته‌ای است که در زمینه‌های مختلف مطالعاتی وارد شده است [۱۷]. عمدتاً دو دیدگاه متمایز شامل تاب‌آوری اکولوژیکی و تاب‌آوری مهندسی در تعاریف

2 Persistence
3 Stability
4 Domain of attraction

1 Urban watershed decision makers



شکل ۱. شمای منحنی‌های پاسخ (خط پیوسته) - بازیابی (نقطه چین) [۲۷, ۲۳]

Fig.1. Schematic of Reaction curve (solid line)- Recovery curve (dotted line) [23,27]

در این تحقیق رویکرد مشابهی نیز در مورد توانایی بازیابی یک سامانه در مواجهه با طیف گسترده‌ای از رخداد‌های بارندگی اتخاذ می‌شود. به این معنا که ابتدا یک سامانه RBFM به وقوع سیلاب‌هایی که در محدوده تحمل آن هستند پاسخی نمی‌دهد (شکل ۱، محدوده بدون واکنش). در این شرایط توانایی بازیابی مطلق است (محدوده بازیابی کامل)، اگرچه این حالت ممکن است تا وقوع پاسخ سامانه تأیید نشود. با افزایش مقدار بارندگی همزمان با شکست گزینه مدیریتی زهکشی، پاسخ سامانه به طور متناسب افزایش می‌یابد (محدوده واکنش)، در حالی که توانایی بازیابی احتمالاً کاهش می‌یابد (محدوده کاهش بازیابی). با این حال، اقدامات مناسب ممکن است توانایی بازیابی را در برابر آسیب‌های مشابه در آینده بهبود بخشند. این فرآیندها به صورت شماتیک در منحنی‌های پاسخ-بازیابی (RRC) شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. نقطه تلاقی دو منحنی، نقطه هشدار، معرف این است که درصد بازیابی پس از این نقطه از نظر عددی کوچکتر از درصد پاسخ می‌شود. به عبارت دیگر، از این نقطه به بعد، آسیب‌هایی رخ می‌دهد که برنامه‌ریزان حوضه آبریز باید به آن توجه بیشتری داشته باشند، زیرا پاسخ از بازیابی فراتر خواهد رفت و منجر به اختلال بیشتر می‌شود. تهیه RRC می‌تواند تصویر

شدید سیلابی درک کرد [۲۰]. دو عامل، مانع اصلی برای تعیین دقیق کمیت تاب‌آوری هستند. یکی عدم قطعیت در مقادیر متغیرهای آسیب‌پذیری سامانه RBFM (از جمله مساحت در معرض خطر، جمعیت، حمل و نقل، نقاط حساس، مراکز امدادی، کاربری‌های مختلف مسکونی، صنعتی و کشاورزی) است. مقادیر این متغیرها معمولاً دقیق نیستند و بنابراین در تعیین میزان آسیب‌پذیری (پاسخ) و بررسی بازیابی پس از آن می‌تواند خطا رخ دهد. نظریه مجموعه‌های فازی ابزاری کارآمد برای تفسیر ابهاماتی همانند تعیین مقادیر متغیرهای آسیب‌پذیری در مخاطره سیلاب است که در آنها مرز واضح یا راه‌حل دقیق قابل تعریفی وجود ندارد [۲۴]. عامل دیگر، نسبی بودن قضاوت‌های مرتبط با بزرگی پاسخ و توانایی بازیابی سامانه مدیریتی از آسیب وارده است. قضاوت کارشناسان ممکن است در مورد مقدار پاسخ و بازیابی برای متغیرهای مشابه جمعیتی و سازمانی متفاوت باشد. به عنوان مثال، یک مدیر ممکن است در نظر بگیرد که اگر ازدحام جمعیت زیاد و تراکم ترافیک متوسط باشد، پاسخ متوسط است، اما مدیر دیگری ممکن است پاسخ شدیدی را برای همان موقعیت در نظر بگیرد. با کمک تئوری مجموعه فازی، این عدم قطعیت‌ها در متغیرهای آسیب‌پذیری را می‌توان در مجموعه‌هایی (خیلی کم، کم، متوسط و غیره) با مرزهای مشخص پوشش داد [۲۵, ۲۶].

جهت کمی‌سازی تاب‌آوری به این ترتیب است: (۱) برآورد پهنه‌بندی مناطق سیل‌زده، (۲) توسعه یک سیستم فازی و (۳) تعریف شاخص‌های تاب‌آوری. الگوریتم پیشنهادی برای کمی‌سازی تاب‌آوری اجتماعی به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. توسعه مجموعه‌ای از شاخص‌ها بر اساس محدوده‌های تعریف شده در شکل ۱، گام اصلی برای عملیاتی نمودن تاب‌آوری است. به منظور تحلیل تاب‌آوری سامانه‌های RBFM، باید محدوده اثرپذیری سامانه RBFM، پاسخ آن به بارش و توانایی آن برای بازیابی از آسیب‌های سیلاب رودخانه‌ای مشخص شود. پاسخ یک سامانه RBFM به بارش، به عوامل مختلفی بسته به وضعیت جامعه (تراکم جمعیت، شرایط ترافیکی وسایل نقلیه، کاربری اراضی، نزدیکی به نقاط حساس و غیره) در منطقه سیل‌گرفته بستگی دارد. توانایی بازیابی برای غلبه بر مشکلات نیز به عنوان ظرفیت ازعهده برآمدن سامانه، به متغیرهای فیزیکی، اقتصادی و سازمانی بستگی دارد، مانند مدت زمان فرونشست سیلاب، بودجه اختصاص یافته به نهادهای مربوطه و توزیع مناسب مراکز امدادی برای ارائه خدمات بموقع به افراد و مکان‌های متأثر از سیل [۲۸]. متغیرهای آسیب‌پذیری مورد استفاده در این تحقیق بر اساس ادبیات موجود در پژوهش بیرگانی (۲۰۱۶) و نظر متخصصان برای کمی‌سازی پاسخ و بازیابی در جدول ۱ خلاصه شده است [۱۰].

۲-۱- شبیه‌سازی و پهنه‌بندی سیلاب

تخمین وسعت مناطق متأثر از سیلاب (مساحت سیل‌گرفته) در نتیجه شکست گزینه زهکشی در تعیین مرزهای سیستم RBFM مهم است. مدل‌های شبیه‌سازی دوبعدی دقت بهتری در برآورد پهنه سیلابی دارند [۲۹]. مدل RAS2D طی چند سال اخیر به‌طور گسترده در مطالعات مختلف برای برنامه‌ریزی، طراحی و تحلیل مرتبط با گزینه‌های زهکشی در حوضه‌های آبریز شهری مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹، ۳۰]. ویژگی‌هایی چون سادگی استفاده، مناسب بودن برای مناطقی با شیب تند و قابلیت طراحی و مدل‌سازی گزینه‌های زهکشی، مدل RAS2D را در این تحقیق کاندید اصلی کرده است. RAS2D کمیت و کیفیت سیلاب را در آبراهه‌های طبیعی به همراه سیستم زهکشی حوضه آبریز با معادلات موج دینامیک یا پخشیدگی شبیه‌سازی می‌کند [۳۰] و زمان محاسباتی منطقی دارد. در این مطالعه، RAS2D به‌منظور محاسبه عمق سیل و همچنین زمان‌های سیل‌گرفتنی بالای گره‌های انتهایی هر زیرحوضه سیل‌گرفته در سامانه زهکشی استفاده می‌شود. منطقه متأثر از سیل با ارزیابی نقشه‌های

لحظه‌ای^۱ از رفتار سامانه‌های RBFM را در مواجهه با رخداد‌های مختلف بارش نشان دهد. مزیت رویکرد پیشنهادی در تحلیل تاب‌آوری اجتماعی، تعریف شاخص‌های معرف محدوده‌های RRC و استفاده از مجموعه‌های فازی برای فرآیند کمی‌سازی آنها است.

کمی‌سازی شاخص‌های اجتماعی تاب‌آوری در تحقیق حاضر، به منظور طراحی و انتخاب گزینه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب، در حوضه آبریز گرگانرود واقع در شمال شرقی ایران اجرا شده است. این حوضه آبریز یک سامانه اجتماعی شهری-روستایی است که سال‌های متوالی در معرض سیلاب‌های مخرب بوده است. همچنین سایر اهداف به شرح زیر است:

- ارائه تعریفی برای تاب‌آوری اجتماعی سامانه‌های RBFM که قابلیت اجرا داشته باشد.

- شاخص‌هایی معرفی شوند که امکان کمی‌سازی آنها با تحلیل آسیب‌پذیری فازی فراهم باشد و هنگام شکست عملکرد اقدامات مدیریتی در برابر سیلاب رودخانه‌ای کاربرد عملی داشته باشند.

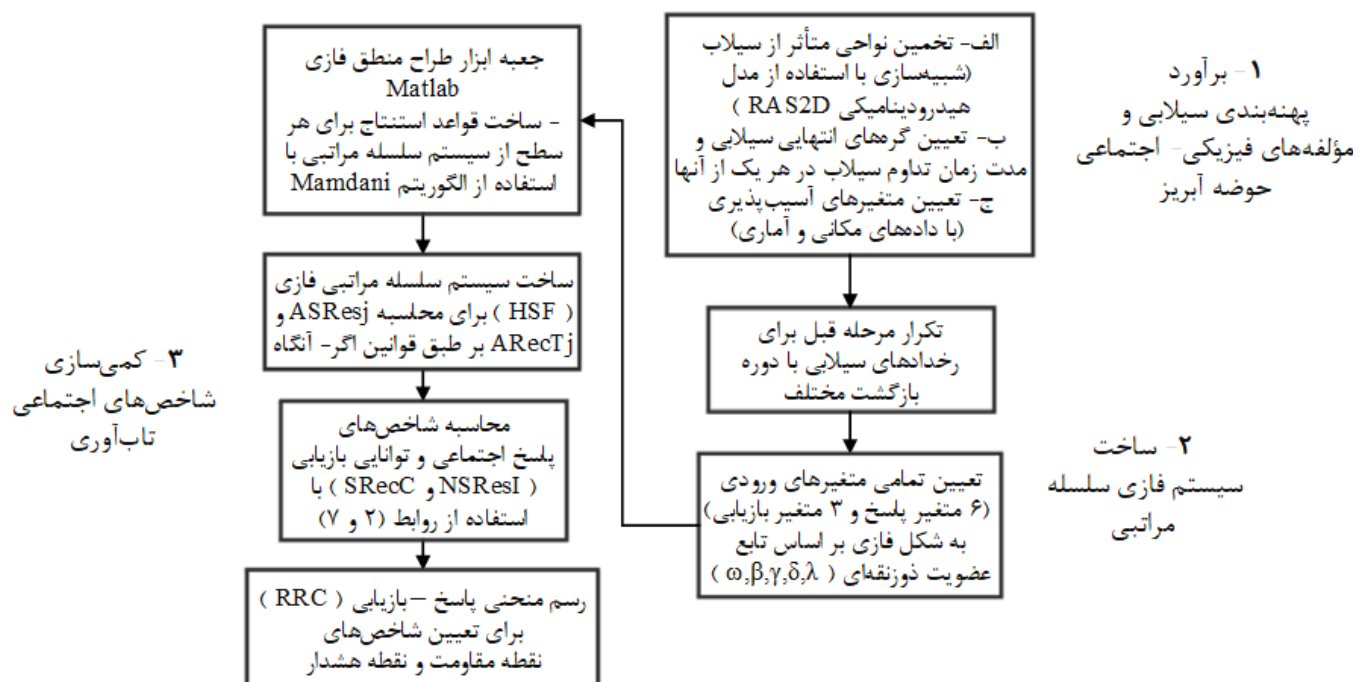
- با توجه به نسبی بودن مقادیر متغیرهای آسیب‌پذیری در سطح حوضه آبریز و ایجاد مسئله ابعادی به دلیل تعداد زیاد متغیرها در تحلیل آسیب‌پذیری، یک سیستم فازی سلسله مراتبی در این تحقیق توسعه می‌یابد تا فرآیند کمی‌سازی متغیرهای (فنی و جمعیتی) تشکیل‌دهنده سامانه RBFM که در کمی‌سازی شاخص‌ها مؤثر هستند تسهیل شود.

- مقدار یا بزرگی آشفستگی که سهم زیادی در اندازه‌گیری تاب‌آوری دارد، مستقیماً در کمی‌سازی آن گنجانده شود.

نوآوری این تحقیق استفاده از مجموعه جامعی از متغیرهای متنوع آسیب‌پذیری برای کمی‌سازی تاب‌آوری اجتماعی با استفاده از روش فازی سلسله مراتبی است. همچنین امکان ارزیابی عملکرد گزینه‌های سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریتی در حوضه آبریز رودخانه‌ای در مواجهه با سیلاب‌هایی با دوره بازگشت مختلف توسط منحنی‌های پاسخ اجتماعی-توانایی بازیابی فراهم می‌شود.

۲- رویکرد تحلیل تاب‌آوری

کمی‌سازی تعریف تاب‌آوری به علت وابستگی تاب‌آوری یک سامانه اجتماعی به سه پارامتر آسیب‌پذیری (یعنی در معرض بودن، حساسیت و ظرفیت مقابله) کاری پیچیده است [۳، ۱۱]. مراحل سه‌گانه مورد نیاز



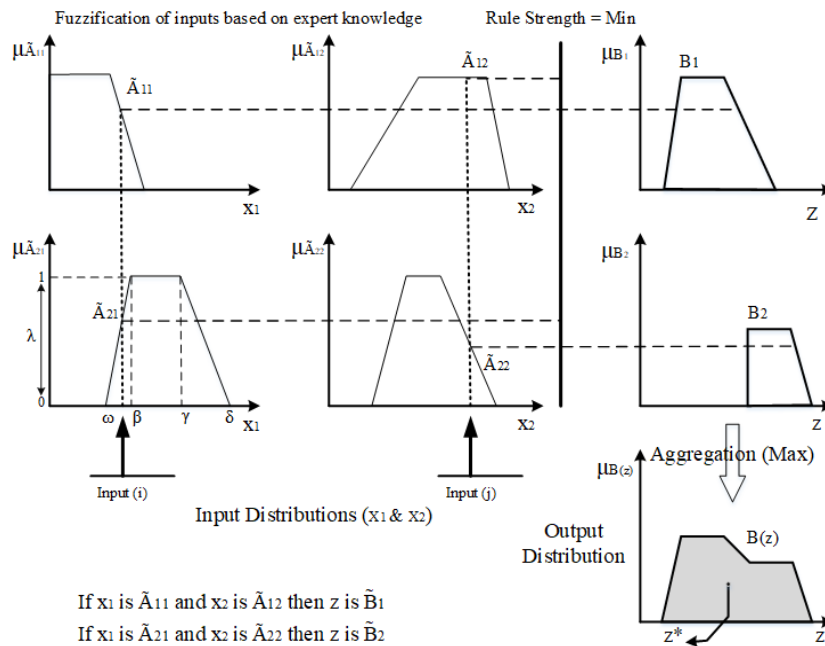
شکل ۲. مراحل سه‌گانه و شمای متدولوژی کمی‌سازی تاب‌آوری اجتماعی

Fig. 2. The three steps and methodology for quantifying social resilience

جدول ۱. پارامترهای آسیب‌پذیری و متغیرهای مربوط به هر یک از آنها برای کمی‌سازی شاخص‌های تاب‌آوری

Table 1. Vulnerability parameters and variables related to each of them to quantify resilience indicators

علامت اختصاری	متغیر آسیب‌پذیری	شاخص (نوع اثر)
RBFM	مساحت ناحیه سیل‌گرفته	سیستم RBFM (در معرض بودن)
PC	ازدحام جمعیت	پاسخ (حساسیت)
TD	تراکم حمل و نقل	
RE	تراکم مناطق مسکونی	
CIA	تراکم مناطق صنعتی و تجاری	
AGS	تراکم مناطق کشاورزی و فضای سبز شامل جنگل و مرتع	
DSP	فاصله گرهم‌های سیلابی تا نزدیک‌ترین نقاط حساس	
ARC	دسترسی به مراکز مشاوره و امدادی	
BA	اختصاص بودجه	توانایی بازیابی (ظرفیت مقابله)
ISD	مدت فروکش کردن طغیان رودخانه	



شکل ۳. شماتیک سیستم قاعده بنیاد فازی Mamdani با دو نمونه قانون فرضی [۱۰، ۳۲]

Fig.3. Schematic Mamdani fuzzy-rule base system with two sample rules [10,32]

گام ۱: فازی سازی مقادیر حقیقی که در آن متغیرهای ورودی با توابع عضویت مشخص به مجموعه های فازی تبدیل می شوند. این مجموعه های فازی از نظر زبانی با عباراتی مانند خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم بیان می شوند. توابع بر اساس ماهیت مسئله و دانش کارشناسی تعیین می شود. در اینجا، ورودی های PC تا ISD مطابق جدول ۱ برای تعیین کمی پاسخ و توانایی بازیابی در نظر گرفته می شود.

گام ۲: نمایش ترکیبی از دانش، قضاوت و تجربه کارشناسی، که توسط قوانین if-then به منظور ارتباط متقابل اثر ورودی ها بر خروجی ها شکل می گیرد. این قواعد شرطی ممکن است به صورت "اگر فرض اولیه () باشد آنگاه پیامد () است" بیان شود. قضاوت خبرگان در زمینه گزینه های زهکشی، شهرداری، توسعه و مدیریت حوضه آبریز، ترافیک، خدمات اضطراری و غیره ممکن است برای ایجاد قوانین بکار گرفته شود. یک مثال از قانون در تحقیق حاضر این است که اگر PC بسیار زیاد و TD کم باشد آنگاه میزان پاسخ متوسط است که در آن عبارات زیاد، کم و متوسط با تابع عضویت تعریف می شوند.

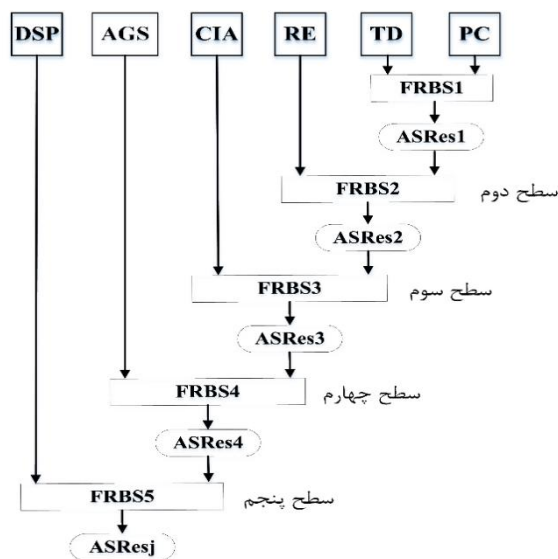
گام ۳: ساخت سیستم استنتاج فازی، که بخش اصلی FRBS برای انجام استنتاج قیاسی قوانین if-then است. برای این منظور از الگوریتم رایج استنتاج ممدانی و آسیلیان استفاده شد [۳۱]. در این روش، یک سیستم

چیدمان حوضه آبریز شهری (به عنوان مثال نقشه های توپوگرافی، خیابان ها و ساختمان ها) در پهنه بندی سیل اطراف گره انتهایی هر زیرحوضه برآورد می شود. از این منظر، هر ناحیه سیل گرفته نشان دهنده یک سامانه RBFM است.

۲-۲ سیستم مبتنی بر قوانین فازی - سلسله مراتبی

یک سیستم مبتنی بر قانون فازی^۱ بر اساس مجموعه ای از ورودی ها، گروهی از خروجی ها را تقریب می زند که به صورت گزاره های زبانی با استفاده از نظریه مجموعه فازی بیان می شود. برای هر عنصر x در مجموعه فازی \tilde{A} ، درجه تعلق با عضویت $\mu_{\tilde{A}}(x)$ در بازه پیوسته [۰، ۱] توصیف می شود. $0 < \mu_{\tilde{A}}(x) < 1$ نشان دهنده اعداد فازی است. شکل توابع عضویت^۲ می تواند گوسی، مثلثی، دوزنقه ای، S یا Z شکل باشد [۲۴]. شکل دوزنقه ای به عنوان رایج ترین تابع، در این مطالعه بخاطر تناسب بهتر آن نسبت به سایر اشکال تحت شرایط حال حاضر حوضه آبریز مورد استفاده قرار می گیرد. گام های زیر برای ایجاد سیستم فازی (FRBS) به فرم شماتیک شکل ۳ استفاده می شود [۲۴، ۳۱]:

- 1 Fuzzy rule-based system (FRBS)
- 2 Membership Functions (MF)



شکل ۴. شمای سیستم سلسله مراتبی فازی با شش متغیر ورودی برای تخمین میزان پاسخ اجتماعی [۳۳, ۳۴]

Fig. 4. Schematic HFS with six input variables to estimate social response magnitude (ASResj is value in each level [33,34])

ابعاد پایین است. فرآیند HFS در شکل ۴ به صورت شماتیک برای برآورد شاخص پاسخ اجتماعی با شش متغیر ورودی در پنج سطح ترسیم شده است. تعداد قواعد برای پنج سطح با دو متغیر ورودی در هر سطح و پنج تابع عضویت برابر $5^2 \times 5 = 125$ است. پاسخ اجتماعی در سطح اول با دو متغیر ازدحام جمعیت و تراکم ترافیک، یکی از پنج مجموعه فازی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است و خروجی این سطح با متغیر سوم سطح بعدی را تشکیل می‌دهد. این روند تا آخرین متغیر برای محاسبه شاخص کل پاسخ اجتماعی در گره انتهایی تکرار می‌شود. اگر چه ساختار سلسله مراتبی باعث کاهش چشمگیر تعداد قوانین می‌شود اما همچنان ساخت این قواعد با استفاده از نظر کارشناسی ابهام برانگیز است و نیاز به صحت‌سنجی دارد، به همین دلیل در این تحقیق فرض می‌شود که تلفیق لایه‌های اطلاعاتی GIS موجود و شبیه‌سازی سیلاب با نظر کارشناسان خبره برای ایجاد قانون کفایت می‌کند.

۲-۳- تعریف شاخص‌های تاب‌آوری

کمی‌سازی محدوده‌های RRC برای چهار شاخص پاسخ اجتماعی، توانایی بازیابی و نقاط مقاومت و هشدار در ادامه تشریح شده است.

فازی با دو ورودی X_1 و X_2 و یک خروجی y توسط مجموعه‌ای از قوانین بیان می‌شود (شکل ۳) و یک خروجی تجمعی بر اساس روش استنتاج پیشنه-کمینه ایجاد می‌شود.

گام ۴: فازی‌زدایی، که فرآیند نهایی برای تبدیل کمیت‌های فازی به دست آمده از مرحله قبل به کمیت‌های صریح است. روش‌های مختلفی برای فازی‌زدایی وجود دارد، اما مرکز سطح در ادبیات کاربرد گسترده‌ای دارد [۳۱, ۳۲].

عموماً مجموعه‌های فازی برای پوشش شکاف‌های مسئله به سه تا پنج تابع عضویت تقسیم می‌شوند، اما با افزایش ورودی‌ها تعداد قوانین ممکن است به طور قابل توجهی افزایش یابد [۲۵]. این موضوع منجر به تعارض ابعادی در یک سیستم فازی می‌شود، که در آن تعداد قوانین به طور تصاعدی با بعد ورودی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، تعداد قوانین برای شش ورودی و پنج مجموعه در نظر گرفته شده $5^6 = 15625$ است که استفاده از تمامی این قوانین کار بسیار پیچیده‌ای است. از سوی دیگر، حذف بخش‌هایی از این قوانین ممکن است با نادیده گرفتن ارتباط متقابل برخی ورودی‌ها، خلأهایی را در مسئله ایجاد کند. یک سیستم فازی سلسله مراتبی (HFS^1) رشد خطی قوانین را با افزایش ورودی‌ها دنبال می‌کند. تئوری این روش بر مبنای تبدیل یک سیستم فازی با ابعاد بالا به مجموعه‌ای از سیستم‌های فازی با

۲-۳-۱- پاسخ اجتماعی

شاخص پاسخ اجتماعی با ساخت یک HFS برای شش متغیر ورودی آسیب‌پذیری (مشخص شده در جدول ۱) در هر منطقه متأثر از گره‌های انتهایی سیستم RBFم مطابق شکل ۴ محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده تخمینی از بزرگی پاسخ را در ناحیه اطراف گره سیل گرفته ارائه می‌دهد. پاسخ در هر سطح به پنج مجموعه فازی (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، بسیار زیاد) تقسیم می‌شود و عددی بین ۰ تا ۱ می‌گیرد. بزرگی پاسخ اجتماعی برای هر مجموعه فازی را می‌توان به صورت فهرست شده در جدول ۲ تعریف کرد. مقدار بزرگی پاسخ اجتماعی (ASres) باید برای تمام گره‌های سیل گرفته تخمین زده شود و مقادیر به دست آمده مطابق رابطه (۱) در نهایت باید برای دستیابی به یک شاخص پاسخ کل (TSresI) در منطقه مورد مطالعه جمع شوند.

$$TSresI = \sum_{j=1}^n ASres_j \quad (1)$$

این فرآیند باید برای میزان پاسخ رخدادهای سیلابی با دوره بازگشت در نظر گرفته شده در تحلیل تاب‌آوری اجتماعی تکرار شود. مقادیر TSresI برای روخدادهای مختلف بارش طبق رابطه (۲) نرمال می‌شوند تا درصد پاسخ نرمال شده (NSresI) به دست آید.

$$NSresI = \frac{TSresI - TSresI_{min}}{TSresI_{max} - TSresI_{min}} \times 100 \quad (2)$$

TSresI_{max} و TSresI_{min} به ترتیب کمینه و بیشینه مقدار شاخص پاسخ کل محاسبه شده هستند. به منظور لحاظ کردن احتمال یک رخداد سیلابی در بزرگی پاسخ و تعیین یک عدد واحد برای شاخص پاسخ اجتماعی، پاسخ مورد انتظار سالانه (EASresI) براساس تعداد دوره بازگشت‌های رخداد بارش به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$EASresI = \int_{h_d}^{\infty} NSresI(h) f(h) dh \quad (3)$$

این رابطه $h(d)$ به ترتیب عمق سیلاب آستانه است که بالاتر از آن خسارت رخ می‌دهد. $f(h)$ نیز تابع چگالی احتمال وقوع عمق سیلاب است.

در این مطالعه، رابطه (۳) با توجه به شش دوره بازگشت بارندگی مد نظر (یعنی ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله) به صورت زیر تقریب زده شده است:

$$EASresI = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot NSresI_i$$

$$\Delta P_i = P(h \geq h_{i-1}) - P(h \geq h_i) \quad \&$$

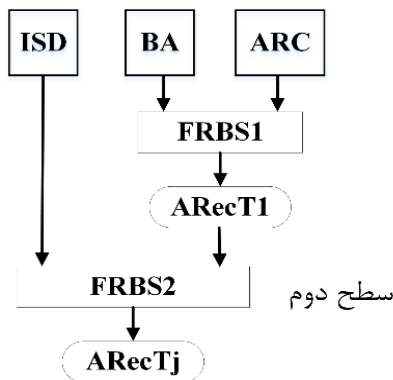
$$NSresI_i = \left[\frac{NSresI(h_{i-1}) + NSresI(h_i)}{2} \right] \quad (4)$$

در این رابطه، n تعداد رخدادهای احتمالاتی وقوع سیلاب بوده و ΔP_i و $NSresI_i$ به ترتیب احتمال تخطی و میانگین پاسخ اجتماعی برای سیلاب i ام است.

۲-۳-۲- توانایی بازیابی اجتماعی

تعیین مدت زمان بازیابی برای هر گره سیل گرفته با ساخت یک HFS برای سه متغیر ورودی ARC، BA و ISD (جدول ۱) مطابق سلسله مراتب شکل ۵ انجام می‌شود. مجموعه‌های فازی مدت زمان بازیابی در جدول ۲ تعریف شده‌اند. مشابه آنچه برای شاخص پاسخ اجتماعی انجام شد، شاخص مدت زمان بازیابی (TrecTI) مناطق اطراف همه گره‌های سیل گرفته مطابق رابطه (۵) تخمین زده می‌شود:

$$TrecTI = \sum_{j=1}^n ArcT_j \quad (5)$$



شکل ۵. شمای سیستم سلسله مراتبی فازی با سه متغیر ورودی برای تخمین مدت زمان بازیابی اجتماعی [۳۴، ۳۳]

Fig. 5. Schematic HFS for three input variables to estimate recovery duration (ASResj is time in each level [33,34])

جدول ۲. تعریف مجموعه‌های فازی با بیان چگونگی جبران شدن خسارت‌ها و فروکش کردن سیلاب [۱۰]

Table 2. Definition of fuzzy sets for social response and recovery duration (recompensing and subsidence [10])

مجموعه فازی	پاسخ اجتماعی	مدت زمان بازیابی
خیلی کم	هیچ‌گونه خسارت و شرایط نامساعد و ناراحتی وجود ندارد.	جبران خسارت و فروکش کردن سیلاب خیلی سریع اتفاق می‌افتد.
کم	هیچ‌گونه خسارتی وجود ندارد و شرایط نامساعد و ناراحتی کم است.	جبران خسارت و فروکش کردن سیلاب سریع اتفاق می‌افتد.
متوسط	وقوع خسارت و شرایط نامساعد و ناراحتی محتمل است.	جبران خسارت و فروکش کردن سیلاب به‌طور متوسط اتفاق می‌افتد.
زیاد	وقوع خسارت محتمل است و شرایط نامساعد و ناراحتی غیرقابل تحمل است.	جبران خسارت و فروکش کردن سیلاب به‌طور آرام اتفاق می‌افتد.
خیلی زیاد	خسارت شدید است و شرایط نامساعد و ناراحتی غیرقابل تحمل است.	جبران خسارت و فروکش کردن سیلاب به‌طور خیلی آرام اتفاق می‌افتد.

۲-۳-۳- نقطه مقاومت

حوزه مقاومت سیستم RBFM در شکل ۱ با شاخص نقطه مقاومت کمی می‌شود. این محدوده با حداکثر عمق بارشی در نظر گرفته می‌شود که در آن پاسخ سامانه برابر با صفر است. به منظور محاسبه چنین بارشی، منحنی شدت-مدت-فراوانی مربوطه برای نشان دادن خصوصیات بارندگی مانند تداوم، شدت و نیز دوره بازگشت استفاده می‌شود. با این حال، از آنجایی که هدف نشان دادن نقطه مقاومت به صورت یک عدد است، از عمق تجمعی بارش‌های مولد سیل با دوره بازگشت مختلف برای نمایش شاخص مقاومت استفاده می‌شود.

۲-۳-۴- نقطه هشدار

ترسیم منحنی بازیابی-پاسخ (RRC) (شکل ۱) با کمک برآورد پاسخ اجتماعی و توانایی بازیابی اجتماعی توسط روابط (۲) و (۶) برای رخدادهای مختلف سیلابی انجام می‌شود. در این مطالعه، مختصات نقطه تقاطع به عنوان یک شاخص برای بیان نقطه هشدار در نظر گرفته می‌شود. مختصات افقی بر بزرگی سیلاب دلالت دارد که با عمق تجمعی بارندگی در نقطه هشدار نشان داده می‌شود. در حالی که مختصات عمودی نشانگر درصد پاسخ یا درصد بازیابی اجتماعی است، این مقادیر در نقطه هشدار با هم برابر هستند.

که $ARecT_j$ مدت زمان بازیابی برای هر گره سیلابی j است. سپس نتایج به دست آمده از رابطه (۵) نرمال‌سازی می‌شوند. از آنجایی که با کاهش مدت زمان بازیابی، شاخص توانایی بازیابی افزایش می‌یابد، مقدار نرمال شده باید از ۱ کسر شود (رابطه (۶)) تا به شاخص بازیابی نرمال شده ($NRecCI$) دست یافت:

$$NRecCI = \left[1 - \frac{TRecTI - TRecTI_{min}}{TRecTI_{max} - TRecTI_{min}} \right] \times 100 \quad (6)$$

این فرآیند برای همه رخدادهای سیلابی در تحلیل تاب‌آوری تکرار می‌شود. از آنجایی که در رابطه (۶) مقادیر شاخص‌های بازیابی بر اساس شدت اثر سیلاب بر زمان بازیابی وزن‌دهی شده‌اند، میانگین مقادیر نرمال شده را می‌توان به عنوان شاخص توانایی بازیابی اجتماعی ($SRecC$) بر اساس رابطه (۷) استفاده کرد:

$$SRecC = \frac{1}{n_r} \cdot \sum_{r=1}^{n_r} NRecI_r \quad (7)$$

جدول ۲. تعریف مجموعه‌های فازی با بیان چگونگی جبران شدن خسارت‌ها و فروکش کردن سیلاب [۱۰]

Table 2. Definition of fuzzy sets for social response and recovery duration (recompensing and subsidence [10])

ISD (hour)	BA (M-Dollar)	ARC (meter)	DSP (meter)	AGS	CIA	RE	TD (vehicle)	PC (person/ha)	گره سیلابی
وضعیت موجود (Status Que)									
۱۵/۳	۳۰	۹۹۴۰	۱۲۷۰	۰/۹۳	۰/۰۰	۰/۰۷	۷۱۶	۱۳۷	۱
۱۸/۹	۳۰	۵۹۸۱	۱۴۳۴	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۱۲	۵۷۴۳	۱۰۹۹	۲
۲۵/۱	۳۰	۴۴۶۷	۲۵۴۲	۰/۸۴	۰/۰۱	۰/۱۵	۳۲۳۳	۶۱۸	۳
۱۴/۴	۳۰	۳۲۸۵	۱۳۴۵	۰/۹۰	۰/۰۰	۰/۱۰	۲۵۸۵	۴۹۴	۴
۲۲/۴	۳۰	۱۸۸۱	۸۲۳	۰/۴۹	۰/۱۴	۰/۳۷	۷۰۵۶	۱۳۵۱	۵
۲۷/۳	۳۰	۱۳۹۵	۲۵۴	۰/۱۰	۰/۳۲	۰/۵۸	۵۶۷۲	۱۰۸۵	۶
۳۲/۵	۳۰	۱۷۹۸	۶۴۸	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۷۲	۸۹۰۴	۱۷۰۴	۷
۴۱/۱	۳۰	۳۷۲۷	۲۶۱۴	۰/۶۳	۰/۰۹	۰/۲۸	۲۲۴۶	۴۲۹	۸
کمربند سبز (Green Belt)									
۱۰/۱	۴۲	۹۹۴۱	۱۲۷۰	۰/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۵	۳۱۲	۶۰	۱
۱۲/۵	۴۲	۵۹۸۲	۱۴۳۴	۰/۹۱	۰/۰۰	۰/۰۹	۲۵۰۲	۴۷۹	۲
۱۶/۵	۴۲	۴۴۶۸	۲۵۴۲	۰/۸۹	۰/۰۱	۰/۱۰	۱۴۰۸	۲۷۰	۳
۹/۵	۴۲	۳۲۸۶	۱۳۴۶	۰/۹۲	۰/۰۰	۰/۰۸	۱۱۲۶	۲۱۶	۴
۱۴/۸	۴۲	۱۸۸۱	۸۲۳	۰/۶۰	۰/۱۲	۰/۲۸	۳۰۷۴	۵۸۹	۵
۱۸/۱	۴۲	۱۳۹۶	۲۵۵	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۴۵	۲۴۷۱	۴۷۳	۶
۲۱/۵	۴۲	۱۷۹۹	۶۴۹	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۵۵	۳۸۷۹	۷۴۳	۷
۲۷/۱	۴۲	۳۷۲۸	۲۶۱۴	۰/۶۹	۰/۰۸	۰/۲۲	۹۷۸	۱۸۷	۸

مراکز امداد و نقاط حساس همراه با ازدحام جمعیت در منطقه مطالعاتی در شکل ۶ نمایان است [۳۵، ۳۶].

۲-۴-۱- گزینه‌های مدیریتی حوضه آبریز

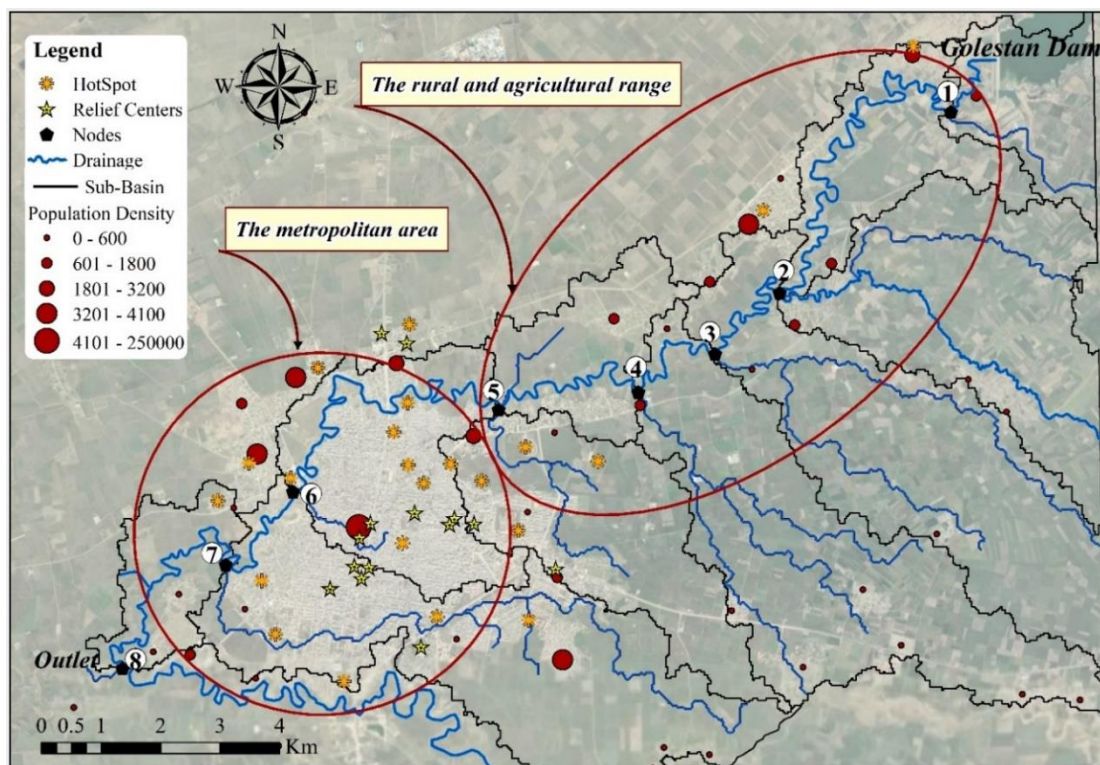
به طور معمول، در مراحل تصمیم‌گیری یا طراحی، گزینه‌های مختلف سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب رودخانه‌ای برای بهبود وضعیت موجود حوضه آبریز از نظر شرایط زهکشی پیشنهاد می‌شوند. بنابراین، الگوریتم ارزیابی تاب‌آوری اجتماعی با انتخاب مجموعه‌ای از گزینه‌های مناسب مورد آزمایش قرار می‌گیرد. طرح‌های مدیریتی در نظر گرفته شده عبارتند از:

- گزینه گوره خاکی (EL): احداث خاکریز در اطراف سواحل رودخانه (تعمیق و گسترش آبراهه‌های موجود)

- گزینه کمربند سبز (GB): اجرای جنگل‌کاری (احیای پوشش گیاهی با بهبود باغات و مراتع) در بالادست محدوده

۲-۴- مطالعه موردی

عملکرد الگوریتم پیشنهادی در مسئله تاب‌آوری اجتماعی در بخشی از حوضه رودخانه گرگانرود مورد بررسی قرار می‌گیرد. این بخش از حوضه آبریز بین طول جغرافیایی $9^{\circ} 7' 55''$ تا $6^{\circ} 18' 55''$ و عرض جغرافیایی $7^{\circ} 13' 37''$ تا $8^{\circ} 19' 37''$ واقع شده است (شکل ۶). مساحت این منطقه تقریباً ۱۲،۲۰۰ هکتار است. کاربری زمین در بازه پایاب سد گلستان تا ورودی رودخانه به منطقه، شهری است که عموماً سیلاب‌دشت آن را اراضی روستایی و کشاورزی تشکیل می‌دهد. این محدوده ۵۵ درصد از کل محدوده را شامل می‌شود. بخش باقیمانده در محدوده شهر گنبد قرار دارد که در این مورد کاربری‌های خاصی مانند مسکونی، اداری-تجاری و فضای سبز وجود دارد. سامانه زهکشی منطقه، آبراهه طبیعی و کانال‌های باز است. متغیرهای آسیب‌پذیری موجود در جدول ۱ در این مطالعه برای ارزیابی عملکرد سامانه RBFM در لایه‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) تهیه شده‌اند. توزیع مکانی



شکل ۶. زیرحوضه‌های محدوده مطالعه، کاربری اراضی (تراکم جمعیت، مراکز امداد و نقاط حساس) و موقعیت هشت گره انتهایی که معرف آخرین سلول هر مساحت متأثر از سیلاب در برخورد با آبراهه اصلی رودخانه گرگانرود هستند

Fig.6. The subbasins boundaries alongside layout of land use (population density, relief centers and sensitive points) and the position of the eight nodes that represent the last cell of each flood-affected area in contact with the main channel of the Gorganrood River

۳- اجرای الگوریتم پیشنهادی و تحلیل نتایج

متغیرهای آسیب‌پذیری هر سامانه RBFM (گره‌های شکل ۶) بر اساس الگوریتم ارائه‌شده برای کمی‌سازی تاب‌آوری با شبیه‌سازی RAS2D و داده‌های GIS تحت رخدادهای بارش ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برای گزینه‌های مختلف مدیریتی تعیین می‌شوند. مقادیر متغیرهای آسیب‌پذیری را برای گزینه کم‌رند سبز (GB) در مقایسه با شرایط موجود (SQ) تحت سیلاب ۲۰۰ ساله در جدول ۳ نمایش داده شده است.

گزینه‌های مدیریتی یا باعث تغییر در پهنه‌بندی و خصوصیات سیلاب می‌شوند یا شرایط اقتصادی-اجتماعی حوضه آبریز را تغییر می‌دهند که این مسئله باعث تغییر در مقادیر متغیرهای آسیب‌پذیری می‌شود. به‌طور کلی، هشت گره سیل‌گرفته یا سامانه RBFM متناظر، در هر یک از گزینه‌ها وجود دارد که متغیرهای آسیب‌پذیری آنها به عنوان ورودی در الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. متغیرهای ورودی و خروجی برای کمی‌سازی پاسخ اجتماعی با کمک توابع عضویت فازی می‌شوند. توابع

- گزینه سیستم هشدار (WS): ایجاد هشدار و برنامه تخلیه به‌منظور پیش‌آگاهی از خطر
- گزینه کانال انحراف (DC): ساخت کانال چندمنظوره (رودخانه سبز) به دور منطقه شهری
- گزینه مخازن نگهداشت (RR): ساخت مخزن سطحی در فضاهای مناسب اطراف رودخانه

۲-۴-۲- نوع آشفستگی ورودی

در این مطالعه رخدادهای بارش با دوره بازگشت ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله برای تحلیل تاب‌آوری اجتماعی در نظر گرفته شده است. عمق بارش تجمعی در ایستگاه بارانسنجی گنبد مربوط به این دوره‌ها در شکل ۷ نمایان است. این ارتفاع بارش برای تعیین نقاط مقاومت و رسم RRC استفاده می‌شود. در این مطالعه با صرف نظر کردن از عدم قطعیت‌های هیدرولوژیکی موجود در مدل‌سازی از جمله در عمق و تداوم بارش‌ها، برای هر دوره بازگشت از یک عمق مشخص بارش در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است.

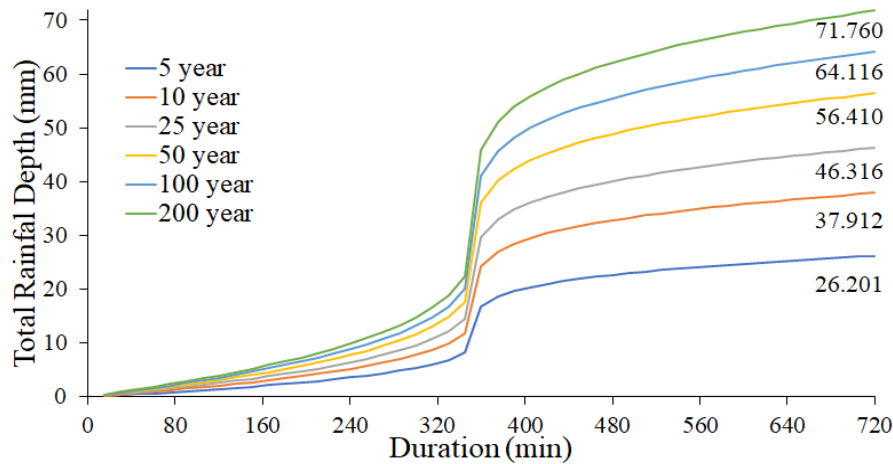
جدول ۳. متغیرهای تحلیل آسیب سیستم RBFM در گزینه‌های شرایط طبیعی و کمربند سبز برای سیلاب ۲۰۰ ساله در هر گره انتهایی

Table 3. RBFM system variables under status que (SQ) and green belt (GB) alternatives for 200year flood in each node

ISD (hour)	BA (M- Dollar)	ARC (meter)	DSP (meter)	AGS	CIA	RE	TD (vehicle)	PC (person/ha)	گره سیلابی
وضعیت موجود (Status Que)									
۱۵/۳	۳۰	۹۹۴۰	۱۲۷۰	۰/۹۳	۰/۰۰	۰/۰۷	۷۱۶	۱۳۷	۱
۱۸/۹	۳۰	۵۹۸۱	۱۴۳۴	۰/۸۸	۰/۰۰	۰/۱۲	۵۷۴۳	۱۰۹۹	۲
۲۵/۱	۳۰	۴۴۶۷	۲۵۴۲	۰/۸۴	۰/۰۱	۰/۱۵	۳۲۳۳	۶۱۸	۳
۱۴/۴	۳۰	۳۲۸۵	۱۳۴۵	۰/۹۰	۰/۰۰	۰/۱۰	۲۵۸۵	۴۹۴	۴
۲۲/۴	۳۰	۱۸۸۱	۸۲۳	۰/۴۹	۰/۱۴	۰/۳۷	۷۰۵۶	۱۳۵۱	۵
۲۷/۳	۳۰	۱۳۹۵	۲۵۴	۰/۱۰	۰/۳۲	۰/۵۸	۵۶۷۲	۱۰۸۵	۶
۳۲/۵	۳۰	۱۷۹۸	۶۴۸	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۷۲	۸۹۰۴	۱۷۰۴	۷
۴۱/۱	۳۰	۳۷۲۷	۲۶۱۴	۰/۶۳	۰/۰۹	۰/۲۸	۲۲۴۶	۴۲۹	۸
کمربند سبز (Green Belt)									
۱۰/۱	۴۲	۹۹۴۱	۱۲۷۰	۰/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۵	۳۱۲	۶۰	۱
۱۲/۵	۴۲	۵۹۸۲	۱۴۳۴	۰/۹۱	۰/۰۰	۰/۰۹	۲۵۰۲	۴۷۹	۲
۱۶/۵	۴۲	۴۴۶۸	۲۵۴۲	۰/۸۹	۰/۰۱	۰/۱۰	۱۴۰۸	۲۷۰	۳
۹/۵	۴۲	۳۲۸۶	۱۳۴۶	۰/۹۲	۰/۰۰	۰/۰۸	۱۱۲۶	۲۱۶	۴
۱۴/۸	۴۲	۱۸۸۱	۸۲۳	۰/۶۰	۰/۱۲	۰/۲۸	۳۰۷۴	۵۸۹	۵
۱۸/۱	۴۲	۱۳۹۶	۲۵۵	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۴۵	۲۴۷۱	۴۷۳	۶
۲۱/۵	۴۲	۱۷۹۹	۶۴۹	۰/۲۳	۰/۲۱	۰/۵۵	۳۸۷۹	۷۴۳	۷
۲۷/۱	۴۲	۳۷۲۸	۲۶۱۴	۰/۶۹	۰/۰۸	۰/۲۲	۹۷۸	۱۸۷	۸

گزینه‌های SQ و GB تأیید می‌کنند. مقدار $Asres_1$ به‌عنوان ورودی برای سطح دوم سیستم سلسله مراتبی استفاده می‌شود. با همین روند، تا زمانی که $ASres_2$ برای تمامی گره‌های سیلابی شکل ۶ محاسبه شود، پاسخ اجتماعی برای هر سطح محاسبه می‌شود. در مرحله بعد مقدار پاسخ اجتماعی نرمال‌سازی شده ($NSresI$) برای هر گزینه مدیریتی تحت رخدادهای بارش ۵ تا ۲۰۰ سال با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود. پاسخ اجتماعی نرمال‌سازی شده گزینه‌های مختلف در برابر رخداد سیلاب با دوره بازگشت مختلف در جدول ۴ آمده است. مقایسه مقادیر جدول ۴ نشان می‌دهد که گزینه مخزن نگهداشت (RR) کوچکترین مقدار $NSresI$ را برای همه رخدادهای مختلف سیلاب دارد، به جز بارش ۲۰۰ ساله که گزینه کمربند سبز (GB) کمترین مقدار (۶۹/۳٪) را بدست می‌آورد. با این وجود،

عضویت متغیرهای ازدحام جمعیت و تراکم ترافیک در داده‌های شکل ۸ (a) نشان داده شده است. به عنوان مثال، در گزینه SQ برای گره ۷ ازدحام جمعیت ۱۷۰۴ نفر بوده که متعلق به مجموعه فازی "خیلی زیاد" است. اما مقدار این متغیر برای گزینه GB برابر ۷۴۳ نفر است که متعلق به مجموعه فازی "کم" است. از آنجایی که تراکم ترافیک نیز برای دو گزینه همین روند را دارد، می‌توان انتظار داشت که مقدار پاسخ اجتماعی ($ASres_1$) در گزینه SQ بیشتر از گزینه GB باشد. همچنین برای هر سطح، قوانین فازی (FRBS) بر اساس قضاوت‌های چندین متخصص محلی ساخته شده است. شکل ۸ (b) نمونه‌ای از قوانین فازی را به فرم ماتریسی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، قوانین ساخته شده انتظارات فوق را در مورد $Asres_1$ برای



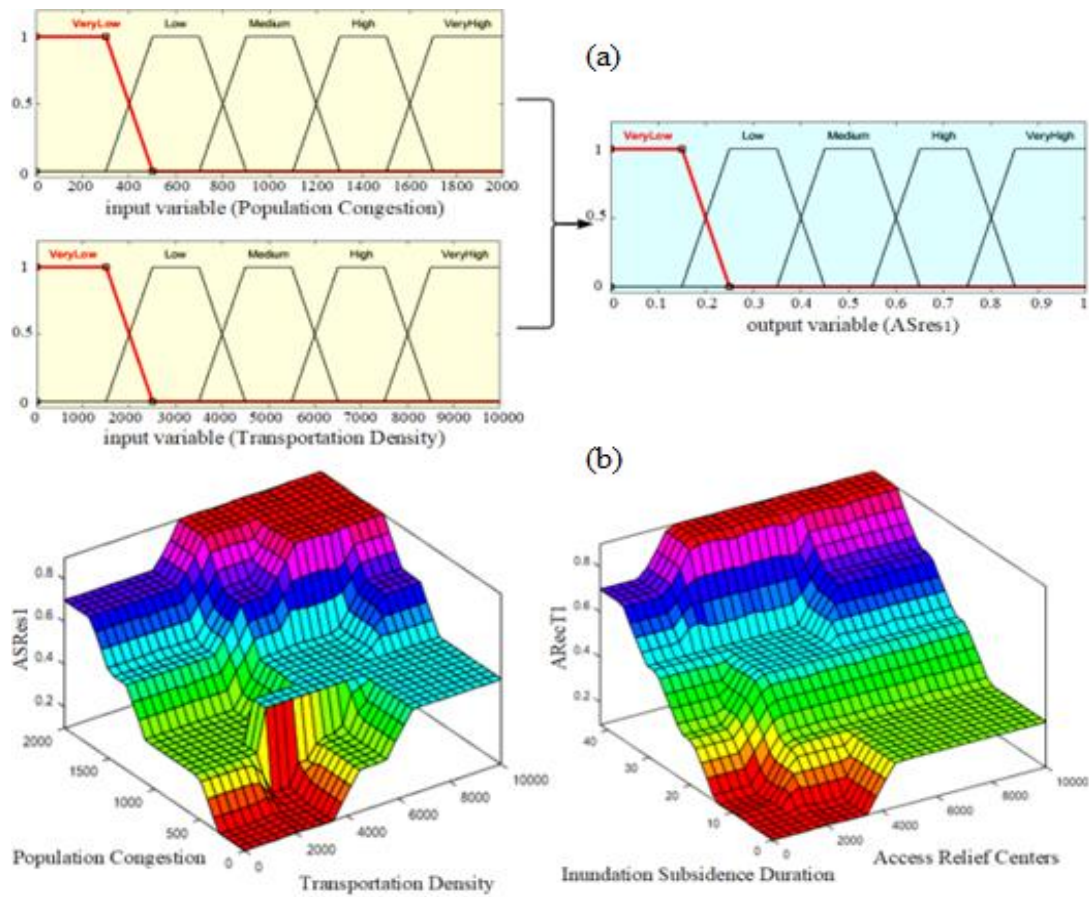
شکل ۷. منحنی‌های تجمعی عمق کل بارش در ایستگاه باران‌سنجی گنبد

Fig. 7. Cumulative rainfall curves in Gonbad rain gauge station

و GB تأیید می‌کنند. سپس مقدار $ARect_1$ به عنوان ورودی در سطح دوم HFS به منظور محاسبه مدت بازیابی ($ARect_j$) استفاده می‌شود. توانایی بازیابی نرمال شده ($NRecCI$) را می‌توان با تعیین $ARect_j$ برای هر گزینه و استفاده از معادله ۶ محاسبه کرد. مقادیر $NRecCI$ در جدول ۵ برای دوره بازگشت‌های مختلف آمده است. در نهایت مقادیر چهار شاخص پاسخ مورد انتظار سالانه ($EASresI$)، توانایی بازیابی اجتماعی ($SRecC$)، نقطه مقاومت ($Resistance\ point$) و نقطه هشدار ($Warning\ point$) برای گزینه‌های زهکشی مختلف در جدول ۶ محاسبه می‌شود. این جدول اطلاعات مناسبی را در مورد وضعیت یک منطقه سیل گرفته ارائه می‌دهند، طوری که تصمیم‌گیرنده می‌تواند گزینه‌ها را از نظر متغیرهای اجتماعی اولویت‌بندی کند. مقدار $NRecCI$ مطابق جدول ۵، در گزینه RR تحت همه رخدادهای سیلابی بیشترین مقدار را دارد، که در جدول ۶ بیانگر بالاترین توانایی بازیابی به میزان ۸۷/۰۴ است. منحنی‌های پاسخ-بازیابی (RRC) با توجه به مقادیر $NSResI$ و $NRecCI$ در جداول ۴ و ۵ همراه با مقدار عمق بارش تجمعی در شکل ۷، با استفاده از نرم افزار MATLAB محاسبه شد (شکل ۹). این منحنی‌ها نحوه و میزان اثرگذاری گزینه‌های مختلف مدیریتی را بر هر یک از چهار شاخص تاب‌آوری اجتماعی نمایان می‌سازد. به عنوان نمونه، گزینه RR با توجه به شکل ۹ (d) کم‌ترین پاسخ اجتماعی را در صورت شکست عملکرد ایجاد می‌کند. گزینه‌های GB، RR، WS، DC دارای مقادیر $NSResI$ تقریباً برابر با صفر تحت رخداد بارش ۵ ساله هستند (جدول ۴).

مقادیر $EASresI$ در جدول ۶ نشان می‌دهد که گزینه RR پاسخ مورد انتظار را حدود ۹ درصد در مقایسه با وضعیت موجود (SQ) کاهش می‌دهد. به همین دلیل به کمک این شاخص، تصمیم‌گیران حوضه آبریز ممکن است گزینه RR را به عنوان طرح نهایی برای منطقه مورد مطالعه انتخاب کنند، در حالی که معمولاً گزینه‌های گوره خاکی (EL) و سیستم هشدار (WS) با در نظر گرفتن شاخص مرسوم هزینه ساخت انتخاب می‌شوند. از طرفی دیگر ارزیابی گزینه‌های مختلف مدیریتی بر اساس هم کارایی عملکرد در کاهش شدت سیلاب و هم هزینه ساخت ممکن است طرح نهایی دیگری را پیشنهاد دهد. این تحقیق تنها کارایی گزینه‌های مختلف سیل را بر اساس کاهش شدت متغیرهای آسیب‌پذیری قضاوت می‌کند و تاثیر گزینه‌ها بر کاهش ریسک مخاطره در نظر گرفته نمی‌شود.

متغیرهای آسیب‌پذیری مرتبط با بازیابی ارائه شده در جدول ۳ به منظور کمی‌سازی شاخص توانایی بازیابی فازی می‌شوند. سیستم فازی همانطور که در شکل ۸ (b) نشان داده شده برای هر سطح ساخته می‌شود. به عنوان مثال، در گزینه SQ برای گره ۷ مدت زمان فروکش کردن طغیان (ISD) ۳۲/۵ ساعت است که به مجموعه فازی "زیاد" یا "خیلی زیاد" تعلق دارد است. در حالیکه مقدار این متغیر برای گزینه GB ۲۱/۵ ساعت و به مجموعه فازی "متوسط" تعلق دارد. از آنجایی که فاصله تا مراکز امدادی (ARC) برای هر دو گزینه (۱۸۰ متر) یکسان است، می‌توان انتظار داشت که $ARect_1$ در گزینه GB کوتاه‌تر از SQ باشد. قوانین ساخته شده همانطور که در شکل ۸ (b) نشان داده شده، این انتظار را در مورد $ARect_1$ برای گزینه‌های SQ



شکل ۸. نمونه‌هایی از (a) سیستم فازی سلسله مراتبی با دو تابع عضویت ورودی جمعیت - ترافیک و (b) فرم ماتریسی قواعد ساخته شده

Fig.8. The samples of (a) FRBS1 with two MF of PC and TD input and (b) matrix form of constructed fuzzy rules

جدول ۴. پاسخ اجتماعی برای هر گزینه تحت سیلاب‌های مختلف

Table 4. Social response indicator for drainage alternatives under different flood events

NSResI (%)						گزینه
سال ۲۰۰	سال ۱۰۰	سال ۵۰	سال ۲۵	سال ۱۰	سال ۵	
۱۰۰	۸۴/۶	۶۲/۴	۴۹/۹	۳۱/۶	۱۴/۶	SQ
۹۴/۱	۷۹/۰	۵۶/۶	۳۸/۴	۲۵/۲	۸/۸	EL
۶۹/۳	۶۲/۰	۴۷/۵	۳۶/۲	۲۳/۹	۱/۱	GB
۷۰/۴	۵۸/۱	۴۲/۹	۱۷/۲	۳/۶	۰/۰	RR
۸۰/۱	۷۲/۲	۴۹/۳	۳۴/۸	۲۰/۸	۱/۴	WS
۷۷/۶	۶۵/۰	۴۶/۲	۳۰/۱	۱۳/۵	۰/۹	DC

جدول ۵. توانایی بازیابی برای هر گزینه تحت سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف

Table 5. recovery capability indicator for drainage alternatives under different flood events

گزینه	NRecCI (%)					
	سال ۵	سال ۱۰	سال ۲۵	سال ۵۰	سال ۱۰۰	سال ۲۰۰
SQ	۸۹/۶	۶۵/۵	۴۶/۴	۲۸/۹	۱۷/۰	۰/۰
EL	۹۵/۳	۸۴/۹	۷۶/۸	۶۹/۲	۵۷/۸	۳۴/۷
GB	۹۹/۴	۸۹/۱	۸۰/۹	۷۲/۴	۶۵/۹	۵۱/۰
RR	۱۰۰	۹۹/۲	۹۵/۲	۸۶/۶	۷۲/۴	۶۸/۹
WS	۹۷/۰	۸۵/۲	۷۸/۱	۷۳/۷	۶۷/۲	۵۷/۵
DC	۹۹/۶	۹۴/۳	۹۰/۵	۷۷/۰	۶۹/۵	۶۰/۲

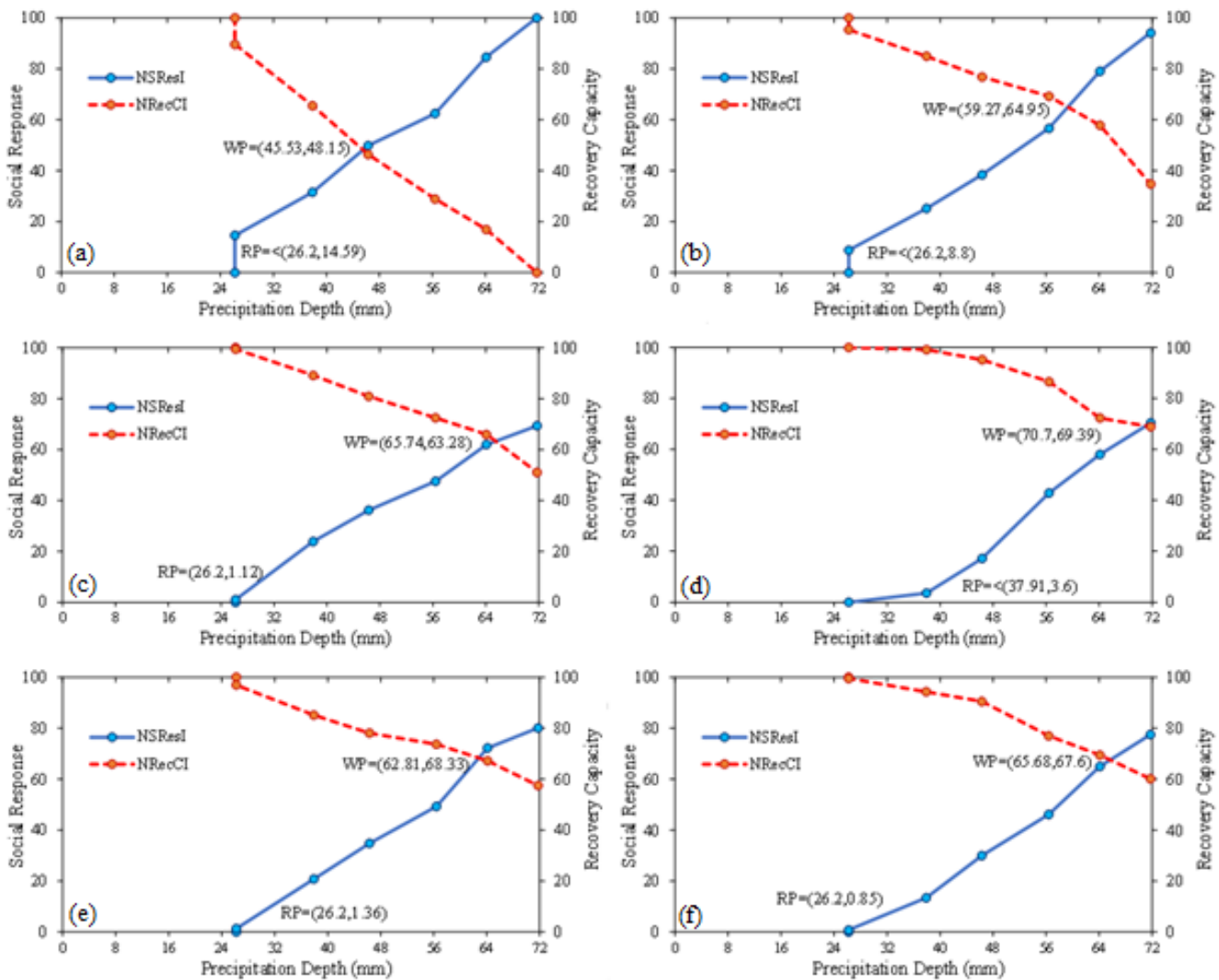
جدول ۶. مشخصات چهار شاخص در کمی‌سازی تاب‌آوری اجتماعی

Table 6. characterizations of four indicators to quantify social resilience

گزینه	EASResI (%/year)	SRecC (%/year)	Resistance (mm)	Warning point	
				y (%)	x (mm)
SQ	۲۳/۰۱	۴۱/۲۲	<۲۶/۲	۴۵/۵۳	۴۸/۱۵
EL	۲۰/۵۶	۶۹/۷۸	<۲۶/۲	۵۹/۲۷	۶۴/۹۵
GB	۱۶/۸۲	۷۶/۴۶	۲۶/۲	۶۵/۷۴	۶۳/۲۸
RR	۱۳/۸۷	۸۷/۰۴	<۳۷/۹	۷۰/۷۰	۶۹/۳۹
WS	۱۸/۱۸	۷۶/۴۴	۲۶/۲	۶۲/۸۱	۶۸/۳۳
DC	۱۶/۴۸	۸۱/۸۶	۲۶/۲	۶۵/۶۸	۶۷/۶۰

این نشان می‌دهد که نقطه مقاومت (مطابق شکل ۷ برابر ۲۶/۲ میلی‌متر) برای این گزینه‌ها عمق بارش تجمعی ۵ ساله است، حال آنکه با توجه به شکل ۹ نقاط مقاومت در گزینه‌های SQ و EL کوچکتر هستند. تعیین نقطه مقاومت همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده، به تنهایی برای انتخاب گزینه مناسب کافی نیست. این مسئله ضرورت تعریف شاخص‌های مختلف تاب‌آوری را به منظور تعیین رفتار سامانه RBFM پس از شکست عملکرد نشان می‌دهد.

نقطه هشدار برای گزینه RR مطابق جدول ۶ در مختصات (۶۹/۴، ۷۰/۷) رخ می‌دهد. این بدان معناست که تصمیم‌گیرندگان پس از اجرای گزینه مخزن نگهداشت (RR) باید به رخداد‌های ۲۰۰ ساله توجه داشته باشند. نقطه هشدار در شرایط موجود (SQ)، بارش ۲۵ ساله (۴۵/۵ میلی‌متر) را نشان می‌دهد، در حالیکه معمولاً در رویکردهای سنتی رخداد ۱۰۰ ساله نگران‌کننده در نظر گرفته می‌شود و بارش ۲۰ ساله ایمن فرض می‌شود. با این حال، نزدیکی مختصات X گزینه‌های مختلف، انتخاب مناسب‌ترین از



شکل ۹. منحنی پاسخ-بازایی برای گزینه‌های مختلف مدیریتی: (a) وضعیت موجود، (b) گوره خاکی، (c) کمربند سبز، (d) مخزن نگهداشت، (e) سیستم هشدار، (f) کانال انحراف (رودخانه سبز)

Fig.9. Response-Recovery Curves (RRCs) for various management alternatives:(a) status quo, (b) earthen levee, (c) green belt, (d) retention reservoir, (e) warning system, (f) diversion channel (green river)

۴- نتیجه‌گیری و جمع بندی

این مطالعه با تمرکز بر جنبه‌های اجتماعی مدیریت سیلاب در حوضه‌های آبریز، تاب‌آوری را به عنوان ظرفیت سامانه RBFM به‌منظور پاسخ‌گویی به رخداد سیلاب رودخانه‌ای و بازگشت به شرایط پیش از آفتگی تعریف کرده است. بر این اساس، عملیاتی‌سازی تاب‌آوری در این مطالعه با اندازه‌گیری بزرگی پاسخ و توانایی بازایی در طیف وسیعی از رخدادهای بارش پیشنهاد شده است که در آن، خصوصیات جمعیتی، سازمانی و فیزیکی سامانه RBFM نقش پررنگی در کمیت پاسخ و بازایی دارند. کمی‌سازی

میان آنها را دشوار می‌کند. در این صورت تصمیم‌گیری ممکن است بر اساس مختصات y نقطه هشدار (برابری در پاسخ اجتماعی و توانایی بازایی) انجام شود. به عنوان مثال، x نقطه هشدار در گزینه‌های GB و DC به ترتیب برابر $۶۵/۷۴$ و $۶۵/۶۸$ است. در چنین حالتی، ترجیح تصمیم‌گیرندگان بر اساس پاسخ اجتماعی یا ظرفیت بازایی تعیین کننده است. زیرا در وضعیت اول ممکن است گزینه GB به دلیل پاسخ اجتماعی $۶۳/۳٪$ ارجح باشد، در حالیکه برای وضعیت دوم با توانایی بازایی $۶۷/۶٪$ ممکن است گزینه DC ترجیح داده شود.

۵- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
مدت زمان بازیابی برای گره سیلابی Z در سیستم زهکشی (RBFM) برای هر رخداد بارش	$ARect_j$
بزرگی پاسخ برای گره سیلابی Z در سیستم زهکشی (RBFM) برای هر رخداد بارش	$ASres_j$
شاخص حداکثر مجموع پاسخ اجتماعی	$ASres_{max}$
شاخص حداقل مجموع پاسخ اجتماعی	$ASres_{min}$
تابع چگالی عمق بارش کل	$f(h)$
ارتفاع بارش طراحی که پاسخ حوضه آبریز رخ می‌دهد، m	h_d
تعداد رخدادهای بارش (دوره بازگشت)	n_r
شاخص بازیابی نرمال‌سازی شده برای هر رخداد بارش، %	$NRecCI$
شاخص پاسخ نرمال‌سازی شده برای هر رخداد بارش، %	$NSresI$
شاخص مدت زمان کل بازیابی در منطقه مطالعاتی برای هر رخداد بارش	$TRecTI$
شاخص حداکثر تداوم کل بازیابی	$TRecTI_{max}$
شاخص حداقل تداوم کل بازیابی	$TRecTI_{min}$
شاخص پاسخ کل در منطقه مطالعاتی برای هر رخداد بارش	$TSresI$
علائم یونانی	
میزان احتمال تخطی از بارش طراحی	ΔP_i
تابع عضویت برای عنصر X	$\mu \tilde{A}(x)$

منابع

- [1] H. Jia, Y. Lu, L. Y. Shaw, Y. Chen, Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village, Separation and Purification Technology, 84 (2012) 112-119.
- [2] C. Pyke, M.P. Warren, T. Johnson, J. LaGro Jr, J. Scharfenberg, P. Groth, R. Freed, W. Schroer, E. Main, Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate

رفتار سامانه تحت آشفتگی در این مطالعه با تعریف چهار شاخص پاسخ اجتماعی، توانایی بازیابی و نقاط مقاومت و هشدار انجام شد. یک سیستم فازی (FRBS) برای مواجهه با عدم قطعیت متغیرهای جمعیتی و فیزیکی و قضاوت نسبی در میزان پاسخ و بازیابی توسعه یافت که با توجه به افزایش ابعاد در FRBS، این مشکل با ایجاد سیستم فازی سلسله مراتبی در تعیین کمی پاسخ و بازیابی برطرف شد.

الگوریتم پیشنهادی در یک مطالعه موردی واقع شده در حوضه آبریز شهر گنبدکاووس در استان گلستان به کار گرفته شد و شاخصها برای پنج گزینه مدیریتی به منظور بهبود وضعیت کنونی ارزیابی شدند. متغیرهای آسیب پذیری برای گزینه های مدیریتی، با استفاده از مدل شبیه سازی ۲ بعدی HEC-RAS و اطلاعات مورد نیاز در محیط GIS تعیین شدند. نتایج نشان می‌دهد که شاخصها امکان بررسی آثار گزینه‌های زهکشی حوضه آبریز شهری را در رفتار RBFM تحت شرایط سیلابی مختلف فراهم می‌کنند. همچنین، شاخص‌های اجتماعی می‌توانند در فرآیند تصمیم‌گیری در کنار شاخص‌های دیگر جنبه‌ها (اقتصادی و محیط‌زیستی) برای انتخاب تاب‌آورترین مداخله مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج نشان داد در محدوده مورد مطالعه بر اساس ارزیابی تاب‌آوری اجتماعی، گزینه مخزن نگهداشت برای همه رخدادهای سیلاب با دوره بازگشت مختلف، به جز در یک مورد، گزینه مناسب‌تری است. این در حالی که معمولاً گزینه‌های گوره خاکی و سیستم هشدار به دلیل هزینه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

الگوریتم پیشنهادی برای ارزیابی تاب‌آوری گزینه‌های مدیریت سیلاب رودخانه‌ای این امکان را فراهم می‌کند تا چهار شاخص پاسخ اجتماعی، توانایی بازیابی، نقطه مقاومت و نقطه هشدار کمی‌سازی شوند، مقدار بزرگی آشفتگی در برآورد تاب‌آوری اجتماعی لحاظ شود، مسئله نسبی بودن مقادیر متغیرهای آسیب‌پذیری و مشکل ابعادی محاسبات با ساخت یک سیستم فازی سلسله مراتبی برطرف شود و رفتار گزینه‌های مختلف مدیریتی در شرایط شکست عملکرد با ترسیم منحنی پاسخ-بازیابی مورد ارزیابی قرار گیرد. تعریف مفهوم "نقطه هشدار" در این مطالعه به صورت نشانه‌ای از محل تسلط پاسخ بر توانایی بازیابی از بارش، منجر به توجه بیشتر به نحوه بروز اختلال در یک سامانه RBFM می‌شود. البته بررسی درجه تاب‌آوری حوضه آبریز شهری در قالب یک عدد منحصر به فرد نیاز به تحقیقات بیشتری دارد، چراکه ورود ترجیحات مدیران و ذی‌نفعان و اختصاص وزن‌های مختلف به شاخص‌ها می‌تواند مقایسه اقدامات مدیریت سیلاب را پیچیده‌تر کند.

- [12] F. Yazdandoost, B. Bozorgy, Flood risk management strategies using multi-criteria analysis, in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, Thomas Telford Ltd, 2008, pp. 261-266.
- [13] K.-H. Liao, A theory on urban resilience to floods—a basis for alternative planning practices, *Ecology and society*, 17(4) (2012).
- [14] S. Djordjević, D. Butler, P. Gourbesville, O. Mark, E. Pasche, New policies to deal with climate change and other drivers impacting on resilience to flooding in urban areas: the CORFU approach, *Environmental Science & Policy*, 14(7) (2011) 864-873.
- [15] Y. Cai, G. Huang, Q. Tan, B. Chen, Identification of optimal strategies for improving eco-resilience to floods in ecologically vulnerable regions of a wetland, *Ecological Modelling*, 222(2) (2011) 360-369.
- [16] P.M. Orenco, M. Fujii, A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP), *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 3 (2013) 62-75.
- [17] T. McDaniels, S. Chang, D. Cole, J. Mikawoz, H. Longstaff, Fostering resilience to extreme events within infrastructure systems: Characterizing decision contexts for mitigation and adaptation, *Global Environmental Change*, 18(2) (2008) 310-318.
- [18] C.S. Holling, G.K. Meffe, Command and control and the pathology of natural resource management, *Conservation biology*, 10(2) (1996) 328-337.
- [19] D. Tilman, J.A. Downing, Biodiversity and stability in grasslands, *Nature*, 367(6461) (1994) 363-365.
- [20] K. de Bruijn, J. Buurman, M. Mens, R. Dahm, F. Klijn, Resilience in practice: Five principles to enable societies to cope with extreme weather events, *Environmental Science & Policy*, 70 (2017) 21-30.
- [21] D. Kuang, K.-H. Liao, Learning from Floods: Linking flood experience and flood resilience, *Journal of environmental management*, 271 (2020) 111025.
- change, *Landscape and Urban Planning*, 103(2) (2011) 166-173.
- [3] Q. Zhou, P.S. Mikkelsen, K. Halsnæs, K. Arnbjerg-Nielsen, Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits, *Journal of Hydrology*, 414 (2012) 539-549.
- [4] C. Li, X. Cheng, N. Li, X. Du, Q. Yu, G. Kan, A framework for flood risk analysis and benefit assessment of flood control measures in urban areas, *International journal of environmental research and public health*, 13(8) (2016) 787-802.
- [5] Y. Tahmasebi Birgani, F. Yazdandoost, An integrated framework to evaluate resilient-sustainable urban drainage management plans using a combined-adaptive MCDM technique, *Water Resources Management*, 32(8) (2018) 2817-2835.
- [6] P. Willems, K. Arnbjerg-Nielsen, J. Olsson, V. Nguyen, Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings, *Atmospheric research*, 103 (2012) 106-118.
- [7] T. Siekmann, M. Siekmann, Resilient urban drainage—Options of an optimized area-management, *Urban Water Journal*, 12(1) (2015) 44-51.
- [8] Y.T. Birgani, F. Yazdandoost, A framework for evaluating the persistence of urban drainage risk management systems, *Journal of Hydro-environment Research*, 8(4) (2014) 330-342.
- [9] M.J. Hammond, A.S. Chen, S. Djordjević, D. Butler, O. Mark, Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review, *Urban Water Journal*, 12(1) (2015) 14-29.
- [10] Y.T. Birgani, F. Yazdandoost, Resilience in urban drainage risk management systems, in: proceedings of the institution of civil engineers-water management, Thomas Telford Ltd, 2016, pp. 3-16.
- [11] Y.T. Birgani, F. Yazdandoost, Sustainable urban drainage management based on resilience risk management, Ph.D Dissertation, 2016 (in Persian).

- Water, 12(4) (2020) 1032.
- [30] S. Dhungel, M.E. Barber, R.L. Mahler, Comparison of one-and two-dimensional flood modeling in urban environments, *International journal of sustainable development and planning*, 14(4) (2019) 356-366.
- [31] I.D. Sumitra, S. Supatmi, Mamdani fuzzy inference system using three parameters for flood disaster forecasting in Bandung region, in, IOP Publishing, 2019, pp. 42-58.
- [32] P.-c. Li, G.-h. Chen, L.-c. Dai, Z. Li, Fuzzy logic-based approach for identifying the risk importance of human error, *Safety science*, 48(7) (2010) 902-913.
- [33] M. Fayaz, S. Ahmad, I. Ullah, D. Kim, A blended risk index modeling and visualization based on hierarchical fuzzy logic for water supply pipelines assessment and management, *Processes*, 6(5) (2018) 61-75.
- [34] M. Fayaz, I. Ullah, D.-H. Kim, Underground risk index assessment and prediction using a simplified hierarchical fuzzy logic model and kalman filter, *Processes*, 6(8) (2018) 103-118.
- [35] M.E. Banihabib, N. Chitsaz, T.O. Randhir, Non-compensatory decision model for incorporating the sustainable development criteria in flood risk management plans, *SN Applied Sciences*, 2(1) (2020) 1-11.
- [36] M.S. Hashemi, F. Zare, A. Bagheri, A. Moridi, Flood assessment in the context of sustainable development using the DPSIR framework, *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 2(2) (2014) 41-49.
- [22] S.L. Cutter, L. Barnes, M. Berry, C. Burton, E. Evans, E. Tate, J. Webb, A place-based model for understanding community resilience to natural disasters, *Global environmental change*, 18(4) (2008) 598-606.
- [23] M.J.P. Mens, F. Klijn, K.M. de Bruijn, E. van Beek, The meaning of system robustness for flood risk management, *Environmental science & policy*, 14(8) (2011) 1121-1131.
- [24] N. Islam, R. Sadiq, M.J. Rodriguez, A. Francisque, Evaluation of source water protection strategies: a fuzzy-based model, *Journal of environmental management*, 121 (2013) 191-201.
- [25] M. Fayaz, I. Ullah, D.-H. Park, K. Kim, D. Kim, An integrated risk index model based on hierarchical fuzzy logic for underground risk assessment, *Applied Sciences*, 7(10) (2017) 137-151.
- [26] Ö. Ekmekcioğlu, K. Koc, M. Özger, District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(3) (2021) 617-637.
- [27] M. Disse, T.G. Johnson, J. Leandro, T. Hartmann, Exploring the relation between flood risk management and flood resilience, *Water Security*, 9 (2020) 59-68.
- [28] A.M.A. Saja, A. Goonetilleke, M. Teo, A.M. Ziyath, A critical review of social resilience assessment frameworks in disaster management, *International journal of disaster risk reduction*, 35 (2019) 101096 %@ 102212-104209.
- [29] Y.G. Lai, A two-dimensional depth-averaged sediment transport mobile-bed model with polygonal meshes,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Ali Kiaei, Mehdi Ahmadi, *Operationalizing Social Resilience for Riverine Flood Risk Management in Urban Basins*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(7) (2023) 1505-1524.

DOI: [10.22060/ceej.2023.22071.7895](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22071.7895)



