

Document Type

Applied Research Article

پژوهشی کاربردی

نوع مقاله

An Integrated Framework for Urban Flood Governance: A Participatory Spatial Decision-Making Approach

A. Radmehr*

Assistant Professor, Faculty of Governance, College of Management, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding, Author Email: aradmehr@ut.ac.ir

Received ► 15-11-2025
Revised ► 05-01-2026
Accepted ► 18-03-2026
Available online ► 15-06-2026

تبیین چارچوب یکپارچه حکمرانی سیلاب شهری با رویکرد تصمیم‌گیری مکانی مشارکتی

احمد رادمهر

استادیار دانشکده حکمرانی، دانشکده‌گان مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* راینامه نویسنده مسئول: aradmehr@ut.ac.ir

تاریخ دریافت ► ۱۴۰۴/۰۸/۲۴
تاریخ بازنگری ► ۱۴۰۴/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش ► ۱۴۰۴/۱۲/۲۷
تاریخ انتشار ► ۱۴۰۵/۰۳/۲۵

Abstract

Urban water governance is increasingly relying on adaptive and integrated systems alongside conventional structural measures. This paper proposes an innovative and integrated spatial decision-making approach to enhance urban water governance. The study emphasizes collaborative stakeholder engagement within a GIS-based multi-criteria decision analysis framework. A decision-support toolbox developed in a Geographic Information System environment employs the Analytic Hierarchy Process. The proposed model integrates spatial analysis and stakeholder participation into a unified spatial planning support system. The results of a case study conducted in Tehran demonstrate the practical applicability of the proposed method in the field of urban water governance. The final flood hazard map classified the study area into six distinct risk levels. Approximately 6% of the area was categorized as very high vulnerability, primarily located in areas characterized by low slopes, high density, and insufficient drainage infrastructure. Classes two and three, representing moderate to high vulnerability, accounted for about 43% of the area, while 42% fell within the low-vulnerability category. Least-cost path analysis, considering land use, slope, and geological criteria, was applied to identify suitable routes for urban runoff collection. The findings indicate that the immediate upgrading of the drainage system in the southeastern areas is essential. The proposed routes, by leveraging existing infrastructure and favorable topography, can reduce construction costs while helping to minimize potential negative economic and social impacts, such as resident displacement. Overall, the proposed model provides a replicable framework for integrating technical, social, and institutional considerations in urban flood governance.

Keywords: Water Governance, Collaborative Planning, Geographic Information System, Multi-Criteria Decision Analysis.

چکیده

حکمرانی آب شهری به‌طور فزاینده‌ای بر سیستم‌های تطبیقی و یکپارچه، در کنار اقدامات سازه‌ای متعارف، تکیه دارد. در این مقاله یک رویکرد نوآورانه و یکپارچه در تصمیم‌گیری مکانی برای ارتقای حکمرانی آب شهری پیشنهاد می‌شود. این مطالعه بر مشارکت همکارانه ذی‌نفعان در چارچوب تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی تأکید دارد. مدل پیشنهادی در این پژوهش، دو رویکرد تحلیل مکانی و مشارکت ذی‌نفعان را در قالب یک سیستم پشتیبان برنامه‌ریزی مکانی ادغام می‌کند. نتایج مطالعه موردی در شهر تهران، کاربرد عملی این روش را در حوزه حکمرانی آب شهری نشان می‌دهد. نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب، منطقه مورد مطالعه را به شش کلاس خطرپذیری متمایز طبقه‌بندی کرد. حدود ۶٪ از منطقه در دسته خطرپذیری بسیار بالا قرار گرفت که بیشتر در مناطق با شیب کم، تراکم بالا و زیرساخت زهکشی ناکافی واقع بودند. کلاس‌های دو و سه، که بیانگر خطرپذیری متوسط تا بالا هستند، حدود ۴۳٪ از منطقه را دربر گرفتند، درحالی‌که ۴۲٪ در دسته خطرپذیری پایین قرار داشتند. تحلیل مسیر با کمترین هزینه با در نظر گرفتن معیارهای کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی برای شناسایی مسیرهای مناسب جمع‌آوری رواناب شهری استفاده شد. یافته‌ها نشان داد ساماندهی فوری سیستم زهکشی در مناطق جنوب شرقی ضروری است و مسیرهای پیشنهادی، با اتکا به زیرساخت‌های موجود و توپوگرافی مناسب، ضمن کاهش هزینه‌های ساخت، می‌توانند به حداقل‌سازی پیامدهای اقتصادی و اجتماعی منفی احتمالی مانند جابه‌جایی ساکنان کمک کنند. در مجموع، مدل پیشنهادی چارچوبی تکرارپذیر برای تلفیق ملاحظات فنی، اجتماعی و نهادی در حکمرانی سیلاب شهری فراهم می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: حکمرانی آب، برنامه‌ریزی مشارکتی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره.

How to cite this article:

Radmehr, A. (2026). An Integrated Framework for Urban Flood Governance: A Participatory Spatial Decision-Making Approach. Journal of Water and Sustainable Development, 13(1), 33-52. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v13i1.2511-1469>

به سیلاب را به شدت کاهش دهد (Nick و همکاران، ۲۰۲۳). مطالعات مشارکتی در زامبیا و ایالات متحده نیز بر نقش روایت‌های اجتماعی، آگاهی عمومی، هماهنگی سیاستی و کاهش نابرابری‌ها در موفقیت اقدامات مدیریت سیلاب و زیرساخت‌های سبز تأکید دارند (O'Shea و همکاران، ۲۰۲۵؛ Sun و همکاران، ۲۰۲۴). علاوه بر این پژوهش‌ها نشان می‌دهند تغییرات کاربری اراضی، مقررات شهری و ظرفیت جمعی پاسخ‌گویی، تأثیر مستقیمی بر شدت سیلاب‌های شهری دارند (Winter و Karvonen، ۲۰۲۲) و ابزارهایی همچون بیمه سیلاب می‌توانند به عنوان سازوکار انتقال ریسک و بازیابی جوامع سیل‌زده ایفای نقش کنند (Minano و همکاران، ۲۰۲۴).

در کنار تحولات نهادی و مشارکتی، توسعه ابزارهای تحلیلی، نقش مهمی در پیشبرد مدیریت سیلاب شهری ایفا کرده است. مسائل پیچیده و چندبعدی مدیریت سیلاب بیشتر در قالب مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره تعریف می‌شوند تا امکان ارزیابی هم‌زمان معیارهای مختلف و تعارض‌آمیز فراهم شود. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ترکیب با تحلیل‌های مکانی در محیط سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی ظرفیت بالایی دارند و به‌طور گسترده‌ای در مدل‌سازی و پهنه‌بندی خطر سیلاب به کار رفته‌اند (Malczewski، ۱۹۹۹). در این راستا، پژوهش‌هایی با بهره‌گیری از چارچوب‌های مشارکتی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و اولویت‌بندی مکانی نشان دادند تلفیق تحلیل‌های فضایی و مشارکت ذی‌نفعان می‌تواند به کاهش حجم سیلاب و بهبود تخصیص منابع اقتصادی منجر شود (Qi و همکاران، ۲۰۲۴).

هم‌زمان، مطالعات اخیر بر نقش ابزارها و پلتفرم‌های داده‌محور در حکمرانی ریسک سیلاب تأکید کرده و تفاوت میان رویکردهای تنها فناورانه و رویکردهای اجتماعی-فناورانه را برجسته ساخته‌اند (Fadmastuti و همکاران، ۲۰۲۴). تجربه‌هایی مانند آزمایشگاه‌های مشارکتی در شهر لودی ایتالیا نشان دادند توسعه نقشه‌های ریسک متناسب با نیاز ذی‌نفعان و ارتقای سامانه‌های اطلاعاتی، عناصر کلیدی در بهبود ارتباط، مشارکت عمومی و اثربخشی تصمیم‌گیری در مدیریت سیلاب هستند (Minucci و همکاران، ۲۰۲۰).

با وجود این پیشرفت‌ها، مرور انتقادی ادبیات نشان می‌دهد در بسیاری از مطالعات، مشارکت ذی‌نفعان همچنان به‌صورت محدود یا نمادین در فرآیند تصمیم‌سازی لحاظ شده و چارچوب‌های عملیاتی و ابزارمحوری که بتوانند تحلیل‌های مکانی، ترجیحات ذی‌نفعان و نیازهای برنامه‌ریزی شهری را به‌صورت یکپارچه پشتیبانی کنند، کمتر توسعه یافته‌اند. این امر شکاف قابل توجهی میان نتایج مدل‌سازی‌های فنی و قابلیت اجرای سیاست‌ها در عمل ایجاد کرده است.

بر این اساس، خلأ اصلی در ادبیات موجود را می‌توان عدم وجود یک چارچوب مکانی یکپارچه و مشارکتی دانست که به‌طور هم‌زمان تحلیل خطرپذیری سیلاب و تصمیم‌گیری

سیلاب‌های شهری به‌عنوان یکی از مهمترین مخاطرات طبیعی، به‌طور فزاینده‌ای زیرساخت‌های شهری، ایمنی شهروندان و پایداری نظام‌های اجتماعی-اقتصادی را با چالش مواجه کرده‌اند. رشد شتابان شهرنشینی، افزایش سطوح نفوذناپذیر، توسعه در دشت‌های سیلابی، تغییرات اقلیمی و ناکارآمدی زیرساخت‌های زهکشی، موجب تشدید فراوانی و شدت سیلاب‌های شهری شده است. در واکنش به این شرایط، اتکال صرف بر رویکردهای فنی و سازه‌ای به‌تدریج کارایی خود را از دست داده و نیاز به گذار به سمت الگوهای حکمرانی تطبیقی، یکپارچه و تاب‌آور در مدیریت سیلاب‌های شهری به‌عنوان ضرورتی انکارناپذیر مطرح شده است.

در ادبیات حکمرانی سیلاب، رویکردهای نوین بر تلفیق ابعاد مهندسی، نهادی، سیاستی و اجتماعی تأکید دارند و مدیریت ریسک سیلاب به‌عنوان فرآیندی چندسطحی و ذی‌نفع‌محور تلقی می‌شود. مطالعات مختلف نشان دادند ضعف حکمرانی، ناهماهنگی نهادی، زیرساخت ناکافی و اثرات تغییر اقلیم از عوامل کلیدی تشدید سیلاب‌های شهری هستند و بر ضرورت گسترش زیرساخت‌ها، سیاست‌های تاب‌آور اقلیمی و حکمرانی مشارکتی تأکید شده است (Kaiser و همکاران، ۲۰۲۵).

تجربه‌های سیاستی مانند طرح بیمه مجدد سیلاب در بریتانیا نیز نشان می‌دهند گذار به قیمت‌گذاری مبتنی بر ریسک و افزایش مشارکت ذی‌نفعان نقش مهمی در مواجهه با عدم قطعیت‌های اقلیمی ایفا می‌کند (Curtis و Hampton، ۲۰۲۲). افزون بر این، پژوهش‌هایی که از ابزارهایی همچون بازی‌های جدی استفاده کردند، نشان دادند الگوهای مختلف حکمرانی چگونه می‌توانند تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت را تحت تأثیر قرار دهند و به سازماندهی مؤثرتر حکمرانی محلی کمک کنند (Latham و همکاران، ۲۰۲۴).

در این چارچوب، مشارکت ذی‌نفعان به‌عنوان یکی از ارکان اصلی مدیریت ریسک سیلاب مورد توجه روزافزون قرار گرفته است. مطالعات انجام شده در زمینه قراردادهای هیدرو-اجتماعی، ظرفیت‌های رسمی و غیررسمی مشارکت اجتماعی را در مدیریت سیلاب آشکار ساخته‌اند (Arik و همکاران، ۲۰۲۳).

پژوهش‌های انجام شده در کشورهای مختلف نشان می‌دهند ارتقای حکمرانی مؤثر در مدیریت ریسک از مسیر آموزش، سیاست‌گذاری، قوانین و سازوکارهای مشارکتی و تقویت ظرفیت‌های محلی امکان‌پذیر است (Lukman و همکاران، ۲۰۲۳). همچنین، نقش ادغام دانش بومی، بهبود جریان اطلاعات و گذار از رویکردهای واکنشی به پیش‌نگرانه در افزایش تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب مورد تأکید قرار گرفته است (McNaught و همکاران، ۲۰۲۴). در مقابل، ارزیابی‌های پس از بحران در کشورهایمانند آلمان نشان دادند ناهماهنگی نهادی و ضعف آمادگی می‌تواند اثربخشی پاسخ

عملیاتی در حوزه مدیریت رواناب شهری را پوشش دهد. در پاسخ به این خلد هدف پژوهش حاضر، توسعه و پیاده‌سازی یک چارچوب تصمیم‌گیری مکانی مشارکتی برای پشتیبانی از حکمرانی آب شهری است. در این راستا، پژوهش با تلفیق تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره، مشارکت ساختاریافته ذی‌نفعان و ابزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی، یک جعبه‌ابزار تصمیم‌یار مکانی ارائه می‌دهد که قادر است هم به پهنه‌بندی خطر سیلاب و هم به شناسایی مسیرهای بهینه جمع‌آوری رواناب شهری کمک کند. مطالعه موردی شهر تهران به‌منظور ارزیابی کارایی و قابلیت کاربرد عملی چارچوب پیشنهادی استفاده شد.

روش‌شناسی پژوهش

در این پژوهش، چارچوبی برای ارزیابی خطرپذیری سیلاب و شناسایی مسیرهای بهینه جمع‌آوری رواناب شهری ارائه شده است. در شکل (۱) فرایند انجام پژوهش ارائه شده است. در گام نخست، نقشه خطرپذیری با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی و جعبه‌ابزار اختصاصی توسعه یافته در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تولید شد. این مدل با ادغام شاخص‌های مکانی نظیر کاربری اراضی، شیب و تراکم شبکه زهکشی، برآوردی نظام‌مند از سطح خطر ارائه می‌کند. در گام بعدی، صحت‌سنجی مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی با ایجاد قابلیت مدل‌سازی مکانی شبکه عصبی مصنوعی انجام گرفته و در ادامه، مسیرهای انتقال رواناب با روش مسیر کمترین هزینه و بر پایه ویژگی‌های توپوگرافی و زیرساختی تعیین شدند. جعبه‌ابزار طراحی شده به‌عنوان سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری عمل کرده و فرایند ورود داده، اجرای تحلیل و تفسیر نتایج را تسهیل می‌کند. هدف اصلی، کاهش شکاف میان سیاست‌گذاری و اجرا از طریق ارائه سامانه‌ای کاربردی برای تصمیم‌گیری هوشمند در مدیریت آب شهری است.

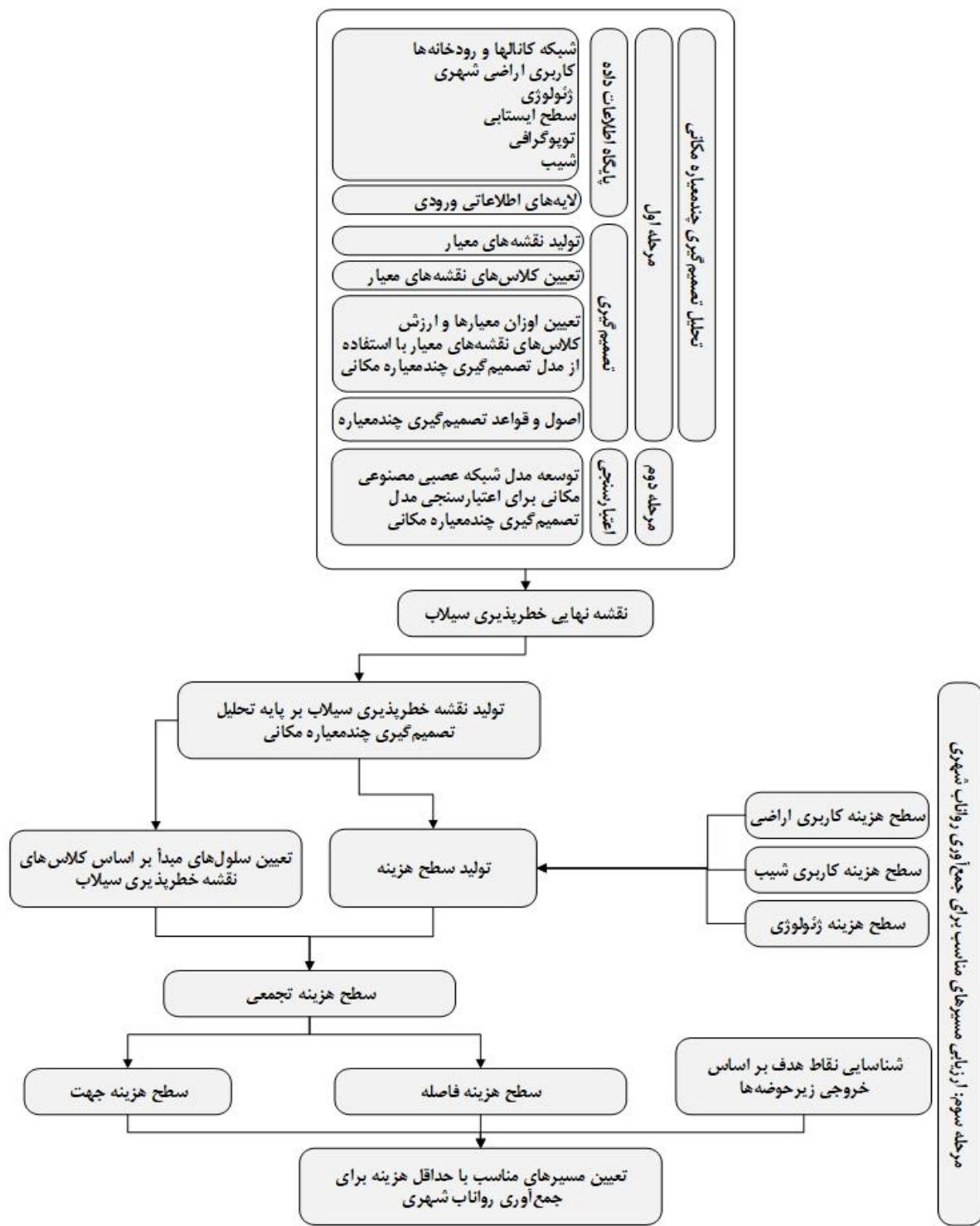
- چارچوب مشارکتی و مشارکت ذی‌نفعان

به‌منظور تضمین شفافیت روش‌شناختی، روایی تصمیمات و مشروعیت نهادی فرایند تصمیم‌گیری، در این پژوهش یک چارچوب مشارکتی ساختاریافته برای درگیرسازی فعال ذی‌نفعان در تصمیم‌گیری مکانی مدیریت سیلاب شهری طراحی و اجرا شد. این چارچوب بر اصول حکمرانی مشارکتی، تولید مشترک دانش و رویکردهای نوین مدیریت سیلاب شهری استوار بوده و به‌گونه‌ای تدوین شده است که قابلیت تکرار و انطباق با سایر بافت‌های شهری را داشته باشد. ذی‌نفعان کلیدی بر اساس نقش نهادی، میزان تأثیرگذاری در مدیریت سیلاب شهری و سطح تخصص شناسایی شدند. ترکیب مشارکت‌کنندگان شامل کارشناسان فنی مدیریت سیلاب و زهکشی شهری، برنامه‌ریزان شهری، متخصصان سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و نمایندگانی از نهادهای

مسئول در حوزه مدیریت آب‌های سطحی شهری بود. این تنوع نهادی و تخصصی با هدف بازتاب دیدگاه‌های فنی، مدیریتی و اجرایی در فرایند تصمیم‌گیری مکانی شکل گرفت. فرایند مشارکت ذی‌نفعان به‌صورت چندمرحله‌ای و با تکیه بر مصاحبه‌های نیمه‌ساختاریافته و جلسات گفت‌وگو محور اجرا شد. در مرحله نخست، جلسات تعاملی برای معرفی اهداف پژوهش، تبیین مسئله سیلاب شهری و تشریح ماهیت خطرپذیری سیلاب برگزار شد. در این مرحله، تمرکز بر ایجاد درک مشترک از عوامل مکانی مؤثر بر سیلاب و استخراج معیارهای اصلی و زیرمعیارهای ارزیابی خطرپذیری بود. معیارها به‌صورت مشارکتی و با اتکا به دانش کارشناسی، تجربه محلی و اولویت‌های سیاستی ذی‌نفعان شناسایی شدند تا از هم‌راستایی آن‌ها با واقعیت‌های اجرایی اطمینان حاصل شود.

در مرحله دوم، به‌منظور کمی‌سازی ترجیحات ذی‌نفعان، روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به‌کار گرفته شد. ذی‌نفعان از طریق مقایسه‌های زوجی، اهمیت نسبی معیارها را تعیین کردند. در مواردی که اختلاف نظر میان مشارکت‌کنندگان مشاهده شد، فرایند تسهیل‌گری با رویکرد گفت‌وگوی ساختاریافته انجام گرفت تا رسیدن به اجماع جمعی امکان‌پذیر شود. وزن‌های نهایی معیارها، حاصل فرایند قضاوت‌های جمعی بوده و از غلبه دیدگاه فردی جلوگیری شد. در طول تمامی مراحل، از یک جعبه‌ابزار تصمیم‌یار مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی که به‌صورت سفارشی توسعه یافته است، به‌عنوان واسطه مشارکتی استفاده شد. این جعبه‌ابزار امکان نمایش برخط نقشه‌های خطرپذیری سیلاب، تحلیل سناریوهای مختلف ناشی از تغییر وزن معیارها و دریافت بازخورد فوری از مشارکت‌کنندگان را فراهم ساخت. به‌این‌ترتیب ذی‌نفعان قادر بودند تأثیر مستقیم ترجیحات خود را بر نتایج مکانی مشاهده کرده و در فرایند اصلاح و بهبود تصمیمات، مشارکت فعال داشته باشند. این سازوکار، شفافیت، قابلیت ردیابی تصمیمات و بازتولیدپذیری فرایند تحلیلی را به‌طور قابل توجهی افزایش داد.

چارچوب مشارکتی پیشنهادی نه‌تنها موجب ارتقای کیفیت فنی و واقع‌گرایی مدل مکانی شد، بلکه مشروعیت نهادی، قابلیت اجرا و پذیرش نتایج در سطوح مدیریتی و اجرایی را نیز تقویت کرد. ادغام نظام‌مند نظرات ذی‌نفعان در مراحل کلیدی انتخاب و وزن‌دهی معیارها، به افزایش حس مالکیت جمعی، اعتماد به نتایج و آمادگی نهادی برای بهره‌برداری از خروجی‌های مدل انجامید. در مجموع، این رویکرد مشارکتی یکی از نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر محسوب می‌شود و نمونه‌ای کاربردی از عملیاتی‌سازی تولید مشترک دانش در حکمرانی آب شهری ارائه می‌دهد. چارچوب پیشنهادی، پلی میان مدل‌سازی علمی و واقعیت‌های سیاست‌گذاری و اجرا ایجاد کرده و نیاز روزافزون به ابزارهای تصمیم‌یار مشارکتی در مدیریت سیلاب شهری را پاسخ می‌دهد.



شکل ۱- فرایند انجام پژوهش

تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی و تهیه نقشه خطرپذیری سیلاب

مراحل انجام این بخش از تحقیق به‌منظور تهیه نقشه خطرپذیری سیلاب به شرح زیر است:

- جمع‌آوری اطلاعات و انجام تحلیل‌های لازم بر روی آن‌ها.
- تعیین معیارهای مناسب برای فرآیند تصمیم‌گیری.
- استانداردسازی نقشه‌های معیار در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی.
- به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای تعیین وزن نسبی هر یک از معیارها.
- استفاده از روش ترکیب خطی وزنی جهت تولید نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب و شناسایی نواحی مستعد وقوع سیلاب.

- معیارهای ارزیابی

در این پژوهش، معیارهای ارزیابی نقشه خطرپذیری سیلاب به سه گروه اصلی تقسیم شده‌اند: آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی. معیار آسیب‌پذیری شامل زیرمعیارهای کاربری اراضی شهری، فاصله از کانال‌ها و زهکش‌های شهری و تراکم شبکه زهکش‌ها است؛ معیار هیدرولیکی دو زیرمعیار ارتفاع و شیب زمین را دربر می‌گیرد؛ و معیار اثرات محیطی به دو عامل زمین‌شناسی و سطح آب زیرزمینی محدود می‌شود. در مطالعات مشابه، معیارهای حفاظت آب و خاک به‌عنوان عوامل کلیدی و مدیریت سیلاب به‌عنوان زیرمعیار آن، با متغیرهای شیب، بارش سالانه، عمق خاک، زمین‌شناسی و توپوگرافی بررسی شده‌اند (Phua و Minowa, ۲۰۰۵). در این پژوهش، معیارهای انتخابی بر اساس مطالعات پیشین، کیفیت و دسترس‌پذیری داده‌ها تعیین شده‌اند و تمرکز اصلی بر ارزیابی میزان آسیب‌پذیری منطقه در برابر سیلاب است. داده‌های دقیق‌تر مانند ویژگی‌های خاک می‌تواند دقت مدل را افزایش دهد. تمامی داده‌ها برای تحلیل مکانی به فرمت رستری تبدیل شدند و زیرمعیارها بر اساس میزان اثرگذاری بر خطرپذیری نهایی، به طبقات مختلف تفکیک شدند؛ به‌طوری‌که کلاس‌های با اعداد پایین‌تر نمایانگر تأثیر بیشتر بر سیل‌خیزی هستند. براساس این دسته‌بندی، کاربری اراضی شهری در پنج کلاس (خیابان، تجاری، صنعتی، مسکونی، فضای باز)، فاصله از کانال‌ها در هفت کلاس، تراکم زهکشی در شش کلاس، و شیب و ارتفاع هر یک در نه کلاس تقسیم شدند. زمین‌شناسی در پنج کلاس و سطح آب زیرزمینی در شش کلاس لحاظ شد. لازم به ذکر است برای طبقه‌بندی معیار کاربری اراضی شهری، طبقه‌بندی مشابهی نیز توسط سایر پژوهشگران انجام شده است (Lutz و Fernández, ۲۰۱۰). همچنین، طبقه‌بندی‌های مربوط به معیارهای فاصله از کانال‌ها و زهکش‌ها، شیب و ارتفاع نیز با توجه به گستره

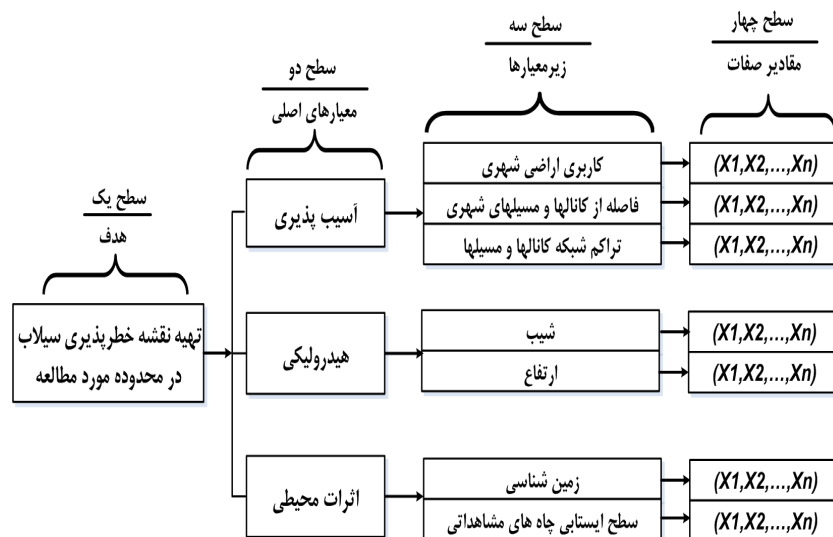
محدوده مورد مطالعه انجام شد. به‌عنوان مثال در مورد معیار شیب، از آنجایی‌که حدود ۹۰ درصد از محدوده مورد مطالعه شیب کمتر از ۱۰ درصد دارد، اکثر طبقات مربوط به شیب نیز در همین محدوده تعریف شده‌اند. در ارتباط با ساختار زمین‌شناسی شهر تهران، ساختار منطقه به چهار بخش اصلی تقسیم شد: سازند آبرفتی هزاردره (آبرفت‌های A)، سازند آبرفتی ناهمگن شمال تهران (آبرفت‌های Bn) و سیلت‌های رسی کهریزک (آبرفت‌های Bs) (منظور از حروف n و s به ترتیب شمال و جنوب تهران است)، سازند آبرفتی تهران (آبرفت‌های C) و آبرفت‌های کنونی (آبرفت‌های D). به‌این‌ترتیب طبقات زمین‌شناسی شامل ساختارهای A, Bn, C, D1, D2, R, Bs و Bn بوده و کلاسه‌بندی لایه زمین‌شناسی براساس میزان نفوذپذیری هر یک از آنها صورت گرفته است.

- فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از مؤثرترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری در حوزه‌های مختلف به شمار می‌رود (Saaty, ۱۹۹۶). این روش بر پایه مقایسه‌های زوجی بنا شده است و به مدیران و تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد تا سناریوهای مختلف را به‌صورت نظام‌مند ارزیابی نمایند. مدل‌سازی با این روش شامل مراحل ساختاردهی سلسله‌مراتبی مسئله، تعریف ماتریس‌های مقایسه زوجی، محاسبه وزن‌های معیارها و گزینه‌ها و بررسی میزان سازگاری سیستم، می‌باشد. مقادیر عددی ترجیحات در مقایسه‌های زوجی بر اساس پیشنهاد ساعتی در جدول (۱) ارائه شده است (Saaty, ۱۹۹۶). شکل (۲) ساختار سلسله‌مراتبی مرتبط با مدیریت سیلاب شهری را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، سطح اول مربوط به هدف، سطح دوم شامل معیارهای اصلی، سطح سوم دربرگیرنده زیرمعیارها و سطح چهارم شامل کلاس‌های مربوط به هر زیرمعیار می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر عددی ارجحیت‌ها در مقایسات زوجی

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مرجح یا کاملاً مهم‌تر یا کاملاً مطلوب‌تر
۷	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت خیلی قوی
۵	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت قوی
۳	کمی مرجح یا کمی مهم‌تر یا کمی مطلوب‌تر
۱	ترجیح یا اهمیت یا مطلوبیت یکسان
۸, ۶, ۴, ۲	ترجیحات بین فواصل فوق



شکل ۲- سلسله مراتبی مدیریت سیلاب شهری

شبکه عصبی توسعه یافته در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شدند.

شبکه عصبی به گونه ای آموزش داده شد که کلاس های خطرپذیری سیلاب را بر اساس نقشه های معیار وزندهی شده پیش بینی کند. همگرایی نتایج پیش بینی شده توسط شبکه عصبی با طبقات خطر استخراج شده از مدل تصمیم گیری چندمعیاره مکانی، پایداری مدل را تأیید کرده و سوگیری های طبقه بندی را به حداقل رساند. به منظور جلوگیری از بیش برآزش و افزایش سرعت محاسبات در ماتریس مکانی بزرگ (۹۶۲ × ۱۱۲۵ سلول) معادل با کل محدوده مورد مطالعه، کاهش ابعاد داده ها با استفاده از تحلیل خوشه ای (روش نزدیک ترین همسایه) انجام شد.

این یکپارچگی ترکیبی میان تصمیم گیری چندمعیاره مکانی و اعتبارسنجی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، با تلفیق وزندهی مبتنی بر دانش خبرگان و یادگیری داده محور، موجب افزایش اطمینان پذیری و استحکام چارچوب حکمرانی مکانی سیلاب می شود.

- ارزیابی مسیرهای مناسب برای جمع آوری رواناب شهری

پس از تهیه نقشه خطرپذیری سیلاب برای محدوده مورد مطالعه، مرحله بعد شامل شناسایی مسیرهای بهینه برای جمع آوری رواناب شهری است. این مرحله با تعیین نقاط سیل خیز بر اساس کلاس های خطرپذیری استخراج شده و طراحی مسیرهای انتقال رواناب بر پایه معیارهای تصمیم گیری چندمعیاره انجام می شود. مسیرهای نهایی مسیرهایی هستند که از نظر مسافت و زمان حداقل هزینه را دارند. ابتدا سلول هایی با خطرپذیری بالا شناسایی شده و سپس با تعریف سطح هزینه تناسب بر اساس معیارهایی چون کاربری اراضی، شیب و زمین شناسی، مسیرهای کم هزینه پیشنهاد می شوند. در مدل شبیه سازی مسیر با کمترین هزینه مبتنی بر نظریه گراف، تحلیل های رستری برای تعیین بهینه ترین

- توسعه جعبه ابزار و یکپارچه سازی با سامانه اطلاعات جغرافیایی

در این پژوهش، جعبه ابزاری سفارشی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی توسعه داده شد تا فرآیند تصمیم گیری مکانی به صورت یکپارچه و هدفمند انجام گیرد. این جعبه ابزار شامل سه ماژول اصلی است:

۱. پیش پردازش داده ها (تبدیل داده های برداری به رستری و هم ترازای لایه ها)،

۲. وزندهی معیارها بر اساس نتایج روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و اعمال آن ها بر روی نقشه های معیار استاندارد،

۳. هم پوشانی نقشه ها و کلاسه بندی خطرپذیری سیلاب با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی برای تولید نقشه نهایی خطرپذیری.

این جعبه ابزار به صورت افزونه در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی پیاده سازی شده و امکان اجرای کامل مدل تصمیم گیری به شکل فرمان داخلی را فراهم می کند. فرآیند اجرایی شامل خواندن لایه های برداری، تبدیل آن ها به داده های رستری، تشکیل ساختار سلسله مراتبی، محاسبه وزن ها با مقایسه زوجی، و در پایان تولید نقشه خطرپذیری است. نقشه خروجی با تخصیص وزن های نهایی به متغیرهای رستری و کلاسه بندی مکانی تولید شده و جعبه ابزار از طریق واسط کاربری ساده و قابل فهم، قابلیت استفاده در سایر بافت های شهری و تسهیل تصمیم گیری مشارکتی را دارد.

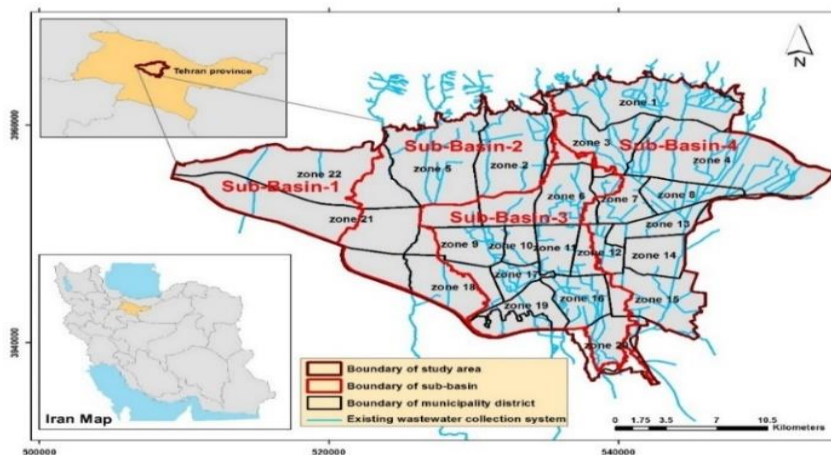
- ارزیابی مدل با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی

باتوجه به عدم دسترسی به نقشه های ثبت شده رخدادهای واقعی سیلاب، از یک روش اعتبارسنجی مکانی مبتنی بر شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) برای ارزیابی سازگاری درونی نتایج حاصل از مدل تصمیم گیری چندمعیاره مکانی استفاده شد. در این راستا، لایه های رستری شده نمایانگر معیارهای تصمیم گیری به عنوان داده های آموزشی برای مدل

مسیر بین سلول‌های مبدأ و مقصد با کمترین هزینه استفاده می‌شود. این فرآیند چهار گام دارد: ۱) انتخاب سلول‌های مبدأ و مقصد؛ ۲) تولید سطح هزینه متناسب با اعمال وزن‌ها از طریق فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و ترکیب خطی وزنی؛ ۳) محاسبه سطح هزینه تجمعی حداقل که نقشه فاصله وزنی میان سلول‌ها را تولید می‌کند و ۴) تعیین مسیرهای مناسب جمع‌آوری رواناب شهری بر پایه نقشه هزینه تجمعی، به‌گونه‌ای که مکان‌های منتخب به نزدیک‌ترین سلول‌های مبدأ با کمترین زمان و هزینه متصل شوند. نتیجه این مدل، شناسایی مسیرهای بهینه و اقتصادی برای هدایت رواناب شهری است که هم‌راستا با معیارهای فنی و هیدرولوژیکی طراحی شده‌اند.

- محدوده مورد مطالعه

در این تحقیق حوضه شهری تهران به عنوان محدوده مورد مطالعه در نظر گرفته شده است (شکل ۳). محدوده مطالعاتی حوضه آبریز تهران از شمال توسط دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز، از جنوب به دشت ورامین و ارتفاعات کهریزک، از شرق به حوضه آبریز رودخانه سرخه حصار و کوه‌های بی‌بی شهربانو و از غرب به حوضه رودخانه کن محدود می‌شود. به‌طور کلی شبکه آب‌های سطحی محدوده تهران بزرگ از سه سیستم زیر تشکیل شده است. ۱- آبراهه‌ها و مسیل‌های منتهی به جنوب شرق تهران، ۲- آبراهه‌ها و مسیل‌های منتهی به جنوب غرب تهران، ۳- انهار و کانال‌های محدوده مرکزی و جنوب تهران بزرگ.



شکل ۳- محدوده مطالعاتی شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی تهران

- نقشه خطرپذیری سیلاب

برای تهیه نقشه‌های معیار و نقشه خطرپذیری سیلاب، از یک جعبه‌ابزار توسعه یافته در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. مدل تهیه شده شامل تمامی داده‌ها، متغیرهای ورودی، پردازش‌های لازم بر روی این متغیرها و روش انتخاب شده تصمیم‌گیری چندمعیاره (فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی) می‌باشد. این مدل، معیارهای اصلی مانند آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی، زیرمعیارهای آن‌ها و وزن‌دهی آن‌ها را در بر می‌گیرد. شایان ذکر است این جعبه‌ابزار توسعه یافته، در قالب یک برنامه الحاقی در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی قابل پیاده‌سازی است و بر پایه یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی) طراحی شده است. مراحل اجرای این برنامه به شرح زیر می‌باشد: در ابتدا، لایه‌های برداری ورودی توسط برنامه خوانده می‌شوند. پس از پردازش‌های لازم، به فرمت اطلاعات رستری تبدیل می‌شوند. در گام بعد، ساختار سلسله‌مراتبی مطابق با هدف مسئله طراحی می‌شود. پس از آن، وزن‌های معیارهای تصمیم‌گیری بر اساس ماتریس مقایسه زوجی محاسبه می‌شود. در نهایت، در آخرین مرحله، نقشه خروجی پس از

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج مرتبط با میزان خطرپذیری سیلاب در محدوده مورد مطالعه و تحلیل مسیر با کمترین هزینه برای جمع‌آوری رواناب شهری ارائه شده است.

- محاسبه وزن‌های معیارهای تصمیم‌گیری

وزن معیارهای تصمیم‌گیری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و پس از تعیین ساختار سلسله‌مراتبی تحقیق محاسبه شد. برای این منظور، مقادیر ماتریس مقایسه زوجی با استفاده از مقیاس ساعتی (جدول ۱) تعیین شد. نتایج محاسبات ماتریس مقایسه زوجی در جدول (۳) ارائه شده است. نسبت ناسازگاری^۱ نیز برای ماتریس‌های مقایسه زوجی محاسبه شد که نشان‌دهنده میزان سازگاری نتایج است. در صورتی که مقدار نهایی نسبت ناسازگاری کمتر از مقدار آستانه (۰/۱) باشد، نیازی به بازنگری در قضاوت‌ها نیست و وزن‌های محاسبه شده به ورودی‌ها (یعنی نقشه‌های کلاسه‌بندی شده) اعمال می‌شود (Saaty, ۱۹۹۶).

کلاسه‌بندی تولید می‌شود. مشخصات داده‌های استفاده شده در این مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است. با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی و اعمال وزن‌های نهایی استخراج شده از جدول (۳) به متغیرهای ورودی (که به لایه‌های رستری تبدیل شده‌اند)، نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب تهیه می‌شود.

داده‌های اولیه مورد استفاده در این پژوهش، از شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌عنوان مرجع رسمی کشور در حوزه منابع آب و داده‌های هیدرولوژیکی تهیه شده‌اند. با وجود اعتبار نهادهای این منبع، لازم است به برخی محدودیت‌ها و عدم قطعیت‌های ذاتی داده‌های مورد استفاده اشاره شود. نخست، داده‌های مکانی مانند نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی و زمین‌شناسی که در قالب فایل‌های برداری دریافت شده‌اند، پس از رقومی‌سازی و تبدیل به فرمت رستری، ممکن است تحت تأثیر خطاهای ناشی از مقیاس نقشه، دقت برداشت اولیه و فرآیند تبدیل فرمت قرار گیرند. دوم، داده‌های مربوط به سطح ایستابی آب زیرزمینی که مبتنی بر اطلاعات

چاه‌های مشاهداتی هستند، دارای عدم قطعیت مکانی و زمانی بوده و به دلیل پراکنش نامتوازن چاه‌ها، لزوماً تمامی تغییرات محلی سطح آب زیرزمینی را به‌صورت دقیق بازنمایی نمی‌کنند. علاوه بر این، یکسان‌سازی تفکیک مکانی لایه‌ها (ابعاد سلول ۳۰ متر) و استانداردسازی متغیرها در فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند منجر به ساده‌سازی برخی ناهمگنی‌های مکانی شود. با این حال، استفاده از چندین معیار مستقل، وزن‌دهی مبتنی بر اجماع ذی‌نفعان و تحلیل حساسیت غیرمستقیم از طریق مقایسه سناریوهای وزن‌دهی، تا حدی اثر عدم قطعیت داده‌ها بر نتایج نهایی را کاهش می‌دهد. در مجموع، اگرچه عدم قطعیت داده‌ها می‌تواند بر دقت مطلق نقشه خطرپذیری تأثیرگذار باشد، نتایج این پژوهش با هدف شناسایی الگوهای نسبی خطر و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مقدماتی در مقیاس شهری تفسیر می‌شوند. توسعه مدل با داده‌های دقیق‌تر، به‌ویژه اطلاعات بارش-رواناب با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا، در پژوهش‌های آینده می‌تواند به بهبود دقت و قابلیت اطمینان نتایج منجر شود.

جدول ۲- داده‌های مورد استفاده در پژوهش

داده های مورد استفاده	محل اخذ داده‌ها	فرمت اطلاعات دریافتی*
نقشه توپوگرافی		.dwg
نقشه کاربری اراضی		.dwg
نقشه زمین شناسی	وزارت نیرو - شرکت مدیریت منابع آب ایران	.dwg
سطح ایستابی چاه‌های مشاهداتی		.xls

* لازم به ذکر است که اطلاعات دریافتی به فرمت .dwg. بعد از رقومی‌سازی به فرمت شیپ فایل جهت تولید لایه‌های اطلاعاتی تبدیل شدند.

باتوجه به رابطه (۱) میزان تناسب برای هر محدوده محاسبه می‌شود:

$$F_i = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij} \quad (1)$$

F_i : شاخص مرتبط با میزان سیل‌خیزی محدوده i ، W_j : وزن نسبی معیار j ($\sum W_j = 1$)، X_{ij} : مقادیر استاندارد شده محدوده i تحت معیار j و n نیز تعداد کل معیارها می‌باشد. لازم به ذکر است در تمام مراحل، ابعاد سلول رسترهای خروجی برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. به منظور تهیه نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب، معیارهای اصلی آسیب‌پذیری^۲، هیدرولیکی^۳ و اثرات محیطی^۴ با استفاده از روابط (۲، ۳ و ۴) تولید می‌شوند. در این روابط، نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی، با اعمال وزن زیرمعیارهای مربوطه تولید شدند. نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب نیز باتوجه به رابطه (۵) تولید می‌شود.

$$\begin{aligned} Vulnerability_Map &= Map_Landuse \times 0.571 \\ &+ Map_Distance_Channel \times 0.286 \\ &+ Map_Density_Channel \times 0.143 \end{aligned} \quad (2)$$

$Vulnerability_Map$: نقشه معیار آسیب‌پذیری
 $Map_Landuse$: نقشه معیار کاربری اراضی شهری
 $Map_Distance_Channel$: نقشه معیار فاصله از کانال‌ها و مسیل‌های شهری
 $Map_Density_Channel$: نقشه معیار تراکم شبکه کانال‌ها و مسیل‌های شهری
 $Hydraulic_Map = Map_Dem \times 0.5 + Map_Slope \times 0.5$ (۳)
 $Hydraulic_Map$: نقشه معیار هیدرولیکی
 Map_Dem : نقشه معیار ارتفاعی
 Map_Slope : نقشه معیار شیب
 $Environmental_Impact_Map = Map_Geology \times 0.643 + Map_Water_Table \times 0.357$ (۴)
 $Environmental_Impact_Map$: نقشه معیار اثرات محیطی
 $Map_Geology$: نقشه معیار زمین‌شناسی
 Map_Water_Table : نقشه معیار سطح آب زیرزمینی

$$F = [V \times (\sum_i (W_{V1} \times W_{Vi1}) + \sum_i (W_{V2} \times W_{Vi2}) + \sum_i (W_{V3} \times W_{Vi3}))] + [H \times (\sum_i (W_{H1} \times W_{Hi1}) + \sum_i (W_{H2} \times W_{Hi2}))] + [EI \times (\sum_i (W_{EI1} \times W_{Ei1}) + \sum_i (W_{EI2} \times W_{Ei2}))] \quad (5)$$

در رابطه (۵)، F شاخص مربوط به نقشه خروجی (نقشه خطرپذیری سیلاب) می‌باشد. همچنین V معیار اصلی آسیب‌پذیری، W_{V1} ، W_{V2} و W_{V3} به ترتیب وزن مربوط به زیرمعیارهای کاربری اراضی، فاصله از کانال‌ها و زهکش‌ها و تراکم شبکه کانال‌ها می‌باشند. W_{V1} ، W_{V2} و W_{V3} نیز وزن مربوط به کلاس‌های هر یک از زیرمعیارهای آسیب‌پذیری می‌باشد. شاخص H ، معیار اصلی هیدرولیکی، W_{H1} و W_{H2} به ترتیب وزن مربوط به زیرمعیارهای ارتفاع و شیب، W_{H1} و W_{H2} نیز وزن مربوط به کلاس‌های هر یک از زیرمعیارهای هیدرولیکی می‌باشند. شاخص EI نیز بیان‌گر معیار اصلی اثرات محیطی، W_{EI1} و W_{EI2} به ترتیب وزن مربوط به زیرمعیارهای ژئولوژی و سطح آب زیرزمینی، W_{EI1} و W_{EI2} نیز وزن مربوط به کلاس‌های هر یک از زیرمعیارهای اثرات محیطی می‌باشند. نقشه‌های معیار آسیب‌پذیری، هیدرولیکی و اثرات محیطی و همچنین نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب با توجه به تحلیل‌های چندمعیاره در شکل (۴) نشان داده شده است.

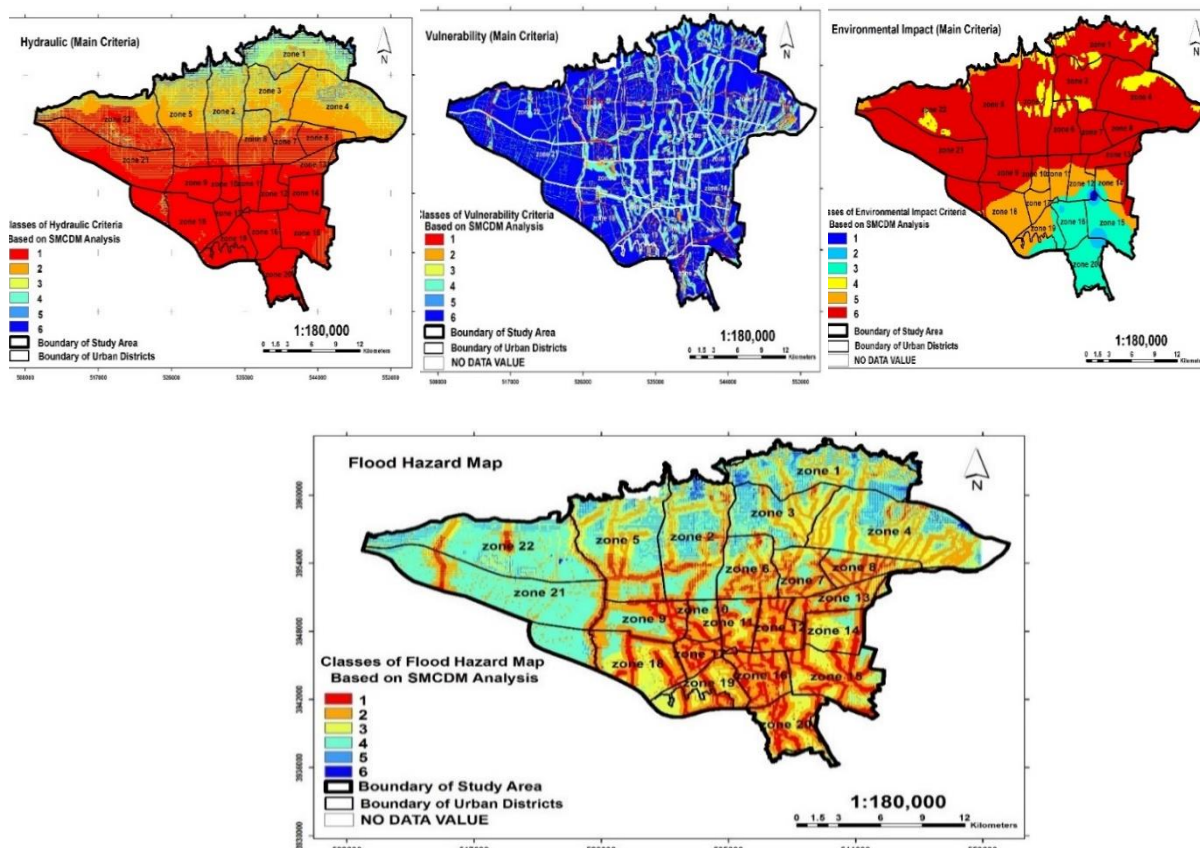
نتایج فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی نشان می‌دهد معیار «اثرات محیطی» با وزن نهایی ۰/۰۷۸ نسبت به معیارهای «آسیب‌پذیری» (۰/۶۳۵) و «هیدرولیکی» (۰/۲۸۷) اهمیت کمتری در ارزیابی خطرپذیری سیلاب شهری کسب کرده است. این توزیع وزن‌ها مبتنی بر ترکیبی از ملاحظات فیزیکی سیلاب شهری، ویژگی‌های مکانی محدوده مورد مطالعه و قضاوت‌های خبرگان در چارچوب تصمیم‌گیری مشارکتی است. از منظر فیزیک سیلاب شهری، وقوع سیلاب در محیط‌های شهری بیشتر تحت تأثیر عوامل سطحی و انسان‌ساخت نظیر نوع کاربری اراضی، میزان نفوذناپذیری سطوح، تراکم و کارایی شبکه زهکشی و فاصله از کانال‌ها و مسیل‌ها قرار دارد. این عوامل مستقیماً بر تولید رواناب، تمرکز جریان و سرعت انتقال آن تأثیرگذار بوده و در مقیاس شهری، نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به ویژگی‌های زمین‌شناسی و تراز آب زیرزمینی ایفا می‌کنند. از منظر مکانی، محدوده مورد مطالعه (حوضه شهری تهران) از لحاظ زمین‌شناسی در بخش‌های وسیعی، ساختارهای نسبتاً همگن آبرفتی دارد و تغییرات شدید زمین‌شناسی به‌صورت پهنه‌های گسترده مشاهده نمی‌شود. به‌طور مشابه، داده‌های سطح ایستابی آب زیرزمینی بیشتر بر پایه چاه‌های مشاهداتی پراکنده بوده و تغییرات آن بیشتر در مقیاس محلی قابل مشاهده است تا در مقیاس حوضه‌ای شهری. در نتیجه، اثر این دو زیرمعیار بر

تمایز مکانی پهنه‌های سیل‌خیز نسبت به معیارهای آسیب‌پذیری و هیدرولیکی محدودتر ارزیابی شده است. از منظر روش‌شناختی، وزن معیارها حاصل فرآیند مشارکتی مبتنی بر اجماع ذی‌نفعان و خبرگان حوزه مدیریت سیلاب شهری بوده است. نتایج مقایسه‌های زوجی نشان داد مشارکت‌کنندگان، معیارهای آسیب‌پذیری و هیدرولیکی را به‌عنوان عوامل اولویت‌دار در مدیریت عملیاتی سیلاب شهری در تهران در نظر گرفته‌اند، درحالی‌که اثرات محیطی بیشتر به‌عنوان عامل پشتیبان و اصلاح‌کننده الگوهای خطرپذیری تلقی شده است.

شایان ذکر است نسبت ناسازگاری (IR) تمامی ماتریس‌ها کمتر از حد آستانه (۰/۱) بوده و از سازگاری قضاوت‌ها اطمینان حاصل شده است. بنابراین، وزن کمتر معیار «اثرات محیطی» نه به‌معنای بی‌اهمیتی آن، بلکه بازتابی از نقش نسبی این عامل در مقایسه با متغیرهای غالب سیلاب شهری در مقیاس مورد مطالعه است. درعین‌حال، نقش معیار زمین‌شناسی و سطح ایستابی آب زیرزمینی به‌صورت غیرمستقیم و مکمل در پهنه‌بندی خطرپذیری سیلاب لحاظ شده است. در این پژوهش، کلاس‌بندی معیارها به‌گونه‌ای انجام شده است که کلاس‌های با عدد ۱ نشان‌دهنده بیشترین تأثیر در پتانسیل سیل‌خیزی و کلاس‌های با اعداد بزرگ‌تر بیانگر تأثیر کمتر هستند. این منطق برای تمام نقشه‌های معیار یکسان است. در فرآیند استانداردسازی نقشه‌های معیار، ابتدا نقشه‌های پایه بر اساس داده‌های اولیه تولید و سپس باتوجه‌به میزان تأثیر هر معیار در تولید رواناب، کلاس‌بندی می‌شوند. به‌عنوان نمونه در نقشه معیار کاربری اراضی شهری، کلاس‌ها متناسب با درجه نفوذپذیری سطح زمین در بازه ۱ تا ۵ استاندارد شده‌اند؛ به‌طوری‌که عدد ۱ بیانگر پتانسیل بالای تولید رواناب و عدد ۵ نشان‌دهنده تأثیر کمتر در تولید رواناب است. نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب (شکل ۴) شامل شش کلاس خطر است: کلاس ۱ «بسیار زیاد»، کلاس‌های ۲ و ۳ «متوسط تا زیاد و متوسط»، کلاس ۴ «کم»، و کلاس‌های ۵ و ۶ به ترتیب «بسیار کم» و «کمترین خطرپذیری» را نشان می‌دهند. بر اساس نتایج، حدود ۶٪ از محدوده در کلاس ۱، ۴۳٪ در کلاس‌های ۲ و ۳، ۴۲٪ در کلاس ۴ و ۹٪ در کلاس‌های ۵ و ۶ قرار دارند. یافته‌ها حاکی از آن است که مناطق جنوب‌شرقی دارای بالاترین خطر سیلاب بوده و در زمین‌های پست با شیب کمتر از ۲٪ و شبکه جمع‌آوری رواناب ضعیف واقع شده‌اند، درحالی‌که مناطق غربی محدوده خطرپذیری پایین‌تری دارند.

جدول ۳- کلاس‌های مناسبیت معیارها، زیرمعیارها و وزن‌های مربوطه به منظور مدیریت سیلاب شهری

وزن نهایی	IR	وزن	کلاس‌های زیرمعیار	IR	وزن	زیرمعیار	IR	وزن	معیارهای اصلی
۰/۱۵۹	۰/۰۴	۰/۴۳۹	خیابان	۰/۰۰۱	۰/۵۷۱	کاربري اراضي شهري	۰/۰۹	۰/۶۳۵	آسيب‌پذيري
۰/۱۰۵		۰/۲۸۹	تجاري-بازرگاني						
۰/۰۵۴		۰/۱۴۹	صنعتي						
۰/۰۲۷		۰/۰۷۴	مسكوني						
۰/۰۱۸		۰/۰۴۹	فضاي باز						
۰/۰۶۴	۰/۰۳	۰/۳۵۳	۰-۱۰۰		۰/۲۸۶	فاصله از کانالها و زهکش‌های شهري			
۰/۰۴۳		۰/۲۳۹	۱۰۰-۲۰۰						
۰/۰۲۹		۰/۱۵۸	۲۰۰-۳۰۰						
۰/۰۱۹		۰/۱۰۴	۳۰۰-۴۰۰						
۰/۰۱۲		۰/۰۶۷	۴۰۰-۵۰۰						
۰/۰۰۹		۰/۰۴۹	۵۰۰-۱۰۰۰						
۰/۰۰۵		۰/۰۳	> ۱۰۰۰						
۰/۰۳۹	۰/۰۷	۰/۴۲۸	۰-۰/۶۴		۰/۱۴۳	تراکم شبکه کانالها و زهکش‌های شهري			
۰/۰۲۳		۰/۲۵۵	۰/۶۴-۱/۳						
۰/۰۱۴		۰/۱۵	۱/۳-۱/۹۳						
۰/۰۰۸		۰/۰۸۸	۱/۹۳-۲/۵۷						
۰/۰۰۴		۰/۰۴۷	۲/۵۷-۳/۲۲						
۰/۰۰۳		۰/۰۳۳	۳/۲۲-۳/۸۶						
۰/۰۳۹	۰/۰۱	۰/۲۷۳	<۱۱۰۰	۰	۰/۵	ارتفاع	۰/۲۸۷	هیدرولیکی	
۰/۰۲۹		۰/۲۰۳	۱۱۰۰-۱۲۰۰						
۰/۰۲۲		۰/۱۵۲	۱۲۰۰-۱۳۰۰						
۰/۰۱۶		۰/۱۱۲	۱۳۰۰-۱۴۰۰						
۰/۰۱۲		۰/۰۸۲	۱۴۰۰-۱۵۰۰						
۰/۰۰۸		۰/۰۵۹	۱۵۰۰-۱۶۰۰						
۰/۰۱۱		۰/۰۷۶	۱۶۰۰-۱۷۰۰						
۰/۰۰۶		۰/۰۴۳	۱۷۰۰-۱۸۰۰						
۰/۰۰۵		۰/۰۳۳	>۱۸۰۰						
۰/۰۴۵	۰/۰۳	۰/۳۱۲	<۲%		۰/۵	شیب			
۰/۰۳۲		۰/۲۲۲	۲-۵%						
۰/۰۲۲		۰/۱۵۵	۵-۸%						
۰/۰۱۵		۰/۱۰۸	۸-۱۰%						
۰/۰۱۱		۰/۰۷۴	۱۰-۱۲%						
۰/۰۰۷		۰/۰۵۱	۱۲-۱۵%						
۰/۰۰۵		۰/۰۳۵	۱۵-۲۰%						
۰/۰۰۴		۰/۰۲۵	۲۰-۳۰%						
۰/۰۰۳		۰/۰۱۸	>۳۰%						
۰/۰۲۴	۰/۰۶	۰/۴۷۳	A	۰	۰/۶۴۳	زمین‌شناسي	۰/۰۷۸	اثرات محيطي	
۰/۰۱۳		۰/۲۶۳	Bs,R						
۰/۰۰۷		۰/۱۴۴	D ₁						
۰/۰۰۴		۰/۰۷۲	D ₂						
۰/۰۰۲		۰/۰۴۸	Bn,C						
۰/۰۱۲	۰/۲۶	۰/۴۳۴	<۱۲		۰/۳۵۷	سطح ایستایی			
۰/۰۰۸		۰/۲۸۱	۱۲-۱۵						
۰/۰۰۴		۰/۱۵۱	۱۵-۲۰						
۰/۰۰۲		۰/۰۶۳	۲۰-۲۵						
۰/۰۰۱		۰/۰۴۲	۲۵-۳۰						
۰/۰۰۱		۰/۰۳	>۳۰						



شکل ۴- نقشه خطرپذیری سیلاب در محدوده مورد مطالعه

و شاخص درصد خطای پیش بینی ($VE\%$) بین مقادیر مشاهداتی و تخمین زده شده استفاده شد. لازم به ذکر است بهترین پیش‌بینی‌ها باتوجه به حداقل مقادیر $RMSE$ و $VE\%$ و حداکثر $CORR$ ، در هر سه قسمت آموزش، صحت سنجی و تست حاصل می‌شود (جدول ۴).

-تولید سطوح هزینه

در فرآیند شناسایی مسیرهای بهینه جمع‌آوری رواناب، لایه رستری هزینه به عنوان مبنای اصلی تصمیم‌گیری به کار گرفته شد تا هزینه حرکت از هر سلول در محدوده مورد مطالعه را مشخص کند. برای ساخت این لایه، هزینه ساخت مسیر در هر سلول بین مقادیر ۱ تا ۱۰ تعیین شد؛ به‌طوری‌که عدد ۱ نشان دهنده کمترین هزینه و بیشترین مطلوبیت و عدد ۱۰ بیانگر بیشترین هزینه و کمترین مطلوبیت است. مسیرهای بهینه از طریق تکرارهای متعدد مدل استخراج شدند. معیارهای تصمیم‌گیری به سه دسته اصلی تقسیم شدند: کاربری اراضی شهری، شیب و زمین‌شناسی. در معیار کاربری اراضی، نقشه محدوده به ۲۲ کلاس تفکیک شد و برای هر کلاس، مقدار هزینه متناسب با دشواری احداث مسیر رواناب اختصاص یافت؛ به‌طوری‌که کاربری‌های شهری با هزینه کمتر، مطلوبیت بالاتری داشتند. در خصوص معیار شیب، محدوده به ۱۰ کلاس تقسیم‌بندی شد؛ کلاس‌های با شیب کمتر، دارای هزینه پایین‌تر و کلاس‌های با شیب بالا، با هزینه بیشتر در

به‌منظور بررسی استحکام و پایداری خروجی‌های مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی، یک مدل شبکه عصبی مصنوعی برای اعتبارسنجی نتایج توسعه داده شد. ساختار شبکه شامل ۷ نورون ورودی (لایه‌های معیار)، دو لایه پنهان هر یک با ۴ نورون، و یک نورون خروجی نمایانگر شاخص نهایی خطرپذیری سیلاب بوده است. ماتریس داده‌های مکانی (1125×962 سلول) به‌منظور افزایش کارایی محاسباتی و تأمین حجم نمونه کافی، با استفاده از تحلیل خوشه‌ای به ابعاد (150×126) کاهش داده شد، به‌گونه‌ای که تعداد نمونه‌ها باید از حداقل مقدار توصیه شده در رابطه (۶) فراتر باشد (Kavzoglu, ۲۰۰۱).

$$N_{min} = 30 \times N_i \times (N_i + 1) \quad (6)$$

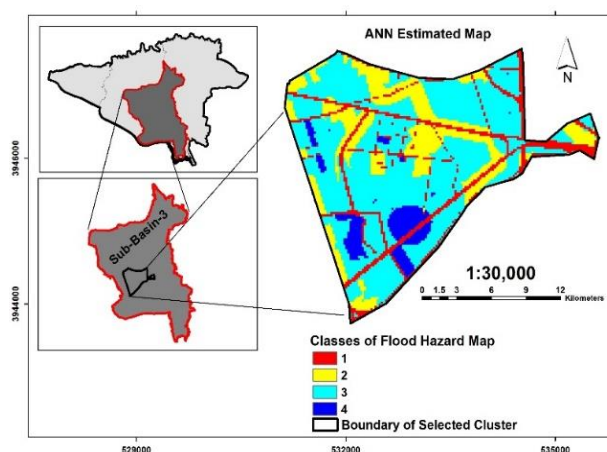
N_{min} : حداقل تعداد نمونه‌های مورد نیاز

N_i : تعداد متغیرهای (نورون‌های) ورودی مدل

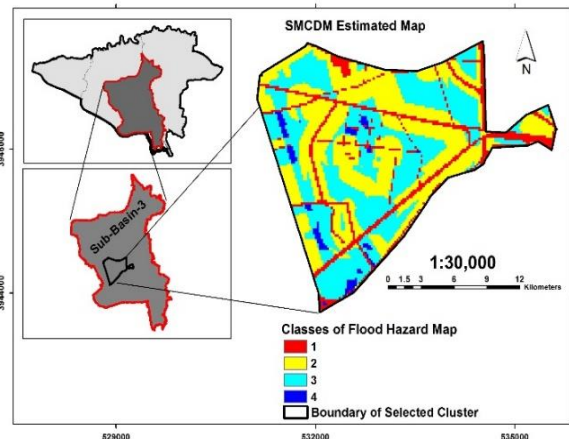
پس از آموزش شبکه با استفاده از نقشه خطرپذیری حاصل از مدل تصمیم‌گیری مکانی به‌عنوان داده هدف، مرحله آزمون با تغییر اوزان معیارهای آسیب‌پذیری و تولید نقشه‌های خطرپذیری پیش‌بینی شده انجام شد. تبدیل داده‌ها به فرمت رستری اسکی^۵ امکان مقایسه مکانی مستقیم میان نقشه‌های خطرپذیری مبتنی بر مدل تصمیم‌گیری و نقشه‌های پیش‌بینی‌شده توسط شبکه عصبی را فراهم ساخت (شکل‌های ۵ و ۶). به این منظور از شاخص‌های کارایی ضریب همبستگی ($CORR$)، ریشه میانگین مربعات خطاها ($RMSE$)

نظر گرفته شدند، چرا که شیب عاملی مؤثر در طراحی شبکه زهکشی است. در خصوص معیار زمین‌شناسی، این معیار به شش کلاس (A, R, D2, D1, C, Bn, Bs) تفکیک شد که هزینه هر کلاس بر مبنای نفوذپذیری لایه‌ها تعیین شد؛ به‌گونه‌ای که نفوذپذیری بیشتر معادل هزینه بالاتر و

نفوذپذیری کمتر معادل هزینه پایین‌تر در نظر گرفته شد. این ساختار لایه هزینه، امکان تحلیل دقیق‌تر و استخراج مسیرهای کم‌هزینه و بهینه برای جمع‌آوری رواناب شهری را فراهم کرد.



شکل ۶- نقشه تخمینی مدل شبکه عصبی برای خوشه انتخابی



شکل ۵- نقشه پتانسیل سیل خیزی تولید شده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی برای خوشه انتخابی

جدول ۴- مقادیر معیارهای کارایی برای مراحل مختلف آموزش، صحت‌سنجی و تست

معیارهای کارایی	CORR	RMSE	VE (%)
آموزش	۰/۸۷	۰/۱۹۰	۰/۳۸
صحت‌سنجی	۰/۸۲	۰/۲۳۱	۰/۳۳
تست	۰/۷۶	۰/۲۷۶	۰/۳۲

- تعیین سلول‌های مبدا

تعیین سلول‌های مبدا در این مرحله از پژوهش بر اساس نقشه خطرپذیری سیلاب و کلاس‌های آن انجام شد. منظور از نقاط مبدا، آغاز مسیرهای جمع‌آوری رواناب شهری است. به‌منظور شناسایی این نقاط در سطح زیرحوضه‌های درون‌شهری، دو گروه سلول مبدا تعریف شد: (۱) نقاط مبدا دسته اول: در صورت واقع شدن کلاس یک خطرپذیری در زیرحوضه‌های مطالعاتی، سلول‌های مورد نظر به عنوان نقاط مبدا انتخاب می‌شوند (نقاط مبدا دسته اول) و (۲) نقاط مبدا دسته دوم: در صورت واقع شدن کلاس دو خطرپذیری در زیرحوضه‌های مطالعاتی، سلول‌های مورد نظر به عنوان نقاط مبدا انتخاب می‌شوند (نقاط مبدا دسته دوم). بر پایه این دو قاعده، در مجموع ۳۹ سلول مبدا شناسایی شد که شامل ۱۹ سلول از نوع دسته اول و ۲۰ سلول از نوع دسته دوم است. نقاط تعیین شده در فرمت اطلاعات شیب فایل ۶ به‌عنوان یکی از ورودی‌های مدل معرفی شدند، به‌گونه‌ای که با انتخاب هر یک از این سلول‌ها، مسیرهای بهینه جمع‌آوری رواناب محاسبه می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۷) نشان داده شد، سلول‌های مبدا دو دسته در زیرحوضه شماره ۳ مشخص شدند؛ لازم به ذکر است زیرحوضه ۳ برای این بخش از مطالعه بر اساس نتایج نقشه خطرپذیری سیلاب انتخاب شد.

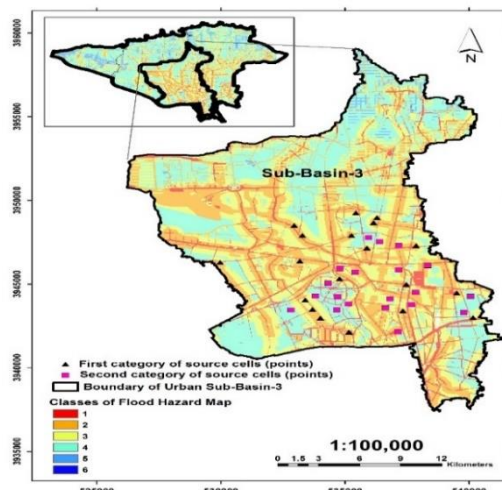
- تولید سطح هزینه مناسب به منظور مدل‌سازی مسیرهای مناسب برای جمع‌آوری رواناب شهری

بعد از تولید سطوح هزینه معیارهای مختلف تصمیم‌گیری، میزان تناسب هر منطقه یا سلول که بیان‌گر هزینه حرکت از طریق هر سلول می‌باشد، تعیین می‌شود. تولید سطح هزینه مناسب در قالب یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره مطرح می‌شود. به این ترتیب که ابتدا وزن هر یک از سطوح هزینه تولید شده توسط ماتریس‌های مقایسه زوجی تعیین شده و در ادامه با روش ترکیب خطی وزنی سطح هزینه مناسب نهایی با رابطه (۷) تولید می‌شود.

$$\text{Suitability cost surface} = \sum [Cost Surface (C_n) \times Weight(W_n)] \quad (7)$$

$\text{Suitability cost surface}$: سطح هزینه مناسب
 $Cost Surface (C_n)$: سطح هزینه مربوط به هریک از معیارهای تصمیم‌گیری
 $Weight(W_n)$: وزن سطوح هزینه مربوط به معیارهای تصمیم‌گیری می‌باشد که از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی حاصل می‌شود.

در جدول (۵) ماتریس مقایسه زوجی سطوح هزینه معیارهای تصمیم‌گیری ارائه شده است.



شکل ۷- موقعیت نقاط مبدا بر اساس کلاس‌های خطرپذیری سیلاب در زیرحوضه سه درون شهری

جدول ۵- ماتریس مقایسه زوجی سطوح هزینه معیارهای تصمیم‌گیری

سطوح هزینه	کاربری اراضی	شیب	ژئولوژی	وزن معیارها
کاربری اراضی	۱	۲	۷	۰/۵۸۲
شیب	-	۱	۶	۰/۳۴۸
ژئولوژی	-	-	۱	۰/۰۶۹
نرخ ناسازگاری				۰/۰۳

همراه سطح هزینه تجمعی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مسیرهای پیشنهادی در مناطقی واقع می‌شوند که میزان هزینه آنها حداقل می‌باشد. همچنین مسیرهای تعیین شده بر اساس ارزش هزینه یک که به کلاس کانال‌ها و مسیرهای وضع موجود اختصاص یافته است، پس از عبور از مسیرهای مناسب از نظر مقادیر هزینه‌ای، به سمت کانال‌های وضع موجود هدایت می‌شوند. در شکل (۹) مسیرهای پیشنهادی برای جمع‌آوری رواناب‌های شهری در مقایسه با کانال‌ها و زهکش‌های موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده‌اند.

-آنالیز هزینه مسیرهای پیشنهادی

آنالیز هزینه یکی از بخش‌های مهم این پژوهش می‌باشد. در این بخش از پژوهش با تقاطع هر یک از مسیرهای پیشنهادی با عوارض موجود و بر اساس کلاس‌های هزینه هر یک از معیارهای تصمیم‌گیری، میزان هزینه هر یک از مسیرها تعیین می‌شود. لازم به ذکر است به منظور آنالیز هزینه در این بخش، یکی از نقاط (سلول) مبدا به صورت انتخابی تعیین شده و با تغییر ارزش‌های هزینه‌ای مربوط به کلاس‌های معیار کاربری اراضی که به عنوان مهمترین معیار در برآورد هزینه مسیرهای پیشنهادی بر اساس تحلیل‌های چندمعیاره مطرح می‌باشد، هزینه مربوط به مسیرهای پیشنهادی تعیین می‌شود.

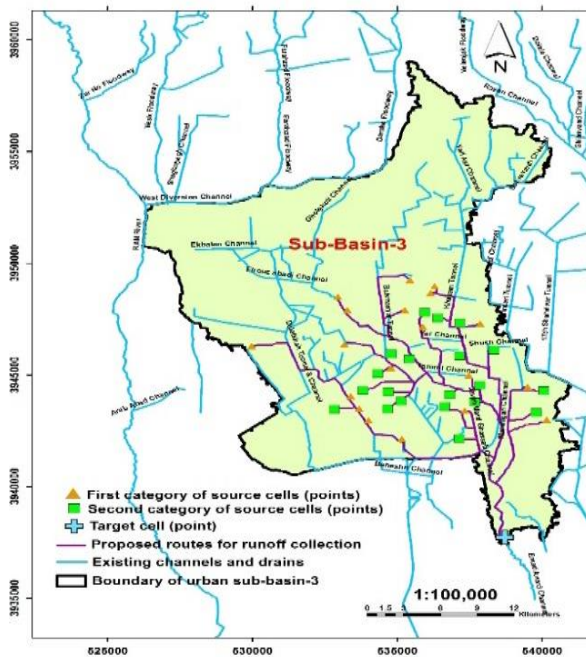
نتایج مربوط به کل محاسبات فرایند تحلیل سلسله مراتبی اعم از وزن سطوح هزینه و کلاس‌های مربوط به هر یک از سطوح هزینه و وزن نهایی آنها در جدول ۶ ارائه شده است. مقدار نرخ ناسازگاری (IR) نیز برای ماتریس‌های مقایسه زوجی به دست آمده است که نشان‌دهنده سازگاری نتایج می‌باشد. باتوجه به اینکه، مقادیر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ می‌باشد، سازگاری در قضاوت‌ها رعایت شده است.

-تعیین مسیرهای با حداقل هزینه از نظر مسافت و زمان

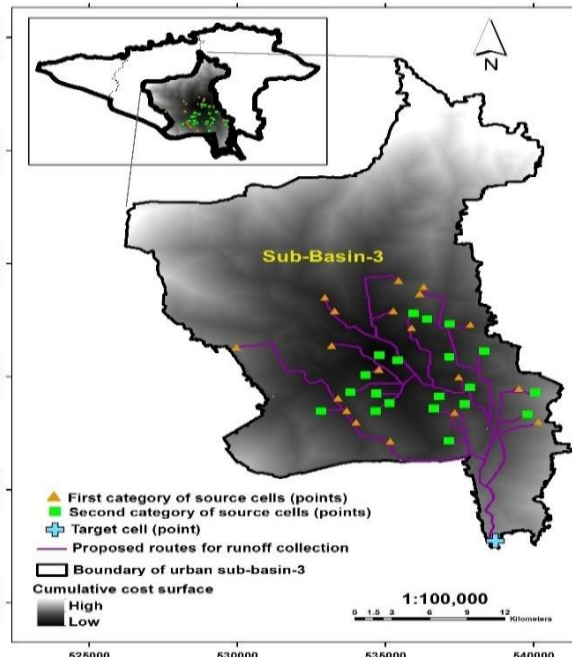
بعد از تعیین نقاط (سلول) مبدا بر اساس دو قانون تعریف شده، مسیرهای با حداقل هزینه بین هر یک از سلول‌های مبدا تعریف شده (ابتدای مسیرهای جمع‌آوری رواناب) و سلول هدف که خروجی زیرحوضه‌ها می‌باشد، با استفاده از نقشه فاصله وزندهی شده با هزینه و نقشه جهت، تعیین می‌شود. به منظور اجرای این فرایند و باتوجه به بالا بودن حجم عملیات مربوطه بر اساس نقاط مبدا انتخابی از جعبه ابزار توسعه داده شده که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد، استفاده شد. نحوه اجرای مدل فوق به این ترتیب است که ابتدا نقاط (سلول) مبدا به صورت یک فایل ورودی به مدل معرفی شده و با انتخاب هر یک از سلول‌های مبدا، و با توجه به مراحل ذکر شده در بخش‌های قبل، مسیرهای مناسب برای جمع‌آوری رواناب شهری پیشنهاد می‌شوند. در شکل (۸) مسیرهای پیشنهادی به منظور جمع‌آوری رواناب شهری در زیرحوضه سه بر اساس نقاط مبدا تعریف شده، به

جدول ۶- سطوح هزینه، کلاس‌های مناسب هریک از آنها و وزن‌های مربوط به آن به منظور تعیین مسیرهای مناسب برای جمع‌آوری رواناب شهری

سطوح هزینه	وزن	نرخ ناسازگاری	کلاس‌های هزینه	وزن	نرخ ناسازگاری
سطح هزینه کاربری اراضی	۰/۵۸۲	۰/۱	کانال‌ها و مسیل‌ها	۰/۶۴۵	۰/۳۷۵
			جاده و خیابان	۰/۲۹۷	
			سایر	۰/۰۵۸	
سطح هزینه شیب	۰/۳۴۸	۰/۰۸۰	۰ - ۰/۵	۰/۲۶۰	۰/۰۹۰
			۰/۵ - ۱	۰/۲۰۲	۰/۰۷۰
			۱ - ۱/۵	۰/۱۵۶	۰/۰۵۴
			۱/۵ - ۲	۰/۱۱۹	۰/۰۴۱
			۲ - ۲/۵	۰/۰۹۱	۰/۰۳۲
			۲/۵ - ۳	۰/۰۶۴	۰/۰۲۲
			۳ - ۵	۰/۰۴۴	۰/۰۱۵
			۵ - ۱۰	۰/۰۲۹	۰/۰۱۰
			۱۰ - ۲۰	۰/۰۲۰	۰/۰۰۷
			> ۲۰	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵
			A	۰/۳۹۰	۰/۰۲۷
سطح هزینه ژئولوژی	۰/۰۶۹	۰/۰۹۰	R	۰/۲۴۶	۰/۰۱۷
			Bs	۰/۱۵۳	۰/۰۱۱
			D ₁	۰/۰۹۵	۰/۰۰۷
			D ₂	۰/۰۵۹	۰/۰۰۴
			C	۰/۰۳۷	۰/۰۰۳
			Bn	۰/۰۲۰	۰/۰۰۱



شکل ۹- مقایسه مسیرهای پیشنهادی با کانال‌ها و زهکش‌های موجود در زیرحوضه سه درون شهری

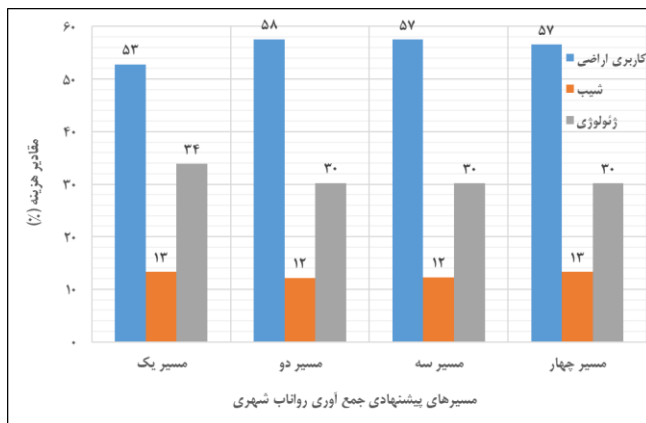


شکل ۸- مسیرهای پیشنهادی به منظور جمع‌آوری رواناب در زیرحوضه سه درون شهری

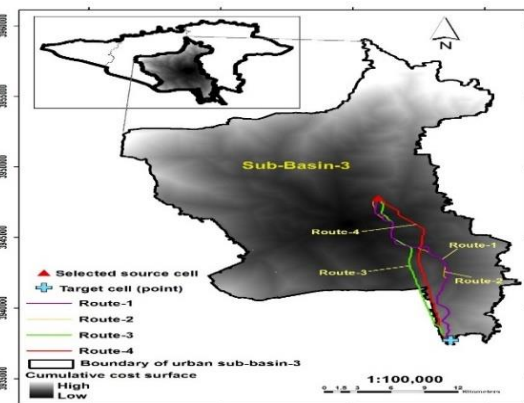
در شکل (۱۰) چهار مسیر پیشنهادی برای سلول مبدا انتخاب شده به ازای تغییر در ارزش هزینه کلاس کانال‌ها و مسیل‌های شهری با مقادیر هزینه ۱، ۴، ۷ و ۱۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است ارزش هزینه ۱ (یک) معادل بهترین کلاس مناسب و ارزش هزینه ۱۰ (ده) معادل بدترین کلاس مناسب می‌باشد. براین اساس چهار مسیر به نام‌های مسیر یک، مسیر دو، مسیر سه و مسیر چهار در شکل (۱۰) نشان داده شده است که هر کدام از این مسیرها بر اساس ارزش‌های هزینه ۱، ۴، ۷ و ۱۰ برای کلاس کانال‌ها و مسیل‌های شهری تعیین شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مسیرهای یک و دو که به ترتیب به ازای ارزش‌های هزینه ۱ و ۴ تعیین شده‌اند، تقریباً بر روی هم واقع می‌شوند.

در شکل (۱۱) درصد هزینه هر یک از معیارهای هزینه تصمیم‌گیری برای مسیرهای مختلف نشان داده شده است.

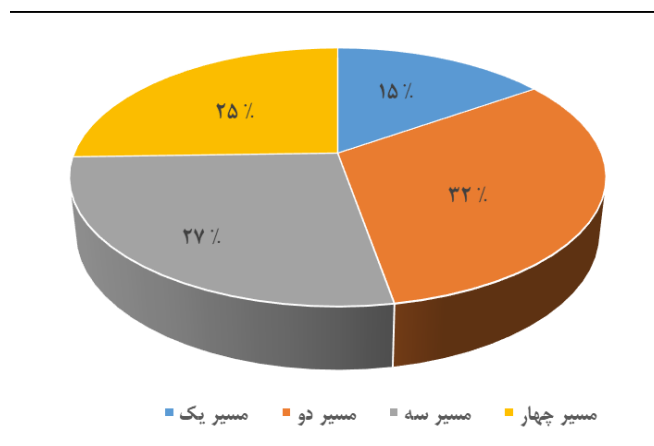
بر اساس این شکل ملاحظه می‌شود در تمامی مسیرها، به ترتیب معیارهای هزینه کاربری اراضی، ژئولوژی و شیب بیشترین درصد هزینه را دارد. در شکل (۱۲) نیز مقایسه بین مسیرهای پیشنهادی جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس هزینه هر یک از معیارهای تصمیم‌گیری ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این شکل، هزینه معیارهای تصمیم‌گیری، بر اساس حاصل ضرب تعداد پیکسل‌های هر یک از کلاس‌های معیارهای هزینه تصمیم‌گیری در مقادیر هزینه‌ای آنها محاسبه شده است. در شکل (۱۳) کل هزینه مربوط به هر یک از مسیرهای پیشنهادی مورد مقایسه قرار گرفته است. بر این اساس مسیر یک با کمترین هزینه، به عنوان مناسب‌ترین مسیر پیشنهادی برای جمع‌آوری رواناب شهری معرفی می‌شود.



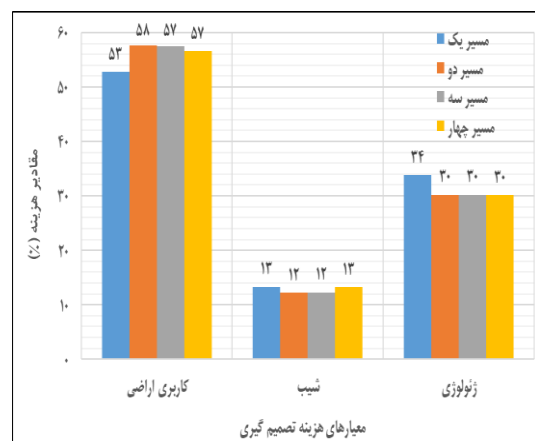
شکل ۱۱- درصد هزینه هر یک از معیارهای هزینه تصمیم‌گیری برای مسیرهای پیشنهادی جمع‌آوری رواناب شهری



شکل ۱۰- مسیرهای پیشنهادی به منظور جمع‌آوری رواناب شهری برای سلول مبدا انتخابی



شکل ۱۳- مقایسه بین مسیرهای پیشنهادی جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس هزینه کل محاسبه شده



شکل ۱۲- مقایسه بین مسیرهای پیشنهادی جمع‌آوری رواناب شهری بر اساس هزینه هر یک از معیارهای هزینه تصمیم‌گیری

نتایج و بحث

برای شفاف‌سازی جایگاه و نوآوری پژوهش حاضر در قیاس با مطالعات اخیر، جدول (۷) چارچوب روش‌شناختی، سطح اعتبارسنجی، میزان مشارکت ذی‌نفعان و خروجی‌های عملیاتی

این مطالعه را با پژوهش‌های منتخب مقایسه می‌کند که در ادامه توضیحات مرتبط ارائه شده است. چارچوب یکپارچه‌ای که در این مطالعه توسعه یافته است و فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و تحلیل مسیر با کمترین هزینه را در قالب یک ساختار تصمیم‌گیری مکانی

مشارکتی تلفیق می‌کند، در ایجاد پیوند میان اولویت‌بندی مبتنی بر نظر خبرگان و مدل‌سازی اعتبارسنجی‌شده مبتنی بر داده در مدیریت ریسک سیلاب شهری کارآمد ارزیابی شد (Nguyen و همکاران، ۲۰۲۲). وزن‌های چندذنی‌نفعی که از دیدگاه مهندسان، برنامه‌ریزان سیاستی، دانشگاهیان و سازمان‌های غیردولتی استخراج شده‌اند، نه تنها با شاخص‌های هیدرولوژیکی هم‌خوانی داشتند، بلکه پس از اعتبارسنجی با استفاده از مدل شبکه عصبی، به تفکیک مکانی دقیق‌تر پهنه‌های حساس به سیلاب نیز منجر شدند (Guo و همکاران، ۲۰۲۴). به‌کارگیری تحلیل مسیر با کمترین هزینه، گزینه‌های اجرایی و کم‌هزینه‌ای برای انتقال رواناب در بستر پیچیده شهری تهران فراهم کرد و به‌این‌ترتیب ارزیابی ریسک را به طراحی عملیاتی قابل اجرا پیوند داد.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات اخیر که بر توسعه چارچوب‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره و یادگیری ماشین برای پهنه‌بندی مخاطرات تأکید دارند، هم‌راستا است (Lu و همکاران، ۲۰۲۴؛ McNaught و همکاران، ۲۰۲۴). شبکه‌های بیزین یکپارچه شده با سیستم اطلاعات جغرافیایی توانسته‌اند بازنمایی دقیق‌تر و کمی‌سازی بهتر عدم قطعیت را در ارزیابی مخاطرات سیلاب شهری ارائه دهند (Lu و همکاران، ۲۰۲۴).

همچنین، مدل‌های هیدرودینامیکی، نمایش بهتری از سازوکارهای سیلاب ناشی از بارش‌های شدید فراهم کرده و از نظر اعتبارسنجی، پشتیبان گزینه‌های سازه‌ای استخراج شده از طریق بهینه‌سازی مکانی بوده‌اند (Luan و همکاران، ۲۰۲۴). از منظر پهنه‌بندی حساسیت سیلاب، مرورهای نظام‌مند نقش داده‌های سنجش‌ازدور با قدرت تفکیک مکانی بالا و انتخاب مناسب پارامترهای کلیدی را در شکل‌دهی به مدل‌های پیش‌بینی قابل اتکا برجسته کرده‌اند (Pourzangbar و همکاران، ۲۰۲۵).

علاوه‌براین، معماری‌های یادگیری عمیق مانند شبکه انتزاعی عمیق، ظرفیت بالایی در استخراج روابط غیرخطی فضایی در بافت‌های متراکم شهری از خود نشان داده‌اند؛ امری که در مطالعات موردی اخیر در شهرهای ایران نیز اعتبارسنجی شده است (Shirzadi و همکاران، ۲۰۲۵). برجستگی معیارهای کاربری اراضی و شیب زمین به‌عنوان عوامل غالب، نشان‌دهنده هم‌راستایی قوی میان دانش تجربی محلی و علوم هیدرولوژی است و بر ارزش کالیبراسیون مشارکتی در مدل‌های مکانی تأکید دارد. این هم‌راستایی، علاوه بر تقویت استحکام روش‌شناختی، اعتبار مدل را نیز افزایش می‌دهد، چراکه ذی‌نفعان شهری بازتاب دانش تجربی خود را به‌طور مستقیم در خروجی‌های مدل مشاهده می‌کنند.

چارچوب‌های نوین مبتنی بر سناریو، به‌طور صریح تغییرات اقلیم و تحولات کاربری اراضی را در ارزیابی حساسیت سیلاب تلفیق کرده‌اند و برتری روش‌های ترکیبی نسبت به رویکردهای ایستا را از منظر تاب‌آوری شهری برجسته ساخته‌اند (Khodaei و همکاران، ۲۰۲۵). بهینه‌سازی سامانه‌های سبز-

خاکستری-آبی گزارش شده در سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که راهکارهای مبتنی بر طبیعت، در صورت هم‌افزایی با اقدامات مهندسی متعارف، عملکرد بهتری نسبت به راهبردهای تک‌زیرساختی در مدیریت رواناب شهری دارند (Liu و همکاران، ۲۰۲۵).

از منظر فنی، تحلیل مسیر با کمترین هزینه به تولید مسیرهای بهینه جمع‌آوری رواناب انجامید که به‌عنوان مکمل‌هایی غیرمتمرکز و تطبیق‌پذیر برای سیستم‌های زهکشی متعارف عمل می‌کنند؛ نتایجی که با شواهد اخیر مرتبط با سامانه‌های زهکشی پایدار شهری و راهکارهای مبتنی بر طبیعت برای افزایش تاب‌آوری شهرها هم‌خوان است (Fadmastuti و همکاران، ۲۰۲۴؛ Haapasaari و همکاران، ۲۰۲۴).

با ادغام تحلیل مسیر با کمترین هزینه مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی، این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه طراحی تطبیقی مدیریت آب‌های سطحی می‌تواند با استفاده از مدل‌های داده‌محور و درعین‌حال پاسخ‌گو به الزامات حکمرانی، به‌صورت مکانی بهینه شود. از منظر حکمرانی، مدل ارائه‌شده یک جعبه‌ابزار پشتیبان تصمیم فراهم می‌آورد که دانش خبرگان، بینش ذی‌نفعان و تحلیل‌های مکانی را یکپارچه کرده و به‌این‌ترتیب به تسهیل هماهنگی نهادی کمک می‌کند؛ موضوعی که به‌ویژه در شهرهایی با ساختار حکمرانی چندپاره مانند تهران چالش‌برانگیز است (Challies و همکاران، ۲۰۱۶؛ Francesch-Huidobro، ۲۰۱۵).

در مقایسه با مدل‌های متمرکز بر حکمرانی، رویکرد حاضر بر قابلیت کاربرد عملیاتی و سهولت استفاده برای متخصصان اجرایی تأکید دارد و فاصله پایدار میان نظریه مدل‌سازی و اجرای سیاستی را کاهش می‌دهد. نوآوری این پژوهش نسبت به روندهای جاری در سه محور اصلی قابل تبیین است: ۱) کاهش شکاف میان دانش خبرگانی و داده‌های تجربی از طریق اعتبارسنجی وزن‌های استخراج شده از مدل تصمیم‌گیری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی؛ ۲) عملیاتی‌سازی تحلیل مسیر با کمترین هزینه برای شناسایی مداخلات اجرایی و کم‌هزینه که مستقیماً با توپوگرافی فیزیکی، ظرفیت زهکشی و محدودیت‌های شهری پیوند دارند؛ ۳) نهادینه‌سازی مشارکت ذی‌نفعان در کل جریان تصمیم‌گیری، هم‌سو با شواهد که نشان می‌دهد حکمرانی مشارکتی به ارتقای پذیرش سیاست‌ها و تاب‌آوری بلندمدت می‌انجامد (Guo و همکاران، ۲۰۲۴).

بااین‌حال برخی محدودیت‌ها همچنان وجود دارد. مدل‌های کنونی تا حدی بر لایه‌های ایستا (مانند کاربری اراضی و سطوح نفوذناپذیر) متکی هستند و سناریوهای پویای اقلیمی به‌طور کامل در چرخه وزن‌دهی و اعتبارسنجی ادغام نشده‌اند. همچنین، بازنمایی شبکه زهکشی ساده‌سازی شده است و می‌توان آن را با بهره‌گیری از مدل‌های بازسازی گراف برای داده‌های ناقص زیرساختی تقویت کرد (Guo و همکاران، ۲۰۲۴).

هرچند عدم قطعیت به صورت ضمنی از طریق اعتبارسنجی با شبکه عصبی مورد توجه قرار گرفته است، می توان آن را با تحلیل حساسیت بیزین به صورت صریح تر و کمی تر توسعه داد (Lu و همکاران، ۲۰۲۴). پژوهش های آینده می توانند به ادغام بهینه سازی چندهدفه با پیوند تحلیل مسیر کم هزینه به طراحی توپولوژی شبکه زهکشی، به کارگیری سناریوهای تغییر اقلیم و تحول کاربری اراضی با شبیه سازی های هیدرودینامیکی برای آزمون عملکرد رویدادمحور بپردازند.

در نهایت، این مطالعه با تلفیق اولویت های استخراج شده از مشارکت ذی نفعان و اعتبارسنجی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، به گفتمان روبه رشد حکمرانی مشارکتی سیلاب کمک می کند. نتایج نشان می دهد مدل های مشارکتی دارای استحکام علمی می توانند به طور هم زمان بینش هیدرولوژیکی و درگیرسازی نهادی را فراهم آورند و چارچوبی قابل بازتولید و انطباق پذیر برای سایر شهرهای دارای محدودیت داده و پیچیدگی نهادی در مقیاس جهانی ارائه دهند.

جدول ۷- مقایسه چارچوب روش شناختی، اعتبارسنجی و خروجی های عملیاتی پژوهش حاضر با مطالعات منتخب

ردیف	پژوهش	چارچوب و روش ها	نحوه اعتبارسنجی	سطح و نقش مشارکت ذی نفعان	خروجی های کلیدی	تمایز یا محدودیت نسبت به پژوهش حاضر
۱	Nguyen و همکاران (۲۰۲۲)	AHP + GIS برای ارزیابی خطر سیلاب	مقایسه با داده های سیل تاریخی	محدود (خبرگان فنی)	نقشه حساسیت سیلاب	فاقد ادغام یادگیری ماشین و طراحی مسیرهای اجرایی
۲	Guo و همکاران (۲۰۲۴)	MCDM	اعتبارسنجی داده محور	متوسط (خبرگان منتخب)	بهبود تفکیک مکانی پهنه های سیلابی	فاقد پیوند به مداخلات فضایی اجرایی
۳	Lu و همکاران (۲۰۲۴)	GIS + شبکه بیزین	کمی سازی عدم قطعیت	بدون مشارکت ساختاریافته	مدل سازی ریسک سیلاب	تمرکز بر عدم قطعیت، بدون طراحی عملیاتی
۴	Luan و همکاران (۲۰۲۴)	مدل هیدرودینامیکی	کالیبراسیون بارش-رواناب	بدون مشارکت	شبیه سازی رویدادمحور سیلاب	نیازمند داده های پرهزینه و فاقد چارچوب حکمرانی
۵	Pourzangbar و همکاران (۲۰۲۵)	سنجش ازدور + ML	مقایسه طبقه بندی	بدون مشارکت	پهنه بندی حساسیت با تفکیک بالا	تمرکز بر داده، نه تصمیم سازی نهادی
۶	Shirzadi و همکاران (۲۰۲۵)	DANet (یادگیری عمیق)	اعتبارسنجی آماری	بدون مشارکت	استخراج روابط غیرخطی فضایی	مدل جعبه سیاه، فاقد پذیرش سیاسی
۷	Liu و همکاران (۲۰۲۵)	بهینه سازی GGBS	شبیه سازی عملکرد	محدود (برنامه ریزی)	ارزیابی زیرساخت سبز-خاکستری-آبی	تمرکز بر زیرساخت، نه حکمرانی فضایی
۸	Khodaei و همکاران (۲۰۲۵)	MCDM سناریو محور	تحلیل تطبیقی سناریو	محدود	تلفیق تغییر اقلیم	فاقد اعتبارسنجی داده محور
۹	Yang و همکاران (۲۰۲۵)	Random Forest + Gibbs	آزمون الگوریتمی	بدون مشارکت	بازسازی شبکه زهکشی	نیازمند داده زیرساختی دقیق
۱۰	پژوهش حاضر	AHP + ANN + LCP در چارچوب CSDM مشارکتی	اعتبارسنجی فضایی ANN	بالا (مهندسان، سیاست گذاران، دانشجویان، NGOها)	پهنه بندی دقیق + مسیرهای کم هزینه اجرایی	پیوند مؤثر دانش خبرگانی، داده محور و حکمرانی عملیاتی

نتیجه گیری

این پژوهش یک چارچوب مکانی جامع و مشارکتی برای حکمرانی آب شهری ارائه می دهد. یکپارچه سازی سامانه اطلاعات جغرافیایی، تصمیم گیری چندمعیاره و مشارکت ذی نفعان در قالب یک بستر واحد، کارایی بالای این رویکرد را در فرآیند برنامه ریزی و اولویت بندی اقدامات مدیریتی نشان می دهد. نقشه خطرپذیری سیلاب به عنوان ابزاری کارآمد در ارتقای زیرساخت های جمع آوری رواناب شهری عمل کرده و

می تواند سیاست گذاران و طراحان را در این حوزه یاری رساند. نقشه نهایی، خطر سیلاب را در شش کلاس متمایز طبقه بندی می کند؛ به طوری که کلاس های یک تا پنج به ترتیب بیانگر سطوح خطر بسیار زیاد، متوسط تا زیاد، متوسط، کم و بسیار کم بوده و کلاس شش نمایانگر حداقل میزان خطرپذیری است. براین اساس، حدود ۶ درصد از محدوده مورد مطالعه در کلاس خطرپذیری یک، حدود ۴۳ درصد در کلاس های دو و سه، حدود ۴۲ درصد در کلاس چهار و نزدیک به ۹ درصد در

Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>

Francesch-Huidobro, M. (2015). Collaborative governance and environmental authority for adaptive flood risk: Recreating sustainable coastal cities: Theme 3: Pathways towards urban modes that support regenerative sustainability. *Cleaner Production*, 107, 568-580. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.045>

Guo, J., Bian, Y., Li, M., & Du, J. (2024). Assessing resilience through social networks: A case study of flood disaster management in China. *Disaster Risk Reduction*, 108, 104583. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104583>

Haapasaari, P., Marttunen, M., Salokannel, V., & Similä, J. (2024). Navigating the pathway from collaborative governance to impacts under uncertainty: A theory of change for watershed visions. *Environmental Science & Policy*, 162, 103937. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103937>

Hampton, S., & Curtis, J. (2022). A bridge over troubled water? Flood insurance and the governance of climate change adaptation. *Geoforum*, 136, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2022.08.008>

Kaiser, Z. R. M., Abdullah, A., & Akter, F. (2025). From risk to resilience and sustainability: Addressing urban flash floods and waterlogging. *Risk Sciences*, 100011. <https://doi.org/10.1016/j.risk.2025.100011>

Kavzoglu, T. (2001). An investigation of the design and use of feed-forward artificial neural networks in the classification of remotely sensed images. Doctoral dissertation, University of Nottingham, Nottingham, United Kingdom (UK).

Khodaei, H., Nasiri Saleh, F., Nobakht Dalir, A., & Zarei, E. (2025). Future flood susceptibility mapping under climate and land use change. *Scientific Reports*, 15(1), 12394. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97008-0>

کلاس‌های پنج و شش قرار دارند. نتایج نشان می‌دهد نواحی واقع در مجاورت سامانه‌های اصلی جمع‌آوری رواناب شهری، بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به سیلاب دارند. مناطق با خطر بالا بیشتر شبکه متراکم کانال‌ها، توپوگرافی پست و شیب‌های ملایم کمتر از ۲ درصد دارند. به‌منظور شناسایی مسیرهای بهینه جمع‌آوری رواناب شهری، از نقشه خطرپذیری سیلاب تولید شده مبتنی بر مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی استفاده شد. مسیرهای بهینه با به‌کارگیری الگوریتم مناسب و با در نظر گرفتن فرض‌های منطقی تعیین شدند. در این فرآیند، لایه‌های اطلاعاتی معرف سطوح هزینه تصمیم‌گیری شامل معیارهایی نظیر کاربری اراضی، شیب و زمین‌شناسی ایجاد شدند. سلول‌های مبدأ که نمایانگر نقاط آغاز سامانه جمع‌آوری رواناب هستند، بر اساس نقشه خطرپذیری و طبقات آن تعیین شدند و خروجی زیرحوضه‌های شهری به‌عنوان نقاط مقصد در نظر گرفته شدند تا امکان شناسایی مسیرهای بهینه انتقال رواناب فراهم شود. لازم به تأکید است که مدل توسعه یافته در این پژوهش برای مطالعات مقدماتی کنترل سیلاب در حوضه‌های شهری طراحی شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که به‌کارگیری تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در بستر سامانه اطلاعات جغرافیایی، روشی بسیار مؤثر برای تولید نقشه‌های دقیق خطرپذیری سیلاب است. از آنجا که یکی از ارکان اساسی مدیریت، شناسایی اولویت‌ها است، این مدل و خروجی‌های آن می‌تواند چارچوبی مناسب برای حکمرانی آب در حوضه‌های شهری فراهم آورند.

منابع

Arik, A. D., Chionne, D., Renou, Y., Brochet, A., Blanchet, J., Kharbouche, M., Ruin, I., & Creutin, J. D. (2023). The limits of scalability: Uncovering friction between levels of flood risk governance in the French Alps. *Disaster Risk Reduction*, 97, 104044. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104044>

Challies, E., Newig, J., Thaler, T., Kochskämper, E., & Levin-Keitel, M. (2016). Participatory and collaborative governance for sustainable flood risk management: An emerging research agenda. *Environmental Science and Policy*, 55 (2016), 55, 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.09.012>

Fadmastuti, M., Nowak, D., & Crompvoets, J. (2024). Flood data platform governance: Identifying the technological and socio-technical approach (es) differences. *Environmental Science & Policy*, 162, 103938. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103938>

- Minucci, G., Molinari, D., Gemini, G., & Pezzoli, S. (2020). Enhancing flood risk maps by a participatory and collaborative design process. *Disaster Risk Reduction*, 50, 101747. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101747>
- Nguyen, H., Pham, B. T., Prakash, I., Dou, J., Trinh, P. T., & Le, H. V. (2022). A hybrid flood susceptibility modeling framework using GIS-based multi-criteria analysis and machine-learning approaches (ANN, SVM, RF). *Hydrology*, 605, 127304. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127304>
- Nick, F. C., Sanger, N., van der Heijden, S., & Sandholz, S. (2023). Collaboration is key: exploring the 2021 flood response for critical infrastructures in Germany. *Disaster Risk Reduction*, 91, 103710. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103710>
- O'Shea, T. E., Grobusch, L. C., Zhang, M., Neal, J., Daron, J., Jones, R. G., Jack, C., McClure, A., Siame, G., Ndhlovu, D., & Bharwani, S. (2025). Integrating social narratives of flood events into a text network analysis-based decision support framework to reduce vulnerability to climate change in Africa. *Climate Services*, 37, 100538. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2024.100538>
- Phua, M. H., & Minowa, M. (2005). A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: a case study in the Kinabalu Area, Sabah, Malaysia. *Landscape and urban planning*, 71(2-4), 207-222. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.03.004>
- Pourzangbar, A., Oberle, P., Kron, A., & Franca, M. J. (2025). Analysis of the utilization of machine learning to map flood susceptibility. *Flood Risk Management*, 18(2), e70042. <https://doi.org/10.1111/jfr3.70042>
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Lian, J., Xu, K. & Yao, Y. (2024). An exploratory framework to urban flood collaborative mitigation strategy considering synergistic effect of inundation volume. *Hydrology*, 628, 130555. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130555>
- Saaty, T. L. (1996). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*, RWS Publication. Pittsburgh, USA.
- Latham, Z., Barrett-Lennard, G., & Opdyke, A. (2024). Archetypes of local governance for flood risk reduction decision-making under uncertain climate change futures. *Sustainable Cities and Society*, 112, 105632. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105632>
- Liu, Y., Zhang, X., Liu, J., Wang, Y., Jia, H., & Tao, S. (2025). A flood resilience assessment method of green-grey-blue coupled urban drainage system considering backwater effects. *Ecological Indicators*, 170, 113032. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.113032>
- Lu, Y., Zhai, G., & Zhou, S. (2024). An integrated Bayesian networks and GIS approach for flood disaster risk assessment: Yinchuan case study. *Ecological Indicators*, 166, 112322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112322>
- Luan, G., Hou, J., Wang, T., Zhou, Q., Xu, L., Sun, J., & Wang, C. (2024). Method for analyzing urban waterlogging mechanisms based on a 1D-2D water environment dynamic bidirectional coupling model. *Environmental Management*, 360, 121024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121024>
- Lukman, T., Yahaya, A. K., & Gordon, N. (2023). External stakeholders in the collaborative governance of natural resources in Ghana: Experiences from the Wa West District. *Environmental challenges*, 13, 100769. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100769>
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & sons. New York, USA.
- McNaught, R., Nalau, J., Hales, R., Pittaway, E., Handmer, J., & Renouf, J. (2024). Innovation and deadlock in governing disasters and climate change Collaboratively-Lessons from the Northern Rivers region of New South Wales, Australia. *Disaster Risk Reduction*, 105, 104366. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104366>
- Minano, A., Thistlethwaite, J., & Henstra, D. (2024). Conceptualizing and evaluating the role of a data platform as an entry-point for strengthening flood risk governance in Canada. *Disaster Risk Reduction*, 103, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104297>

drivers and responses. Land use policy, 117, 106124.

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106124>

Yang, J., Liu, K., Wang, M., & Yue, Q. (2025). A new algorithm for generation of urban underground stormwater networks and its application for enhanced urban flood simulation. Hydrology, 661, 133571.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105632>

پىنوشتها

- 1- Inconsistency Ratio
- 2- Vulnerability
- 3- Hydraulic
- 4- Environmental-Impact
- 5- ASCII
- 6- Shapefile

Shirzadi, A., Salvati, A., Tahan, M. H., Shahabi, H., Nodoushan, E. J., Ramezani, M., Hashim, M., & Clague, J. J. (2025). Urban flood susceptibility mapping using deep and machine learning algorithms as a management tool: A case study of Sanandaj City, Iran. Ecological Indicators, 178, 113886.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113886>

Sun, Q., Kushner, H., & Yang, Y. E. (2024). Identifying barriers to decentralized stormwater infrastructure implementation at different levels of urban flood governance—A case study in Eastern Pennsylvania, US. Environmental Science & Policy, 154, 103686.

<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103686>

Winter, A. K., & Karvonen, A. (2022). Climate governance at the fringes: Peri-urban flooding