Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 6, No. 4, PP. 58-70, Winter 2022
DOI: 10.22112/JWWSE.2021.286010.1275

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال ششم، شماره ۴، صفحات ۵۸-۷۰، زمستان ۱۴۰۰

Research Paper

Prioritization of Bottlenecks in the Main Stormwater Collection System for Rehabilitation Measures, Case Study: Tehran Catchment, Iran

Mohammad Shahsavandi[1], Jafar Yazdi[2*], Hossein Zangoui[3], Moein Assefi[4] and Mohammad Ali Karimkhani[5]

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3- Head of River Engineering Projects Division, Regional Water Company of Tehran, Iran.
4- Expert in River and Coastal Engineering Office, Regional Water Company of Tehran, Iran.
5- Deputy of Planning, Regional Water Company of Tehran, Tehran, Iran.
*Corresponding Author, Email: j_yazdi@sbu.ac.ir

Received: 02/6/2021
Revised: 01/08/2021
Accepted: 31/08/2021
© IWWA

Abstract

Urban drainage Systems are of the vital infrastructures, which are responsible for the safe transport of runoff. In recent decades, the increase in surface runoff has led to inadequate capacity in some parts of drainage network, which results in over-flowing. Land use and population density around these areas pose a high risk of loss of lives and injuries. Since in previous studies, vulnerability indicators were not considered in the assessment of bottleneck's risk, in this study, hazards and vulnerability indicators are combined together for calculating the risk index which is used for the prioritization of bottlenecks. In order to prioritize the bottlenecks of urban drainage system in Tehran catchment using the Simple Additive Weighting (SAW) method, the hydraulic modeling and Analytic Hierarchy Process (AHP) has been used for calculating the weight of indicators. For this purpose, five indicators have been defined which are population density around the bottlenecks, density of properties and diversity of land uses at these areas, average percentage of canal/main channel river filling, degree of bottleneck submergence, channel or river rank and flow velocity in canal/river. The results showed that the major critical bottlenecks are located in the eastern sub-basin of Tehran: in Abuzar, Maghsoudbeig and Bakhtar canals.

Keywords: Urban drainage system, Bottlenecks, Risk index, Analytic Hierarchy Process

مقاله پژوهشی

اولویت‌بندی نقاط حادثه‌خیز شبکه اصلی جمع‌آوری سیلاب حوضه آبریز شهر تهران برای انجام فعالیت‌های بهسازی

محمد شاه‌سوندی[۱]، جعفر یزدی[۲*]، حسین زنگویی[۳]، معین آصفی[۴] و محمدعلی کریمخانی[۵]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳- کارشناسی ارشد، رئیس گروه طرح‌های مهندسی رودخانه، شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، ایران.
۴- دکتری، کارشناس دفتر مهندسی رودخانه‌ها و سواحل، شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، ایران.
۵- معاونت برنامه‌ریزی، شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: j_yazdi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۲
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی یکی از زیرساخت‌های حیاتی هستند که وظیفه انتقال ایمن رواناب را برعهده دارند. در دهه‌های اخیر، افزایش حجم رواناب یا سیلاب موجب شده تا در برخی از قسمت‌های شبکه ظرفیت کافی برای عبور جریان وجود نداشته باشد. وجود کاربری اراضی و تراکم جمعیتی در اطراف این مناطق ریسک بالایی را برای انسان‌ها به‌همراه دارد. با توجه به این‌که در مطالعات پیشین شاخص‌های آسیب‌پذیری در بررسی نقاط حادثه‌خیز شبکه درنظر گرفته نشده است، در این پژوهش شاخص‌های خطر و شاخص‌های آسیب‌پذیری توأمان با یکدیگر در محاسبه شاخص ریسک استفاده شده و اولویت‌بندی گلوگاه‌ها بر اساس آن انجام شده است. به این ترتیب با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی شبکه، روش تحلیل سلسله‌مراتبی[۱] و تعریف پنج شاخص: تمرکز جمعیتی در اطراف گلوگاه، تراکم و تنوع کاربری‌ها در حاشیه گلوگاه، متوسط درصد پرشدگی کانال/رودخانه در محل گلوگاه، درجه کانال سیلابرو یا رودخانه و سرعت در کانال/رودخانه، وزن‌های شاخص‌ها به‌دست آمده و با استفاده از روش مجموع ساده وزنی[۲]، گلوگاه‌های موجود در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران برای انجام عملیات بهسازی، اولویت‌بندی شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عمده گلوگاه‌های بحرانی در زیرحوضه شرق تهران و در کانال‌های ابوذر، مقصودبیک و باختر قرار دارند.

کلمات کلیدی: شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی، گلوگاه‌های شبکه، شاخص ریسک، تحلیل سلسله‌مراتبی

۱- مقدمه

دستیابی به زیرساخت‌های مطمئن و کارآمد یکی از اهداف جوامع شهری است. از جمله این زیرساخت‌ها که چالش‌های زیادی را در دهه‌های اخیر به‌همراه داشته است، سیستم جمع‌آوری آب‌های سطحی است. هر ساله در برخی نقاط کشور بروز آبگرفتگی در معابر، خیابان‌ها و سطح شهر رخ می‌دهد که نشان از وجود ضعف در این سیستم است (پوریامهر، ۱۴۰۰؛ کریمی و همکاران، ۱۳۹۷). از طرفی با توجه به مسئله تغییر اقلیم که در پی افزایش گازهای گلخانه‌ای ایجاد شده است و هم‌چنین کاهش سطح نفوذپذیر که به دنبال تغییر کاربری اراضی و توسعه شهرنشینی به‌وجود آمده است (آذری و تابش، ۱۳۹۴)، تواتر آبگرفتگی‌ها و خرابی‌های ناشی از سیل افزایش یافته است.

برای کاهش این مشکلات لازم است وضعیت فعلی شبکه ارزیابی شده تا براساس وضعیت موجود، تصمیم‌گیری برای اصلاح مجاری شبکه صورت پذیرد. در ایران، معمولاً عمده مشکلات ناشی از خروج رواناب از شبکه به‌واسطه سازه‌های عرضی (نظیر پل و کانال) است که به‌دلیل ایجاد تنگ‌شدگی در مسیر جریان ایجاد شده است. در این پژوهش به سازه‌های عرضی که در سیلاب‌های با دوره بازگشت بالای ۱۰ سال می‌توانند مشکل‌ساز شوند، گلوگاه اطلاق شده است. به این ترتیب اولویت‌بندی گلوگاه‌ها می‌تواند نقش موثری در تصمیم‌گیری‌ها (از قبیل تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی انجام اقدامات بهسازی) ایفا کند. چرا که معمولاً بودجه مورد نیاز برای اصلاح کلیه گلوگاه‌ها در دسترس نیست و لازم است تا ابتدا اولویت به گلوگاه‌های بحرانی‌تر داده شود. در این اولویت‌بندی لازم است تا هم معیارهای خطر (نظیر عمق و سرعت جریان) و هم معیارهای آسیب‌پذیری (نظیر تراکم جمعیت و تراکم و تنوع کاربری اراضی) درنظر گرفته شود. چرا که در دو گزینه با خطر یکسان، گلوگاهی که آسیب‌پذیری بیشتری داشته باشد در اولویت بالاتر قرار می‌گیرد. از این‌رو در پژوهش حاضر شاخص ریسک که در بردارنده هر دو مفهوم فوق است برای ارزیابی و اولویت‌بندی گلوگاه‌ها انتخاب شده است.

صالحی و همکاران (۱۳۹۲) رویکردی کارآمد را در ارزیابی خطر سیل تهران به‌کار گرفتند. در این تحقیق ۵ معیار فاصله از شبکه زهکشی، تجمع جریان، شیب، ارتفاع و اراضی ساخته شده و ساخته نشده درنظر گرفته شده و از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی[۳] برای تصمیم‌گیری استفاده شده است. نقشه نهایی تولید شده نشان می‌دهد که مناطق حریم آبراهه‌ها و نواحی تقریباً مرکزی تا جنوب شهر دارای بالاترین میزان خطرند.

آذری و تابش (۱۳۹۴) روشی برای تعیین میزان عملکرد هیدرولیکی کانال‌های روباز در سیستم‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی معرفی کردند. در این تحقیق با استفاده از استانداردها و تحقیقات پیشین انجام شده بر روی عملکرد هیدرولیکی کانال‌ها، منحنی جریمه سرعت جریان و ارتفاع آزاد آب در کانال‌ها تعریف شده است. برای هر یک از اجزای سیستم، شاخص عملکرد مشخص شده و سپس با روابط ارائه شده، قابلیت اطمینان کل سیستم نیز تعیین شد. این روش پیشنهادی بر روی بخشی از شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی تهران در منطقه سیل برگردان غرب اعمال شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سیستم مورد مطالعه از نظر ارتفاع آزاد دارای کارایی بسیار خوبی است و کارایی هیدرولیکی سیستم از نظر سرعت نیز در سطح بالایی قرار دارد.

رادمهر و عراقی‌نژاد (۱۳۹۵) نقشه‌های خطرپذیری سیلاب شهر تهران را به‌منظور اتخاذ تصمیمات دقیق‌تر در مدیریت سیلاب شهری با استفاده از ترکیب روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی[۴] تهیه کردند. با توجه به نقشه نهایی خطرپذیری سیلاب، مناطق جنوب شرقی محدوده مورد مطالعه درجه خطرپذیری بالایی دارند.

کریمی، غضنپور و علیمرادی‌پور (۱۳۹۷) با استفاده از مدل AHPFuzzy مبتنی بر تحلیل آماری، شاخص‌های جغرافیایی موثر بر کم‌وکیف آب‌گرفتگی معابر در مناطق چهارگانه شهر کرمان در طی سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۵ را شناسایی کردند. معیارهای درنظر گرفته شده در این پژوهش عبارتند از عوامل جوی (مدت بارش، زمان بارش، شدت بارش و میزان بارش)، عوامل محیطی (شیب، توپوگرافی، نفوذپذیری خاک) و عوامل انسانی (شکل فیزیکی آبراهه‌ها، عرض خیابان‌ها، وجود یا نبود شبکه زهکش فرعی و پوشش اراضی شهری). سپس اطلاعات مربوط به نظر کارشناسان، با پرسشنامه جمع‌آوری شده و در نهایت با استفاده از ArcCN-Runof در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌های خطر رواناب در مناطق چهارگانه شهر ترسیم شده است.

زندسلیمی و همکاران (۱۳۹۷) پهنه‌بندی سیل را برای محدوده سیل‌برگردان غرب و با استفاده از مدل هیدرولیکی MIKEFLOOD برای دوره بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله ارائه دادند. از اطلاعات به‌دست آمده از این پژوهش می‌توان در مشخص نمودن مناطق بحرانی که نیازمند اقدامات مدیریتی هستند استفاده نمود. رشید (۱۳۹۸) نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در منطقه سه، شهر تهران را با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله‌مراتبی تهیه کرده است. در این تحقیق از پارامترهای شیب، ارتفاع، فاصله از آبراهه، فاصله

از فضای سبز و کاربری اراضی در ارزیابی خطر سیلاب شهری استفاده شده است.

شریعت و همکاران (۱۳۹۸) روشی برای مدیریت ریسک شبکه‌های جمع‌آوری آب‌های سطحی ارائه دادند. این روش با استفاده از مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار Autodesk SSA انجام شده است. لایه‌های در نظرگرفته شده در وزن‌دهی شامل لایه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، اجتماعی، ترافیکی، زیست‌محیطی، سیمای شهری و سازه‌ای و زیرلایه‌های لازم است. استخراج وزن لایه‌ها با استفاده از نظرات متخصصان امور شهری و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره AHP انجام شده است. در نهایت نیز نقشه ریسک آبگرفتگی در کانال‌ها با استفاده از قابلیت‌های GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS و SAW به‌صورت مکانی تهیه شده است. اجرای روش ارائه شده در این پژوهش در مورد کانال‌های درجه ۳ و ۴ منطقه ۱۱ شهرداری تهران نشان‌دهنده ریسک آب‌گرفتگی زیاد و خیلی زیاد برای ۶ تا ۹ درصد طول کل کانال است.

Ouma and Tateishi (2014) روشی برای تهیه نقشه سیلاب مبتنی بر اظهارات مردم و همچنین برآورد خطرات سیل در مناطق در حال رشد شهری ارائه دادند. آن‌ها در این پژوهش برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مناطق در معرض خطر سیل، از روش تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی و تکنیک‌های تجزیه و تحلیل در سیستم اطلاعات جغرافیایی برای شهرداری الدوریت در کنیا استفاده کردند. در این روش برای تهیه نقشه آسیب‌پذیری سیل، از لایه‌های توزیع باران، ارتفاع، شیب، شبکه و تراکم زهکشی، کاربری اراضی/ پوشش زمین و نوع خاک استفاده شده است.

Siddayao et al. (2015) با ترکیب روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی با GIS ابزاری را برای ارزیابی خطرات سیل در مناطق مرکزی شهر توگوگارائو ارائه دادند. این ابزار پس از جمع‌آوری اطلاعات توپولوژیک در مورد شهر و همچنین ارزیابی معیارهای متخصصین در مورد خطرات سیل و سپس استفاده از تکنیک‌های منطق فازی مبتنی بر AHP در نرم‌افزار متن‌باز QGIS توسعه یافته است.

Garofalo et al. (2016) با استفاده از یک شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی مجهز به حسگرها و یک سری دریچه متحرک الکترونیکی، یک سیستم غیرمتمرکز زمان- واقعی بر اساس یک الگوریتم مبتنی بر شایعات[5] ارائه دادند که عملکرد سیستم جمع‌آوری رواناب و نرخ شکست را نشان می‌دهد. هدف از این طرح، بهره‌برداری موثر از ظرفیت ذخیره‌سازی شبکه سیلابروی شهری به منظور کاهش سیلاب است.

Abou Rjeily et al. (2017) ابزاری با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر NARX، برای هشدار سریع به مدیران سیستم زهکش شهری در برابر خطرات سیل توسعه دادند. به این منظور از داده‌های بارش در چند ایستگاه و مقادیر عمق جریان در منهول‌های بحرانی برای آموزش شبکه استفاده کردند. به منظور شناسایی منهول‌های بحرانی نیز از نرم‌افزار EPA-SWMM استفاده شد. کاربرد سیستم پیش‌بینی سیل در سیستم زه‌کشی محیط دانشگاه لیل نشان می‌دهد که شبکه عصبی آموزش دیده NARX هم در حوادث جزئی و هم در طوفان‌های شدید عملکرد خوبی داشته است.

Dash and Sar (2020) با تجزیه و تحلیل چند معیاره در منطقه الله‌آباد هند، مناطق احتمالی خطر سیل را شناسایی کردند. در این مطالعه برای تصمیم‌گیری در مورد روابط پیچیده از روش تجزیه و تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده است. به این ترتیب با هم‌پوشانی هشت معیار جریان تجمعی[6]، ظرفیت تخلیه[7]، ارتفاع، سطح آب زیرزمینی، کاربری اراضی، ضریب رواناب، شیب و زمین‌شناسی، شاخص خطر تهیه شده که با نقشه تاریخی پهنه سیل که از داده‌های سنجش از دور به‌دست آمده است مطابقت دارد.

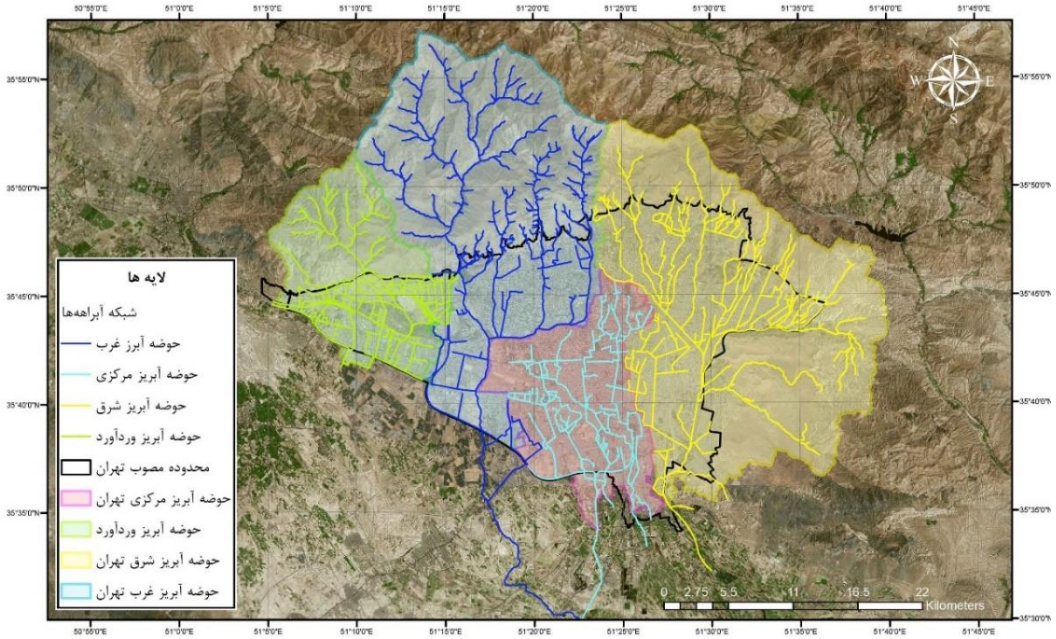
با بررسی مطالعات و پژوهش‌های پیشین، دیده می‌شود که ارزیابی وضعیت شبکه زه‌کش شهری عمدتاً براساس شاخص‌های خطر انجام شده است، حال آن‌که شاخص‌های آسیب‌پذیری نقش بسیار مهمی در تعیین اولویت‌های گلوگاهی از نظر خطر سیل و خطرات جانی دارند، چرا که در دو گلوگاه با شاخص خطر یکسان، گلوگاهی که آسیب‌پذیری بیشتری دارد در اولویت بالاتر قرار می‌گیرد. از این‌رو در پژوهش حاضر علاوه بر شاخص‌های خطر، شاخص‌های آسیب‌پذیری اجتماعی و اقتصادی جدید تعریف و در مجموعه شاخص‌های رتبه‌بندی درنظر گرفته شده است. علاوه‌بر این، پژوهش‌های پیشین در شهر تهران در محدوده یک یا چند منطقه و در بردارنده شبکه فرعی سیلابروها بوده است؛ در حالی‌که ریسک مخاطرات جانی سیلاب در مناطق شهری از سیلابروهای اصلی ناشی می‌شود. لذا برای مطالعه وضعیت شبکه از نظر خطر سیل و بررسی ایمنی شهروندان در برابر سیلاب، مسیل‌ها و سیلابروهای اصلی شهر باید ملاک عمل درنظر گرفته شود. پژوهش حاضر با توجه به آن‌که از یک رویکرد ثابت و بر مبنای مدل‌سازی هیدرولیکی یک‌پارچه کل سامانه برای اولویت‌بندی تمامی گلوگاه‌های شبکه اصلی هدایت سیلاب شهر تهران استفاده می‌کند، امکان قیاس گلوگاه‌ها در زیرحوضه‌های مختلف شهر را فراهم می‌آورد، موضوعی که به سادگی با تجمیع نتایج

پژوهش‌های جداگانه امکان‌پذیر نیست.

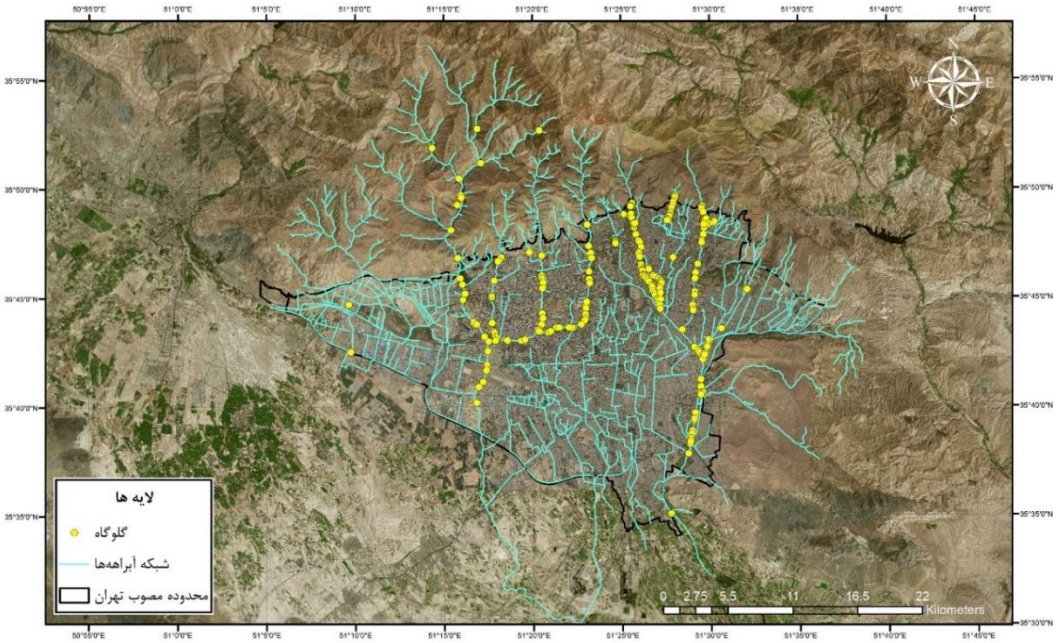
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه موردی

چهار حوضه آبریز مستقل شهر تهران در شکل نشان داده شده است. شبکه آبراهه‌های موجود بر روی هر حوضه نیز به تفکیک در این شکل دیده می‌شود. مجموعه نقاط آسیب‌پذیر و حادثه‌خیز موجود بر روی هر شبکه آبراهه، از گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای تهران (سال ۱۳۹۴)، شهرداری تهران (سال ۱۳۹۴) و موسسه تحقیقات آب (سال ۱۳۹۰) استخراج شده است. موقعیت این گلوگاه‌ها را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد.



شکل ۱- حوضه آبریز شهر تهران و چهار زیرحوضه اصلی آن



شکل ۲- موقعیت گلوگاه‌ها در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران

به‌منظور ارزیابی و اولویت‌بندی نقاط آسیب‌پذیر و حادثه‌خیز در سرشاخه‌های کوهستانی و شهر تهران، تعریف معیارهایی برای تعیین اهمیت مناطق تحت تأثیر سیلاب، ضروری است. در این راستا، پنج شاخص ۱) تمرکز جمعیتی، ۲) تراکم و تنوع کاربری‌ها، ۳) متوسط درصد پرشدگی کانال/ رودخانه (در سیلاب‌های مختلف) و ۴) درجه کانال سیلابرو یا رودخانه (در روش هورتون)

و ۵) سرعت در کانال/ رودخانه درنظر گرفته شد و شاخص ریسک هر گلوگاه با استفاده از روش مجموع ساده وزنی به‌دست آمده است. وزن هر شاخص نیز با استفاده از مقایسه زوجی و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی به‌دست آمده است. مراحل انجام پژوهش در روندنمای شکل نشان داده شده است.

برای تعیین مقادیر شاخص‌های ارائه شده در بالا (برای هر گلوگاه) نیاز به دانستن مقادیر عمق و سرعت جریان در دوره بازگشت‌های مختلف، درجه رودخانه/ کانال در محل گلوگاه و اطلاعات جمعیتی و کاربری اراضی در حاشیه این گلوگاه‌ها است. پس از تهیه لایه‌های اطلاعاتی فوق در محیط GIS، براساس وزن‌های به‌دست آمده از روش AHP، لایه‌ها ترکیب شده تا اولویت‌بندی نقاط حساس و آسیب‌پذیر حوضه تعیین شود. لازم‌به ذکر است که تمامی شاخص‌های فوق پیش از استفاده در اولویت‌بندی براساس بزرگترین مقدار به‌دست آمده از بین نقاط آسیب مختلف استاندارد شده است.

۲-۲- شاخص تمرکز جمعیتی

تمرکز جمعیت بیشتر در اطراف گلوگاه، ریسک بالاتری را در شرایط سیلابی به‌همراه دارد. از این‌رو شاخص تمرکز جمعیتی برای منعکس نمودن این موضوع انتخاب شده است. اطلاعات جمعیتی در نواحی اطراف گلوگاه‌ها و بازه‌های حساس شناسایی شده برای محاسبه این شاخص مورد نیاز است. در این پژوهش اطلاعات جمعیتی تهران در سال ۱۳۹۵ از طریق مکاتبه و درخواست اطلاعات از مرکز آمار ایران دریافت شده است. برای محاسبه شاخص تراکم جمعیتی، یک دایره به شعاع ۱۰۰ متر از هر گلوگاه ترسیم شده و تعداد جمعیت قرار گرفته در داخل آن محاسبه شده است (به‌صورت مجموع نسبت مساحت قطاع کاربری موجود در شعاع ۱۰۰ متری به مساحت کل کاربری ضرب در کل جمعیت کاربری)؛ در نهایت جمعیت قرارگرفته در حاشیه هر گلوگاه به بیشینه موجود تقسیم شده تا مقدار استاندارد برای هر کدام محاسبه شود. شکل ۴ این شاخص را برای ۲۴۳ گلوگاه موجود نشان می‌دهد. در رابطه با فاصله انتخاب شده در اطراف گلوگاه لازم‌به ذکر است که این فاصله برای مقایسه نسبی مقادیر شاخص‌ها در گلوگاه‌ها نسبت به یکدیگر است و شاخصی مطلق نیست. از این‌رو افزایش یا کاهش این فاصله تفاوت معناداری در مقایسه گلوگاه‌ها از نظر شاخص مورد استفاده ایجاد نمی‌کند.

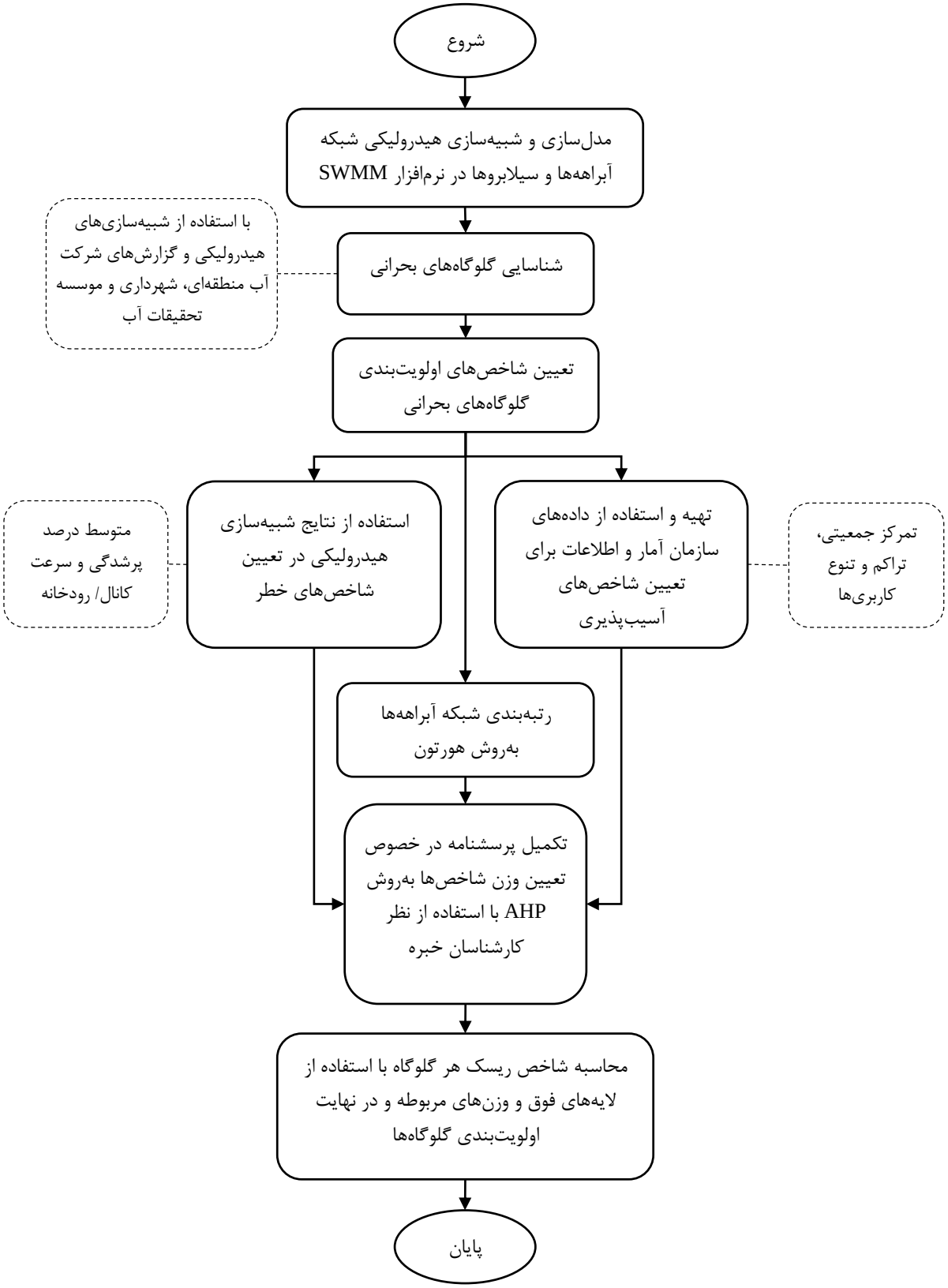
۲-۳- شاخص تراکم و تنوع کاربری‌ها

تراکم و تنوع بیشتر کاربری‌ها در اطراف گلوگاه، ریسک بالاتری را در شرایط سیلابی به دنبال دارد. به این ترتیب با محاسبه شاخص تراکم و تنوع کاربری‌ها می‌توان مناطق با ریسک بالاتر را شناسایی نمود. در واقع شاخص تراکم و تنوع کاربری میزان آسیب‌پذیری اجتماعی و اقتصادی را در اطراف هر گلوگاه نشان می‌دهد. هر چه این شاخص کمتر باشد به این معنی است که میزان آسیب‌پذیری (اجتماعی و اقتصادی) در این ناحیه کمتر است. برای محاسبه این شاخص به اطلاعات کاربری اراضی در حاشیه گلوگاه‌ها نیاز است. این اطلاعات از طریق مکاتبه و درخواست اطلاعات از مرکز آمار ایران دریافت شده است. این اطلاعات دربردارنده فایل نقطه‌ای موقعیت هر کاربری در سطح شهر است (این نقشه به همراه موقعیت گلوگاه‌های بحرانی در شکل ۵ نشان داده شده است). بدین ترتیب می‌توان تراکم کاربری‌ها در اطراف هر گلوگاه را با تعیین یک فاصله مشخص به‌دست آورد. از طرفی با توجه به درجات اهمیت متفاوت هر کاربری لازم است تا درجه اهمیت آن هم در محاسبه شاخص لحاظ شود. در "راهنمای تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب" (سازمان برنامه و بودجه، ۱۳۹۹) کاربری‌های مختلف با توجه به میزان حساسیت آن‌ها به آسیب‌پذیری طبقه‌بندی شده‌اند.

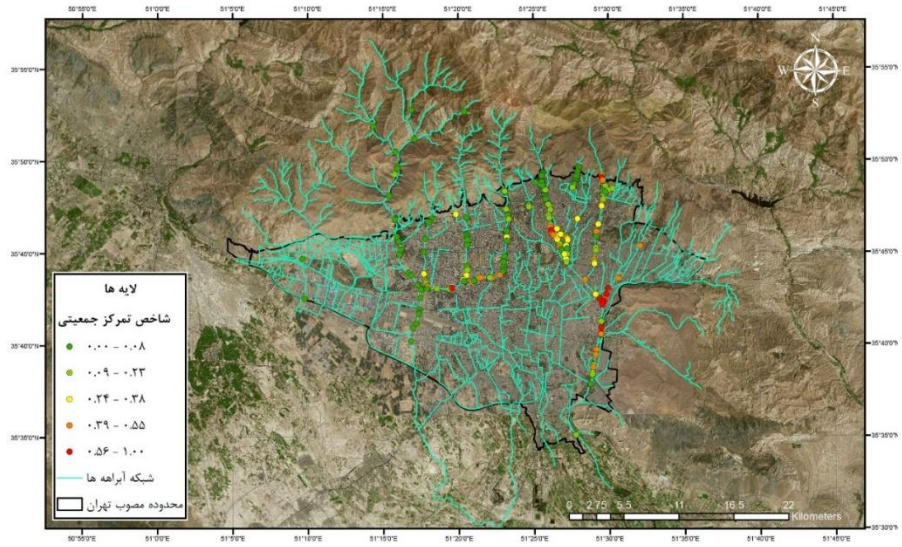
از این‌رو ابتدا برای هر نوع کاربری موجود، با توجه به راهنمای مذکور، یک درجه در نظر گرفته می‌شود (درجه‌های اهمیت مورد استفاده در این تحقیق مطابق جدول ۱ است). سپس مشابه شاخص قبل، یک دایره به شعاع ۱۰۰ متر به مرکزیت گلوگاه ایجاد شده و کاربری‌هایی که در این محدوده قرار می‌گیرند، انتخاب می‌شوند. در نهایت با جمع مقادیر درجه اهمیت هر کاربری برای تمامی عوارض قرار گرفته در محدوده ترسیمی و تقسیم آن‌ها به مقدار بیشینه، شاخص تراکم و تنوع کاربری‌ها محاسبه می‌شود. شکل ۶ توزیع مکانی این شاخص را برای گلوگاه‌های موجود نشان می‌دهد.

جدول ۱- درجه اهمیت هر نوع کاربری (متناسب با جمعیت مستقر)

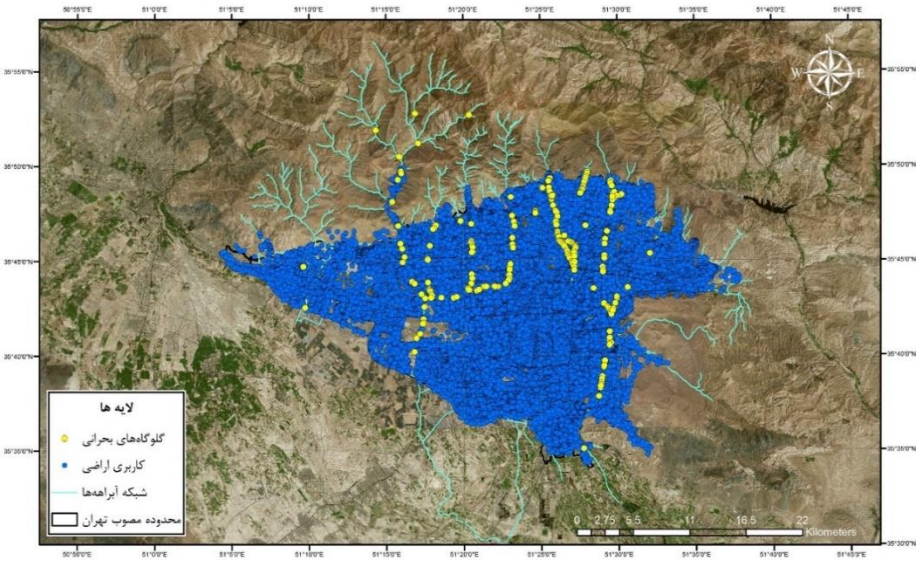
نوع کاربری	کانال	مسیل	رودخانه	حسینیه	جاده	آزادراه/ بزرگراه	میدان	مسیر مترو	خیابان	بلوار	مسجد	کوچه	مکان	محله	منطقه	هنرستان	بانک	مترو	راه آهن	درمانگاه	بیمارستان
درجه اهمیت	۰	۰	۰	۱	۲	۳	۳	۳	۴	۴	۵	۶	۶	۶	۶	۷	۷	۸	۸	۹	۱۰



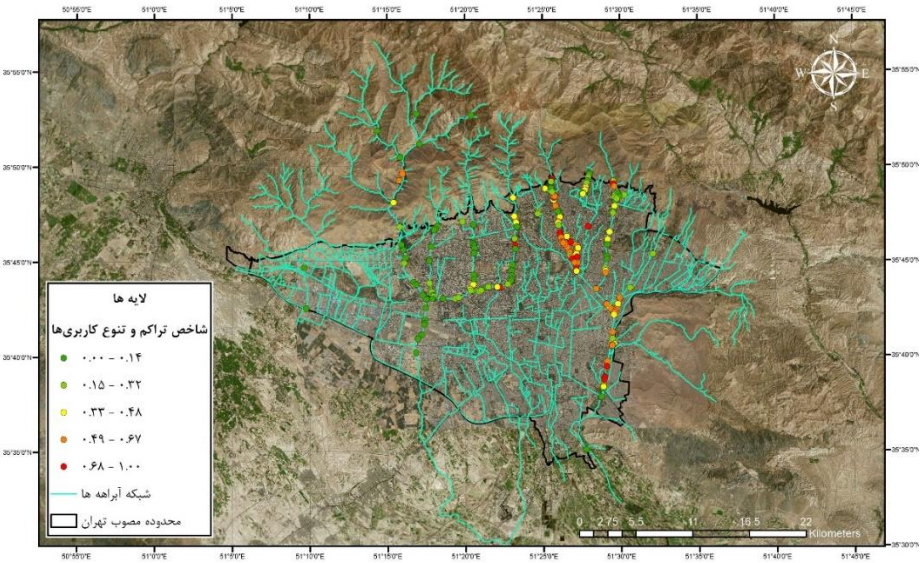
شکل ۳- روندنمای انجام پژوهش



شکل ۴- شاخص تمرکز جمعیتی برای گلوگاه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران مطابق آمار سال ۱۳۹۵



شکل ۵- نقشه موقعیت کاربری اراضی و موقعیت گلوگاه‌های بحرانی

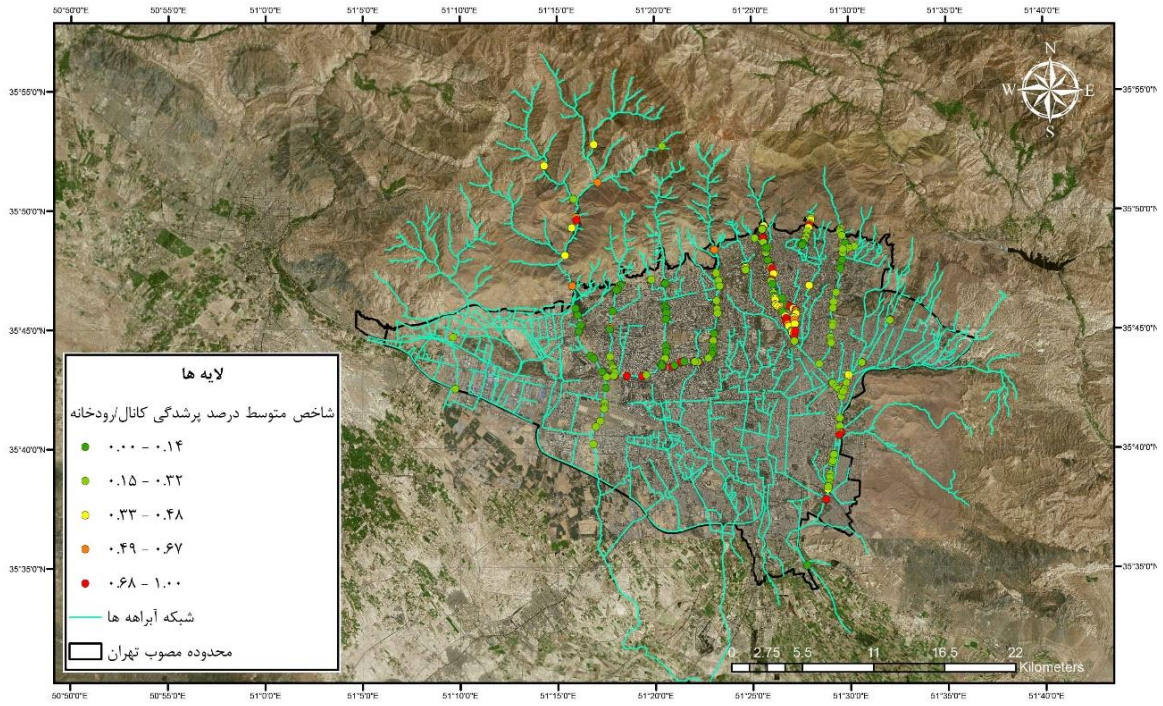


شکل ۶- شاخص تراکم و تنوع کاربری‌ها در حاشیه گلوگاه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران مطابق آمار سال ۱۳۹۵

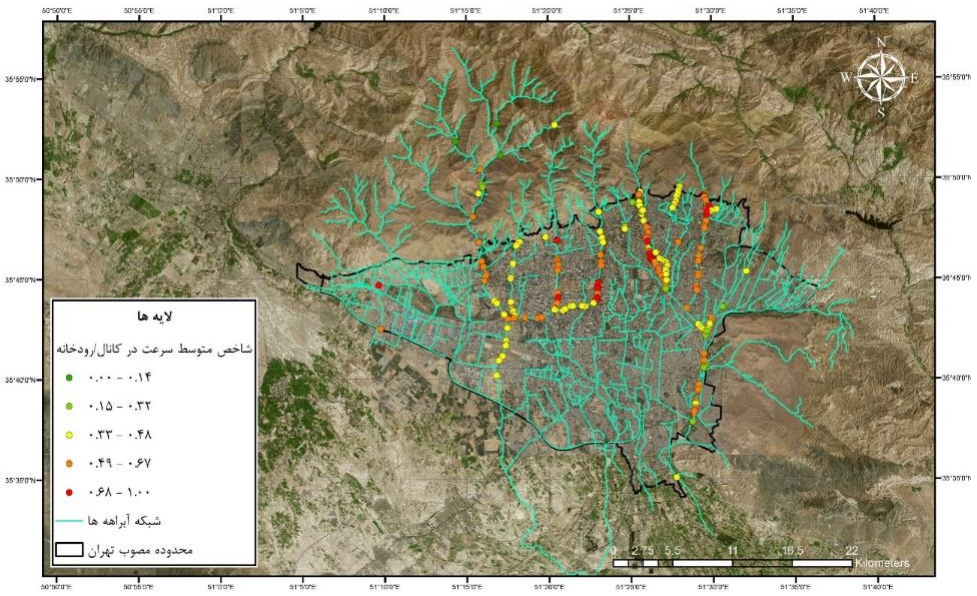
۲-۴- شاخص‌های متوسط درصد پرشدگی و سرعت در کانال/ رودخانه

علاوه‌بر شاخص‌های آسیب‌پذیری مورد بحث در بالا به شاخص‌های خطر نیز برای محاسبه شاخص ریسک در هر گلوگاه نیاز است. در واقع هر چه این دو شاخص برای یک گلوگاه بیشتر باشد، معرف آن است که خطر بیشتری را در شرایط سیلابی به‌همراه دارد. درصد پرشدگی کانال/ رودخانه و هم‌چنین سرعت در کانال/ رودخانه در سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف برای برخی نقاط بحرانی در گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای تهران، شهرداری تهران و موسسه تحقیقات آب موجود بود و استخراج شد. ولی برای برخی دیگر از نقاط حساس شناسایی شده این اطلاعات وجود نداشت. لذا مدل هیدرولیکی کل آبراهه‌ها و کانال‌های شهر تهران با استفاده از مدل EPA-SWMM ساخته شد و سیلاب‌های با دوره بازگشت مختلف (۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله) مدل‌سازی شد تا اطلاعات لازم برای نقاط حساس باقیمانده استخراج شود. نقشه شاخص‌های متوسط درصد پرشدگی و سرعت در کانال/ رودخانه که از متوسط وزنی درصد پرشدگی در چهار دوره بازگشت فوق به‌دست آمده است، در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر بارش‌های ورودی هر زیرحوزه در این مدل با روش IDW از مقادیر داده‌های ایستگاه‌های اطراف در دوره بازگشت مشخص به‌دست آمده است. توضیح این‌که در مطالعات طرح جامع آب‌های سطحی شهر تهران، پس از تحلیل فراوانی بارش‌های حدی ایستگاه‌های حوضه، یک رابطه کلی شدت-مدت فراوانی ارائه شده است. در این رابطه، شدت یا عمق بارش در هر نقطه مدنظر، تابعی از ارتفاع است. بنابراین براساس رابطه مذکور، برای هر یک از زیرحوضه‌های واقع در هر یک از حوضه‌های چهارگانه تهران، با توجه به ارتفاع مرکز ثقل آن زیرحوضه، بارش طراحی متناسب آن از رابطه مذکور به‌دست می‌آید. در کل تعداد ۱۸۲ زیرحوضه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی/هیدرولیکی وجود داشته است که بزرگی بارش هر کدام با توجه به رابطه مذکور به‌دست آمده است و بدین ترتیب توزیع مکانی بارش در مدل‌سازی لحاظ شده است.

هم‌چنین لازم‌به ذکر است که در تحلیل حساسیت مدل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، پارامترهای عرض معادل، درصد نفوذناپذیری، ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر و مناطق نفوذپذیر، شماره منحنی، عمق ذخیره کاهش‌یافته در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر بدون ذخیره کاهش یافته درنظر گرفته شدند. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که در زیرحوضه‌های غیرشهری پارامترهای شماره منحنی، ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر و درصد مناطق نفوذناپذیر و در زیرحوضه‌های شهری پارامترهای عرض معادل، درصد نفوذناپذیری، ضریب مانینگ مناطق نفوذناپذیر، عمق ذخیره کاهش یافته در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر مهم‌تر از سایر پارامترها بوده و بیشترین تأثیر را در خروجی داشتند و از این‌رو در کالیبراسیون مدل مورد استفاده قرار گرفتند.



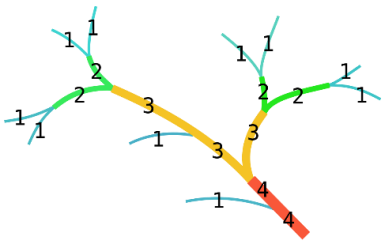
شکل ۷- شاخص متوسط درصد پرشدگی کانال/ رودخانه در گلوگاه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران



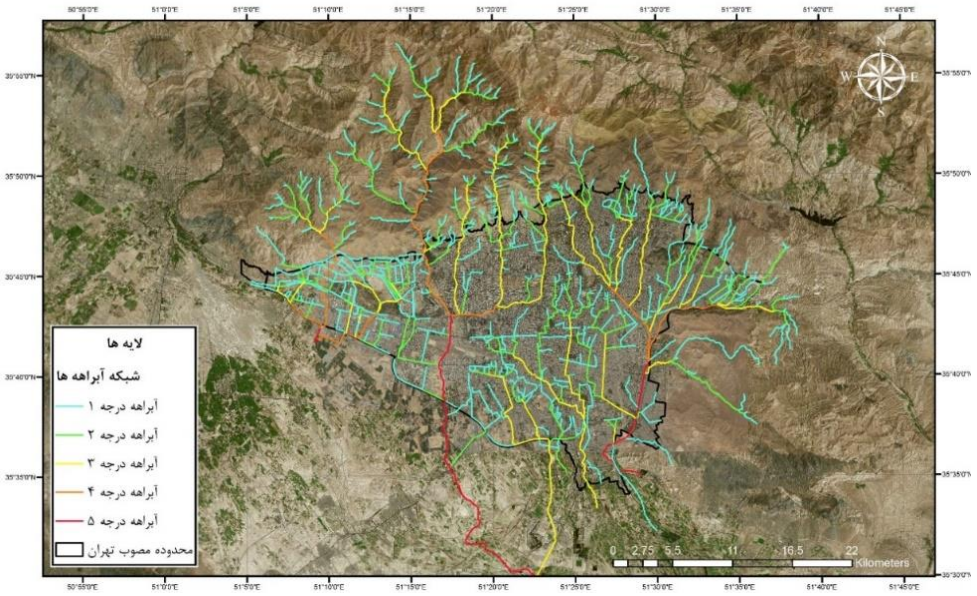
شکل ۸- شاخص سرعت متوسط در کانال/ رودخانه در گلوگاه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران

۲-۵- درجه کانال سیلابرو یا رودخانه

در دو کانال با سرعت جریان برابر، کانالی که عمق جریان بیشتری را دارا باشد، خطر بیشتری دارد. از طرفی شاخص درصدپرشدگی انتخاب شده تابعی از ابعاد کانال بوده و نمی‌تواند موضوع عمق جریان را به خوبی نشان دهد. ضمناً کانال‌های قرارگرفته در پایین‌دست، دبی جریان بیشتری را نسبت به سرشاخه‌ها از خود عبور می‌دهند و طبیعتاً عمق جریان بیشتری هم دارند. از این‌رو لایه درجه کانال سیلابرو یا رودخانه بر اساس روش هورتون در هیدرولوژی و در محیط GIS برای کل آبراهه‌های حوضه آبریز شهر تهران تهیه شده است. در این روش سرشاخه هر آبراهه رتبه یک را دارا است. از اتصال دو رودخانه درجه یک، یک رودخانه درجه دو به‌وجود می‌آید. رودخانه درجه دو زمانی به رودخانه درجه سه تبدیل می‌شود که حداقل یک رودخانه با درجه دو به آن بپیوندد و به‌همین ترتیب تا انتهای آبراهه‌های حوضه، رتبه‌بندی انجام می‌شود (مطابق شکل ۹). شکل ۱۰ نقشه رتبه‌بندی آبراهه‌های حوضه آبریز تهران را نشان می‌دهد.



شکل ۹- نحوه درجه‌بندی رودخانه به‌روش هورتون



شکل ۱۰- درجه آبراهه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران به‌روش هورتون

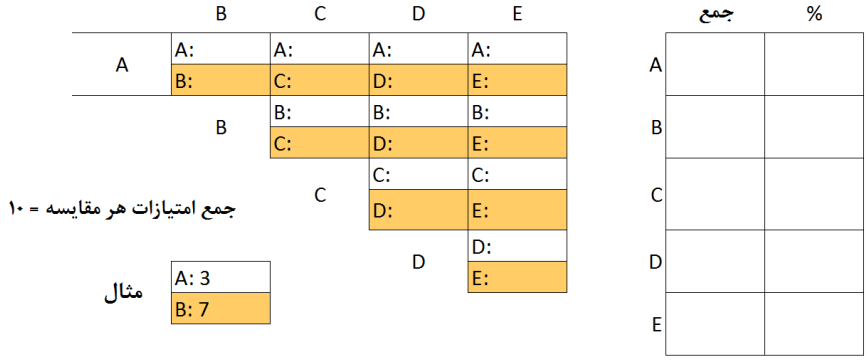
۲-۶- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

این روش اولین بار توسط ساعتی در دهه ۱۹۷۰ بیان شد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در هنگامی که عمل تصمیم‌گیری با چند گزینه رقیب و معیار تصمیم‌گیری روبرو است می‌تواند استفاده شود. معیارهای مطرح شده می‌توانند کمی و کیفی باشند. اساس این روش تصمیم‌گیری بر مقایسه‌های زوجی است. تصمیم‌گیرنده با فراهم آوردن درخت سلسله مراتبی تصمیم که عوامل مورد مقایسه و گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم را نشان می‌دهد آغاز می‌کند. سپس یک سری مقایسه‌های زوجی انجام می‌شود. این مقایسه‌ها وزن هر یک از گزینه‌ها را در مقایسه با گزینه‌های رقیب مورد ارزیابی در تصمیم، نشان می‌دهد. در نهایت منطق فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به گونه‌ای ماتریس‌های حاصل از مقایسه‌های زوجی را با یکدیگر تلفیق می‌سازد که تصمیم بهینه به‌دست آید. این روش شامل چند مرحله است (Saaty, 1984):

- شناسایی گزینه‌های مختلف پیش روی تصمیم‌گیرنده؛
- تعیین معیارهایی برای اولویت‌بندی این گزینه‌ها یا عواملی که بر میزان حساسیت اثرگذارند؛
- اولویت‌بندی معیارها (در صورتی که بیش از یکی باشد)، بدین‌صورت که هر یک از آن‌ها نسبت به هم مقایسه می‌شوند و اعداد مربوط به آن‌ها تخصیص می‌یابند؛
- با تشکیل ماتریس‌های مربوطه و با استفاده از روش تقریبی میانگین حسابی، این معیارها نسبت به هم اولویت‌بندی می‌شوند.

بعد از محاسبه میانگین حسابی و نرمال‌سازی نتایج به‌دست آمده، اعداد نهایی گرد شده و به‌صورت درصد به‌عنوان درصد وزنی هر معیار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این تحقیق، اهمیت نسبی شاخص‌ها با استفاده از روش سلسله مراتبی تعیین شده است. هدف استفاده از این روش تعیین اهمیت نسبی هر یک از نقاط حساس در اطراف رودخانه‌ها و کانال‌های اصلی انتقال سیلاب حوضه آبریز شهر تهران و تعیین سطح خطرزایی برای نواحی در معرض خطر است. نمونه کاربرگ مورد بحث در اخذ نظرات کارشناسی در شکل ۱۱ ارائه شده است. اطلاعات و مشخصات کارشناسان در این نظرسنجی نیز درجدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۱- نمونه کاربرگ برای مقایسه زوجی شاخص‌ها به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

جدول ۲- مشخصات کارشناسان مورد استفاده در نظرسنجی

شماره	سمت	تعداد	سابقه کاری
۱	اساتید دانشگاه	۳	بیش از ۱۵ سال
۲	کارشناسان شهرداری (سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران)	۲	بیش از ۵ سال
۳	دانشجوی دکتری	۱	۴ سال
۴	ای استان تهران‌کارشناسان شرکت آب منطقه	۵	بیش از ۲۰ سال

۳- نتایج

بعد از اخذ نظرات کارشناسان مختلف در خصوص اهمیت نسبی معیارهای پنج‌گانه، اولویت‌بندی نقاط آسیب‌پذیر و اجماع این نظرات، وزن‌های نسبی شاخص‌ها مطابق جدول ۳ به‌دست آمده است. نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی گویای آن است که شاخص تراکم جمعیتی اطراف گلوگاه، بیشترین وزن و درجه رودخانه/ کانال سیلابرو کمترین مقدار را دارد. در رده دوم تا چهارم نیز با فاصله کمی به‌ترتیب تراکم و تنوع کاربری‌های اطراف نقاط گلوگاهی، متوسط درصد پرشدگی رودخانه/ کانال سیلابرو و سرعت در کانال/ رودخانه قرار دارند.

جدول ۳- نتایج وزن شاخص‌ها در روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

شاخص	میانگین
تراکم جمعیتی اطراف گلوگاه	۲۶/۲
تراکم و تنوع کاربری‌های اطراف نقاط گلوگاهی	۲۲/۶
متوسط درصد پرشدگی رودخانه/ کانال سیلابرو	۱۹/۲
درجه رودخانه/ کانال سیلابرو	۱۴/۶
سرعت در کانال/ رودخانه	۱۷/۴

در یک تعریف عام، ریسک احتمال زیان است، و این احتمال به سه عنصر بستگی دارد: خطر، آسیب‌پذیری و در معرض بودن. اگر هر یک از این سه عنصر در ریسک کاهش یا افزایش یابند، ریسک نیز افزایش یا کاهش می‌یابد (Crichton, 1999). علاوه‌بر این، تعاریف زیر برای ریسک در فرهنگ لغت بین‌المللی Webster بیان شده است (Tung et al., 2006):

۱- احتمال از دست دادن، ضرر، آسیب‌دیدگی، تخریب و غیره؛

۲- کسی یا چیزی که خطر یا احتمال نامطلوبی را ایجاد می‌کند: یک عنصر یا عامل خطرناک؛

۳- تلفیق دارایی در معرض خطر و احتمال از دست دادن آن (تعریف سازمان ملل).

محاسبه ریسک سیل در تعریف سوم به‌صورت زیر قابل انجام است:

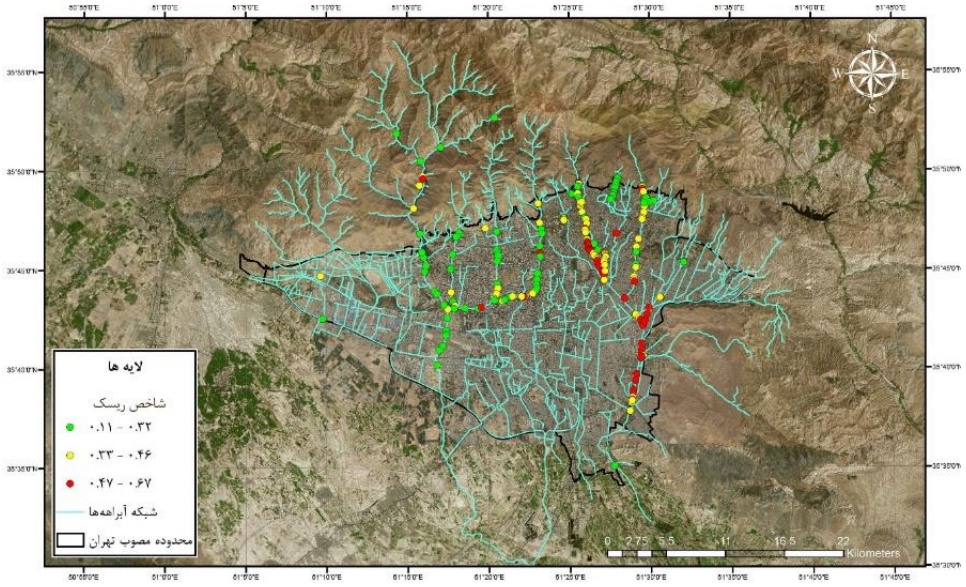
$$Risk\ (\text{خطرپذیر}) = Hazard\ (\text{خطر}) \times Vulnerability\ (\text{آسیب‌پذیری}) \times \text{Exposer}\ (\text{در معرض خطر قرار گرفتن}) \quad (۱)$$

از آن‌جا که در معرض خطر بودن جزء ذاتی آسیب‌پذیری است، می‌توان آن را در درون آسیب‌پذیری درنظر گرفت و به این ترتیب با در نظرگیری شاخص‌های خطر و آسیب‌پذیری مطابق تعریف فوق، شاخص ریسک را محاسبه نمود. در نهایت با ترکیب پنج لایه اطلاعاتی به‌دست آمده برای شاخص‌ها و وزن‌های فوق مطابق رابطه ۲، نقشه توزیع مکانی شاخص ریسک (R) به‌دست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان نقاط آسیب‌پذیر و حادثه‌خیز در سرشاخه‌های کوهستانی و شهر تهران را اولویت‌بندی کرد.

$$R = W_1 \times I_1 + W_2 \times I_2 + W_3 \times I_3 + W_4 \times I_4 + W_5 \times I_5 \quad (۲)$$

که W_1، W_2، W_3، W_4 و W_5: به‌ترتیب وزن شاخص‌های I_1، I_2، I_3، I_4 و I_5 هستند که به‌روش تحلیل سلسله مراتبی به‌دست آمده‌اند.

نقشه توزیع مکانی ریسک در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران مطابق شکل **۱۲** به‌دست آمده است. مشخصات ۲۰ گلوگاه بحرانی اولویت‌دار نیز به‌ترتیب در جدول ارائه شده است. شاخص ریسک محاسبه شده امکان مقایسه گلوگاه‌ها را ازنظر میزان ریسک مورد انتظار نشان می‌دهد. در واقع هر چه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد به این معنی است که آن گلوگاه ازنظر شاخص‌های خطر و شاخص‌های آسیب‌پذیری مقدار بیشتری را داشته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که عمده گلوگاه‌های بحرانی در زیرحوضه شرق تهران و در کانال‌های ابوذر، مقصودبیک و باختر قرار دارند. در اولویت پایین‌تر تمرکز این گلوگاه‌ها در کانال سیل‌برگردان غرب و بعد از آن در زیرحوضه سولقان است. نتیجه این پژوهش می‌تواند در اولویت‌بندی طرح‌های توسعه منابع آب نقش به‌سزایی ایفا کند و با تخصیص صحیح‌تر منابع زمینه مدیریت بهتر را فراهم آورد.



شکل ۱۲- شاخص ریسک در گلوگاه‌های شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران

جدول ۴- مشخصات ۲۰ گلوگاه بحرانی اولویت‌دار بر روی رودخانه‌ها و کانال‌های واقع در حوضه آبریز شهر تهران

ردیف	موقعیت گلوگاه		شاخص متوسط درصد پرشدگی کانال/ رودخانه	شاخص درجه کانال سیلابرو یا رودخانه	شاخص تراکم و تنوع کاربری‌ها در حاشیه گلوگاه	شاخص تمرکز جمعیتی در محدوده گلوگاه	شاخص سرعت در اطراف گلوگاه	شاخص ریسک	رتبه
	X	Y							
1	540921	3955754	1.00	0.60	0.82	0.35	0.64	0.67	1
2	544440	3948170	1.00	1.00	0.53	0.47	0.41	0.65	2
3	539439	3958635	0.49	0.60	0.63	0.71	0.76	0.64	3
4	544407.68	3948154.99	1.00	1.00	0.57	0.52	0.22	0.64	4
5	539679	3958120	1.00	0.60	0.59	0.38	0.73	0.64	5
6	539360	3958885	0.93	0.60	0.56	0.44	0.76	0.64	6
7	539459	3958549	0.94	0.60	0.43	0.66	0.53	0.63	7
8	539429	3958667	0.49	0.60	0.52	0.71	0.76	0.62	8
9	544420.33	3948282.96	0.24	1.00	0.55	0.66	0.59	0.59	9
10	543888.03	3946125	0.25	1.00	0.74	0.44	0.58	0.58	10
11	544535	3951298	0.60	0.80	0.57	0.46	0.51	0.57	11
12	544471	3963909	0.25	0.20	1.00	0.59	0.62	0.57	12
13	544321.6	3951702.26	0.15	0.80	0.57	0.85	0.38	0.56	13
14	542052	3959775	0.70	0.60	0.74	0.30	0.53	0.56	14
15	545107.76	3952836.92	0.40	0.60	0.51	0.73	0.48	0.55	15
16	544431	3949462	0.95	0.80	0.55	0.14	0.53	0.55	16
17	543657.51	3944845.28	0.28	1.00	0.72	0.40	0.47	0.55	17
18	544389.51	3948106.7	0.21	1.00	0.52	0.60	0.49	0.55	18
19	539342	3958955	0.20	0.60	0.79	0.55	0.56	0.55	19
20	539644	3958145	0.44	0.60	0.58	0.44	0.73	0.54	20

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مجموعه نقاط آسیب‌پذیر و حادثه‌خیز موجود بر روی شبکه اصلی جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران، از گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای تهران، شهرداری تهران و موسسه تحقیقات آب استخراج شده است. به‌منظور اولویت‌بندی این نقاط نسبت به سیلاب، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با درنظرگیری پنج شاخص: تمرکز جمعیتی در اطراف گلوگاه، تراکم و تنوع کاربری‌ها در حاشیه گلوگاه، متوسط درصد پرشدگی کانال/ رودخانه (در سیلاب‌های مختلف)، درجه کانال سیلابرو یا رودخانه و سرعت در کانال/ رودخانه، وزن‌های شاخص‌ها به‌دست آمده و با استفاده از روش مجموع ساده وزنی، گلوگاه‌های موجود در شبکه جمع‌آوری آب‌های سطحی شهر تهران برای انجام عملیات بهسازی، اولویت‌بندی شده است. نتایج وزن شاخص‌ها در روش تحلیل سلسله مراتبی نشان می‌دهد که شاخص تراکم جمعیتی اطراف گلوگاه، بیشترین وزن و درجه رودخانه/ کانال سیلابرو کمترین مقدار را دارد. در رده دوم تا چهارم نیز با فاصله کمی به‌ترتیب تراکم و تنوع کاربری‌های اطراف نقاط گلوگاهی، متوسط درصد پرشدگی رودخانه/کانال سیلابرو و سرعت در کانال/رودخانه قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که بر اساس نظر کارشناسان خبره، شاخص‌های آسیب‌پذیری اولویت بالاتری نسبت به شاخص‌های خطر دارند. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تمرکز گلوگاه‌های بحرانی در زیرحوضه شرق تهران و در کانال‌های ابوذر، مقصودبیک و باختر است. در اولویت بعدی تمرکز این گلوگاه‌ها در کانال سیل‌برگردان غرب و بعد از آن در زیرحوضه سولقان قرار دارد.

۵- تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مادی و معنوی دفتر تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای تهران انجام شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از خانم دکتر قائمی و آقای مهندس غفاری، مدیر دفتر مهندسی رودخانه و سواحل، شرکت آب منطقه‌ای تهران، که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

۶- پی‌نوشت‌ها

1- Analytical Hierarchy Process (AHP)
2- Simple Additive Weighting (SAW)
3- Fuzzy AHP

4- Geographic Information System (GIS)
5- Gossip-based algorithm
6- Flow accumulation
7- Draining capability

۷- مراجع

آذری، ب.، و تابش، م.، (۱۳۹۴)، "تعیین شاخص عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های جمع‌آوری آب سطحی"، *پنجمین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری*، اصفهان.

پوریامهر، ر.، (۱۴۰۰)،"آبگرفتگی (امکانات و راه‌کارها)"، *دهمین همایش ملی جغرافیا و محیط‌زیست*، شیروان.

رادمهر، ا.، و عراقی‌نژاد، ش.، (۱۳۹۰)، "اولویت‌بندی زیرحوضه‌های درون شهری واقع درحوضه آبریز شهری تهران به‌منظور مطالعات کنترل سیلاب با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی فازی"، *چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران*، تهران.

رادمهر، ا.، و عراقی‌نژاد، ش.، (۱۳۹۵)، "مدیریت بهینه رواناب شهری با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی"، *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*، ۴۸(۳)، ۲۲۷-۲۴۰.

رشید، ف.، (۱۳۹۸)، "پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در منطقه ۳ شهر تهران با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش تحلیل سلسله مراتبی"، *ششمین کنفرانس جامع مدیریت بحران و HSE*، تهران، ایران.

زندسلیمی، ز.، صالحی‌نیشابوری، ع.ا. و یزدی، ج.، (۱۳۹۷)، "پهنه‌بندی سیلاب در محدوده شهری با استفاده از مدل MIKEFLOOD (منطقه مطالعاتی: سیل‌برگردان غرب تهران)"، *دومین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران*، اصفهان، ایران.

سازمان برنامه و بودجه کشور، (۱۳۹۹)، "راهنمای تهیه نقشه‌های خطرپذیری سیلاب"، ضابطه شماره ۸۲۱، دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا، وزارت نیرو، تهران، ایران.

سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران، (۱۳۹۴)، "گزارش بررسی پتانسیل خطرزایی شبکه اصلی و تاسیسات جمع‌آوری و هدایت آب‌های سطحی"، مطالعات عملیاتی کردن طرح جامع مدیریت آب‌های سطحی شهر تهران، حوضه آبریز شرق تهران.

شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، (۱۳۹۴)، "مطالعه و بررسی نقاط بحرانی سیل در رودخانه‌های شهر تهران"، معاونت حفاظت و بهره‌برداری، دفتر مهندسی رودخانه‌ها و سواحل.

شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، (۱۳۹۹)، "بررسی و ارزیابی روش‌های نوین پیش‌بینی و هشدار سیل و امکان‌سنجی آن در حوضه آبریز شهر تهران"، طرح تحقیقاتی، مجری: دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

شریعت، ر.، روزبهانی، ع.، و ابراهیمیان، ع.، (۱۳۹۸)، " تحلیل ریسک شبکه‌های جمع‌آوری رواناب شهری با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی (مطالعه موردی: منطقه ۱۱ تهران)، *مجله آب و فاضلاب*، ۳۰(۱)، ۱-۱۷.

صالحی، ا.، رفیعی، ی.، فرزاد بهتاش، م.ر.، و آقابابایی، م.ت.، (۱۳۹۲)، " پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از GIS و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعهٔ موردی: تهران)"، *نشریه محیط‌شناسی*، ۳۹(۳) ، ۱۷۹-۱۸۸.

کریمی، ص.، غضنفرپور، ح.، و علیمرادی‌پور، ن.، (۱۳۹۷). مقایسه و تحلیل جغرافیایی خطر آب گرفتگی در معابر شهری (مورد مطالعه: معابر مناطق چهارگانه شهر کرمان)، *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۵(۱)، ۱۷-۳۴.

موسسه تحقیقات آب، (۱۳۹۰)، "گزارش هیدرولیک و پهنه‌بندی سیلاب"، مطالعات مدیریت جامع سیل (IFM)، حوضه آبریز رودخانه کن.

Abou Rjeily, Y., Abbas, O., Sadek, M., Shahrour, I., and Hage Chehade, F., (2017), “Flood forecasting within urban drainage systems using NARX neural network”, *Water Science and Technology*, 76(9), 2401-2412.

Crichton, D., (1999), “The risk triangle”, In: Ingleton, J., (ed.), Natural Disaster Management, Tudor Rose, London, 102-103.

Dash, P., and Sar, J., (2020), “Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index”, *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12620.

Garofalo, G., Giordano, A., Piro, P., Spezzano, G., and Vinci, A., (2017), “A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems”, *Journal of Network and Computer Applications*, 78(C), 30-42.

Ouma, Y.O., and Tateishi, R., (2014), “Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment”, *Water*, 6(6), 1515-1545.

Saaty, T.L., (1984), "The analytic hierarchy process: Decision making in complex environments", *Quantitative Assessment in Arms Control, Springer, Boston, MA*, 285-308.

Siddayao, G.P., Valdez, S. E., and Fernandez, P.L., (2015), “Modeling flood risk for an urban CBD using AHP and GIS”, *International Journal of Information and Education Technology*, 5(10), 748-753.

Tung, Y.K., Yen, B.C., and Melching, C., (2006), *Hydrosystems engineering reliability assessment and risk analysis*, McGrow-Hill, New York.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.