



Research Paper

**Flood Risk Zoning in Urban Areas Using RS, GIS, and Network Analysis Techniques
(Case Study: Mashhad City)**

Bahadur Pasandideh Talemi ¹, Masoumeh Hafez Rezazadeh ^{2*}, Maryam Karimian Bostani ²

¹ Ph. D student of Department of Geography and Urban Planning, Zah. C, Islamic Azad University, Zahedan, Iran.

² Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning, Zah. C, Islamic Azad University, Zahedan, Iran.

Keywords

Zoning, flood relief, RS and GIS techniques, Mashhad city



A B S T R A C T

Flood Zoning is one of the most important tools in flood risk management, as it helps identify high-risk and low-risk areas in terms of flood occurrence. The main objective of this study is flood hazard zoning in the city of Mashhad using Remote Sensing (RS), Geographic Information Systems (GIS), and network analysis techniques. This research is descriptive-analytical in terms of methodology and applied in terms of purpose. Data collection was conducted through library (documentary) studies, as well as gathering statistical and spatial information, including documents, records, observations, and documentation. The required data for this study were collected using the library research method. The statistical population of this research consists of experts and elites in Mashhad, with 20 individuals selected through purposive sampling. For data analysis, (RS), (GIS), and network analysis techniques were employed. The results of this study indicate that the city of Mashhad faces a serious challenge of flood risk, with over 41% of the city's area (13,400 hectares out of a total of 32,487 hectares) classified as highly unsuitable or unsuitable in terms of flood susceptibility. These areas are primarily at high risk of waterlogging and flooding and require urgent measures such as improving drainage systems, runoff control, and construction management. Approximately 34% of the city (11,054 hectares) is in a moderate condition, which could turn into high-risk zones in the event of heavy rainfall or land-use changes. On the other hand, only 12.75% of Mashhad (4,145 hectares) has sufficient flood resilience, mainly consisting of areas with suitable slopes and high permeability. These findings highlight the necessity for integrated flood management, land-use optimization, and watershed management projects in Mashhad, as urban development without environmental considerations could exacerbate flood risks in this metropolitan area.

*Corresponding Author.

Email Adresses: M.hafezrezazadeh@iauh.ac.ir.

Pasandideh Talemi, B., Hafez Rezazadeh, M. and Karimian Bostani, M. (2025). Flood Risk Zoning in Urban Areas Using RS, GIS, and Network Analysis Techniques (Case Study: Mashhad City). *Human Ecology*, 4(12), 1245-1262.



Doi: <https://doi.org/10.22034/he.2025.515963.1083>



پهنه‌بندی خطر سیل خیزی در مناطق شهری با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS و تحلیل شبکه‌ای (مورد مطالعه: شهر مشهد)

بهادر پسندیده طالعی^۱، معصومه حافظ رضازاده^۲، مریم کریمیان بستانی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران.

^۲ دانشیار، گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، واحد زاهدان، دانشگاه آزاد اسلامی، زاهدان، ایران.

واژگان کلیدی

پهنه‌بندی، سیل خیزی،
تکنیک‌های RS و GIS،
شهر مشهد



چکیده

پهنه‌بندی سیلاب یکی از ابزارهای مهم در مدیریت ریسک سیل است که به شناسایی مناطق پرخطر و کم‌خطر از نظر وقوع سیل می‌پردازد. هدف اصلی این مطالعه پهنه‌بندی خطر سیل خیزی در شهر مشهد با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS و تحلیل شبکه‌ای است. این تحقیق از نظر روش پژوهش توصیفی-تحلیلی و به لحاظ هدف کاربردی است. گردآوری داده‌ها، از طریق مطالعات کتابخانه‌ای (اسنادی) و جمع‌آوری اطلاعات آماری و مکانی که شامل اسناد و مدارک، مشاهده و مستندسازی می‌باشد، صورت می‌پذیرد. اطلاعاتی که در این پژوهش مورد نیاز است بوسیله‌ی روش کتابخانه‌ای گردآوری شده‌است. جامعه آماری پژوهش حاضر کارشناسان و نخبگان شهر مشهد می‌باشد که به روش هدفمند، ۲۰ نفر انتخاب شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از روش‌های تکنیک‌های RS و GIS و تحلیل شبکه‌ای استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که شهر مشهد با چالش جدی خطر سیلاب مواجه است، به‌طوری‌که بیش از ۴۱٪ از مساحت شهر (۱۳۴۰۰ هکتار از مجموع ۳۲۴۸۷ هکتار) در وضعیت کاملاً نامناسب و نامناسب از نظر سیل خیزی قرار دارد. این مناطق عمدتاً در معرض خطر بالای آبگرفتگی و سیلاب هستند و نیازمند اقدامات فوری مانند بهبود سیستم‌های زهکشی، کنترل رواناب و مدیریت ساخت‌وسازها می‌باشند. حدود ۳۴٪ از شهر (۱۱۰۵۴ هکتار) نیز در وضعیت متوسط قرار دارد که در صورت بارش‌های شدید یا تغییرات کاربری اراضی، احتمال تبدیل شدن به مناطق پرخطر وجود دارد. از سوی دیگر، تنها ۰۱۲٪ (۷۵٪ از مشهد ۴۱۴۵ هکتار) از ایمنی کافی در برابر سیل برخوردار است که عمدتاً شامل مناطق با شیب مناسب و نفوذپذیری بالاست. این یافته‌ها ضرورت مدیریت یکپارچه سیلاب، اصلاح کاربری اراضی و اجرای پروژه‌های آبخیزداری در مشهد را آشکار می‌سازد، چراکه توسعه شهری بدون ملاحظات محیط‌زیستی می‌تواند خطر سیل را در این کلان‌شهر تشدید کند.

ارجاع به این مقاله: پسندیده طالعی، بهادر، حافظ رضازاده، معصومه و کریمیان بستانی، مریم. (۱۴۰۴). پهنه‌بندی خطر سیل خیزی در مناطق شهری با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS و تحلیل شبکه‌ای (مورد مطالعه: شهر مشهد). اکولوژی انسانی، ۴(۱۲)، ۱۳۴۵-۱۲۶۲.

۱. مقدمه

مخاطرات طبیعی با ایجاد اختلالی وسیع در فعالیت‌های عادی و درهم‌شکستن انگاره‌های متعارف زندگی همراه هستند که به از بین رفتن تعادل عملکردی و نظم منجر می‌شود (Ostrowska & Mazur, 2015; Davies et al, 2018). بخش عمده مخاطرات طبیعی مرتبط با فرآیندهای ژئومورفولوژیکی ناشی از خطرات ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و اتمسفری است (مختاری، ۱۳۸۵). یکی از بزرگ‌ترین و رایج‌ترین اشکال مخاطرات طبیعی سیلاب می‌باشد و شناخت نواحی مستعد وقوع سیلاب، از اقدامات اساسی در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی توسعه‌ای محسوب می‌گردد (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۲). سیلاب عبارت است از بالا آمدن ناگهانی آب رودخانه‌ها و یا جریان آبی تند و بیشتر ویرانگر که به‌طور ناگهانی اتفاق می‌افتد (Rinat et al., 2018). سیلاب، پدیده‌ای پیچیده است (Cao et al., 2016) که به خسارات شدید مادی، تلفات انسانی و فرسایش بسیار شدید منجر می‌شود (Farhan and Ayed, 2017). سیلاب شهری، حجم آبی است که از ظرفیت شبکه زهکشی شهر خارج شده، منجر به بروز مشکلات و خسارات زیادی در شهر می‌شود. بیشتر تحقیقات صورت گرفته در سراسر جهان حاکی از افزایش سیلاب‌های شهری، به‌ویژه در کلان‌شهرها است. تمرکز جمعیت در مناطق شهری با توسعه شهرها و تغییر چهره طبیعی زمین سبب افزایش سطوح نفوذناپذیر و تغییر چرخه هیدرولوژی شده است (باقلانی و همکاران، ۱۳۹۸). خسارات اقتصادی-اجتماعی زیاد، تلفات انسانی، تخریب گسترده و ایجاد شرایط زندگی در حال تهدید بخشی از آسیب‌هایی است که سیل که در شهرها به وجود می‌آورد (Turgut & Tefvik, 2012). در زمینه تلفات انسانی ناشی از بلایای طبیعی می‌توان گفت که نیمی از مرگ‌ومیرها در اثر سیل رخ می‌دهد (FitzGerald et al., 2010; Lee & Vink, 2015). در این زمینه، در فاصله ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۵ سیلاب‌ها جان ۵۹۰۹۲ نفر را در سرتاسر جهان گرفته‌اند (Haynes et al., 2017) و طی یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۰-۲۰۰۹)، ۵۳۹۸۱۱ نفر در اثر این فاجعه مرگبار جان خود را از دست داده‌اند (Salvati et al., 2018). امروزه افزایش جمعیت، پیشرفت علم و گسترش تأسیسات صنعتی و کمبود مکان برای ساخت و ساز، خصوصاً در کلان‌شهرها، باعث شده تا تغییرات شدیدی در مورفولوژی حوزه‌های آبخیز ایجاد شود. تجاوز به حریم رودخانه‌ها، مسیل‌ها و آبراهه‌ها، باعث تغییر الگوی زهکشی طبیعی و جاری شدن جریان‌های بیش از ظرفیت آبراهه‌ها و مسیل‌های شهری می‌شود. این مسأله منجر به تشدید خطر سیل خیزی و آب گرفتگی معابر و افزایش هزینه‌های نگهداری شهر شده و خسارات احتمالی جانی و مالی را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده است (باقلانی و همکاران، ۱۳۹۸).

همچنین افزایش شهرنشینی و تغییر در شیوه زیست و الگوی کاربری اراضی باعث افزایش میزان مشکلاتی مانند بروز سیلاب‌ها به خصوص در مناطق تحت تغییر یعنی شهرها شده و تأثیرات نامطلوبی در هیدرولوژی حوضه آبریز مربوطه می‌گذارد و موجب تشدید سیلاب‌ها، افزایش آلودگی در قسمت پایاب، کاهش جریان‌های پایه و کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌گردد. به بیان دیگر، تحولات هیدرولوژیکی ناشی از شهرسازی و نحوه کاربری اراضی حوضه‌های شهری را می‌توان به اختصار شامل تغییر حجم کل رواناب، تغییر میزان تغذیه ناشی از بارش، تغییر حداکثر آبدهی سیلاب‌ها و تغییر کیفیت آب خلاصه نمود (Ahmadlou et al, 2019). در مناطق شهری ارزیابی خطر سیل هنوز چالش برانگیز است زیرا تجزیه و تحلیل خطر سیل معمولاً در ترکیب اثرات اجتماعی و اقتصادی مشترکاً انجام نمی‌شود، اما منحصراً در ارزیابی خسارت‌های اقتصادی از نظر مالی قابل‌اندازه‌گیری است. مدیریت سیلاب متضمن کاهش اثرات و خطرات است، اما حذف اثرات خطرات تقریباً ناممکن است. دلیل این امر، محدودیت‌های مالی و دانش محدود و اندک ما انسان‌ها است. یکی از راهکارهای کاهش اثرات در برابر مخاطرات، تاب‌آوری است (افسری و شهسواری، ۱۴۰۱).

شهر مشهد با جمعیتی بیش از ۳ میلیون نفر دومین کلان شهر ایران در نیمه جنوب غربی دشت کشف رود، به علت گسترش بر سطح دشت تراکمی و مخروطه افکنه‌های آبرفتی، تحت تأثیر شرایط توپوگرافی، شیب و زهکشی ضعیف، همیشه هنگام بارش‌های شدید، دچار سیلاب‌های ناگهانی یا آبگرفتگی بافت بوده است. با توجه به موقعیت شهر مشهد در حوضه کشف رود، اختلاف ارتفاع در نقاط شمال و جنوب شهر و فرارگیری آن بین آبراهه‌هایی که از کوه‌های بینالود سرچشمه گرفته و به کشف رود منتهی می‌شوند، هنگام بروز سیلاب، در محیط شهری است که دارای ۱۸ مسیل اصلی با جمع طول ۱۲۹۲۹۵ با دبی SM 1240 است

تشدید خطر سیل و آبگرفتگی معابر، منجر به افزایش هزینه‌های نگهداری شهر و خسارات احتمالی جانی و مالی می‌شود. برنامه‌ریزی شهری جامع، از آثار زیان‌بار سیلاب‌های شهری تا حد ممکن جلوگیری کرده است. لذا پهنه‌بندی سطوح شهری به‌دلیل خطرپذیری و وقوع سیلاب شهری را می‌توان بخشی از مراحل پیشگیری و آمادگی یا ترکیب این دو، قبل از وقوع بحران سیلاب دانست. بر این اساس پژوهش حاضر به پهنه‌بندی خطر سیل خیزی در شهر مشهد با استفاده از تکنیک‌های RS و GIS و تحلیل شبکه‌ای پرداخته است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

سیلاب‌ها یکی از بحران‌های طبیعی است که هر ساله در نقاط مختلف جهان و کشور به بروز خسارت‌های جانی و مالی محسوس و نامحسوس فراوان منجر می‌شود (اشتری و همکاران، ۱۴۰۱)؛ جاری شدن سیل بسیاری از نقاط جهان از جمله کشورهای توسعه یافته را تحت تأثیر قرار داده است (Saffari et al., 2020). رخداد این پدیده متأثر از پارامترهای مختلف ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی، اقلیمی، زمین‌شناسی و کاربری اراضی است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۳). گسترش خسارت سیلاب و پیامدهای ناشی از آن اهمیت و لزوم اعمال مدیریت سیلاب‌ها را هرچه بیشتر آشکار می‌سازد (وفایی و همکاران، ۱۴۰۱؛ ذاکری‌نژاد و عیاش، ۱۴۰۳). یکی از مسائل حیاتی برای امنیت عمومی این است که چگونه در طی وقوع سیل، مناطق در معرض آن را تخلیه کرد. به همین دلیل، بسیاری از محققان کشورهای مختلف، نگرانی‌ها و علاقه خود را در این زمینه نشان داده‌اند (Chen et al., 2017). وقوع خطر سیل نتیجه ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی است که درک بهتر، گستره مکانی آن را در محیط‌های مختلف می‌طلبد (Danumah et al., 2016). در همین راستا به منظور مدیریت پدیده سیل لازم است ارزیابی خطر و پهنه‌بندی سطح خطر آن به صورت موردی صورت بگیرد و مجموعه اقدامات لازم برای کاهش اثرات آن و برنامه‌ریزی‌های اضطراری جهت آمادگی قبل از وقوع این پدیده در نظر گرفته شود (Li et al., 2012; Wu et al., 2015). شاید پیشگیری و حذف کامل خطر این پدیده امکان‌پذیر نباشد، اما با پیشرفت تکنولوژی، می‌توان مناطق آسیب‌پذیر در برابر سیل را از طریق مدل‌سازی دو بعدی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در برابر رویدادهای شدید بارندگی شناسایی و تا حدی تأثیر آن را کاهش داد (Rangari et al., 2019; Agrawal, 2020).

در رابطه با موضوع تحقیق حاضر تحقیقاتی به صورت‌های مختلف در داخل و خارج از ایران شکل گرفته که در اینجا به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌گردد: عابدینی و همکاران (۱۴۰۲)، در پژوهشی به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از تکنیک چند معیاره آراس و هیدروگراف واحد (مطالعه‌ی موردی: حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری پل سلطان مشکین‌شهر)، پرداخته‌اند. نتایج مطالعه نشان داد، عوامل شیب، لیتولوژی، کاربری و ارتفاع به ترتیب با مقادیر وزنی؛ ۱۵۶/۱۶۴، ۱۱۸/۰ و ۰/۱۱۶ بیشترین تأثیر را بر ایجاد سیل در منطقه مطالعاتی دارند. ضمناً نتایج نشان داد، زمان لازم برای جریان آب به خروجی از ۰ ثانیه (بارانی که بر خود خروجی می‌بارد) تا ۶۸۰۰۰ ثانیه (در طول ۱۷ ساعت)، متغیر است. در این صورت مناطق صاف و هموار در نزدیکی حوضه با بیشترین زمان و کمترین سرعت و همینطور در مراتع در سمت شمال شرقی با کمترین زمان و بیشترین سرعت به نقطه خروجی ابرخیز می‌رسد. لذا پهنه‌بندی خطر سیلاب، می‌تواند در انجام اقدامات حفاظتی، ابرخیزداری و مدیریتی این حوضه کمک مؤثری را داشته باشد. کمالی و قاسمی (۱۴۰۲)، در پژوهشی به بررسی راهبردهای تاب‌آوری کالبدی مسکن خانوارهای روستایی در برابر سیل در شهرستان درگز، پرداخته‌اند. بر اساس مطالعات اکتشافی اولیه ۱۴ نقطه قوت و فرصت به عنوان مزیت و ۱۸ نقطه ضعف و تهدید به عنوان محدودیت پیش‌روی تاب‌آوری کالبدی مسکن روستایی در مواجهه با سیل شناسایی شد. براساس تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته در ماتریس QSPM در بین استراتژی‌های تدافعی «ارتقای دانش و آگاهی ساکنان از اصول استاندارد ساخت و ساز در نواحی در معرض سیل»، بالاترین امتیاز یعنی ۲۶۳۷ را کسب نموده و به‌عنوان اولین راهبرد انتخاب شده است. نصر و عبدالعظیمی (۱۴۰۱)، در پژوهشی به تحلیل مکانی تاب‌آوری کالبدی کلان شهر شیراز در مقابله با مخاطره‌ی سیل، پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش می‌تواند در فاز پیش‌گیری و آمادگی مدیریت بحران، مد نظر مدیران اجرایی قرار گیرد. وفایی و همکاران (۱۴۰۱)، در پژوهشی به ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل HEC-RAS، پرداخته‌اند. نتایج نشان داد کانال‌های موجود در محدوده مورد مطالعه توانایی انتقال سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲ و ۱۰ ساله را دارد، ولی دوره بازگشت ۲۵،۵۰ و ۱۰۰ ساله به‌علت ارتفاع کم پل‌ها در برخی مقاطع ورودی و محدود شدن مقاطع خروجی، دچار آب‌گرفتگی می‌شود. بر این اساس در محدوده خروجی انتهایی پردیس و کانال آب و برق، به‌دلیل وجود موانع مختلف، سیلاب با دوره بازگشت ۲۵ سال به بالا و در قسمت‌هایی از کانال پژوهش به‌دلیل انحناء مسیل، سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال به بالا ایجاد خسارت می‌کند. افسری و شهسواری (۱۴۰۱)، در پژوهشی به تحلیل فضایی تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی با تأکید بر سیل مطالعه موردی: نواحی منطقه یک شهر تهران، پرداخته‌اند. نتایج شاخص نهایی تاب‌آوری نشان می‌دهد که ناحیه یک بالأخص جنوب و مرکز آن دارای بهترین شرایط بودند. نواحی ۴ و ۵ نیز در مجاورت آن دارای شرایط مناسبی بودند، اما در مقایسه با ناحیه یک میزان کمتری از مساحت آن‌ها در دسته با شرایط مناسب قرار می‌گرفت. به‌طور کلی این سه ناحیه (۱، ۴ و ۵) یک‌قطب به‌هم‌پیوسته را تشکیل داده بودند. بعد از ناحیه ۱، ناحیه ۶ دارای بهترین وضعیت بود. حوزه نفوذ این ناحیه برخلاف ناحیه ۱ یک محدوده به‌هم‌پیوسته را در سایر نواحی تشکیل نداده و صرفاً محدوده ناحیه ۶ را شامل می‌شود. همچنین به‌طور کلی نواحی غربی (۲، ۳، ۷ و ۸) تا حدی دارای وضعیت نامناسب‌تری نسبت به نواحی شرقی بودند. صادقلو و همکاران (۱۴۰۱)، در پژوهشی به تحلیل تأثیر ادراک از خطر بر میزان تاب‌آوری جوامع محلی در برابر سیلاب در روستاهای شهرستان بینالود، پرداخته‌اند. نتایج ارزیابی میزان اثرگذاری ابعاد ادراک خطر بر میزان تاب‌آوری با استفاده از آزمون رگرسیون نشان‌دهنده این است که از بین ابعاد ادراک خطر، بعد شناختی بیشترین اثر را در

تاب‌آوری روستاهای مطالعه‌شده داشته است. زیاری و همکاران (۱۳۹۹)، در پژوهشی به تبیین راهبردهای افزایش تاب‌آوری کالبدی در برابر سیلاب در رودخانه چشمه کیله شهر تنکابن، پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده وجود رابطه منسجم بین ساختار کالبدی در بافت پیرامون رودخانه چشمه کیله شهر تنکابن و افزایش تاب‌آوری کالبدی شهر تنکابن در برابر سیلاب است. بنابراین با کاربست اصول و راهبردهای تدوین‌شده در این مقاله، می‌توان از طریق برنامه‌ریزی، طراحی و اجرای ساختار مناسب بافت پیرامونی رودخانه چشمه کیله، به بهبود عملکرد شهر به هنگام سیل دست‌یافت. چراغی قلعه‌سری و همکاران (۱۳۹۹)، پژوهشی جهت شناسایی مناطق حساس به سیل‌گیری با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در حوضه نکارود به این نتایج دست یافتند که مدل مذکور دقت مناسبی در شناسایی پهنه‌های حساس سیلاب در منطقه مورد مطالعه دارد. سان^۱ (۲۰۲۳)، در پژوهشی به با عنوان "ارزیابی تاب‌آوری شهری و هماهنگی پیوند زیرسیستم در تراکم شهری پکن-تیانجین-هبی" نشان دادند که: (۱) از نظر فضایی، شکاف قابل‌توجهی بین شاخص تاب‌آوری شهرهای استان هبی و پکن-تیانجین، وجود دارد. (۲) به طور کلی، زیرسیستم انعطاف‌پذیری شهری به آرامی در حال افزایش است. شهپری ثانی و همکاران^۲ (۲۰۲۲)، در پژوهشی به ارزیابی تاب‌آوری اجتماعی در برابر مخاطرات طبیعی در سرپل ذهاب، پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که بیش از ۶۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در گروه تاب‌آوری اجتماعی پایین قرار می‌گیرد که به عنوان آسیب‌پذیرترین مناطق طبقه‌بندی می‌شود. ایان^۳ (۲۰۲۱)، در پژوهشی به مدل‌سازی سیل رودخانه‌ای با استفاده از سنجش از دور در برزیل پرداخته است. نتایج مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهد متغیرهای فاصله از رودخانه، توپوگرافی و بارش بیشترین تأثیر را در وقوع سیل در برزیل دارند. سومیا و همکاران^۴ (۲۰۱۵)، در مقاله‌ای با عنوان پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سیل شهری در ساحل جنوب غربی هند با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۵ و مدل‌های هیدرولوژیکی از طریق استفاده از ارزیابی چندمعیاره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی با بهره‌گیری از تصاویر سنجش از دور به این نتیجه دست یافتند که در میان مناطق آسیب‌پذیر، مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا و آسیب‌پذیری بالا جمعاً ۴/۶ درصد از مساحت کل شهر را تشکیل داده‌اند.

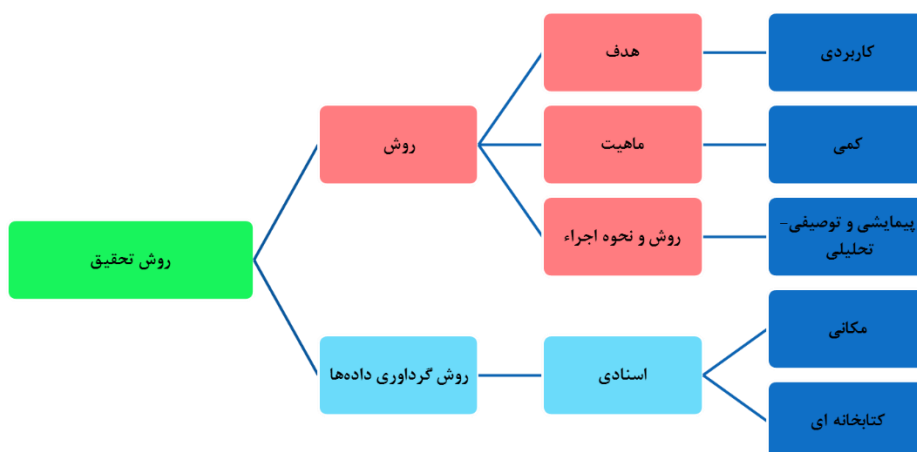
با توجه به موارد ذکر شده، مطالعات گوناگونی در خصوص خطر سیلاب و لزوم پهنه‌بندی سیل به انجام رسیده است. این مسأله تا زمانیکه تمامی ابعاد موضوع شامل روش‌ها و ابزارهای مختلف مورد استفاده و نتایج حاصل از آن‌ها پوشش داده شود ضروری است. همانطور که مشاهده شد مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب هم در حوضه‌های آبخیز شهری و هم در حوضه‌های آبخیز طبیعی انجام شده است. در این گونه مطالعات عمدتاً استفاده به منظور برآورد دبی و پهنه‌بندی سیلاب کاربرد فراوانی دارد و سیستم اطلاعات جغرافیایی نقش مهمی در پیشبرد پژوهش ایفا می‌کند. این تکنیک یکی از متداولترین روش‌ها برای ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب است. لذا در این مطالعه به پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی در شهر مشهد پرداخته شد. در پژوهش حاضر برخلاف سایر پژوهش‌های انجام شده جهت افزایش دقت از تکنیک‌های RS و GIS و روش تحلیل شبکه‌ای استفاده شده است. همچنین، نتایج حاصل این پژوهش می‌تواند در تصمیم‌گیری و اتخاذ روش‌های بهینه و اقتصادی در کاهش خسارت احتمالی سیل در شهر مشهد مورد استفاده قرار گیرد.

۳. مواد و روش‌ها

۳-۱. روش پژوهش

این تحقیق از نظر روش پژوهش توصیفی-تحلیلی و به لحاظ هدف کاربردی است. گردآوری داده‌ها، از طریق مطالعات کتابخانه‌ای (اسنادی) و جمع‌آوری اطلاعات آماری و مکانی که شامل اسناد و مدارک، مشاهده و مستندسازی می‌باشد، صورت می‌پذیرد. اطلاعاتی که در این پژوهش مورد نیاز است بوسیله‌ی روش کتابخانه‌ای گردآوری شده‌است.

1 Sun et al
2 Shahpari Sani et al
3 Ayan et al
4 Sowmya et al
5 Geographic Information System



شکل ۱. طرح شماتیک روش تحقیق (منبع: نویسنده‌گان، ۱۴۰۳)

جامعه آماری پژوهش حاضر کارشناسان و نخبگان شهر مشهد می‌باشد که به روش هدفمند، ۲۰ نفر انتخاب شدند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از منابع معتبر و متنوعی تهیه شده‌اند تا ارزیابی جامعی از خطر سیل در منطقه مورد مطالعه ارائه شود. لایه‌های اطلاعاتی اصلی شامل داده‌های توپوگرافی مدل رقومی ارتفاع با دقت ۱۲.۵ متر از ماهواره (ALOS PALSAR)، نقشه‌های شیب و جهت شیب، داده‌های بارش بلندمدت از سازمان هواشناسی، نقشه‌های کاربری اراضی با تفکیک پوشش گیاهی و سطوح نفوذناپذیر، و لایه‌های هیدروگرافی مانند شبکه رودخانه‌ها و آبراهه‌ها بوده‌اند. این داده‌ها پس از جمع‌آوری، در محیط GIS پیش‌پردازش و همگن‌سازی شدند تا امکان تحلیل یکپارچه فراهم گردد.

برای افزایش دقت تحلیل‌ها، از داده‌های کمکی دیگری نیز استفاده شده است. این داده‌ها شامل اطلاعات زمین‌شناسی منطقه (نوع خاک و واحدهای سنگ‌شناسی)، سوابق تاریخی وقوع سیلاب‌ها، و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌های Sentinel-2 و Landsat برای بررسی تغییرات پوشش زمین در بازه‌های زمانی مختلف بوده‌اند. تمامی داده‌ها با سیستم مختصات UTM و دقت مکانی مناسب زمین‌مرجع‌سازی شدند. ترکیب این داده‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی و سنجش از دور، امکان شناسایی مناطق پرخطر و پیش‌بینی پهنه‌های سیل‌گیر را با دقت قابل قبولی فراهم کرده است.

بررسی وضعیت معیارها و شاخص‌ها در محدوده‌ی مورد مطالعه و طریقه‌ی ارزش‌گذاری استاندارد کردن آن‌ها در این وهله، در قالب لایه‌های اطلاعاتی، هر کدام از شاخص‌ها به رس‌تر مبدل شده‌است. روش ارزش‌گذاری آن‌ها در بازه ۱ تا ۹ برای همه‌ی فضا در عنوان پنج پهنه کاملاً نامناسب تا کاملاً مناسب دسته‌بندی شده‌است. این فواصل و ارزش‌گذاری با در نظر گرفتن نظرات و ضوابط کارشناسان بوده است (جدول ۱).

جدول ۱. شاخص‌ها و نحوه‌ی ارزش‌گذاری شاخص برای آسیب‌پذیری شهر مشهد در برابر سیل

مفهوم	نحوه ارزش‌گذاری		شاخص
	امتیازات	بازه‌ها	
ارتفاع	کاملاً نامناسب	۱	۹۰۰ تا ۱۰۰۰ متر
	نامناسب	۳	۱۱۰۰ تا ۱۱۰۰ متر
	متوسط	۵	۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متر
	مناسب	۷	۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ متر
	کاملاً مناسب	۹	بیشتر از ۱۳۰۰ متر
شیب	کاملاً نامناسب	۱	۰ تا ۵ درصد
	نامناسب	۳	۵ تا ۱۰ درصد
	متوسط	۵	۱۰ تا ۱۵ درصد
	مناسب	۷	۱۵ تا ۲۵ درصد
	کاملاً مناسب	۹	بیشتر از ۲۵ درصد
جهت شیب	کاملاً مناسب	۹	شرق
	مناسب	۷	شمال
	متوسط	۵	شمال غرب
	نامناسب	۳	جنوب غرب

کاملاً نامناسب	۱	جنوب	
کاملاً مناسب	۹	تراکم خیلی کم	تراکم آبراهه
مناسب	۷	تراکم کم	
متوسط	۵	تراکم متوسط	
نامناسب	۳	تراکم زیاد	
کاملاً نامناسب	۱	تراکم خیلی زیاد	
کاملاً نامناسب	۱	۰ تا ۱۰۰۰ متر	فاصله از آبراهه
نامناسب	۳	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر	
متوسط	۵	۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر	
مناسب	۷	۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر	
کاملاً مناسب	۹	بیشتر از ۵۰۰۰ متر	
کاملاً مناسب	۹	باغات	کاربری اراضی
مناسب	۷	اراضی کشاورزی	
متوسط	۵	مرتع	
نامناسب	۳	مرتع با پوشش کم	
کاملاً نامناسب	۱	مناطق شهر و مرتع بدون پوشش	
کاملاً مناسب	۳	فرسایش کم	زمین شناسی
متوسط	۵	فرسایش متوسط	
نامناسب	۷	فرسایش زیاد	
کاملاً نامناسب	۹	فرسایش خیلی زیاد	
کاملاً مناسب	۹	خیلی کم	رطوبت توپوگرافی
مناسب	۷	کم	
متوسط	۵	متوسط	
نامناسب	۳	زیاد	
کاملاً نامناسب	۱	خیلی زیاد	
کاملاً مناسب	۹	۱۸۰ تا ۱۹۰ میلیمتر	بارش
مناسب	۷	۱۹۰ تا ۲۰۰ میلیمتر	
متوسط	۵	۲۰۰ تا ۲۴۰ میلیمتر	
نامناسب	۳	۲۴۰ تا ۲۸۰ میلیمتر	
کاملاً نامناسب	۱	بیشتر از ۲۸۰ میلیمتر	

(منبع: عابدینی و همکاران (۱۴۰۲)؛ کمالی و قاسمی (۱۴۰۲)، وفای و همکاران (۱۴۰۱)؛ افسری و شهناوی (۱۴۰۱)، زیاری و همکاران (۱۳۹۹)، رایان (۲۰۲۱)، سومیا و همکاران، (۲۰۱۵)).

اولویت‌بندی معیارها بر حسب نظر ۲۰ نفر از کارشناسان خبره و اساتید متخصص در مشهد تعیین گردید. به این صورت که هر یک از کارشناسان معیارها را بر اساس اهمیت آن‌ها نسبت به یکدیگر اولویت‌بندی نمودند. سپس با استفاده از روش AHP مقایسه زوجی معیارها نسبت به یکدیگر در نرم‌افزار Expert Choice انجام شد و وزن‌دهی گزینه‌ها نسبت به هم محاسبه و وزن نهایی معیارها تعیین شد. با در نظر گرفتن اینکه روش مقایسه‌ای دو به دو دارای خصوصیتی مناسب من جمله دقت بالا، آسانی در کاربرد و تئوری نیرومندی است، از این روش استفاده شد. پس در این مرحله پرسش‌نامه میان متخصصان و کارشناسان توزیع گردید. در مرحله بعدی، با وارد کردن وزن‌های نسبی درج شده در ماتریس، به نرم‌افزار Expert choice اوزان شاخص‌ها و معیارها با استفاده کردن از روش میانگین هندسی به‌دست آمد و حساب شد. معیار وزن‌دادن به هر کدام از عنصرهای موجود در درون هر لایه میزان مؤثر بودن آن در شهر مشهد است. بعد از وزن‌دادن و انجام دادن محاسبه‌ها در نرم‌افزار Expert Choice و با در نظر گرفتن نرخ سازگاری وزن‌های نهایی ۰.۲ به‌دست آمد که در این روش بیشترین وزن به شاخص‌های نسبت ارتفاع با ۰/۲۶ و کمترین آن نیز به جهت شیب ۰/۳ تعلق گرفته است (جدول ۲).

های شهر مشهد برای تاب آوری سیل جدول ۲. شاخص

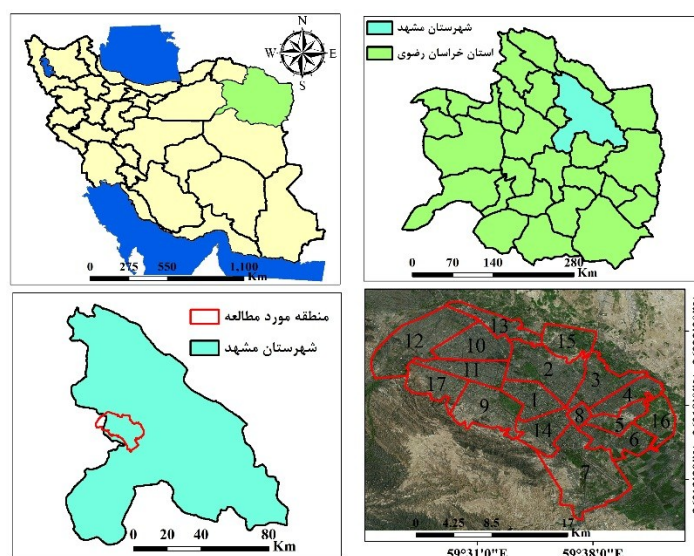
شاخص	وزن لایه‌ها
ارتفاع	۰.۲۶
شیب	۰.۱۴
جهت شیب	۰.۰۳
بارش	۰.۱۹
تراکم آبراهه	۰.۰۸
فاصله از آبراهه	۰.۰۷
زمین‌شناسی	۰.۰۵
کاربری اراضی	۰.۱
رطوبت توپوگرافی	۰.۰۸

(منبع: نتایج تحقیق، ۱۴۰۳)

۳-۲. محدوده مورد مطالعه

شهر مشهد مرکز استان خراسان رضوی، در شمال شرقی ایران قرار دارد. این شهر، در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۷ دقیقه واقع شده است. این شهر به‌عنوان اولین کلان‌شهر مذهبی ایران و دومین آن‌ها در جهان از جایگاه ویژه به‌لحاظ وسعت، جمعیت و اهمیت در مقیاس جغرافیایی و اداری برخوردار است. شهر مشهد دارای ۱۷ منطقه شهرداری است و جمعیتی معادل ۳۰۵۷۶۷۹ نفر را در خود جای داده است.

شهر مشهد با موقعیت جغرافیایی خاص خود در شمال شرق ایران اغلب با بارندگی‌های نامنظم شدید روبرو است. توسعه شهری سریع، کاهش فضای سبز، و افزایش سطوح نفوذناپذیر موجب تشدید رواناب و کاهش جذب آب در خاک شده است. این عوامل در ترکیب با بارش‌های سنگین به‌ویژه در فصل‌های پاییز و بهار، خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی را در مشهد افزایش داده است. مناطق حاشیه شهر و مسیل‌های طبیعی که به دلیل ساخت‌وسازهای غیراصولی مسدود یا تغییر مسیر داده شده‌اند، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر سیل دارند.



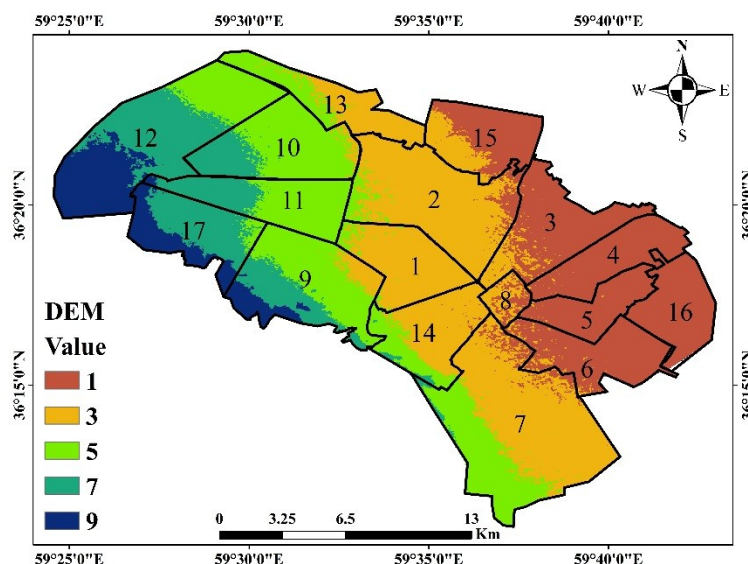
شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه (منبع: نویسنده‌گان، ۱۴۰۳)

۴. یافته‌ها

توپوگرافی یا طبقات ارتفاعی

توپوگرافی شهر مشهد با ترکیبی از ارتفاعات کوهستانی در جنوب و دشت‌های نسبتاً مسطح در مرکز و شمال، الگوی خاصی از خطر سیلاب ایجاد کرده است. مناطق جنوبی مشهد مانند کوهسنگی با شیب‌های تند، باعث ایجاد رواناب سریع به سمت مناطق پایین دست مانند مرکز شهر می‌شوند. حوضه آبریز کشف رود به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل تهدیدکننده، در سال‌های پر بارش باعث آبگرفتگی معابر و خیابان‌های اصلی مانند بلوار وکیل آباد شده است. مدل‌های رقمی ارتفاع تهیه شده از داده‌های مدل رقمی ارتفاع نشان می‌دهد که چگونه اختلاف ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ متر بین ارتفاعات جنوبی و دشت شمالی مشهد، شرایط را برای سیلاب‌های ناگهانی فراهم می‌کند.

مطالعه طبقات ارتفاعی مشهد نشان می‌دهد (شکل ۳)، که بیش از ۶۰ درصد مناطق مسکونی در ارتفاع بین ۹۵۰ تا ۱۰۵۰ متر از سطح دریا قرار گرفته‌اند که همگی در معرض خطر سیلاب قرار دارند. بیشترین ارتفاع منطقه در شمال و کمترین ارتفاع نیز در جنوب و غرب منطقه واقع شده است. تحلیل‌های GIS مبتنی بر مدل رقومی ارتفاع ۵ متری مشهد، ارتباط مستقیمی بین طبقات ارتفاعی پایین و نقاط بحرانی سیلاب در این شهر را تأیید می‌کند. سیلاب‌های تاریخی مشهد مانند سیل سال ۱۴۰۰، عمدتاً در مناطق با ارتفاع کمتر از ۱۰۰۰ متر رخ داده‌اند. مناطق شمالی مشهد مانند جاده کلات و مناطق اطراف فرودگاه، به دلیل موقعیت توپوگرافیکی و ارتفاع کم، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر سیلاب نشان داده‌اند.



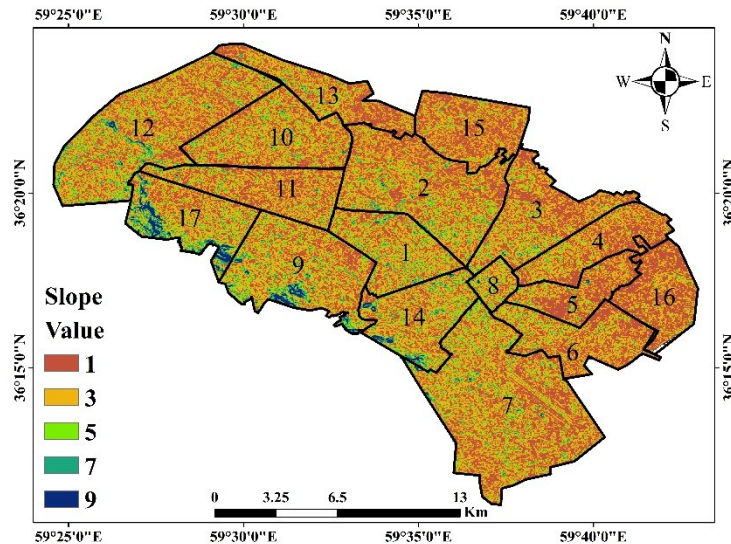
شکل ۳. طبقات ارتفاعی منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی شیب

شیب زمین به عنوان یکی از کلیدی‌ترین عوامل توپوگرافیکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی جریان آب و احتمال وقوع سیلاب در مشهد دارد. مناطق جنوبی شهر که عمدتاً دارای شیب‌های تند (بیش از ۱۵ درصد) هستند، باعث تسریع در ایجاد رواناب سطحی می‌شوند. این پدیده به ویژه در حوضه‌های آبریز منتهی به کشف رود مشهود است، جایی که شیب‌های تند کوهپایه‌های جنوبی، آب باران را با سرعت زیاد به سمت مناطق مسکونی مرکز و شمال شهر هدایت می‌کنند.

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۴۰ درصد از مساحت مشهد دارای شیب‌های بیش از ۵ درصد است که این مناطق مستعد ایجاد رواناب‌های خطرناک در هنگام بارش‌های شدید هستند.

نتایج نشان می‌دهد که مناطق با شیب ملایم (بین ۲ تا ۵ درصد) در مشهد، اگرچه کمتر در معرض خطر سیلاب‌های ناگهانی هستند، اما به دلیل تجمع تدریجی آب و نفوذناپذیری سطح زمین در اثر توسعه شهری، مستعد آبرفتگی‌های طولانی‌مدت می‌باشند. این پدیده به ویژه در مناطق شمالی و شمال شرقی مشهد مانند جاده کلات و مناطق اطراف فرودگاه مشهد مشاهده شده است. از سوی دیگر، مناطق با شیب کمتر از ۲ درصد که حدود ۳۰ درصد از مساحت شهر را شامل می‌شوند، به دلیل عدم زهکشی مناسب، بیشترین آسیب‌ها را در سیلاب‌های اخیر تجربه کرده‌اند. نقشه‌های شیب تهیه شده از داده‌های LiDAR با دقت ۱ متر، به خوبی ارتباط بین درجه شیب و نقاط بحرانی سیلاب در مشهد را نشان می‌دهند (شکل ۴).

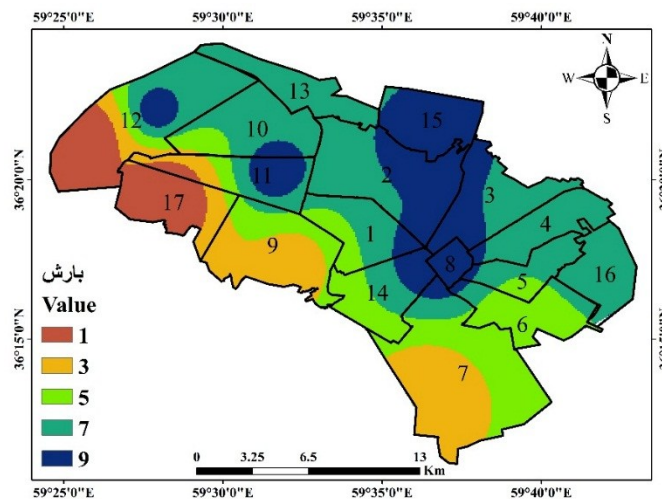


شکل ۴. شیب منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی بارش

الگوی بارش در مشهد به عنوان یکی از عوامل کلیدی در وقوع سیلاب‌های شهری عمل می‌کند. در این پژوهش از نتایج ۵ ایستگاه سینوپتیک اصلی شهر مشهد (مانند ایستگاه فرودگاه، کشاورزی و ایستگاه‌های تحقیقاتی) و ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی خودکار مربوط به مدیریت شهری مشهد که داده‌های بارش را با تفکیک مکانی و زمانی ثبت می‌کنند در یک ۲۰ سال اخیر (۲۰۰۲-۲۰۲۲)، استفاده شده است. همچنین در این پژوهش از داده‌های ترکیبی این ایستگاه‌ها همراه با داده‌های راداری برای افزایش دقت پهنه‌بندی استفاده شده است. مطالعات نشان می‌دهد که شدت بارش (mm/h) بیش از مقدار میانگین، مهم‌ترین شاخص در ایجاد سیلاب‌های ناگهانی در این شهر است. به‌ویژه بارش‌های رگباری با شدت بیش از ۳۰ میلی‌متر در ساعت که عمدتاً در فصل‌های بهار و پاییز رخ می‌دهند، توانایی ایجاد رواناب‌های خطرناک را دارند. تحلیل داده‌های ۲۰ ساله ایستگاه‌های سینوپتیک مشهد نشان می‌دهد که ۷۰ درصد سیلاب‌های مخرب شهر در اثر بارش‌هایی با مدت زمان کمتر از ۳ ساعت و شدت بالا اتفاق افتاده‌اند (شکل ۵).

توزیع ناهمگون بارش در سطح شهر مشهد به‌ویژه در مناطق کوهپایه‌ای جنوبی، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی سیل‌خیزی دارد. داده‌های راداری بارش‌سنجی نشان می‌دهند که مناطق جنوبی مشهد به‌طور متوسط ۲۰ درصد بارش بیشتری نسبت به مناطق شمالی دریافت می‌کنند. این ناهمگونی در کنار شیب‌های تند منطقه، باعث تشدید رواناب و افزایش خطر سیلاب در مناطق پایین‌دست می‌شود. بررسی سیلاب‌های اخیر مشهد نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد خسارات در اثر بارش‌های با دوره بازگشت کمتر از ۱۰ سال و حجم بیش از ۴۰ میلی‌متر در ۲۴ ساعت اتفاق افتاده است. این یافته‌ها اهمیت توجه به تغییرات الگوی بارش در برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب شهری را نشان می‌دهد.

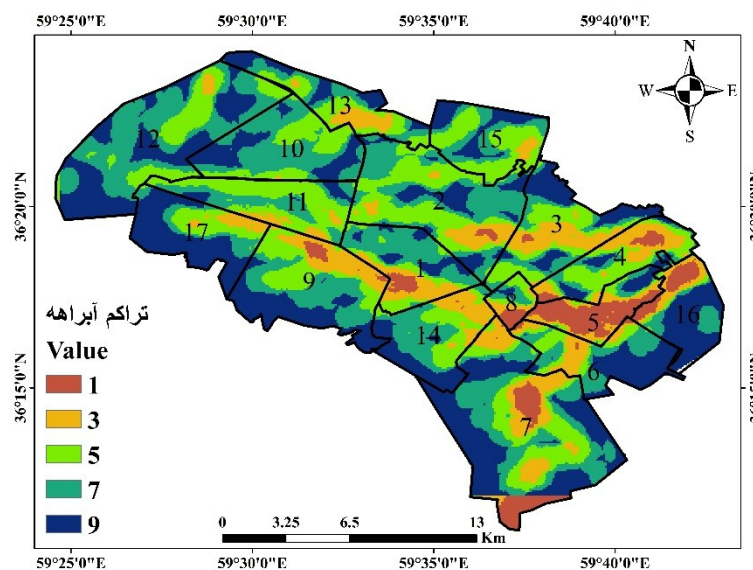


شکل ۵. میزان بارندگی منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی تراکم آبراهه

شبکه متراکم آبراهه‌ها در مشهد به عنوان شاخصی کلیدی در ارزیابی خطر سیلاب عمل می‌کند. تحلیل‌های ژئومورفولوژیک نشان می‌دهد که حوضه آبریز کشف رود با تراکم آبراهه‌ای بیش از ۲.۵ کیلومتر در کیلومتر مربع، یکی از عوامل اصلی تشدید سیلاب در مناطق مرکزی و شمالی شهر است. این تراکم بالا در کنار شیب‌های تند جنوبی، باعث تمرکز سریع رواناب‌ها و افزایش دبی سیلابی در مسیل‌های اصلی مانند مسیل طرق و مسیل ملک آباد شده است. داده‌های سنجش از دور نشان می‌دهند که توسعه شهری در دو دهه اخیر موجب کاهش ۳۵ درصدی نفوذپذیری و افزایش ۴۰ درصدی رواناب سطحی در این حوضه‌ها شده است (شکل ۶).

مطالعه همبستگی بین تراکم آبراهه‌ها و نقاط بحرانی سیلاب در مشهد نشان می‌دهد که مناطق با تراکم آبراهه‌ای بیش از ۳ کیلومتر در کیلومتر مربع، ۶۰ درصد بیشتر در معرض خسارات سیلابی قرار دارند. پهنه‌بندی خطر سیلاب بر اساس شاخص تراکم آبراهه‌ها، مناطق شمال شرقی مشهد به ویژه حوالی فرودگاه و جاده کلات را به عنوان نقاط بحرانی شناسایی کرده است. بررسی‌های می‌دانی تأیید می‌کند که این مناطق در سیلاب‌های اخیر بیشترین خسارات را متحمل شده‌اند. مدل‌سازی هیدرولوژیکی نشان می‌دهد که افزایش ۱۰ درصدی تراکم آبراهه‌ها می‌تواند باعث افزایش ۲۵ درصدی دبی اوج سیلاب در خروجی حوضه‌های شهری شود.

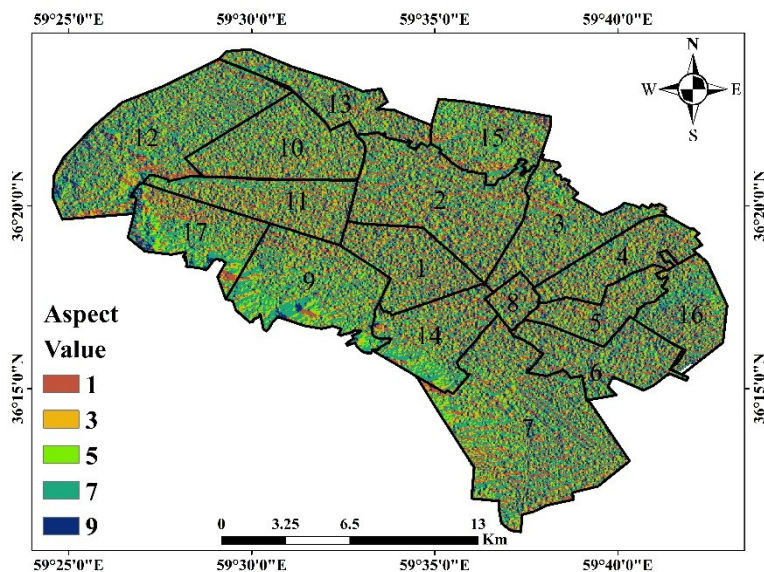


شکل ۶. تراکم آبراهه منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی جهت شیب

جهت شیب به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی توپوگرافی، نقش مؤثری در توزیع مکانی خطر سیلاب در شهر مشهد ایفا می‌کند. تحلیل‌های GIS نشان می‌دهد که شیب‌های رو به شمال (شمالی و شمال شرقی) در ارتفاعات جنوبی مشهد، به دلیل دریافت بارش بیشتر و ذوب سریع‌تر برف، سهم بیشتری در تولید رواناب دارند. این جهت‌گیری شیب‌ها باعث تمرکز جریان آب به سمت مناطق پرتراکم شهری در دشت مشهد شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۶۵ درصد از مساحت حوضه‌های بالادست مشهد دارای شیب‌های شمال‌نما هستند که این ویژگی، شدت سیلاب‌های ورودی به شهر را افزایش داده است (شکل ۷).

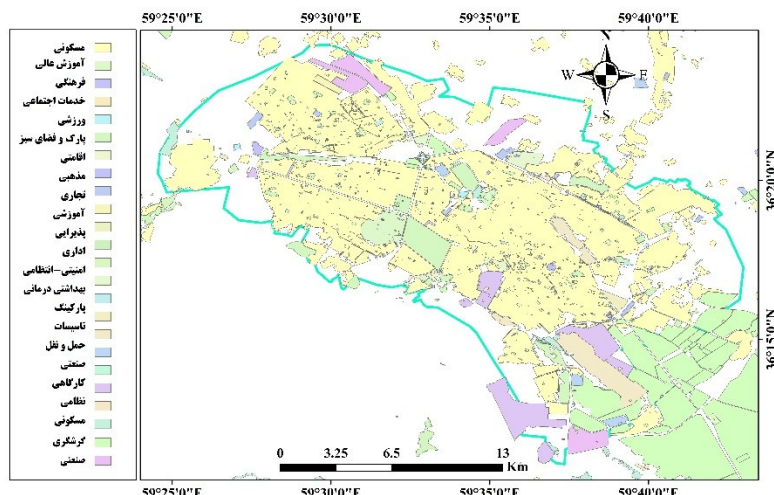
مطالعه همبستگی بین جهت شیب و نقاط آبگرفتگی در مشهد نشان می‌دهد که مناطق با شیب‌های شرقی و شمال شرقی، به دلیل هم‌راستا بودن با جهت حرکت توده‌های باران‌زای غالب، بیشترین سهم را در تولید رواناب دارند. پهنه‌بندی خطر سیلاب بر اساس جهت شیب، مناطق جنوب غربی مشهد را به عنوان کانون‌های اصلی تولید رواناب شناسایی کرده است. این در حالی است که مناطق با شیب‌های جنوبی، به دلیل تابش بیشتر آفتاب و نرخ تبخیر بالاتر، سهم کمتری در تغذیه سیلاب‌های شهری دارند. مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی حاکی از آن است که تغییرات جهت شیب می‌تواند تا ۳۰ درصد در توزیع مکانی رواناب مؤثر باشد.



شکل ۷. جهت شیب منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی کاربری اراضی

الگوی کاربری اراضی در مشهد به عنوان یکی از عوامل اصلی در تعیین پتانسیل سیل خیزی عمل می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸. نقشه کاربری اراضی شهر مشهد (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

توسعه سریع شهری و افزایش سطوح نفوذناپذیر مانند آسفالت و بتن، موجب کاهش ۴۰ درصدی نفوذپذیری خاک در دو دهه اخیر شده است. تحلیل‌های مکانی نشان می‌دهد مناطق با کاربری مسکونی و تجاری متراکم در مرکز و شمال مشهد، به دلیل وجود بیش از ۶۰ درصد سطوح نفوذناپذیر، بیشترین سهم را در تولید رواناب شهری دارند. از سوی دیگر، اراضی کشاورزی و باغات در حاشیه شهر، اگرچه نفوذپذیری نسبی بالاتری دارند، اما تغییر کاربری این اراضی به مناطق مسکونی در سال‌های اخیر، خطر سیلاب را در مناطق پایین‌دست افزایش داده است.

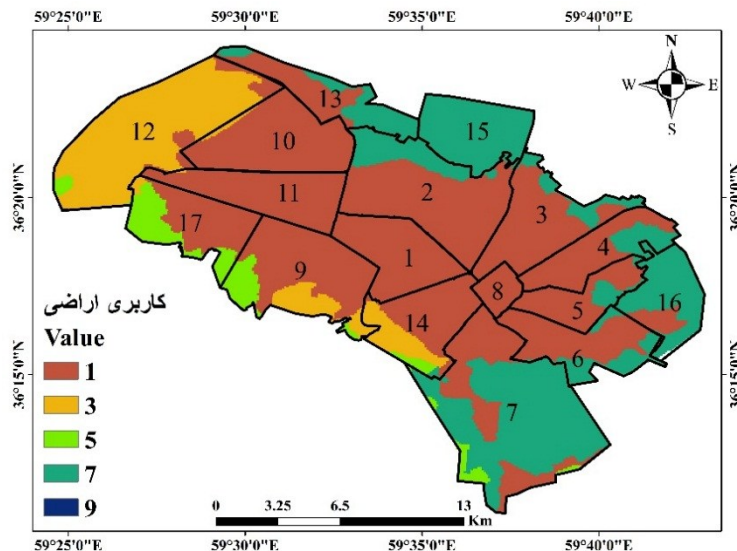
مطالعه تطبیقی کاربری اراضی و نقاط آبگرفتی در سیلاب‌های اخیر مشهد نشان می‌دهد:

- مناطق صنعتی و کارگاهی با ۷۵ درصد سطوح نفوذناپذیر، ۳۵ درصد بیشتر از سایر کاربری‌ها در معرض آبگرفتی قرار دارند

- پارک‌ها و فضای سبز شهری تنها ۱۵ درصد از رواناب سطحی را تولید می‌کنند

- اراضی بایر حاشیه شهر به دلیل تخریب پوشش گیاهی، تبدیل به کانون‌های تولید رواناب شده‌اند.

پهنه‌بندی خطر سیلاب بر اساس کاربری اراضی، مناطق شمال شرقی مشهد را به دلیل تراکم بالای کاربری‌های نفوذناپذیر و تخریب اراضی طبیعی، به عنوان پرخطرترین نقاط شناسایی کرده است (شکل ۹). این یافته‌ها لزوم اعمال ضوابط سخت‌گیرانه در تغییر کاربری اراضی و حفظ فضای سبز شهری را نشان می‌دهد.

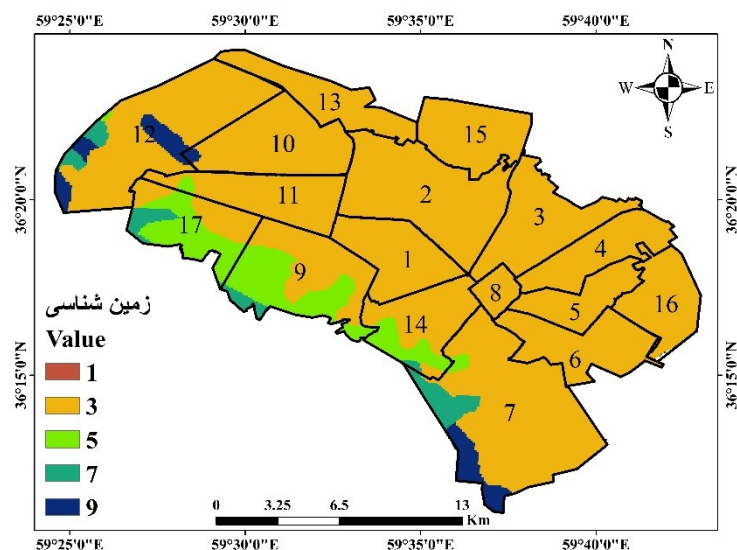


شکل ۹. کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی زمین‌شناسی

ساختار زمین‌شناسی مشهد به دلیل تنوع واحدهای سنگی و خاکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در الگوی سیلاب‌های منطقه دارد. مطالعات نشان می‌دهد که تشکیلات مارنی و رسوبات رسی در شمال و شمال شرق مشهد، با نفوذپذیری بسیار کم (کمتر از ۰.۰۱ سانتیمتر بر ساعت)، موجب تشدید رواناب سطحی می‌شوند (شکل ۱۰). در مقابل، مخروط‌افکنه‌های آبرفتی در غرب شهر با نفوذپذیری نسبی بالاتر، نقش تعدیل‌کننده در جذب بخشی از رواناب‌ها دارند. واحدهای زمین‌شناسی فعال از نظر هیدرولوژیکی در مشهد شامل: ۱- سازندهای سخت و نفوذناپذیر جنوب شهر (سازند شمشک)، ۲- رسوبات دانه‌ریز و رسی حوضه کشف‌رود، ۳- آبرفت‌های جوان با نفوذپذیری متوسط در مناطق غربی. گسل‌های فعال مشهد مانند گسل شمال مشهد، با ایجاد تغییر در مورفولوژی زمین و الگوی زهکشی طبیعی، موجب تغییر مسیر آبراهه‌ها و تشدید خطر سیلاب در مناطق خاصی شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد:

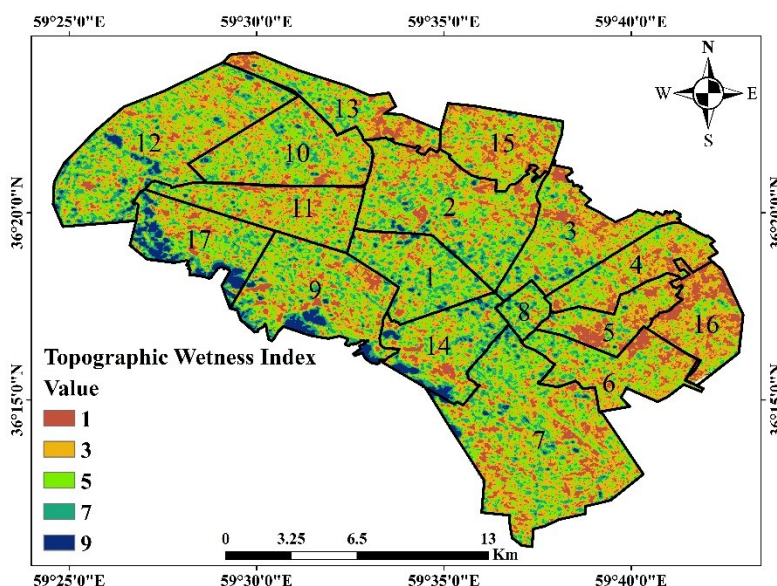
- مناطق واقع در امتداد گسل‌ها ۲۵٪ بیشتر از سایر نقاط در معرض فرسایش و تغییر الگوی زهکشی هستند.
 - سازندهای مارنی مشهد با خاصیت انحلال‌پذیری بالا، سالانه موجب نشست ۲-۳ سانتیمتری زمین و تغییر ظرفیت زهکشی طبیعی می‌شوند.
 - پهنه‌های با لیتولوژی شیلی در شرق مشهد، بیشترین سهم را در تولید رواناب سریع دارند.
- این ویژگی‌های زمین‌شناسی، مشهد را به شهری با حساسیت بالا به سیلاب‌های ناگهانی تبدیل کرده‌اند که نیازمند مطالعات دقیق‌تر برای مدیریت خطر است.



شکل ۱۰. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

بررسی شاخص رطوبت توپوگرافی

رطوبت توپوگرافی (TWI)، یکی از شاخص‌های مهم در هیدرولوژی و علوم زمین است که ارتباط نزدیکی با پتانسیل سیل خیزی یک منطقه دارد. هرچه مقدار رطوبت توپوگرافی در یک منطقه بیشتر باشد، احتمال تجمع آب و اشباع شدن خاک بالاتر رفته و در نتیجه، آن منطقه سیل خیزتر محسوب می‌شود. این شاخص ابزار مفیدی برای ارزیابی خطر سیل و برنامه‌ریزی مدیریت آبخیز است. این پارامتر با ارائه و نشان‌دهنده تغییرات مکانی رطوبت در یک حوضه است. به عبارت دیگر، این شاخص میزان تجمع آب را در هر اندازه پیکسلی از حوضه نشان می‌دهد. TWI در محیط SAGA GIS محاسبه شد. این شاخص را می‌توان به طور کلی برای اندازه‌گیری تعداد کنترل‌های توپوگرافی در رویدادهای هیدرولوژیکی به کار برد. TWI در ارتباط نزدیک با شیب و بالادست است و به ازای هر واحد عرض، مساحتی را ایجاد می‌کند که همسو با جهت جریان است. در مطالعه حاضر، مقادیر TWI بین ۴.۳ و ۱۵ متفاوت است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. شاخص رطوبت توپوگرافی منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

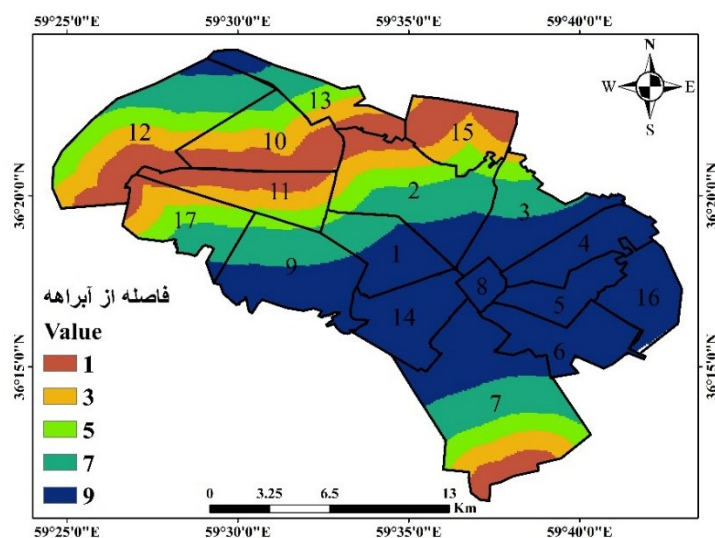
بررسی فاصله از آبراهه

فاصله از شبکه آبراهه‌ها به عنوان یکی از معیارهای کلیدی در ارزیابی خطر سیلاب در مشهد محسوب می‌شود. تحلیل‌های مکانی نشان می‌دهد که بیش از ۶۵ درصد از مناطق آسیب‌دیده در سیلاب‌های اخیر مشهد، در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر از مسیرهای اصلی قرار داشته‌اند. این رابطه معکوس بین فاصله از آبراهه و خطر سیلاب به ویژه در مناطق شمال شرقی مشهد (حوالی فرودگاه و جاده کلات) به وضوح قابل مشاهده است. داده‌های تاریخی نشان می‌دهد که در فاصله ۱۰۰ متری از آبراهه‌های اصلی، احتمال وقوع سیلاب تا ۸۰ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۱۲).

مطالعات می‌دانی و مدل‌سازی‌های هیدرولیکی در مشهد نشان می‌دهد:

- مناطق در فاصله ۲۰۰-۰ متری: پرخطرترین نقاط با احتمال ۹۵ درصد آبگرفتگی
- فاصله ۵۰۰-۲۰۰ متری: خطر متوسط با احتمال ۶۰-۴۰ درصد
- فاصله بیش از ۱ کیلومتری: کم‌خطرترین مناطق (کمتر از ۱۰ درصد)

نقشه‌های خطر سیلاب مشهد نشان می‌دهد که توسعه شهری در حریم ۲۰۰ متری آبراهه‌ها، مهم‌ترین عامل تشدید خسارات سیلاب در دو دهه اخیر بوده است. این یافته‌ها لزوم بازنگری در ضوابط ساخت‌وساز حریم آبراهه‌ها را نشان می‌دهد.



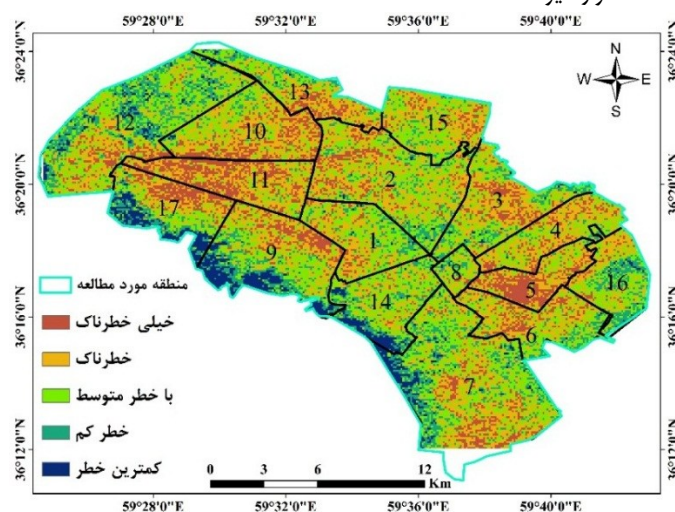
شکل ۱۲. فاصله از آبراهه منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

نتایج مدل‌سازی

طبق نتایج ۸۷۵۵ هکتار (۲۶.۹۴ درصد) در وضعیت کاملاً نامناسب، ۴۶۴۵ هکتار (۱۴.۲۹ درصد) در وضعیت نامناسب، ۱۱۰۵۴ هکتار (۳۴.۰۲ درصد) در وضعیت متوسط، ۳۸۸۸ هکتار (۱۱.۹۶ درصد) در وضعیت مناسب و فقط ۴۱۴۵ هکتار (۱۲.۷۵ درصد) در وضعیت کاملاً مناسب قرار دارند (شکل ۱۳). نقشه پهنه‌بندی خطر سیل نشان می‌دهد که الگوی پراکنش خطر از ساختار مشخصی تبعیت می‌کند. مناطق با خطر بسیار بالا (کلاس ۱) به صورت نوارهای خطی در امتداد شبکه آبراهه‌های اصلی و در دشتهای سیلابی تجمع یافته‌اند. این الگو کاملاً با رفتار هیدرولوژیکی حوزه سازگار است، چرا که این مناطق به دلیل شیب کم، رسوبات آبرفتی با نفوذپذیری پایین و تراکم بالای زهکش‌های طبیعی، مستعد آبگرفتگی هستند. نکته قابل توجه تمرکز ۹۴.۲۶ درصد از مساحت منطقه در این کلاس خطر است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری قابل توجه حوزه مطالعاتی می‌باشد.

از جنبه کاربردی، نتایج حاکی از همپوشانی نگران‌کننده ۵۰ درصد از مناطق مسکونی با پهنه‌های پرخطر (کلاس‌های ۱ و ۳) است. این وضعیت بیانگر توسعه نامناسب سکونتگاه‌ها در گذشته بدون توجه به معیارهای مخاطرات طبیعی است. تمرکز این سکونتگاه‌ها در جنوب و مرکز شبکه آبراهه که در مطالعه به عنوان مناطق بحرانی شناسایی شده‌اند، نیازمند اتخاذ سریع راهکارهای مدیریتی هم در بعد کاهش خطر (مانند احداث دیوارهای سیل‌گیر) و هم در بعد برنامه‌ریزی (مانند جابجایی تدریجی سکونتگاه‌ها) می‌باشد.

بررسی سطوح مختلف خطر نشان می‌دهد تنها ۷۵.۱۲ درصد از منطقه در کلاس کاملاً مناسب (کلاس ۹) قرار دارد. این محدوده‌ها که عمدتاً در ارتفاعات و با شیب‌های متوسط قرار گرفته‌اند، باید به عنوان پهنه‌های امن برای توسعه‌های آینده در نظر گرفته شوند. از سوی دیگر، پهنه‌های با خطر متوسط (۲.۳۴ درصد) می‌توانند با اعمال تمهیدات مهندسی مانند بهبود سیستم‌های زهکشی و مقاوم‌سازی سازه‌ها، برای کاربری‌های کم‌حساسیت مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱۳. نقشه ارزیابی خطر سیل (منبع: یافته‌های تحقیق، ۱۴۰۳)

۵. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

وقوع سیلاب‌های متعدد در مناطق مختلف کشور همواره خسارات فراوانی را در زمینه‌های مختلف به همراه داشته است از این رو تهیه و تدوین یک طرح جامع و کامل در زمینه کنترل سیلاب امری ضروری به نظر می‌رسد. توسعه مناطق مسکونی و شهری در حاشیه رودخانه‌ها و بستر سیلاب دشت‌ها بدون توجه به شرایط هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حاکم بر رودخانه، باعث افزایش خطر سیلاب می‌شود. لذا مدیریت سیلاب و شناسایی پهنه‌های در معرض خطر برای کاهش آسیب‌های ناشی از سیل و به حداقل رساندن خسارت و کنترل آن در محیط شهری امری ضروری است

مطالعه حاضر با بهره‌گیری از تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، به بررسی الگوی فضایی خطر سیل خیزی در شهر مشهد پرداخته است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد که بیش از ۴۰ درصد از مساحت شهر، معادل ۱۳۴۰۱ هکتار، در طبقات پرخطر و کاملاً پرخطر قرار دارد. این مناطق عمدتاً در بخش‌های جنوبی و مرکزی شهر واقع شده‌اند و ویژگی‌های مشترکی از جمله ارتفاع کم، شیب ملایم و پوشش گیاهی کم دارند.

تحلیل فضایی انجام شده آشکار می‌سازد که نزدیکی به رودخانه‌های اصلی و قرارگیری در دشت‌های سیلابی، مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در الگوی پراکنش خطر سیل هستند. در مقابل، مناطق شمالی و شمال شرقی شهر به دلیل دارا بودن ارتفاع بیشتر، شیب مناسب و پوشش گیاهی متراکم، کم‌ترین میزان خطر سیل خیزی را به خود اختصاص داده‌اند. این تفاوت‌های فضایی به وضوح نقش مؤلفه‌های طبیعی را در تعیین سطوح مختلف خطر نشان می‌دهد.

نتایج این پژوهش حاکی از آن است که توسعه شهری در مشهد بدون توجه کافی به ملاحظات محیط‌زیستی صورت گرفته است. تمرکز کاربری‌های مسکونی و تجاری در مناطق کم‌ارتفاع جنوبی که از پتانسیل سیل خیزی بالایی برخوردارند، موجب افزایش آسیب‌پذیری شهر در برابر سیلاب‌ها شده است. این وضعیت لزوم بازنگری در سیاست‌های توسعه شهری و اعمال محدودیت‌های ساخت‌وساز در مناطق پرخطر را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

کاربرد اصلی این مطالعه، ارائه نقشه‌ای دقیق از پهنه‌های سیل خیزی است که می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی باشد. این نقشه به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا ضمن شناسایی مناطق بحرانی، تمهیدات لازم برای کاهش خطر سیل را در اولویت قرار دهند. از جمله این تمهیدات می‌توان به احداث سیستم‌های زهکشی کارآمد، ایجاد سیل‌بندها و احیای پوشش گیاهی اشاره کرد. نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های افسری و شهسواری (۱۴۰۱)، که نشان داند ناحیه یک شهر تهران بالأخص جنوب و مرکز آن دارای بهترین شرایط از نظر سیل خیزی هستند و نتایج، پژوهش شهری ثانی و همکاران (۲۰۲۲)، که نشان دادند که بیش از ۶۰ درصد از منطقه مورد مطالعه در گروه تاب‌آوری پایین قرار می‌گیرد که به عنوان آسیب‌پذیرترین مناطق طبقه‌بندی می‌شود و نتایج سومیا و همکاران (۲۰۱۵)، در پژوهشی با عنوان "پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سیل شهری در ساحل جنوب غربی هند با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های هیدرولوژیکی از طریق استفاده از ارزیابی چندمعیاره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی با بهره‌گیری از تصاویر سنجش از دور" نشان دادند که در میان مناطق آسیب‌پذیر، مناطق با آسیب‌پذیری بسیار بالا و آسیب‌پذیری بالا جمعاً ۴/۶ درصد از مساحت کل شهر را تشکیل داده‌اند، هم‌راستا می‌باشد.

در نهایت با توجه به یافته‌های تحقیق پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- ایجاد سیستم‌های یکپارچه مبتنی بر GIS و RS برای اطلاع‌رسانی به موقع به ساکنان و مدیران شهری.
- تدوین نقشه‌های خطر سیل با مشارکت سازمان‌های مدیریت بحران، شهرداری‌ها و جامعه محلی.
- اعمال محدودیت‌های ساخت‌وساز در مناطق پرخطر و اجرای طرح‌های مقاوم‌سازی.
- طراحی سامانه‌های تعاملی برای نمایش پهنه‌های سیل خیزی و تسهیل تصمیم‌گیری.
- برگزاری کارگاه‌های آموزشی GIS برای مسئولان محلی و ساکنان مناطق پرخطر به همراه شبیه‌سازی سیل.
- ایجاد سامانه پایش و هشدار سیل آنلاین (Web-GIS)
- تلفیق نقشه‌های خطر سیل با طرح تفصیلی شهری برای تعیین کاربری‌های ایمن (مانند پارک‌های سیل‌گیر، محدودیت ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها).

۶. منابع

۱. اشتری، نفیسه، گورابی، ابوالقاسم و رحمتی، مریم. (۱۴۰۱). دربان آستانه علیرضا. ارزیابی پتانسیل خطر سیلاب و بررسی خسارت ناشی از آن در حوضه آبخیز تالار. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۱۲(۴)، ۱-۲۵.
 ۲. افسری، رسول و شهسواری، محمدسینا. (۱۴۰۱). تحلیل فضایی تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی با تأکید بر سیل، مطالعه موردی: نواحی منطقه یک شهر تهران. *پژوهش‌های جغرافیایی برنامه‌ریزی شهری*، ۱۰(۴)، ۱۱۹-۱۳۳.
 ۳. باقلانی، میلاد، رستمی، نورالدین و توکلی، محسن. (۱۳۹۸). شناسایی عوامل مؤثر بر بروز سیلاب شهری در حوضه آبخیز شهر ایلام. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۱(۲)، ۵۲۳-۵۳۶.
 ۴. چراغی قلعه سری، علی، حبیب‌نژاد روشن، محمود و روشن، سید حسین. (۱۳۹۹). تهیه نقشه حساسیت سیلاب با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و سیستم اطلاعات جغرافیایی، *مخاطرات محیط طبیعی*، ۹(۲۵)، ۶۱-۸۰.
 ۵. ذاکری‌نژاد، رضا و عیاش، کمال. (۱۴۰۳). ارزیابی خطر سیل و عوامل مؤثر بر آن در حوضه آبخیز زهر-جراحی در جنوب غرب ایران با استفاده از روش سلسله‌مراتبی فازی. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۶(۲)، صص ۵۱-۶۹.
 ۶. زیاری، کرامت‌الله، ابراهیمی پور، مرضیه، پورجعفر، محمدرضا، صالحی، اسماعیل. (۱۳۹۹). تبیین راهبردهای افزایش تاب‌آوری کالبدی در برابر سیلاب مطالعه موردی: رودخانه چشمه کیله شهر تنکابن. *فصلنامه شهر پایدار*، ۳(۱)، ۸۹-۱۰۵.
 ۷. صادقلو، طاهره، بوزرجمهری، خدیجه و احمدی، سودابه. (۱۴۰۱). تحلیل تأثیر ادراک از خطر بر میزان تاب‌آوری جوامع محلی در برابر سیلاب (منطقه مورد مطالعه: روستاهای شهرستان بینالود). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۳(۳)، ۱۱۹-۱۳۸.
 ۸. عابدینی، موسی، بابایی اولم، طیبه و پاسبان، امیرحسام. (۱۴۰۳). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از مدل MFFPI (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شفارود، استان گیلان). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۷(۱)، ۸۷۱-۸۲۱.
 ۹. عابدینی، موسی، فعال نذیری، مهدی و پیروزی، الناز. (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از تکنیک چند معیاره آراس و هیدروگراف واحد (مطالعه‌ی موردی: حوضه بالادست ایستگاه هیدرومتری پل سلطان مشکین‌شهر). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲(۳۵)، ۱۱۵-۱۳۸.
 ۱۰. کمالی، زهرا و قاسمی، مریم. (۱۴۰۲). راهبردهای تاب‌آوری کالبدی مسکن خانوارهای روستایی در برابر سیل (مطالعه موردی: شهرستان درگز). *راهبردهای توسعه روستایی*، ۱۰(۱)، صص ۱-۱۲.
 ۱۱. مختاری، داود. (۱۳۸۵). جایگاه ژئومورفولوژی در ارزیابی بلایای طبیعی و مقابله با آن‌ها در ایران، *جغرافیایی سرزمین*، ۳(۱)، صص ۵۳-۶۷.
 ۱۲. نصر، طاهره و عبدالعظیمی، هادی. (۱۴۰۱). تحلیل مکانی تاب‌آوری کالبدی کلان شهر شیراز در مقابله با مخاطره‌ی سیل. *هیدروژئومورفولوژی*، ۹(۳۲)، ۱۲۹-۱۵۲.
 ۱۳. وفایی، مسعود، دستورانی، محمدتقی و رستمی خلیج، محمد. (۱۴۰۱). ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل HEC-RAS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۲۲۵-۲۳۹.
14. Ahmadi, M. , Karimi, M. , Alizadeh, S. , Shirzadi, A. , Parvinnejhad, D. , Shahabi, H. and Panahi, M. (2019). Flood susceptibility assessment using integration of adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) and biogeographybased optimization (BBO) and BAT algorithms (BA). *Geocarto International*, 34(11), 1252-1272. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1474276>
 15. Ayan, S. Fleischmanna, J. Paulo, F. Brêdaa, C. Rudorffb, R. Cauduro, D. Paivaa, W. Collischonna, F. Papacd, M. Moreira, R (2021). *Earth Observation for Flood Applications Progress and Perspectives Earth Observation. Chapter 4 River Flood Modeling and Remote Sensing Across Scales.* 61-103. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819412-6.00004-3>
 16. Cao, C. , Xu, P. , Wang, Y. , Chen, J. , Zheng, L. , Niu, C. (2016). Flash flood hazard susceptibility mapping using frequency ratio and statistical index methods in coalmine subsidence areas, *Sustainability*, 8 (9), 940-956. <https://doi.org/10.3390/su8090948>
 17. Chen, W. ; Zhai, G. ; Fan, C. ; Jin, W. and Xie, Y. , (2017), A planning framework based on system Theory and GIS for urban emergency shelter system: a case of Guangzhou, China, *Human and Ecological Risk Assessment, An International Journal*, 23(3), 1-16. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1185692>
 18. Danumah, J. H. , Odai, S. N. , Saley, B. M. , Szarzynski, J. , Thiel, M. , Kwaku, A. , Kouame, F. K. , & Akpa, L. Y. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (Cote d'ivoire). *Geoenvironmental Disasters*, 3(10), 1-13. doi: 10.1186/s40677-016-0044-y
 19. Davies, Tim R. H. , Davies, Alistair J. , (2018). Increasing communities' resilience to disasters: An impact-based approach, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 6(31): 743-749. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.07.026>

20. Farhan, Y. and Ayed, A. (2017) Assessment of Flash-Flood Hazard in Arid Watersheds of Jordan. *Journal of Geographic Information System*, 9, 717-751. doi: 10.4236/jgis. 2017.96045.
21. FitzGerald, G. , Du, W. , Jamal, A. , Clark, M. , & Hou, X. (2010). Flood fatalities in contemporary Australia (1997–2008). *Journal of Emergency Medicine Australasia*, 22(2), 180-186.10.1111/j. 1742-6723.2010.01284.x
22. Haynes, K. , Coates, L. , van den Honert, R. , Gissing, A. , Bird, D. , de Oliveira, F. D. , ... & Radford, D. (2017). Exploring the circumstances surrounding flood fatalities in Australia—1900–2015 and the implications for policy and practice. *Journal of Environmental Science & Policy*, 76, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j. envsci. 2017.07.003>
23. Lee, S. , Vink, K. (2015). Assessing the vulnerability of different age groups regarding flood fatalities: Case study in the Philippines. *Journal of Water Policy*, 17(6), 1045-1061. DOI: 10.2166/wp. 2015.089
24. Li, K. , Wu, S. , Dai, E. , & Xu, Z. (2012). Flood loss analysis and quantitative risk assessment in China. *Natural hazards*, 63(2), 737-760. doi: 10.1007/s11069-012-0180-y
25. Ostrowska, M and Mazur, S, (2015). Risk in a Crisis Situation, *Procedia Economics and Finance*, 3(23): 1054-1059. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00373-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00373-1)
26. Rangari, V. A. , Umamahesh, N. V. , & Bhatt, C. M. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1839-1851. doi: 10.1007/s40808-019-00641-8
27. Saffari, A. , Ahmadabadi, A. , & Sedighifar, Z. (2020), Flood risk analysis based on the WMS model in urban catchments (Case Study: Darband, Golabdereh and Saadabad Basins of Tehran Metropolis), *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 20(57), 318-334. DOI: 10.29252/jgs. 20.57.317
28. Saha, A. K. , & Agrawal, S. (2020). Mapping and assessment of flood risk in Prayagraj district, India: a GIS and remote sensing study. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(2), 1-18. doi: 10.1007/s41204-020-00073-1
29. Salvati, P. , Petrucci, O. , Rossi, M. , Bianchi, C. , Pasqua, A. A. , & Guzzetti, F. (2018). Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in Italy. *Science of the Total Environment*, 610, 867-879. <https://doi.org/10.1016/j. scitotenv. 2017.08.064>
30. Shahpari Sani, D. , Heidari, M. T. , Tahmasebi Mogaddam, H. , Nadizadeh Shorabeh, S. , Yousefvand, S. , Karpour, A. , & Jokar Arsanjani, J. (2022). An Assessment of Social Resilience against Natural Hazards through Multi-Criteria Decision Making in Geographical Setting: A Case Study of Sarpol-e Zahab, Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 14(14), Article 8304. <https://doi.org/10.3390/su14148304>
31. Sowmya, K, John, C, Shrivasthava, N, (2015). Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing and GIS, *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, Springer; *International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 75(2), 1271-1286. <https://link. springer.com/article/10.1007/s11069-014-1372-4>
32. Sun, J, Zhai, N, Mu, H, Miao, J, Li, W, Li, M, (2023), Assessment of urban resilience and subsystem coupling coordination in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, *Sustainable Cities and Society*, Volume 100, January 2024, 105058. <https://doi.org/10.1016/j. scs. 2023.105058>
33. Turgut, A. , Tefvik, T. (2012). Floods and drowning incidents by floods. *World Applied Sciences Journal*, 16(8), 1158-1162. Corpus ID: 14037115
34. Wu, Y. , Zhong, P. A. , Zhang, Y. , Xu, B. , Ma, B. , & Yan, K. (2015). Integrated flood risk assessment and zonation method: a case study in Huaihe River basin, China. *Natural Hazards*, 78(1), 635-651. doi: 10.1007/s11069-015-1737-3