

Accepted Manuscript

Accepted Manuscript (Uncorrected Proof)

Title: Spatial Pattern Analysis of Flood Damage to Infrastructure in the Rural Districts of Babol County

Authors: Jalal Samia^{1,*}, Mousa Heidari Rami¹

1. *Department of Geography and Urban Planning, University of Mazandaran, Babolsar, Iran*

To appear in: **Disaster Prevention and Management Knowledge**

Received date: 2026/05/14

Accepted date: 2026/07/18

First Online Published: 2026/10/18

This is a “Just Accepted” manuscript, which has been examined by the peer-review process and has been accepted for publication. A “Just Accepted” manuscript is published online shortly after its acceptance, which is prior to technical editing and formatting and author proofing. Archives of Rehabilitation provides “Just Accepted” as an optional service which allows authors to make their results available to the research community as soon as possible after acceptance. After a manuscript has been technically edited and formatted, it will be removed from the “Just Accepted” Website and published as a published article. Please note that technical editing may introduce minor changes to the manuscript text and/or graphics which may affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Please cite this article as:

Samia, J., & Heidari Rami, M. [Spatial Pattern Analysis of Flood Damage to Infrastructure in the Rural Districts of Babol County]. Disaster Prevention and Management Knowledge. Forthcoming 2026.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

عنوان: تحلیل الگوی پراکنش فضایی آسیب به زیرساختها در اثر وقوع سیلاب در سطح دهستانهای شهرستان بابل

نویسندگان: جلال سمیعا، موسی حیدری رمی

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

نشریه: دانش پیشگیری و مدیریت بحران

تاریخ دریافت: 1405/2/24

تاریخ پذیرش: 1405/4/27

تاریخ انتشار اولیه: 1405/07/25

این نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» مقاله است که پس از طی فرایند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه در مدت کوتاهی پس از اعلام پذیرش به صورت آنلاین و قبل از فرایند ویراستاری منتشر می‌شود. نشریه آرشیو توانبخشی گزینه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» را به عنوان خدمتی به نویسندگان ارائه می‌دهد تا نتایج آن‌ها در سریع‌ترین زمان ممکن پس از پذیرش برای جامعه علمی در دسترس باشد. پس از آنکه مقاله‌ای فرایند آماده‌سازی و انتشار نهایی را طی می‌کند، از نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» خارج و در یک شماره مشخص در وبسایت نشریه منتشر می‌شود. شایان ذکر است صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در متن مقاله می‌شود که ممکن است بر محتوای آن تأثیر بگذارد و این امر از حیطه مسئولیت دفتر نشریه خارج است.

لطفا این‌گونه استناد شود:

Samia, J., & Heidari Rami, M. [Spatial Pattern Analysis of Flood Damage to Infrastructure in the Rural Districts of Babol County]. Disaster Prevention and Management Knowledge. Forthcoming 2026.

Abstract

Background and Objective: Flooding poses a significant threat to infrastructure, particularly in regions with complex hydrological and topographical characteristics. The Babol county, characterized by its diverse elevation and proximity to riverine systems, is susceptible to flood-induced damage to its transportation and engineering structures. This study aimed to investigate the spatial patterns and density of flood damage across various infrastructure types (roads, bridges, and technical structures) within the rural districts of Babol county. Understanding these spatial distributions is crucial for developing targeted risk assessment and mitigation strategies, prioritizing emergency response, and informing future infrastructure planning. The primary innovation of this research lies in shifting from traditional vulnerability assessment studies toward analyzing the spatial patterns of damage distribution to critical infrastructure, by integrating spatial statistics techniques within a GIS framework at the rural district scale.

Method: A spatial analytical framework was employed to examine the distribution and clustering of flood-induced infrastructure damage. Kernel Density Estimation (KDE) was applied to generate continuous density surfaces and identify areas with high concentrations of damage to roads, bridges, and technical structures. To statistically assess clustering patterns, Hot Spot Analysis using the Getis-Ord G_i^* statistic was conducted, allowing identification of significant hot and cold spots based on z-scores and p-values. The combined application of KDE and Getis-Ord- G_i^* enabled both visualization and statistical validation of spatial concentration patterns within the study area.

Findings: The spatial analyses revealed pronounced and non-random clustering patterns in flood-related infrastructure damage across the rural districts of Babol county. Kernel Density Estimation (KDE) showed that damage intensity was highly concentrated in specific rural districts. The highest density of road damage occurred in Khosh Rud (36.3 per km^2), followed by Sajarud (18.4 per km^2), indicating strong localized accumulation of damage events. For bridge damage, Khosh Rud, Sajarud, and Drazkola recorded the greatest densities (0.99 per km^2). Similarly, the density of damage to technical structures was highest in Drazkola and Sajarud (0.53 per km^2), with notable secondary concentrations in Khosh Rud and Babol Kenar (0.32 per km^2).

Hot Spot Analysis using the Getis-Ord G_i^* statistic confirmed these spatial patterns by identifying statistically significant high-value clusters. Khosh Rud and Sajarud consistently emerged as 99% and 95% confidence hot spots across multiple infrastructure categories, indicating that the intensity of observed damage in these districts is significantly higher than expected under a random spatial process. In contrast, several rural districts in the northern and southern parts of the county were identified as cold spots, exhibiting significantly lower levels of damage.

Conclusion: The spatial analysis of flood damage density highlights specific rural districts (notably Khosh Rud and Sajarud) as critical vulnerability hotspots for infrastructure in Babol County. The consistent high damage concentration across roads, bridges, and technical structures in these areas underscores the need for prioritized interventions. These findings provide a crucial foundation for developing targeted flood risk management and mitigation plans. Focusing resources on these identified hotspots for emergency response, retrofitting, and resilient infrastructure design can significantly enhance the overall safety and functionality of the region's infrastructure networks against future flood events.

Key words: Flood, Geographic Information System, Kernel Density, Hot Spot Analysis, Babol

چکیده

زمینه و هدف: سیلابها تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های حیاتی به‌ویژه در مناطق با ویژگی‌های هیدرولوژیکی و توپوگرافیکی پیچیده می‌باشد. شهرستان بابل بدلیل تنوع ساختارهای ژئومورفولوژیکی، توپوگرافیکی و همچنین وجود انواع سیستم‌های رودخانه‌ای، در معرض آسیب‌های سیلابی به زیرساخت‌های حمل و نقل و ابنیه فنی قرار دارد. هدف این پژوهش، بررسی الگوهای فضایی توزیع و پراکندگی آسیب‌های سیلابی در انواع زیرساخت‌ها نظیر راه‌ها، پل‌ها و ابنیه فنی در دهستان‌های این شهرستان است تا ارزیابی هدفمند خطر و اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی تسهیل شود. نوآوری اصلی این پژوهش در گذار از مطالعات سنتی ارزیابی آسیب‌پذیری به تحلیل الگوی فضایی توزیع خسارات به زیرساخت‌های حیاتی با تلفیق تکنیک‌های آمار فضایی در GIS و در مقیاس دهستانی می‌باشد.

روش: بدین منظور، یک چارچوب تحلیلی آماری- فضایی با استفاده از روش‌های تخمین تراکم کرنل (KDE) و تحلیل نقاط حاد با آماره Getis-Ord Gi* مورد استفاده قرار گرفت. در این زمینه، روش KDE برای نمایش نواحی با تمرکز بالای آسیب و تولید سطوح پیوسته تراکم به تفکیک انواع زیرساخت‌ها استفاده شد. همچنین شاخص Getis-Ord Gi* به منظور ارزیابی معنی داری آماری خوشه‌بندی فضایی آسیب‌ها و شناسایی نقاط حاد (خوشه‌های با تراکم بالای آسیب) و نقاط سرد (خوشه‌های با تراکم پایین آسیب) با سطوح اطمینان مشخص، مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد ترکیبی، امکان نمایش بصری توزیع تراکم آسیب‌ها و اعتبارسنجی آماری الگوهای فضایی آسیب به تاسیسات زیربنایی را فراهم می‌آورد.

یافته‌ها: نتایج تحلیل‌های آمار فضایی استفاده شده نشان‌دهنده شکل‌گیری خوشه‌بندی غیرتصادفی و از نظر آماری معنادار آسیب‌های زیرساختی در دهستان‌های شهرستان بابل می‌باشد. در این راستا، KDE تراکم بالای آسیب به شبکه راه‌ها را در دهستان‌های خوش‌رود و سجادرود به‌ترتیب با مقادیر $3/36$ و $1/84$ در هر کیلومتر مربع نشان می‌دهد. همچنین، تراکم بالای آسیب پل‌ها در دهستان‌های خوش‌رود، سجادرود و درازکلا با مقدار میانگین $0/99$ و تراکم آسیب ابنیه فنی در دهستان‌های درازکلا و سجادرود با مقدار میانگین $0/53$ مشاهده شده است. علاوه بر این، نتایج تحلیل نقاط حاد، دهستان‌های خوش‌رود و سجادرود را با سطوح اطمینان $99/95\%$ و $95/95\%$ به‌عنوان نقاط حاد و خوشه‌های فضایی تمرکز آسیب‌ها به انواع زیرساخت‌ها شناسایی کرد. در مقابل، در روش تحلیل نقاط حاد، دهستان‌های واقع در شمال و جنوب شهرستان بابل به‌عنوان نقاط سرد و با تراکم آسیب پایین به زیرساخت‌ها شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری: الگوهای فضایی آسیب به زیرساخت‌ها در اثر وقوع سیلاب در شهرستان بابل، تمرکز شدیدی را در دهستان‌های خوش‌رود و سجادرود به‌عنوان کانون‌های اصلی آسیب‌پذیری زیرساختی نشان می‌دهد. نتایج حاصل از KDE و تحلیل نقاط حاد، ضرورت اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی، تخصیص منابع برای مقاوم‌سازی و بهبود تاب‌آوری در این مناطق را برجسته می‌سازد. این یافته‌ها مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی هدفمند کاهش خطر سیلاب و افزایش ایمنی زیرساخت‌ها در برابر انواع مخاطرات محیطی فراهم می‌کند.

کلیدواژه: سیلاب، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تراکم کرنل، تحلیل نقاط حاد، بابل

گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و آب و هوایی عصر امروز آثار و تبعات منفی اجتماعی-اقتصادی و محیطی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای ایجاد کرده است (گوزتی و همکاران، ۲۰۱۶: ۲۲۸؛ جانکمن و همکاران، ۲۰۲۴: ۶۳۲۸). افزایش میانگین دمای کره زمین، تغییر الگوهای بارندگی و تغییر رفتار سامانه‌های جوی باعث شده است که وقوع انواع مخاطرات و بلایای طبیعی با شدت و فراوانی بیشتری در بخشهای مختلف جهان همراه شود. در این زمینه، سیلاب و زمین‌لغزش از جمله مخاطرات محیطی هستند که نه تنها اثرات مخرب مستقیم بر محیط‌زیست و سکونتگاه‌های انسانی دارند، بلکه با تهدید زیرساخت‌های حیاتی، خسارات اقتصادی-اجتماعی گسترده‌ای ایجاد می‌کنند. در این زمینه، زیرساخت‌های حیاتی به آن دسته از دارایی‌ها، سیستم‌ها و شبکه‌ها (مانند پل‌ها، راه‌ها و شبکه‌های انرژی) اطلاق می‌شود که کارکرد آن‌ها برای جامعه ضروری بوده و اختلال در عملکرد و یا تخریب آن‌ها می‌تواند منجر به ایجاد پیامدهای فاجعه‌بار بر امنیت، سلامت و یا رفاه جامعه گردد (سمونی و همکاران، ۲۰۲۵: ۳۴). به عنوان نمونه و بر اساس پایگاه اطلاعات رخدادهای اضطراری، در سال ۲۰۲۲، در حدود ۰.۹ میلیون نفر از جمعیت جهان تحت تاثیر آثار و تبعات وقوع سیلاب قرار گرفته و انتظار می‌رود که فراوانی و شدت وقوع مخاطره سیلاب تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در سالهای آینده بیشتر شود (هیات بین دولتی تغییرات اقلیمی، ۲۰۲۳). همچنین، میزان کلی خسارات اقتصادی در اثر وقوع سیلاب در حدود ۳/۴ تریلیون دلار در سال ۲۰۲۳ برآورد شده و کشورهای مختلف جهان برای بازسازی این حجم از خسارات در حدود ۲۲۲ میلیارد دلار هزینه کرده‌اند (مرکز تحقیقات اپیدمیولوژی بلایا، ۲۰۲۳). در این راستا، برنامه‌ریزی در جهت کاهش تلفات انسانی ناشی از وقوع بلایای طبیعی اولویت اصلی سیاست‌گذاریهای چارچوب سندای در مورد کاهش ریسک بلایا^۱ می‌باشد که بر اساس آن میزان مرگ و میر ناشی از وقوع بلایای طبیعی تا سال ۲۰۳۰ می‌بایستی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند (واحد کاهش ریسک بلایای سازمان ملل متحد، ۲۰۱۵). در میان انواع خسارتهای اقتصادی ناشی از وقوع سیلاب، تخریب ابنیه فنی، پل‌ها و شبکه راه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. این زیرساختها نه تنها نقش اساسی در تداوم جابه‌جایی، ارتباطات و ارائه خدمات حیاتی ایفا می‌کنند بلکه آسیب‌دیدگی آن‌ها می‌تواند زنجیره‌ای از اختلالات گسترده در حمل‌ونقل، امداد رسانی، فعالیت‌های اقتصادی و امکان دسترسی به مناطق آسیب‌دیده در بحرانها ایجاد کند. به عنوان نمونه و بر اساس آمار بانک جهانی، هزینه خسارات اقتصادی وارد شده به شبکه‌های حمل و نقل، خطوط انرژی و زیرساختهای مرتبط با منابع آب در اثر وقوع سیلاب تقریباً ۶.۴ میلیارد دلار برآورد شده است (بانک جهانی، ۲۰۲۳).

در زمینه مدیریت بحرانهای مرتبط با مخاطرات طبیعی، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی^۲ در تحلیل خسارات ناشی از وقوع سیلاب، نقشی اساسی در شناسایی الگوهای توزیع فضایی آسیبها و درک روابط میان عوامل محیطی، کالبدی و زیرساختی ایفا می‌کند (توروک و همکاران، ۲۰۲۶: ۲؛ مانسون و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۸۰۸). GIS با فراهم آوردن امکان یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی و توصیفی، تحلیل‌های فضایی پیشرفته و نمایش دقیق توزیع و پراکنش مکانی-زمانی خسارات (گوودچایلد، ۲۰۰۹: ۱۰۳۷)، بستری کارآمد برای برنامه‌ریزی مدیریت ریسک به شمار می‌رود. در این راستا، استفاده از شاخص‌ها و روش‌های تحلیل آمار فضایی در GIS نظیر تخمین تراکم کرنل^۳ (KDE) با قابلیت شناسایی و نمایش شدت تراکم فضایی در الگوی توزیع خسارات (فاندر فین و همکاران، ۲۰۰۵: ۶۶) و تحلیل نقاط حاد^۴ با قابلیت شناسایی الگوهای آماری معنی‌دار در توزیع خسارات، می‌تواند به شناخت دقیق‌تر مناطق بحرانی و تعیین اولویت‌های مداخله در فازهای مدیریت بحران کمک شایانی کند (لیو و همکاران ۲۰۲۳: ۲؛ کوللی و همکاران ۲۰۲۴: ۱۴۱۱۸). بنابراین، به‌کارگیری روشهای آمار فضایی در بستر GIS امکان تحلیل الگوی توزیع و پراکنش خسارات در اثر وقوع سیلاب را فراهم کرده و زمینه برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات مؤثر در جهت کاهش ریسک و ارتقای تاب‌آوری زیرساختها را تقویت می‌کند. در این راستا، تاب‌آوری به معنای ظرفیت یک سیستم، جامعه یا زیرساخت برای مقاومت در برابر حوادث، جذب اثرات آن، تطبیق‌پذیری سریع با شرایط جدید و بازایی عملکردهای ضروری در کمترین زمان ممکن پس از وقوع بحران است (پریزادی و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۲). با این حال، در دهه‌های اخیر بخش عمده‌ای از پژوهش‌های مربوط به مخاطرات محیطی در خارج و داخل کشور و به‌ویژه

1. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction
2. Geographic Information System
3. Kernel Density Estimation
4. Hot Spot Analysis

در زمینه سیلاب، بر مدلسازی و پهنه‌بندی خطر و نیز ارزیابی آسیب‌پذیری و ریسک در سطوح مختلف مکانی متمرکز بوده‌اند (شکوهی و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۲۴۰؛ نجفی و همکاران، ۲۰۲۰: ۴۴؛ موسوی و همکاران، ۲۰۲۴: ۵۲؛ ییلماز و همکاران، ۲۰۲۵: ۲؛ تام و همکاران، ۲۰۲۵: ۲۸۸۰). در این مطالعات تاکید بیشتر بر شناسایی مناطق در معرض خطر و تعیین شاخص‌های آسیب‌پذیری با استفاده از فناوریهای GIS، سنجش از دور و مدل‌های هیدرولوژیکی بوده (پاتال و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۳۵۴، کوفی آکوم و همکاران، ۲۰۲۳: ۳۷۶؛ سورسا و همکاران، ۲۰۲۵: ۲) و توجه کمتری به تحلیل الگوی توزیع و پراکنش فضایی خسارات ناشی از وقوع سیلاب به زیرساختها شده است. این کم‌توجهی دلایل متعددی می‌تواند داشته باشد: نخست، کمبود و یا عدم وجود داده‌های دقیق مکانی از میزان و موقعیت واقعی خسارات پس از وقوع سیلاب‌ها که جز مولفه‌های اصلی در انجام تحلیل‌های فضایی می‌باشد؛ دوم، پیچیدگی موجود در ماهیت زیرساختها و تفاوت‌های آنان از نظر اهمیت، جنس مواد تشکیل دهنده، موقعیت، و ارزش اقتصادی؛ و سوم، استفاده از رویکردهای پیش‌بینی و پیشگیری در سیاست‌های مدیریت بحران کشورها که موجب شده بیشتر مطالعات در مرحله قبل از وقوع مخاطرات بر مدلسازی و پهنه‌بندی ریسک و آسیب‌پذیری متمرکز باشند و ارزیابی الگوی فضایی آسیبهای ناشی از وقوع سیلاب کمتر مورد توجه قرار گیرد. از این‌رو، پژوهش حاضر با تمرکز بر این خلأ علمی، به بررسی و تبیین الگوی فضایی توزیع و پراکنش خسارات زیرساختی ناشی از سیلاب در سطح دهستان‌های شهرستان بابل می‌پردازد.

در مناطق شمالی ایران به‌ویژه استان مازندران، ویژگی‌های اقلیمی معتدل و مرطوب، بارش‌های شدید فصلی و ذوب برف، ساختارهای توپوگرافیکی متنوع، تغییرات کاربری اراضی و دخالت‌های انسانی در منابع طبیعی، زمینه‌ساز افزایش آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات محیطی نظیر سیلاب و زمین‌لغزش شده است. شهرستان بابل به عنوان یکی از مناطق پرجمعیت و دارای زیرساخت‌های گسترده، در سال‌های اخیر چندین بار تحت تأثیر رخدادهای سیلابی قرار گرفته و بخش‌هایی از شبکه‌های ارتباطی، زیرساخت‌های مرتبط با انرژی و تأسیسات در دهستانهای واقع در مناطق بالادست و کوهستانی بخش بندپی شرقی در معرض آسیب و خسارات اقتصادی قرار گرفته‌اند (حجازی و همکاران، ۲۰۲۶: ۱۰۳۰). از آنجایی که عملکرد تأسیسات زیربنایی نقشی کلیدی در پایداری سکونتگاه‌ها، استمرار فعالیت‌های اقتصادی و تأمین رفاه اجتماعی دارد، شناخت الگوی فضایی توزیع آسیب‌ها و تعیین نقاط حساس و آسیب‌پذیر، ضرورتی انکارناپذیر در برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک مخاطرات محیطی است. تحلیل دقیق این الگوها در مقیاس دهستانی می‌تواند دیدی روشن‌تر نسبت به عوامل مؤثر بر شدت آسیب، نحوه توزیع فضایی خسارات و اولویت‌بندی اقدامات پیشگیرانه فراهم آورد. علاوه بر این، شناخت الگوی فضایی توزیع تأسیسات زیربنایی آسیب‌دیده در مقیاس دهستان می‌تواند به شناخت دقیق پراکندگی خسارات، شناسایی نقاط ضعف زیرساختی، درک تاثیر متقابل زیرساختها به عنوان پایه و اساس برنامه‌ریزی مؤثر و همچنین ارزیابی تاب‌آوری مناطق روستایی کمک شایانی نماید. بنابراین پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوی فضایی آسیب تأسیسات زیربنایی ناشی از وقوع سیلاب در سطح دهستان‌های شهرستان بابل انجام می‌شود تا با ارائه بینش علمی و کاربردی، زمینه بهبود برنامه‌ریزی‌های مدیریت بحران و کاهش ریسک در مناطق روستایی فراهم شود. در راستای پر کردن خلأ موجود در مطالعات پیشین که عمدتاً بر مدلسازی مخاطرات سیل و ارزیابی آسیب‌پذیری کلی تمرکز داشته‌اند، نوآوری کلیدی این پژوهش، تحلیل الگوی فضایی توزیع خسارات به زیرساخت‌های حیاتی در سطح دهستان‌های شهرستان بابل است. این تحقیق با اتکا بر رویکرد داده‌محور و بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته تحلیل فضایی در GIS، فقدان شناخت موجود در درک توزیع فضایی آسیب‌های ناشی از سیل را مورد بررسی قرار داده و نتایج حاصل از آن، مبنای علمی ارزشمندی را برای اولویت‌بندی راهبردهای مدیریت ریسک سیل در زمینه بازسازی و مقاوم‌سازی و برنامه‌ریزی جهت افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌های موجود در دهستانها را فراهم می‌آورد.

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

بابل یکی از شهرستان‌های استان مازندران است که در بخش مرکزی این استان واقع شده است (تصویر شماره ۱) و از نظر تقسیمات کشوری در سال ۱۴۰۰ دارای ۶ بخش و ۱۳ دهستان می‌باشد. طبق گزارش مرکز آمار ایران (۱۳۹۵)، جمعیت شهرستان بابل بالغ بر ۴۷۷,۳۷۶ نفر بوده است. از نظر شرایط اقلیمی، شهرستان بابل بدلیل نزدیکی به دریای خزر و قرارگیری در دامنه رشته کوه‌های البرز دارای آب و هوای معتدل با تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل و پربارش همراه می‌باشد. از نظر توپوگرافیکی، بخش وسیعی از جنوب تا شمال شهرستان را جلگه‌های حاصلخیز تشکیل می‌دهد که عمدتاً از رسوبات رودخانه‌های بابل‌رود و دیگر رودخانه‌های کوچک شکل گرفته که برای کشاورزی بسیار

مناسب هستند و بخش عمده فعالیت‌های اقتصادی و استقرار مراکز جمعیتی در این نواحی متمرکز است. همچنین، مناطق کوهپایه‌ای و کوهستانی در قسمت‌های جنوبی و جنوب شرقی شهرستان در بخش بندپی شرقی در دامنه رشته‌کوه‌های البرز قرار دارد که دارای ناهمواری‌های متنوع و شیب‌های تندمی‌باشد. علاوه بر این، شهرستان بابل به دلیل قرار گرفتن در دشت حاصلخیز مازندران، نزدیکی به رشته‌کوه‌های البرز و وجود عواملی تشدید کننده نظیر بارندگی‌های شدید فصلی در پاییز و زمستان، ذوب برف در ارتفاعات، تغییرات کاربری اراضی و ساخت و ساز در حریم رودخانه‌ها و مسیل‌ها و کاهش ظرفیت نفوذپذیری خاک به دلیل توسعه مناطق شهری و روستایی در معرض وقوع انواع مخاطرات محیطی نظیر سیلاب و زمین لغزش قرار دارد. در این راستا، دهستان‌های واقع در قسمت‌های مرکزی و جنوبی شهرستان بابل، به ویژه آنهایی که در مسیر رودخانه‌های اصلی یا در مناطق پست‌تر قرار دارند، بیشتر در معرض خطر وقوع سیلاب‌های دشت می باشند. همچنین، دهستان‌های بالادست و کوهپایه‌ای مانند دهستان فیروزجاه در بخش بندپی شرقی، بیشتر در معرض خطر سیلاب‌های ناگهانی (ناشی از رگبارهای شدید) و سیلاب‌های کوهستانی همراه با وقوع زمین لغزش می‌باشد.

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش جهت تحلیل الگوی توزیع فضایی خسارات زیربنایی ناشی از وقوع سیلاب، موقعیت جغرافیایی تاسیسات آسیب‌دیده زیربنایی همراه با اطلاعاتی از قبیل سال وقوع خسارت، نوع تاسیسات آسیب‌دیده و میزان خسارات اقتصادی برآورد شده در دهستان‌های شهرستان بابل می‌باشد که توسط معاونت بازسازی و بازتوانی سازمان مدیریت بحران استان مازندران و در بخش اداره کل بیمه و ارزیابی خسارات جمع‌آوری و بانک اطلاعات مکانی و توصیفی آنها در بستر پایگاه داده GIS تشکیل شده است. داده‌های خسارت شامل ۱۲۴ مورد آسیب به زیرساختها بوده که از این تعداد ۵۴ مورد آسیب به راه، ۴۸ مورد آسیب به ابنیه فنی و ۲۲ مورد آسیب به پل در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ می باشد. موقعیت مکانی تاسیسات آسیب‌دیده با استفاده از دستگاه GPS دستی و با دقت در حدود ۳ متر برداشت شده و طبقه‌بندی نوع آسیب و میزان خسارات توسط کارشناسان اداره کل بیمه و ارزیابی خسارات سازمان مدیریت بحران انجام گرفته است. لازم به ذکر است که تمامی داده‌های آسیب و خسارات ثبت شده در پایگاه داده‌ای سازمان مدیریت بحران در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، روایی داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، از طریق استفاده از داده‌های مستند، رسمی و دقیق تهیه شده توسط کارشناسان سازمان مدیریت بحران تامین شده است.

مختلف مکانی ایجاد می‌کند. این تابع با قرار دادن یک پنجره وزنی متحرک کرنل بر روی مجموعه داده‌های نقطه‌ای یا خطی مورد بررسی، میزان تراکم را در کل منطقه مورد مطالعه برآورد می‌کند. برآورد تراکم بر اساس میزان تأثیر هر نقطه یا خط به فاصله آنها از محل مورد بررسی و همچنین به پهنای باند یا شعاع جستجوی تابع کرنل بستگی دارد (چرویوت، ۲۰۲۲: ۳۱۱). داده‌هایی که در فاصله مکانی نزدیک‌تر قرار دارند وزن بیشتری در تخمین تراکم در آن منطقه داشته و با افزایش فاصله، وزن و اثرگذاری آنها در برآورد شدت تراکم کاهش می‌یابد. فرمول کلی برای محاسبه تابع تخمین تراکم کرنل رابطه (۱) می‌باشد:

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h^2} k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

که در آن $\hat{f}(x)$ تابع برآورد تراکم در موقعیت مکانی x ، n تعداد کل تاسیسات زیربنایی آسیب‌دیده، x موقعیت‌های مکانی مدنظر برای محاسبه تراکم، x_i موقعیت مکانی نقطه (در این پژوهش تاسیسات آسیب‌دیده) شماره i ، h پهنای باند و یا شعاع جستجو جهت تعیین میزان هموارسازی سطوح تراکم و k تابع کرنل می‌باشد. در این پژوهش، برآورد تراکم فضایی آسیب به تعداد تاسیسات زیربنایی و همچنین نوع تاسیسات زیربنایی آسیب‌دیده در اثر وقوع سیلاب که شامل ابنیه‌های فنی، پلها و راهها در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ می‌باشد، در مقیاس دهستانهای شهرستان بابل در محیط GIS انجام شده است.

تحلیل نقاط حاد (Hot Spot Analysis)

به منظور شناسایی و تحلیل خوشه‌های مکانی با تراکم آماری بالا (نقاط داغ) و تراکم آماری پایین (نقاط سرد) در توزیع فضایی تأسیسات آسیب‌دیده زیربنایی در دهستانهای شهرستان بابل، از روش تحلیل نقاط حاد و شاخص آمار فضایی $Getis-Ord\ G_i^*$ (ختیس و ارد، ۱۹۹۲: ۱۹۰) استفاده شده است. در این زمینه، نقاط حاد به مناطقی گفته می‌شود که دارای تراکم بالای رویدادها (در این پژوهش آسیب‌ها) بوده و از نظر آماری با سطوح اطمینان معنادار، خوشه‌هایی متفاوت از توزیع تصادفی را تشکیل داده که نشان‌دهنده کانون‌های بحران می‌باشند (کریسکی و همکاران، ۲۰۲۱: ۲). در این روش، با تعیین قطعیت و سطوح مختلف معنی‌داری آماری، الگوی توزیع تصادفی و یا خوشه‌ای پدیده‌های جغرافیایی مشخص می‌گردد (فوو و همکاران، ۲۰۱۶: ۴۶۹). در این زمینه، شاخص $Getis-Ord\ G_i^*$ میزان تأثیر مکانی یک داده نقطه‌ای را بر روی نقاط همسایه و مجاور بررسی و مقادیر معنی‌دار آماری بالا (نقاط داغ) و همچنین مقادیر معنی‌دار آماری پایین (نقاط سرد) را مشخص می‌کند. این شاخص بر اساس مقایسه مقدار یک ویژگی در یک نقطه و مقادیر همان ویژگی در نقاط همسایه نقطه مورد نظر و به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (2)$$

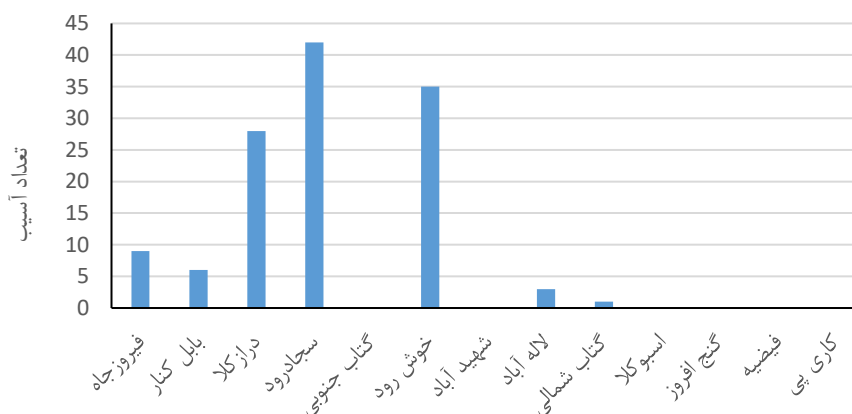
که در آن، G_i^* مقدار شاخص $Getis-Ord\ G_i^*$ برای نقطه i ، x_j تعداد یا تراکم تاسیسات زیربنایی آسیب‌دیده در نقطه j ، w_{ij} ضریب وزن مکانی بین نقطه i و نقطه j که نشان‌دهنده رابطه مکانی بین آنها می‌باشد، n تعداد دهستانها، $\bar{x}$ میانگین تعداد تأسیسات آسیب‌دیده در کل دهستانها و S انحراف معیار مقادیر ویژگی در تمامی نقاط می‌باشد. پس از محاسبه این شاخص برای تمامی نقاط مرتبط با تاسیسات آسیب‌دیده در اثر وقوع سیلاب در دهستانهای شهرستان بابل، شاخصهای آماری نظیر $P-Value$ و $Z-Score$ محاسبه شده است. مقادیر مثبت و بزرگ $Z-Score$ نشان‌دهنده این است که نقطه i و نقاط واقع در همسایگی آن دارای مقادیر

بالایی هستند و این تراکم به صورت مثبت از توزیع تصادفی متمایز بوده و به صورت نقاط حاد^۱ شناخته می‌شوند. مقادیر منفی و کوچک Z-Score نشان‌دهنده این است که نقطه i و نقاط واقع در همسایگی آن دارای مقادیر پایینی هستند و این تراکم به صورت منفی از توزیع تصادفی متمایز بوده و شامل نقاط سرد^۲ می‌باشد. علاوه بر این، مقادیر نزدیک به صفر در مقدار Z-Score نشان‌دهنده این می‌باشد که تراکم مشاهده شده در این نقطه و نقاط پیرامونی با آنچه انتظار می‌رود که در یک توزیع تصادفی مشاهده شود، تفاوت معنی‌داری ندارد. همچنین، مقدار P-Value پایین (کمتر از ۰/۰۵) نشان‌دهنده این است که الگوی مشاهده شده با تراکم بالا و یا تراکم پایین به احتمال زیاد تصادفی نبوده و یک الگوی فضایی معنی‌دار در شکل‌گیری خوشه‌های حاد و یا سرد شکل گرفته است. در حالیکه، در P-Value با مقادیر بالاتر (بیشتر از ۰/۱) تراکم مشاهده شده می‌تواند ناشی از شانس و تصادف بوده و الگوی فضایی معنی‌داری وجود ندارد. در این مطالعه، تحلیل نقاط حاد برای تاسیسات آسیب‌دیده زیربنایی ناشی از وقوع سیلاب در سطح دهستانهای شهرستان بابل بر اساس موقعیت مکانی آنها در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در محیط GIS انجام و شاخصهای آماری P-value و z-score محاسبه شده است.

یافته‌ها

تحلیل آماری توصیفی داده‌های مرتبط با زیرساختهای آسیب‌دیده

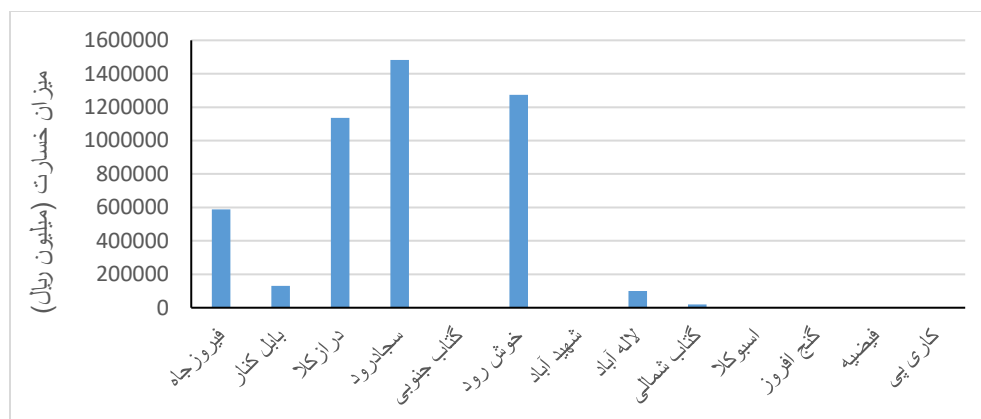
تحلیل آماری توصیفی داده‌های آسیب به تاسیسات زیربنایی در اثر وقوع سیلاب نشان می‌دهد ۵۴ مورد آسیب به راه، ۴۸ مورد خسارت به ابنیه فنی و ۲۲ مورد آسیب به پل در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ در دهستانهای شهرستان بابل رخ داده است. در این زمینه، دهستانهای سجادرود، خوش‌رود و درازکلا به ترتیب با ۴۲، ۳۵ و ۲۸ مورد، بیشترین تعداد وقوع آسیب به تاسیسات زیربنایی و دهستانهای کاری‌پی، فیضیه، گنج‌افروز، اسبوكلا، شهیدآباد و گتاب جنوبی فاقد آسیب در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ بوده‌اند (تصویر شماره ۲).



تصویر ۲. تعداد آسیبهای وارده به تاسیسات زیربنایی در اثر وقوع سیلاب در دهستانهای بابل (ماخذ، یافته‌های پژوهش حاضر)

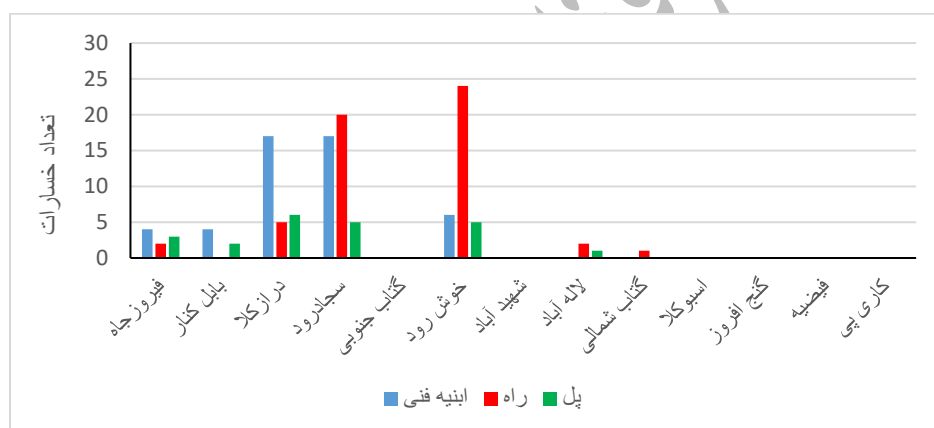
همچنین، دهستانهای سجادرود، خوش‌رود و درازکلا به ترتیب با میزان خسارات اقتصادی برآوردشده به ارزش ۱۴۸۳۵۰۰، ۱۲۷۳۰۰۰ و ۱۱۳۵۲۰۰ میلیون ریال توسط اداره کل بیمه و ارزیابی خسارات سازمان مدیریت بحران، بیشترین میزان خسارات اقتصادی را در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ متحمل شده‌اند (تصویر شماره ۳).

1. Hot Spots
2. Cold Spots



تصویر ۳. میزات خسارات اقتصادی برآورد شده ناشی از وقوع سیلاب در دهستانهای بابل (ماخذ، یافته‌های پژوهش حاضر)

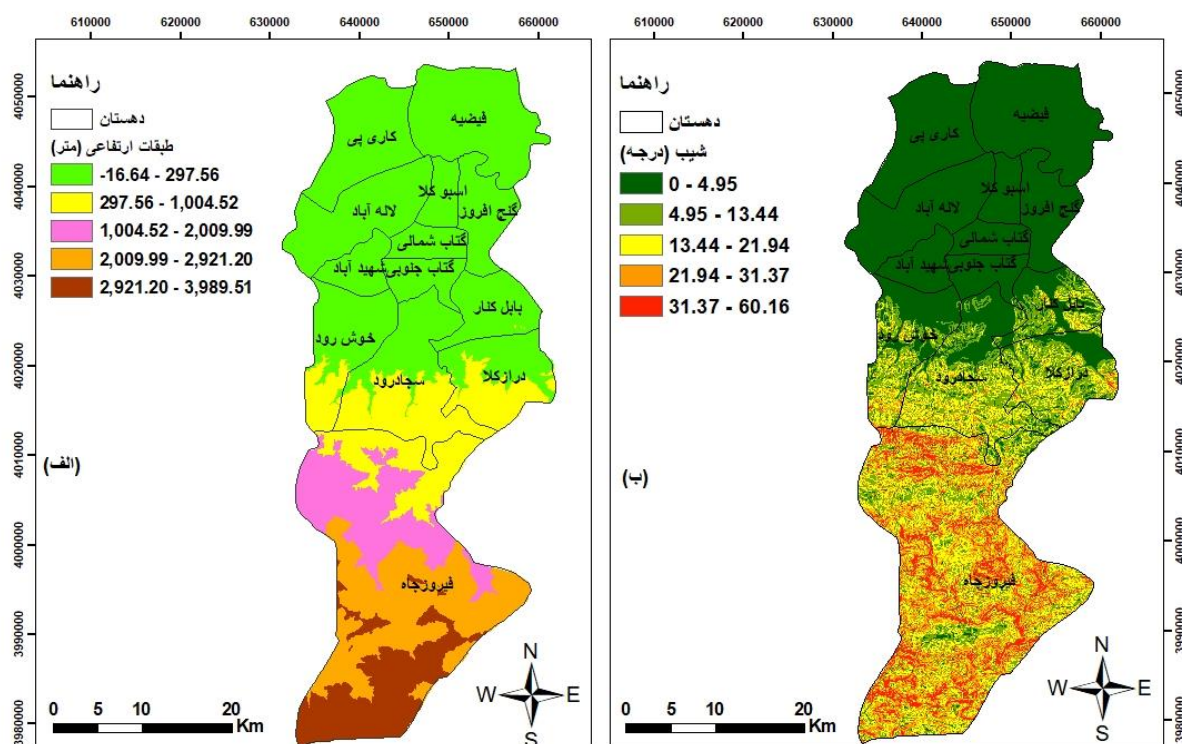
بیشترین تعداد آسیب به راهها در دهستانهای خوش‌رود و سجادرود به ترتیب با ۲۴ و ۲۰ مورد، بیشترین تعداد آسیب به ابنیه فنی در دهستانهای سجادرود و درازکلا با ۱۷ مورد و بیشترین تعداد آسیب به پل در دهستانهای درازکلا، سجادرود و خوش‌رود با ۶ و ۵ مورد به‌وقوع پیوسته است (تصویر شماره ۴).



تصویر ۴. تعداد زیرساختهای آسیب‌دیده ناشی از وقوع سیلاب در دهستانهای بابل (ماخذ، یافته‌های پژوهش حاضر)

نتایج حاصل از تحلیل ناحیه‌ای در محیط GIS، بر پایه داده‌های مرتبط با توزیع مکانی آسیب‌ها و لایه‌های مدل رقومی ارتفاع^۱ و شیب زمین (تصاویر شماره ۵ الف و ب) نشان می‌دهد که بیشترین تعداد خسارات وارده به تأسیسات زیربنایی در دهستان‌هایی رخ داده است که از میانگین ارتفاع و شیب بیشتری برخوردار هستند (جدول شماره ۱). بیشترین فراوانی آسیب‌ها در دهستان‌های سجادرود، خوش‌رود و درازکلا مشاهده می‌شود که پس از دهستان فیروزجاه، بالاترین میانگین ارتفاع (به ترتیب ۳۲۹، ۲۲۰ و ۳۰۵ متر) و شیب (به ترتیب ۱۰/۳۱، ۷/۶۷ و ۱۰/۱۸ درجه) را در میان دهستان‌های شهرستان بابل دارا هستند. در مقابل، دهستان‌های با میانگین ارتفاع و شیب کمتر، یا فاقد آسیب و یا کمترین میزان آسیب به تأسیسات زیربنایی در آن‌ها ثبت شده است. با این حال، دهستان فیروزجاه با وجود برخورداری از بیشترین مقدار میانگین ارتفاع (۲۱۸۹ متر) و میانگین شیب (۲۲ درجه) در بین دهستانهای شهرستان بابل، از نظر تعداد آسیب‌ها در رتبه چهارم قرار گرفته است. دلیل این موضوع می‌تواند بیانگر این باشد که رابطه میان ویژگی‌های توپوگرافیکی و میزان آسیب‌پذیری در تأسیسات زیرساختی، رابطه‌ای کاملاً خطی و مستقیم نبوده و احتمالاً عوامل دیگری نظیر تراکم و پراکنش تأسیسات، الگوی استقرار سکونتگاه‌ها، شدت مواجهه با جریان سیلاب و شرایط

دسترس‌ی نیز در میزان خسارات وارده نقش دارند. در این زمینه، نتایج تحلیل‌های آماری استنباطی همبستگی اسپیرمن و رگرسیون خطی ساده نیز وجود این پیچیدگی را تأیید کردند. به عنوان نمونه، نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داد بین میانگین ارتفاع دهستان‌ها و تعداد خسارت‌ها رابطه‌ای مثبت و معنادار وجود دارد ($P\text{-value} = 0.001$ و $\text{Spearman's rho} = 0.78$). همچنین مقدار R برابر با 0.3 محاسبه شده که نشان می‌دهد 3% از تغییرات در تعداد آسیب‌ها را می‌توان به تغییرات در میانگین ارتفاع نسبت داد. شباهت بین روند مشاهده شده در تحلیل آمار ناحیه‌ای در GIS و معنی‌داری آماری رابطه خطی در تحلیل همبستگی اسپیرمن و رگرسیون، بر اهمیت در نظر گرفتن عامل ارتفاع تأکید می‌کند. در حالی که دهستان‌های با میانگین ارتفاعی بالاتر ممکن است به طور کلی بیشتر در معرض خطرات سیلاب (مانند شدت جریان یا احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی) قرار داشته باشند، اما عوامل دیگری مانند تراکم تأسیسات زیربنایی، نوع کاربری اراضی، وجود یا عدم وجود سازه‌های حفاظتی و همچنین ویژگی‌های خاص توپوگرافیک منطقه‌ای مانند دره‌های تنگ یا دشت‌های سیلابی وسیع می‌توانند بر روی میزان نهایی آسیب‌ها تأثیرگذار باشند.



تصویر ۵. نقشه طبقات ارتفاعی (الف) و نقشه شیب (ب) در مقیاس دهستان‌های شهرستان بابل

در ارتباط با بررسی اثرات متغیرهای توپوگرافیکی نظیر ارتفاع و شیب بر الگوی توزیع و فراوانی آسیب‌ها به تأسیسات زیربنایی می‌توان بیان کرد که مناطق مرتفع‌تر به دلیل دریافت بیشتر بارش (اثرات اوروگرافیک) و افزایش احتمال وقوع سیلاب (یال‌سین، ۲۰۲۰، ۹۹۶)، مستعد آسیب‌پذیری بالاتری هستند. علاوه بر این، حرکت سریع‌تر جریان آب در نواحی کوهستانی و مناطق با ارتفاع بالا، منجر به افزایش انرژی جنبشی سیلاب و تشدید قدرت تخریبی آن می‌شود. در ارتباط با تأثیر شیب زمین، شیب‌های تند مستقیماً سرعت جریان سیلاب را افزایش داده و به تبع آن، توان فرسایش و تخریب را تشدید می‌کنند (حسنی و سیوندی پور، ۲۰۲۵: ۴۴). این سرعت بالای جریان آب، قدرت جابجایی و تخریب تأسیسات حیاتی مانند پل‌ها، جاده‌ها و خطوط انتقال انرژی را افزایش می‌دهد. همچنین، شیب‌های تند با ایجاد جریان‌های سیلابی ناگهانی و سریع، فرصت واکنش و آمادگی را به حداقل می‌رسانند. علاوه بر این، فرسایش شدید خاک در مناطق پرشیب نیز می‌تواند منجر به تخریب پایه پل‌ها و سازه‌های زیربنایی شود که این امر پایداری تأسیسات را به طور جدی به مخاطره می‌اندازد.

جدول ۱- متوسط ارتفاع و شیب در دهستانهای شهرستان بابل (ماخذ، یافته‌های پژوهش حاضر)

نام دهستان	تعداد آسیبها	متوسط ارتفاع (متر)	متوسط شیب (درجه)
فیروزجاه	۹	۲۱۸۹/۶۹	۲۲/۰۵
بابل کنار	۶	۱۱۳/۳۷	۶/۶۳
درازکلا	۲۸	۳۰۵/۴۱	۱۰/۱۸
سجادرود	۴۲	۳۲۹/۵۴	۱۰/۳۱
گتاب جنوبی	۰	۵۰/۶۳	۰/۵۴
خوش رود	۳۵	۲۲۰/۰۴	۷/۶۷
شهید آباد	۰	۴۷/۷۰	۰/۴۱
لاله آباد	۳	۲۱/۰۹	۰/۲۲
گتاب شمالی	۱	۲۶/۶۱	۰/۲۸
اسبوکلا	۰	۱۱/۶۷	۰/۱۴
گنج افروز	۰	۲۲/۷۳	۰/۲۹
فیضیه	۰	-۱/۵۴	۰/۱۱
کاری پی	۰	۲/۵۴	۰/۰۶

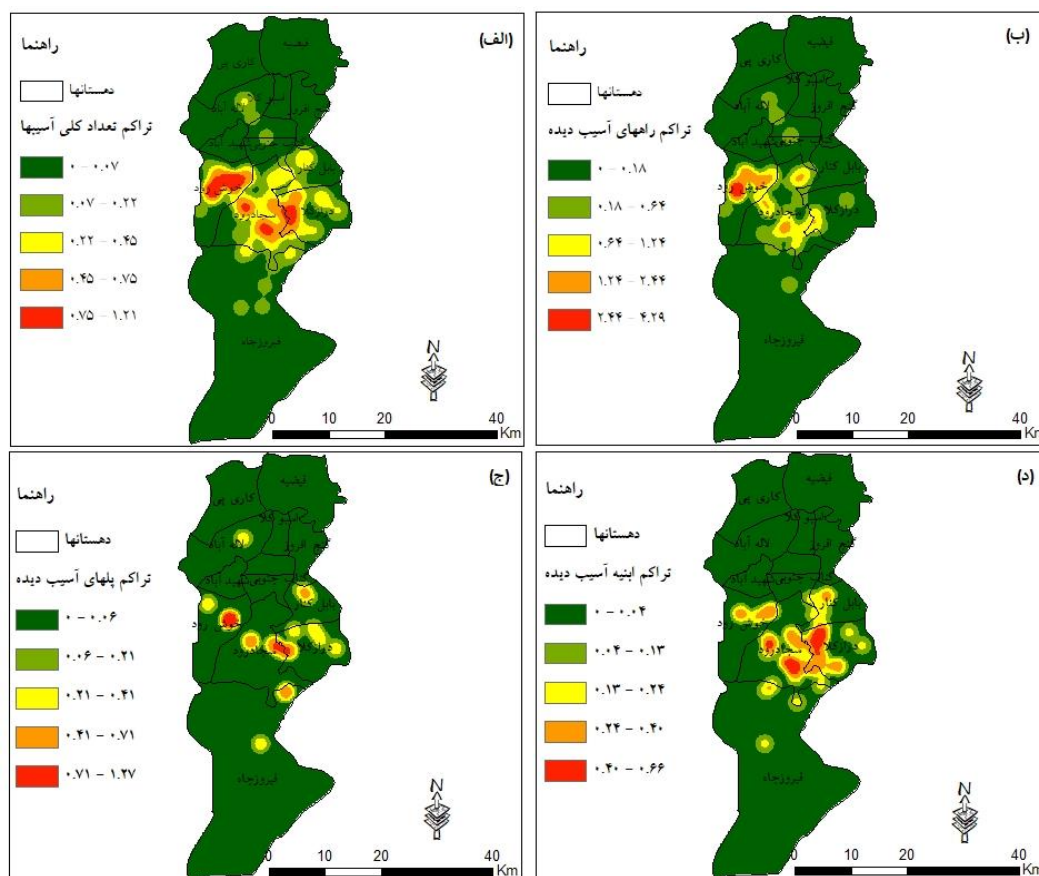
نتایج برآورد تراکم کرنل تاسیسات زیربنایی آسیب‌دیده

نتایج تابع برآورد تراکم کرنل بر روی موقعیت مکانی تعداد و نوع تاسیسات زیربنایی آسیب‌دیده در اثر وقوع سیلاب نشان می‌دهد که الگوی توزیع فضایی در تراکم آسیبها در سطح دهستان‌های شهرستان بابل یکنواخت نبوده و در نواحی خاصی متمرکز شده است. در این زمینه، الگوی کلی توزیع فضایی تراکم آسیبها نشان می‌دهد که شدت تراکم در تعداد آسیبها و همچنین نوع تاسیسات زیربنایی آسیب‌دیده در دهستانهای خوش رود، سجادرود و درازکلا بیشتر از سایر دهستانها می‌باشد (تصویرهای شماره ۶ الف تا د). در زمینه تعداد تاسیسات آسیب‌دیده، دهستانهای خوش‌رود، سجادرود و درازکلا با تراکم میانگین ۰/۹۸ آسیب در هر کیلومتر مربع، بیشترین میزان تراکم تعداد آسیب به تاسیسات زیربنایی در اثر وقوع سیلاب را نشان می‌دهند (شکل ۶ الف). همچنین، دهستانهای فیضیه، کاری‌پی، گنج‌افروز، اسبوکلا و شهیدآباد با تراکم متوسط کمتر از ۰/۰۳ آسیب در هر کیلومتر مربع، کمترین میزان تراکم تعداد آسیب به تاسیسات زیربنایی را دارا می‌باشند (تصویر شماره ۶ الف).

در ارتباط با الگوی فضایی توزیع تراکم آسیبها در شبکه‌های راه، نتایج نشان می‌دهد که دهستان خوش‌رود با تراکم میانگین ۳/۳۶ در هر کیلومتر مربع، بیشترین میزان تراکم آسیب در اثر وقوع سیلاب را به خود اختصاص داده و دهستان سجادرود با تراکم میانگین ۱/۸۴ در هر کیلومتر مربع در رتبه دوم آسیب و سایر دهستانها در کلاسهای تراکم متوسط تا خیلی کم آسیب به شبکه راهها قرار دارند (تصویر شماره ۶ ب). نتایج مرتبط با الگوی توزیع فضایی تراکم آسیبها به پلها نیز نشان می‌دهد که دهستانهای خوش‌رود، سجادرود و درازکلا با تراکم میانگین برابر با ۰/۹۹ در هر کیلومتر مربع، بیشترین میزان آسیب را در اثر وقوع سیلاب نشان داده و سایر دهستانها از تراکم آسیب کمتری برخوردار هستند (تصویر شماره ۶ ج). علاوه بر این، نتایج توزیع فضایی تراکم آسیب به ابنیه فنی نشان می‌دهد که دو دهستان درازکلا و سجادرود با تراکم میانگین ۰/۵۳ در هر کیلومتر مربع، بیشترین میزان تراکم آسیب به

ابنیه فنی را در بین دهستانهای شهرستان بابل به خود اختصاص داده و دهستانهای خوش رود و بابل کنار با تراکم میانگین ۰/۳۲ در هرکیلومتر مربع در رتبه دوم شدت آسیب قرار دارند (تصویر شماره ۶ د).

بر اساس نتایج تخمین تراکم کرنل، الگوی فضایی آسیب‌های ناشی از سیلاب در شبکه‌های زیرساختی دهستانهای شهرستان بابل از تمرکز مشخصی پیروی می‌کند. به‌ویژه دهستان‌های خوش‌رود و سجادرود، در تمام شاخه‌های مرتبط با تاسیسات زیرساختی (راه، پل و ابنیه فنی) در زمره مناطق با بیشترین میزان تراکم آسیب قرار دارند. این تمرکز فضایی می‌تواند بیانگر آن باشد که شدت اثرگذاری رخدادهای سیلابی در این مناطق، از نظر فضایی همپوشانی داشته و احتمالاً می‌تواند ناشی از ترکیب عواملی مانند تراکم بالای زیرساخت‌ها در مسیر جریان‌های سیلاب، موقعیت توپوگرافیکی در حوضه‌های میانی رودخانه‌ها، و محدودیت ظرفیت زهکشی و دفع آب‌های سطحی در این دهستانها باشد. در مقابل، دهستان‌هایی که در کلاس‌های تراکم متوسط تا خیلی کمی از تراکم آسیب‌ها قرار گرفتند، به نظر می‌رسد از نظر موقعیت جغرافیایی در بخش‌های با ارتفاع بالاتر یا با فاصله بیشتر از محورهای اصلی جریان‌های سیلابی واقع شده‌اند. این تفاوت فضایی در توزیع تراکم آسیب به تاسیسات زیربنایی، می‌تواند بیانگر آن باشد که احتمالاً عمق و وسعت جریان‌های سیلابی در مناطق با ارتفاع پایین‌تر و دشت‌های پست‌تر و مسیرهای تجمع رواناب تأثیر بیشتری بر شبکه راه‌ها و پل‌ها دارد. مقایسه الگوی توزیع تراکم فضایی آسیب به راه‌ها، پل‌ها و ابنیه فنی نشان می‌دهد که الگوی فضایی مشابهی میان این سه نوع تأسیسات وجود دارد، با این تفاوت که تراکم آسیب به پل‌ها و ابنیه فنی احتمالاً به دلیل مکان‌یابی بر روی یا مجاور مسیر رودخانه‌ها، ماهیت متمرکزتر و نقطه‌ای‌تری نسبت به شبکه‌های راه دارد. این همگرایی فضایی در دهستان‌های خوش‌رود، سجادرود و درازکلا، بیانگر وجود نقاط تمرکز خطر و آسیب است که می‌توان آن‌ها را به عنوان کانون‌های بحرانی آسیب زیرساختی در این دهستانهای شهرستان بابل در نظر گرفت. از منظر کاربردی، شناسایی این نقاط تمرکز برای برنامه‌ریزی مدیریت بحران و کاهش ریسک اهمیت بالایی دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در فرآیند مقاوم‌سازی و طراحی اقدامات حفاظتی، اولویت مداخله و بهسازی به دهستان‌های با تراکم بالاتر آسیب اختصاص یابد تا اثربخشی اقدامات در کاهش آسیب‌پذیری به حداکثر برسد. همچنین نتایج این بخش می‌تواند مبنایی برای انجام تحلیل‌های تکمیلی همبستگی با عوامل محیطی (مانند ارتفاع، شیب و بارندگی) باشد تا ساختار کلی شکل‌گیری این الگوهای فضایی دقیق‌تر تبیین شود.



تصویر ۶ - برآورد تراکم کرنل برای تعداد آسیبها (الف)، آسیب به راهها (ب)، آسیب به پلها (ج) و آسیب به ابنیه (د) (ماخذ، یافته‌های پژوهش حاضر)

نتایج تحلیل نقاط حاد آسیب به زیرساختها

نتایج بدست‌آمده از روش تحلیل نقاط حاد با استفاده از شاخص آمار مکانی $Getis-Ord\ Gi^*$ جهت بررسی الگوی فضایی توزیع و پراکنش آسیبها نشان می‌دهد که در ۷ دهستان خوشرود، سجادرود، درازکلا، بابلکنار، گتابهای شمالی و جنوبی و شهیدآباد خوشه‌های فضایی نقاط حاد آسیبدیده در اثر وقوع سیلاب در تاسیسات زیربنایی در بازه زمانی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ شکل گرفته که با رنگ قرمز نمایش داده شده است (تصویر شماره ۷). از نظر آماری، خوشه‌های فضایی تجمعی آسیبها در این دهستانها با مقادیر میانگین Z -Score برابر با ۵/۶۶، P -Value برابر با ۰/۰۰۲ و سطوح اطمینان ۹۰ تا ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. نتایج بدست‌آمده در روش تحلیل نقاط حاد منطبق و هم‌راستا با نتایج بدست‌آمده از روش تابع برآورد تراکم کرنل بوده که در آن دهستانهای خوشرود، سجادرود و درازکلا نیز بیشترین میزان تراکم آسیب به تاسیسات زیربنایی ناشی از وقوع سیلاب را داشتند. نکته قابل توجه دیگر در نتایج بدست‌آمده در روش تحلیل نقاط حاد این است که خوشه‌های فضایی تاسیسات آسیبدیده در دهستانهای بابل کنار، گتاب شمالی، گتاب جنوبی و شهیدآباد نیز به عنوان کانونهای بحرانی شکل گرفته که در روش تخمین تراکم کرنل، این دهستانها دارای تراکم پایین آسیب به تاسیسات زیربنایی بودند (تصاویر شماره ۶ الف تا د). دلیل این نتیجه می‌تواند بدلیل ماهیت آماری و فضایی شاخص $Getis-Ord\ Gi^*$ در روش تحلیل نقاط حاد باشد که نه تنها به تعداد رخداد آسیب در یک واحد مکانی توجه دارد، بلکه الگوی تجمع فضایی و تراکم نسبی آن واحد نسبت به دهستانهای همسایه را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. در این راستا و از آنجایی که

18

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف شناسایی و ارزیابی الگوی توزیع فضایی آسیب‌های ناشی از سیلاب در زیرساخت‌های دهستانهای شهرستان بابل، از دو روش مکمل آمار مکانی تخمین تراکم کرنل (KDE) و تحلیل نقاط حاد (Hot Spot Analysis) استفاده شده است. نتایج نشان داد که پراکنش آسیب‌ها در انواع زیرساخت‌های مورد بررسی، از الگوی تصادفی تبعیت نکرده و تمرکزهای فضایی مشخص و معناداری در سطح برخی از دهستان‌های شهرستان وجود دارد. برخلاف مطالعات پیشین در حوزه مخاطرات که عمدتاً بر پهنه‌بندی خطر سیلاب تمرکز داشتند (درفشی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۵۲)، پژوهش حاضر با رویکردی متفاوت بر تحلیل الگوی فضایی خسارات به زیرساخت‌های حیاتی تاکید داشته است. همچنین، در حالی که تحلیل‌های آمار فضایی نظیر تخمین تراکم کرنل و تحلیل نقاط حاد در مطالعات مربوط به مخاطرات طبیعی و انسانی نظیر لرزه‌خیزی (حسن زاده و همکاران، ۱۴۰۳:) و تصادفات جاده‌ای (سمیعا و همکاران، ۱۴۰۲: ۵۰۹) به کار گرفته شده‌اند، استفاده از این ترکیب متدولوژیک برای شناسایی کانون‌های معنادار آسیب به زیرساخت‌ها در اثر وقوع سیلاب و در مقیاس دهستان‌های بابل، ابعاد جدیدی از تحلیل مخاطره را ارائه می‌دهد که فراتر از مدل‌های سنتی پهنه‌بندی است. یافته‌های این پژوهش در مقایسه با مطالعات انجام شده در شهرستان بابل، که عمدتاً بر ارزیابی آسیب‌پذیری شهری (حقیقی و همکاران، ۱۳۹۹: ۷۰) و یا شناسایی نواحی بحرانی سیلاب (حجازی و همکاران، ۱۴۰۴: ۱۰۳۰) تمرکز داشته‌اند، نشان‌دهنده یک تغییر پارادایم از پیش‌بینی خطر به شناسایی کانون‌های آسیب و تحلیل خسارت است. در این زمینه و برخلاف پژوهش‌های پیشین در شهرستان بابل که ماهیت توصیفی و یا پهنه‌بندی داشتند، این مطالعه با استفاده از روشهای آمار فضایی در بستر GIS توانست با دقت آماری بالا، کانون‌های تمرکز آسیب به زیرساخت‌های کلیدی را در سطح دهستان‌های شهرستان بابل شناسایی کند.

همپوشانی نتایج میان الگوهای فضایی شناسایی شده در روش تخمین تراکم کرنل و تحلیل نقاط حاد از منظر مدیریت بحران، حاکی از وجود ساختارهای آسیب‌پذیری پایدار در تاسیسات زیربنایی موجود در این نواحی است که باید در برنامه‌ریزی مدیریت ریسک مورد توجه قرار گیرد. در این زمینه و در فاز پیش از بحران، وجود چنین الگویی نشان‌دهنده ضرورت تمرکز اقدامات پیشگیرانه هدفمند بر دهستان‌های با تراکم بالای تاسیسات زیربنایی آسیب دیده می‌باشد. در این زمینه، انجام اقداماتی همچون مقاوم‌سازی تأسیسات حیاتی، بازنگری در شبکه‌های زیرساختی، بهبود عملکرد سیستم‌های هدایت روانابهای سطحی، و توسعه سامانه‌های هشدار سریع مرتبط با وقوع مخاطرات طبیعی (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۵: ۲؛ آنشوکا و همکاران، ۲۰۲۶: ۲) ضروری می‌باشد. در فاز حین بحران (رجایی و همکاران، ۲۰۲۴)، تمرکز مکانی آسیب‌ها و شناسایی خوشه‌های فضایی به‌عنوان کانون‌های اصلی اختلال، اهمیت مدیریت عملیات پاسخ در سیکل مدیریت بحران را برجسته می‌سازد. در این زمینه، وقوع سیل احتمالاً موجب ایجاد محدودیت سریع در دسترسی به مناطق آسیب‌دیده، آسیب به مسیرهای ارتباطی و نیاز بیشتر به مداخلات اضطراری می‌شود. بنابراین، استقرار پیشگیرانه و زود هنگام تیم‌های واکنش سریع، طراحی مسیرهای جایگزین دسترسی و برنامه‌ریزی برای تداوم عملکرد زیرساخت‌های حیاتی در این نقاط باید بخشی از سناریوهای عملیاتی پاسخ در مدیریت بحران باشد. در نتیجه، تحلیل‌های فضایی ارائه‌شده در این پژوهش ظرفیت آن را دارد که به‌عنوان ورودی مستقیم در طراحی مدل‌های تخصیص منابع امدادی (داریوش و همکاران، ۲۰۲۲: ۴۷؛ سقه‌ئی و همکاران، ۲۰۲۴: ۳۷۸) مورد استفاده قرار گیرد. در فاز پس از بحران نیز الگوی هم‌زمان تراکم بالا و خوشه‌بندی فضایی آماری معنادار بیانگر آن است که بازسازی در این مناطق نباید رویکرد بازگشت به وضعیت پیش از بحران را دنبال کند. چنین الگوهایی معرف مناطقی هستند که احتمال تکرار آسیب در آن‌ها بالاست و از این‌رو فرآیند بازسازی می‌بایستی در راستای ارتقای تاب‌آوری بلندمدت شکل گیرد که شامل اصلاح الگوهای ساخت‌وساز، بهبود مکانیابی استقرار تأسیسات حیاتی و اعمال راهبردهای کاربری زمین مبتنی بر کاهش ریسک می‌باشد.

ار نقطه نظر کاربردی، نتایج حاصل از تحلیل‌های KDE و Hot Spot می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب تصمیم‌یار مکانی برای معاونت بازسازی و بازتوانی در مجموعه مدیریت بحران مورد استفاده قرار گیرد. تمرکز فضایی آسیب‌ها در دهستان‌های سجادرود، خوش‌رود و درازکلا نشان می‌دهد که این مناطق در معرض ریسک تکرارشونده قرار دارند و در نتیجه، برنامه‌ریزی‌های بازسازی نباید صرفاً بر ترمیم موضعی و کوتاه‌مدت متمرکز باشد (ایکدا، ۲۰۲۵: ۲). در این زمینه، انتقال یا بهسازی زیرساخت‌های واقع در نقاط با ریسک بالا، بازنگری در الگوی استقرار کاربری‌ها، و طراحی برنامه‌های ارتقای تاب‌آوری اجتماعی (احمدی و کیانی، ۱۴۰۲: ۱۵۰۸) و نهادی در جوامع محلی این دهستان‌ها می‌تواند در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار گیرد. از سوی دیگر، الگوهای فضایی استخراج‌شده می‌تواند به معاونت بازسازی کمک کند تا مدل‌های هزینه-فایده برای مداخله در زیرساخت‌های حیاتی (وینن و کورلجی، ۲۰۲۱: ۵) را مبتنی بر شواهد فضایی دقیق تنظیم کند. در این راستا، تمرکز آسیب در مناطق مشخص، توجهی برای سرمایه‌گذاری هدفمند در بهبود زیرساخت‌ها و کاهش هزینه‌های بلندمدت بازسازی می‌باشد. این نتایج همچنین ظرفیت استفاده در تدوین برنامه‌های بازسازی مبتنی بر ریسک را دارد و می‌تواند ورودی مهمی برای تنظیم دستورالعمل‌های فنی و اجرایی بازتوانی در مناطق با ریسک بالای آسیب‌پذیری باشد (شاهاتا و همکاران، ۲۰۲۲: ۲).

برای بخش بیمه و ارزیابی خسارات، یافته‌های این تحقیق یک ابزار مهم برای مدیریت ریسک بیمه‌ای، مدل‌سازی خطر و برآورد دقیق خسارات بالقوه فراهم می‌کند (تیرولوگو و همکاران، ۲۰۲۳: ۶۸۲؛ حمزه و فرزانه، ۱۴۰۲: ۲۷). این نتایج می‌تواند در تعیین نرخ‌های بیمه‌ای مبتنی بر ریسک، اصلاح جداول حق بیمه و طراحی محصولات بیمه‌ای ویژه برای مناطق با خطر بالا به کار گرفته شود. افزون بر این، نتایج بدست آمده از تحلیل فضایی آسیب‌ها می‌تواند دقت فرآیند ارزیابی میدانی خسارات پس از بحران را افزایش دهد. با تمرکز بر مناطق دارای تراکم بالای آسیب، تیم‌های ارزیابی می‌توانند اولویت‌بندی مکانی برای اعزام کارشناسان داشته باشند و تخمین‌های اولیه خسارت را با دقت بیشتری انجام دهند. در نهایت، شناسایی کانون‌های سرد در روش تحلیل نقاط حاد که شامل مناطق فاقد آسیب می‌باشد نیز برای بیمه حائز اهمیت بوده زیرا مناطق با ریسک پایین آسیب می‌توانند در تدوین سیاست‌های تشویقی یا تخفیف حق بیمه مورد توجه قرار گیرند.

علیرغم دستاوردهای حاصل از این پژوهش در شناسایی الگوهای فضایی توزیع آسیب به زیرساخت‌ها، چند محدودیت در این مطالعه وجود داشت که می‌تواند مبنای پژوهش‌های آینده قرار گیرد. نخست، محدودیت در دسترسی به داده‌های مکانی با دقت بسیار بالا از تمامی ابنیه‌ها و زیرساخت‌های آسیب‌دیده، که می‌تواند دقت نقشه‌های تراکم را در مقیاس‌های کوچک‌تر افزایش دهد. دوم، تمرکز این پژوهش بر توصیف الگوی توزیع فضایی بود و به تحلیل روابط علی و معلولی بین عوامل طبیعی، کالبدی، هیدرولوژیکی و مدیریتی و با استفاده از متغیرهایی نظیر توپوگرافی، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، تراکم جمعیت، تراکم، کیفیت و قدمت زیرساخت‌ها، ظرفیت آگذری سازه‌ها، میزان بارندگی، ویژگی‌های خاک و ضعف‌های مدیریتی یا اجرایی و وقوع آسیب نپرداخته است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، از مدل‌های پیشرفته آماری مانند رگرسیون جغرافیایی وزنی و یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر جنگل تصادفی جهت تحلیل علت وقوع خوشه‌های آسیب و تعیین عوامل اثرگذار بر شدت خسارات در دهستان‌های شناسایی شده، استفاده شود.

References

- Anshuka, A., Sanderson, D., Le De, L. et al. (2026). A Holistic Approach to Early Warning Systems Using an Agent-Based Model. *Int J Disaster Risk Sci*. <https://doi.org/10.1007/s13753-026-00729-7>
- Amirmoradi, K. , Shokoohi, A. and azizian, A. (2020). [Evaluating Risk of Economic Loss due to River Flood in Urban areas (Study Area: Kan Watershed(Persian)]. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2239-2259. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.283115.668228>
- Cheruiyot, K. (2022). Detecting spatial economic clusters using kernel density and global and local Moran's I analysis in Ekurhuleni metropolitan municipality, South Africa, *Regional Science Policy & Practice*, Volume 14, Issue 2, Pages 307-328, ISSN 1757-7802, <https://doi.org/10.1111/rsp3.12526>
- CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters). (2023). 2023 Disasters in Numbers, [Online] Available at: <https://www.cred.be/>
- Dariush, A & Mohammadi, M.A. (2022). [Presenting the Model of Resource Allocation to Injuries of the Disasters (Persian)]. *Crisis Management and Emergency Situations*, 14(1), 45–81.
- Derafshi, K. , Sadough, H. , Mehjou nejad, A. and khaledi, S. (2020). [The Sub-Zoning of Flood Vulnerability in the Babol City (Persian)]. *Sustainable Development of Geographical Environment*, 2(2), 150-167. <https://doi.org/10.52547/sdge.2.2.150>
- Ehrambaf Shooshtar, A., Samouei, P., & Messi Bidgoli, M. (2025). [Evaluation and Prioritization of Nodes in Urban Critical Infrastructures for Increasing Resilience Against Disasters Using the DEMATEL Approach (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge (quarterly)*, 15(1), 30-49. <http://dpmk.ir/article-1-709-fa.html>
- Formetta, G., Marra, F., Dallan, E., Zaramella, M., Borga, M. (2022). Differential orographic impact on sub-hourly, hourly, and daily extreme precipitation. *Advances in Water Resources*, Volume 159, 2022, 104085, ISSN 0309-1708, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104085>
- Gariano, L.S., Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, Volume 162, 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24, 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Gianni, E., Tyrologou, P., Couto, N. et al. (2023). Natural hazard insurance: dissemination strategies using geological knowledge. *Environ Syst Decis* 43, 680–692. <https://doi.org/10.1007/s10669-023-09936-9>
- Guerri, G., Crisci, A., Messeri, A., Congedo, L., Munafò, M., & Morabito, M. (2021). Thermal summer diurnal hot-spot analysis: The role of local urban features layers. *Remote Sensing*, 13(3), 538. <https://doi.org/10.3390/rs13030538>
- Hamzeh, A., Farzaneh, M. (2023). [An analysis of the importance of natural hazard insurance with an emphasis on flood insurance (Persian)]. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, 10 (S1) :25-47. <http://journal.hydropower.org.ir/article-1-512-fa.html>

- Hassani, M. J. and Sivandi-Pour, A. (2024). [Investigating the vulnerability of urban infrastructure in the face of flood risk, a case study of the water distribution network of Jiroft City (Persian)]. *Journal of Urban Environmental Management*, 2(4), 60-77. <https://doi.org/10.48306/juem.2025.503499.1069>
- Hejazi, A. , negahban, S. , mousavi, M. and Aminzadeh, M. (2024). [Assessment and mapping of urban watershed flood by using fuzzy VIKOR and weighted linear combine models (Case study: Catchment Izeh-Khuzestan) (Persian)]. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(2), 51-70. [10.22034/gmpj.2024.452640.1499](https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.452640.1499)
- Hejazi, S. A. , Rajabi, M. and Rohanizadeh, S. (2025). [Flood Hazard Spatial Zoning and Critical Area Assessment for Sustainable Management and Development (Case Study: Kelaroud Babol Watershed, Mazandaran Province) (Persian)]. *Journal of Ecohydrology*, 12(4), 1025-1049. <https://doi.org/10.22059/ije.2026.405335.1893>
- Ikeda, T. (2025). Recovery and Rehabilitation for Flood Disaster Due to Typhoon Hagibis 2019. In: Shaw, R. (eds) *Encyclopedia of Disaster Risk Reduction*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4547-0_238-1
- IPCC. (2023). Climate change 2023: synthesis report. *Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Core Writing Team, pp 1–34
- Jonkman, S.N., Curran, A. & Bouwer, L.M. (2024). Floods have become less deadly: an analysis of global flood fatalities 1975–2022. *Nat Hazards* 120, 6327–6342. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06444-0>
- Kiaei, A. and Ahmadi, M. (2023). [Operationalizing Social Resilience for Riverine Flood Risk Management in Urban Basins. *Amirkabir Journal of Civil Engineering (Persian)*], 55(7), 1505-1524. [doi: 10.22060/ceej.2023.21585.7767](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21585.7767)
- Kuleli, T., Bayazit, S. (2024). An integrated approach to the spatial distribution of the coastal infrastructure vulnerability by using coastal vulnerability index and hot spot analysis: a case study of Kusadasi-Selcuk. *Nat Hazards* 120, 14117–14151. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06749-0>
- Liu, Y., Li, Q., Li, W., Jia, L., Pei, X. (2023). Knowledge map and hotspot analysis in climate resilience infrastructure (CRI) from 1997 to 2022 through scientometric analysis, *Environmental Research*, Volume 228, 115874, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115874>
- Michael F. Goodchild. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow, *Procedia Earth and Planetary Science*. Volume 1, Issue 1, Pages 1037-1043, ISSN 1878-5220, <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.160>
- Mirshekarpour, M , Hassanzadeh, R and Hossinpour, A . (2025). [Evaluation of seismic risk and structural and population vulnerability a case study of Haji Abad city - Hormozgan Province (Persian)]. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 33(132), 45-64. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2024.2020908.3052>
- Najafi, E. and Karimi Kerdabadi, M. (2020). [Flood Risk Evaluation and Zoning using with AHP-Fuzzy Combined Model with Emphasis on Urban Safety (Case Study: Region 1 of Tehran Municipality) (Persian)]. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 43-60. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.86110>

- Parizadi, T., shaikholeslami, A & karimi razakani, A. (2019). [Analysis of the state of urban resilience against natural hazards (Case Study: Baqer-shahr City) (Persian)]. *Research and Urban Planning*, 10(37), 41-54. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22285229.1398.10.37.4.8>
- Patel, D.P., Srivastava, P.K. (2013). Flood Hazards Mitigation Analysis Using Remote Sensing and GIS: Correspondence with Town Planning Scheme. *Water Resour Manage* 27, 2353–2368. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0291-6>
- Prütz, R., Månsson, P. (2021). A GIS-based approach to compare economic damages of fluvial flooding in the Neckar River basin under current conditions and future scenarios. *Nat Hazards* 108, 1807–1834. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04757-y>
- Saghehei E, Erfani V, Etesam M R. (2024). [Identifying and Assessing the Risks of Failure in Relief Items Distribution During Natural Disasters in the Iranian Red Crescent Society (Persian)]. *Disaster Prev. Manag. Know.* 14 (3) :374-391 URL: <http://dpmk.ir/article-1-670-fa.html>
- Samia, J., Ranjbar Shoubi, M., & Nikpour, A. (2024). [Spatial-temporal Analysis of Road Accidents in Haraz Road Using Spatial Statistics and Geographical Information System (Persian)]. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 13(4), 508-527. <http://dx.doi.org/10.32598/DMKP.13.4.768.1>
- Shahata, K., El-Zahab, S., Zayed, T., Alfalah, G. (2022). Rehabilitation of municipal infrastructure using risk-based performance, *Automation in Construction*, Volume 140, 2022, 104335, ISSN 0926-5805, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104335>
- Sorsa, Y., Abate, B. & Arba, Y. (2026). GIS-based spatiotemporal flood hazard assessment using statistical and fuzzy logic in the Omo Gibe River Basin, Ethiopia. *Discov Appl Sci* 8, 12. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08134-3>
- Taheri Amiri, M J , abdollahzadeh, G , javaheri barforooshi, M and haghghi, F . (2021). [The vulnerability and crisis management of Babil city under the impact of earthquakes using ArcGIS software (Persian)]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4), 62-77. <https://doi.org/10.22065/jsce.2018.121510.1491>
- Tam, T.H., Abd Rahman, M.Z., Harun, S. et al. (2025). Flood vulnerability assessment of buildings using geospatial data and machine learning classifiers. *Acta Geophys.* 73, 2879–2907. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01527-9>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030. <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/43291>
- UNDRR.(2015). Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>. Accessed 11 Dec 2020
- Veen, A.V.D., Logtmeijer, C. (2005). Economic Hotspots: Visualizing Vulnerability to Flooding. *Nat Hazards* 36, 65–80. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-4542-y>
- Wang, D., Huang, G., Zhang, Q., Gao, Y., Du, Y., & Liu, X. (2025). A multi-source landslide early warning model based on dynamic monitoring data and the SAAHP-FCE method. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2513536>

Weijnen, M., Correljé, A. (2021). Rethinking Infrastructure as the Fabric of a Changing Society. In: Weijnen, M.P.C., Lukszo, Z., Farahani, S. (eds) *Shaping an Inclusive Energy Transition*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74586-8_2

World Bank. (2023). Earthquake Damage in Türkiye Estimated to Exceed \$34 billion: *World Bank Disaster Assessment Report*. [Online]. Available: rldbank.org/en/news/press-release/2023/02/27/earthquake-damage-in-turkiye-estimated-to-exceed-34-billion-world-bank-disaster-assessment-report.

Yalcin, E. (2020). Assessing the impact of topography and land cover data resolutions on two-dimensional HEC-RAS hydrodynamic model simulations for urban flood hazard analysis. *Nat Hazards* 101, 995–1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>

Yeboah, F., Ackom, E.K., Yidana, S.M. et al. (2024). Hydrologic Modelling for Flood Threshold and Hazard Prediction in the Black Volta River Basin, West Africa. *Environ Model Assess* 29, 375–394. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09946-6>

Yilmaz, M., Alemdar, K.D. (2025). Mapping and assessment of flood risk based on vulnerability and hazard factors in urban areas through the integration of multi-criteria techniques and GIS: A case study in Yakutiye, Erzurum, Türkiye. *Environ Earth Sci* 84, 435. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12393-z>

Zhang, X., Wang, X. & Török, Z.G. (2026). Multi-scale spatiotemporal gis mapping of urban flood risk hotspots in Zhengzhou: implications for adaptation strategies. *Environ Syst Res* 15, 10. <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00447-x>

Zheng, Z., Fu, B. & Feng, X. (2016). GIS-based analysis for hotspot identification of tradeoff between ecosystem services: A case study in Yanhe Basin, China. *Chin. Geogr. Sci.* 26, 466–477. <https://doi.org/10.1007/s11769-016-0816-z>

Ziari, K. , Rajaei, S. A. and Darabkhani, R. (2024). [Suitable Approach for City Flood Crisis Management: A Case Study of Ilam City. *Sustainable Development of Geographical Environment (Persian)*], 5(9), 72-89. <https://doi.org/10.48308/sdge.2023.230355.1114>