

Flood Hazard Zonation in Shahdad Watershed Using the Analytic Hierarchy Process (AHP)

Mahsa Sheikhasadi ¹, Mahdieh Hosseinjanizadeh*², Mehdi Honarmand ², Reza Hassanzadeh²

¹ Msc. Student, ² Associate Professor, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. E-mail:

mahsasheikhasadi@gmail.com, m.hosseinjanizadeh@kgut.ac.ir, r.hassanzadeh@kgut.ac.ir,
m.honarmand@kgut.ac.ir

Article Info	Abstract
Keywords: Shahdad, Flood risk zoning, Analytical Hierarchy Process (AHP), Remote Sensing.	Floods are among the most destructive natural hazards, causing significant damage worldwide each year, particularly in Iran, and affecting numerous communities. Identifying high risk areas is a fundamental step toward mitigating flood impacts. Therefore, the preparation of flood hazard maps is essential for effective flood management and planning. The aim of this study is to assess and zone flood hazards in the Shahdad watershed using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). Flood susceptibility and flood inundation susceptibility maps were produced using processed satellite imagery from Landsat 8 (OLI sensor) and Sentinel 2. In this study, flood susceptibility is defined as the inherent potential of a catchment to generate runoff and produce flood events, whereas flood inundation susceptibility refers to the likelihood of an area being inundated and experiencing water accumulation due to incoming flood flows. To delineate flood hazard zones, the main criteria influencing both flood susceptibility and flood inundation susceptibility were identified through a comprehensive review of previous studies. These criteria included slope, vegetation cover, curvature, land use, geology, drainage density, topographic wetness index (TWI), stream power index (SPI), elevation, distance from the river, presence of obstacles within the river channel, and riverbed profile. Raster maps of each criterion were generated and classified in a GIS environment. The weights of the criteria were determined using the Analytical Hierarchy Process (AHP) implemented in Expert Choice software. Subsequently, Weighted Linear Combination (WLC) was applied to produce the final flood susceptibility and flood inundation susceptibility maps. The results indicate that 16%, 26%, 36%, 18%, and 3% of the study area fall into very high, high, moderate, low, and very low flood susceptibility classes, respectively. For flood inundation susceptibility, the corresponding percentages are 10%, 28%, 15%, 26%, and 21%. These findings provide valuable information for flood risk management and spatial planning in the Shahdad watershed.

Corresponding author: Mahdieh Hosseinjanizadeh

Email: m.hosseinjanizadeh@kgut.ac.ir,

[https://doi.org/ 10.48306/jgrs.2026.578129.1025](https://doi.org/10.48306/jgrs.2026.578129.1025)

Received September 2025; Accepted November 2025

©2025 Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. This is an open article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

Extended abstract

1. Introduction:

Flooding is one of the most significant and destructive natural hazards, causing substantial damage worldwide each year, particularly in arid and semi-arid regions. In Iran, due to pronounced rainfall variability and specific climatic conditions, flood risk management has become a major priority in natural resource planning and infrastructure development. Given the limitations of generalized mitigation measures, the application of advanced modeling techniques to identify and zone flood-prone areas is essential. The Shahdad watershed, located in eastern Kerman Province within the Lut Desert, is highly susceptible to seasonal and flash floods due to its distinctive topographic features, relatively low-permeability soils, and the occurrence of intense rainfall events. The repeated destruction of temporary flood-control structures in the region further demonstrates its high flood susceptibility. Accordingly, this study aims to delineate flood hazard zones within the Shahdad watershed. To achieve this objective, the Analytic Hierarchy Process (AHP), as an efficient multi-criteria decision-making approach, was integrated within a Geographic Information System (GIS) framework. By assigning weights to the main factors influencing flood occurrence including slope, vegetation cover, curvature, land use, geology, drainage density, Topographic Wetness Index (TWI), Stream Power Index (SPI), elevation, distance from rivers, presence of obstacles within the river channel, and riverbed profile the method enables accurate classification of flood risk levels. The findings of this study provide a scientific basis for sustainable natural resource management and the reduction of potential flood damages in the Shahdad region.

2. Results

The Shahdad watershed was classified into five flood susceptibility zones: very high, high, moderate, low, and very low. The final flood susceptibility map indicates that very high-risk areas cover 203.16 km² (approximately 16% of the study area), high-risk areas 335.89 km² (26%), moderate-risk areas 452.05 km² (36%), low-risk areas 234.10 km² (18%), and very low-risk areas 42.90 km² (3%). In addition, the flood inundation susceptibility map shows that very high-risk zones cover 125.93 km² (10%), high-risk zones 351.04 km² (28%), moderate-risk zones 194.04 km² (15%), low-risk zones 335.68 km² (26%), and very low-risk zones 260.71 km² (21%) of the watershed.

3. Conclusion

The city of Shahdad and its surrounding villages are situated along drainage channels, flood pathways, and watershed outlet zones. Flood hazard generally increases from the upstream western areas toward the downstream eastern parts of the basin. According to the final zonation maps, urban expansion and construction activities should be strictly avoided in very high and high flood-risk areas, as well as within buffer zones adjacent to riverbeds and valleys. Higher drainage density in the residential areas of Shahdad contributes to an increased flood potential in central zones. Downstream villages including Dowlatabad, Aliabad, Ebrahimabad, Amirabad, and Salarabad face significant risk due to their proximity to watercourses and soils with low to moderate infiltration capacity. Kazemabad and nearby settlements are also highly exposed because of their location near steep uplands and major flow paths.

Historical evidence confirms the recurrence of destructive floods in the region, including the catastrophic flood that destroyed the ancient Seljuk city of Khobeyş (Old Shahdad). Flood events continue to pose a serious threat today. The produced flood susceptibility and flood inundation maps provide essential guidance for spatial planning and future development. By implementing cost-effective mitigation measures such as constructing check dams, improving drainage systems, promoting artificial groundwater recharge, and adopting appropriate land-use management practices potential losses in high-risk areas can be significantly reduced.

پهنه بندی خطر وقوع سیل در حوضه آبخیز شهداد با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله

مراتبی (AHP)

مهسا شیخ‌اسدی^۱، مهدیه حسینجانی زاده^۲، مهدی هنرمند^۳، رضا حسن زاده^۴

^۱دانشجو، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

^۲دانشیار، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران
چکیده:

سیل یکی از مخرب ترین پدیده‌های طبیعی است که سالانه خسارات بسیار زیادی را در دنیا و به خصوص ایران به بار می‌آورد و سالانه زندگی بسیاری از افراد را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. شناسایی مناطق پرخطر یکی از راه‌های جلوگیری از اثرات سیل است. نقشه خطر سیل به منظور مدیریت بهتر برای کنترل سیل یک امر ضروری به نظر می‌رسد. هدف از انجام پژوهش حاضر بررسی سیل در حوضه آبخیز شهداد با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی است. برای این منظور نقشه‌های سیل‌خیزی و سیل‌گیری شهداد با استفاده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (سنجنده‌ی OLI) و سنتینل ۲ تهیه شدند. در این پژوهش، سیل‌خیزی به‌عنوان استعداد و پتانسیل حوضه برای تولید رواناب و شکل‌گیری سیلاب، و سیل‌گیری به‌عنوان قابلیت یا احتمال غرقابی‌شدن و تجمع آب در یک محدوده در اثر ورود جریان سیلاب تعریف شده است. برای پهنه‌بندی و شناسایی خطر سیل ابتدا با مرور مطالعات پیشین معیارهای اصلی موثر در سیل‌خیزی و سیل‌گیری شامل: شیب، پوشش گیاهی، انحنای کاربری اراضی، زمین‌شناسی، تراکم شبکه زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت جریان، ارتفاع، فاصله از رودخانه، وجود موانع در بستر رودخانه و پروفایل بستر رودخانه، انتخاب و سپس نقشه معیارها به صورت رستر در محیط GIS تهیه و طبقه‌بندی شدند. وزن معیارها نیز در نرم افزار Expert Choice و بر اساس روش AHP محاسبه شد. در نهایت با تبدیل ترکیب خطی وزنی (WLC) نقشه‌های سیل‌خیزی و سیل‌گیری منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار GIS، تهیه شدند. نقشه نهایی سیل‌خیزی نشان داد که حدود ۱۶٪ از منطقه مورد مطالعه در پهنه خطر بسیار زیاد، ۲۶٪ در پهنه خطر زیاد، ۳۶٪ در پهنه خطر متوسط، ۱۸٪ در پهنه خطر کم و ۳٪ درصد در پهنه خطر بسیار کم از لحاظ سیل‌خیزی قرار دارد. همچنین نقشه نهایی سیل‌گیری نشان داد که حدود ۱۰٪ از منطقه مورد مطالعه در پهنه خطر بسیار زیاد، ۲۸٪ در پهنه خطر زیاد، ۱۵٪ در پهنه خطر متوسط، ۲۶٪ در پهنه خطر کم و ۲۱٪ در پهنه خطر بسیار کم از لحاظ سیل‌گیری قرار دارد. نتایج این تحقیق می‌تواند مدیران و کارشناسان را جهت مدیریت خطر سیل یاری رساند.

واژگان کلیدی: شهداد، پهنه‌بندی خطر سیلاب، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، سنجش از دور

۱- مقدمه

پدیده سیل یکی از مهم‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی به شمار می‌رود که هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در نقاط مختلف جهان به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بر جای می‌گذارد. طی سال‌های اخیر خسارات ناشی از سیل رشد زیادی در جهان داشته است. در کشور ایران نیز به دلیل شرایط خاص اقلیمی، نوسانات بارش و تخریب پوشش گیاهی، وقوع سیل از جمله تهدیدات جدی برای منابع طبیعی، زیرساخت‌ها و سکونتگاه‌های انسانی محسوب می‌شود [۱]. بررسی طرح‌های پیشگیری از سیل در کشور نشان می‌دهد که یک راه حل مشخص برای تمام نقاط سیل‌خیز کشور قابل اجرا نیست. با توجه به پیشرفت علم و دستیابی به اطلاعات مختلف مانند داده‌های هواشناسی، نوع خاک، پوشش زمین، تغییرات کاربری زمین و غیره می‌توان راه‌حلهایی را جهت پیشگیری و مهار سیل و حتی کاهش خسارات ناشی از آن انجام داد. شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مستعد وقوع سیل، گامی اساسی در مدیریت خطر، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و اجرای طرح‌های پیشگیرانه به شمار می‌رود [۲].

یکی از روش‌های کارآمد در ارزیابی و تحلیل خطر سیل، استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که از میان آن‌ها، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۱ به دلیل سادگی، شفافیت و قابلیت ترکیب معیارهای مختلف، کاربرد گسترده‌ای یافته است. این روش با وزندهی به عوامل مؤثر بر وقوع سیل نظیر شیب، کاربری اراضی، نوع خاک، بارش و فاصله از شبکه زهکشی، امکان تعیین مناطق با درجات مختلف خطر را فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، تلفیق این روش با قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و داده‌های سنجش‌ازدور، امکان تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل را با دقت و کارایی بیشتر فراهم می‌کند. بر همین اساس، در ادامه برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، GIS و سنجش‌ازدور مرور شده‌اند.

فتوحی و کیانی (۱۳۹۴)، با استفاده از مدل AHP و نرم افزار GIS به پهنه‌بندی ریسک سیلاب شهری در شهر نهاوند پرداختند و سطوح ریسک‌پذیر شهر نهاوند را استخراج کردند. نتایج نشان داد که از وسعت ۸۶۱ هکتاری شهر نهاوند، ۲۸/۱ درصد از محدوده مورد مطالعه در ریسک بالا تا بسیار بالا، ۳۱/۵ درصد دارای ریسک متوسط و ۴۰/۲ درصد در محدوده دارای وضعیت با ریسک کم تا بسیار کم قرار دارد [۳]. خسروی و همکاران (۱۳۹۵)، با به کارگیری روش ترکیبی نسبت فرکانسی و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی، نقشه خطر سیل برای حوضه آبریز هراز در شمال ایران را به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان داد که خطر سیل با کاهش شیب و ارتفاع افزایش می‌یابد و پوشش گیاهی کم و کاربری شهری از عوامل تشدیدکننده خطر سیل هستند [۴]. اسفندیاری دارآباد (۱۳۹۸)، با استفاده از منطق فازی سیل‌خیزی حوضه آبریز آجرلو چای را بررسی کرد و نشان داد بیش‌تر مساحت منطقه دارای پتانسیل سیل‌خیزی کم تا متوسط است [۵]. خلیلی و اسروش (۱۳۹۹)، با استفاده از مدل AHP آسیب‌پذیری ناشی از سیلاب را در منطقه مکران مورد ارزیابی قرار دادند و پارامترهایی همچون شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی و فاصله از سکونتگاه‌های روستایی را تحلیل کردند [۶]. بر اساس تحقیقات رامین و همکاران (۱۴۰۴)، با استفاده از رویکرد داده محور و ابزارهای نوین سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل Maxent، مشخص شد که قسمت محدودی از شهرستان سروآباد، استان کردستان به لحاظ خطر وقوع سیل در کلاس‌های پر خطر قرار دارد [۷]. در سطح بین‌المللی نیز پراتیک داش^۲ (۲۰۲۰) در منطقه الله‌آباد هند با استفاده از تحلیل چندمعیاره در محیط GIS، ۸۱ درصد اراضی کشاورزی را مستعد سیل تشخیص داد [۸]. همچنین لارس تیرولفا^۳ (۲۰۲۱)، به بررسی و مدل‌سازی توسعه شهری و قرار گرفتن در معرض خطر سیل رودخانه‌ای در جنوب شرقی آسیا پرداختند. نتایج این پژوهش

¹ Analytical Hierarchy Process² Pratik et al³ Lars Tierolfa et al

نشان داد خسارات سالانه سیل در همه کشورها افزایشی است و از ۸٪ در تایلند تا ۲۱۱٪ در لائوس متغیر است. در کامبوج و لائوس، افزایش خطر سیل بیشتر است اما برای میانمار، تایلند و ویتنام، در صورت سناریوی گسترش فیزیکی شهر افزایش خطر سیل پیش بینی می‌شود [۹]. نیکولتا و همکاران (۲۰۲۵)، با استفاده از روش AHP و نسبت فراوانی (FR) نقشه خطر سیلاب در خالکیدیکه را استخراج کردند [۱۰]. بر اساس تحقیقات ایسلام و همکاران (۲۰۲۵)، با استفاده از روش AHP و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مشخص شد که ۳۵٪ از شهر سیهلت واقع در بنگلادش به ویژه مناطق شمالی و حوضه کم‌ارتفاع هاتور در دسته‌بندی پرخطر از نظر آسیب‌پذیری در برابر سیل قرار دارند [۱۱].

حوضه آبخیز شهداد در شرق استان کرمان و در حاشیه بیابان لوت قرار دارد و به دلیل شرایط توپوگرافی، خاک با نفوذپذیری پایین، پراکنش نامنظم بارندگی و وقوع رگبارهای شدید، از مناطق مستعد وقوع سیلاب‌های فصلی و ناگهانی به شمار می‌رود [۱۲]. وقوع سیلاب در منطقه، علاوه بر خسارت به اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌ها، موجب ناپایداری سازه‌های کنترلی و تشدید فرسایش در بستر و کناره‌های رودخانه می‌شود. بنابراین، پهنه‌بندی خطر سیل در این حوضه می‌تواند مبنایی علمی برای مدیریت خطر، کاهش خسارات و هدایت مناسب توسعه و کاربری اراضی فراهم آورد. از این رو، پژوهش حاضر با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و سامانه اطلاعات جغرافیایی به پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در حوضه آبخیز شهداد پرداخته است.

۲- ویژگی‌های طبیعی و محیطی حوضه آبخیز شهداد

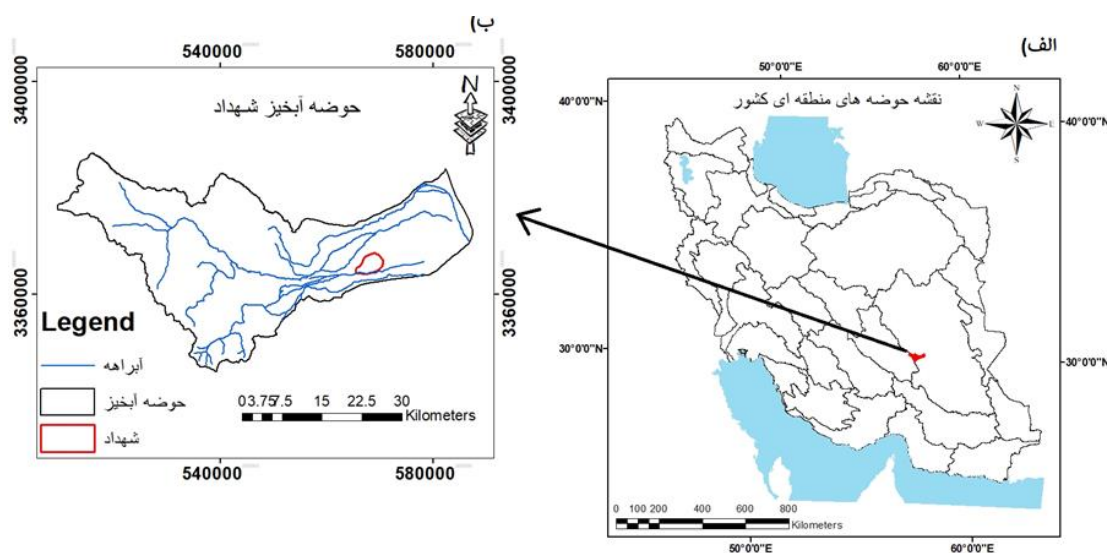
بیابان لوت جز بیابان‌های داخلی ایران است که در جنوب شرقی کشور قرار گرفته است. در سال ۱۳۹۳ در فهرست میراث ملی ایران ثبت شده و در نهایت به عنوان نخستین میراث طبیعی ایران، به سبب دارا بودن ارزش‌های برجسته جهانی در سال ۲۰۱۶ میلادی در فهرست میراث جهانی یونسکو به ثبت رسید [۱۳]. این بیابان به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و اقلیمی از میزان بالای تابش ماهیانه خورشید و روزهای آفتابی و هوای صاف برخوردار است و به همین رو برخی محققین این ناحیه را گرم‌ترین منطقه ایران و یا جهان می‌دانند [۱۴].

حوضه آبخیز شهداد در شرق استان کرمان، در حاشیه غربی بیابان لوت و در شمال تا شمال‌شرق شهر کرمان واقع شده است. این حوضه با امتداد غالب شمال‌غربی- جنوب‌شرقی، از نظر هیدرولوژیکی بخشی از سامانه زهکشی منتهی به دشت لوت محسوب می‌شود. حوضه آبخیز رودخانه درختگان شهداد در ضلع غربی دشت لوت قرار گرفته و به دلیل موقعیت طبیعی خود، از مناطق مستعد وقوع سیلاب‌های فصلی و ناگهانی به شمار می‌رود (شکل ۱) [۱۵]. اقلیم منطقه گرم و خشک است و بارندگی در آن عمدتاً نامنظم، کوتاه‌مدت و به صورت رگبارهای شدید رخ می‌دهد. چنین بارش‌هایی، به‌ویژه در صورت هم‌زمانی با شیب نسبتاً زیاد در بخش‌های بالادست، پوشش گیاهی کم و نفوذپذیری پایین برخی واحدهای سطحی، موجب تولید سریع رواناب و شکل‌گیری جریان‌های سیلابی در آبراهه‌ها و رودخانه‌های فصلی می‌شود. از نظر ژئومورفولوژیکی، حوضه شهداد در حد فاصل ارتفاعات شرقی کرمان و دشت لوت قرار گرفته است. بخش‌های بالادست حوضه دارای ارتفاع و شیب بیشتر بوده و نقش مهمی در تولید رواناب و انتقال جریان‌های سیلابی به سمت نواحی پایین‌دست دارند. در مقابل، بخش‌های پایین‌دست و شرقی حوضه به تدریج به دشت‌های کم‌شیب و پهنه‌های بیابانی منتهی می‌شوند که در آن‌ها امکان تجمع آب، رسوب‌گذاری و گسترش پهنه‌های سیل‌گیر وجود دارد. وجود مخروط‌افکنه‌ها در پایکوه‌ها و حاشیه دشت شهداد نیز نشان‌دهنده نقش جریان‌های سطحی، فرسایش و رسوب‌گذاری در شکل‌گیری چشم‌انداز منطقه است.

رودخانه درختگان و انشعابات آن از مهم‌ترین سامانه‌های زهکشی منطقه به شمار می‌روند. این رودخانه از ارتفاعات شرقی و شمال‌شرقی کرمان سرچشمه گرفته و پس از عبور از نواحی کوهستانی و پایکوهی، به سمت دشت شهداد و در نهایت بیابان لوت جریان می‌یابد. در محدوده تنگه چهارفرسخ، شاخه‌هایی از این رودخانه به سمت شهداد منشعب می‌شوند که در تأمین آب

بخشی از اراضی کشاورزی، باغ‌ها و پوشش گیاهی منطقه نقش دارند. رودخانه شهداد نیز به‌عنوان یکی از شاخه‌های مهم این سامانه زهکشی، پس از عبور از سکونتگاه‌ها و اراضی پیرامونی، به سمت ریگزارها و پهنه‌های شرقی منطقه جریان یافته و در نهایت وارد دشت لوت می‌شود.

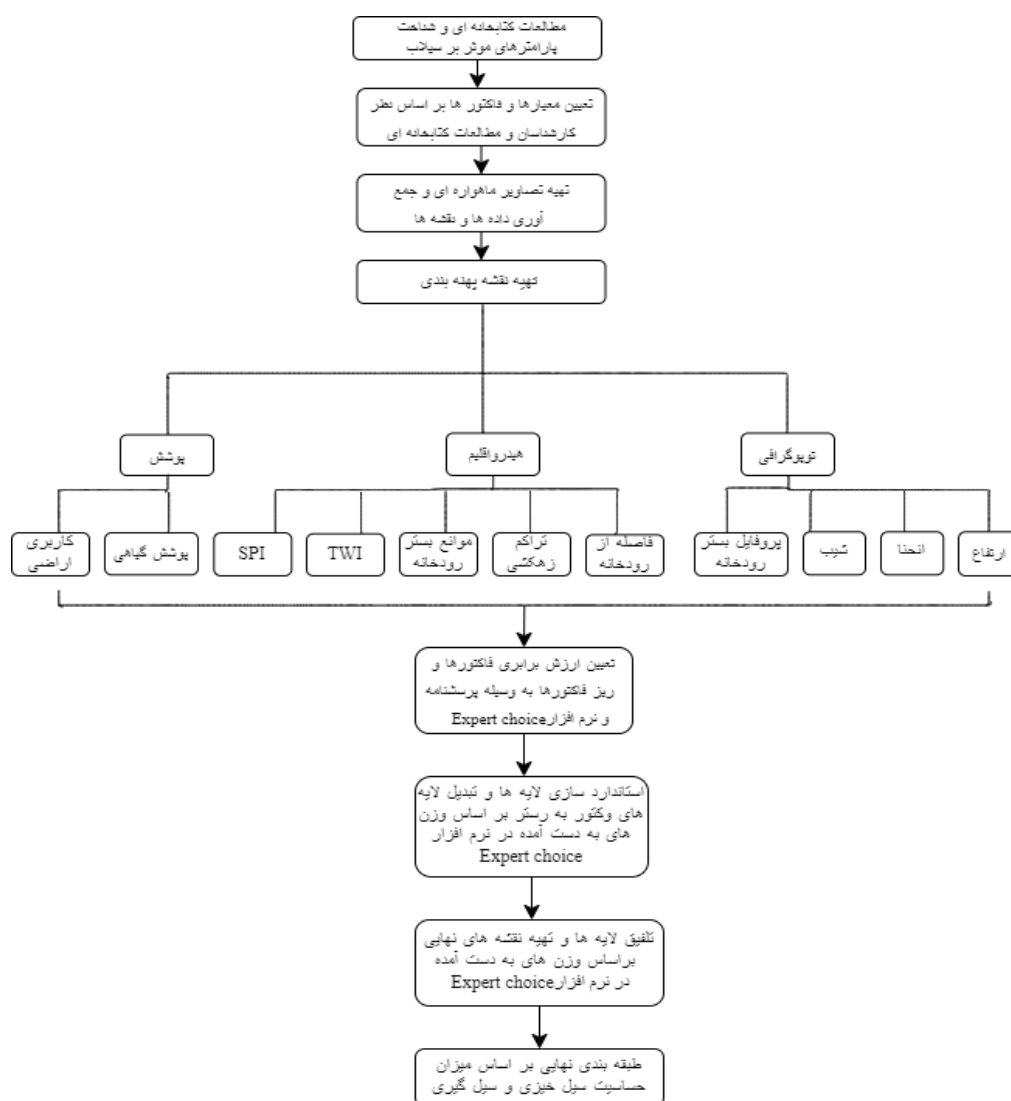
به دلیل ماهیت فصلی و سیلابی جریان‌ها، رودخانه‌ها و آبراهه‌های منطقه در بخش زیادی از سال کم‌آب یا خشک هستند، اما در زمان وقوع بارش‌های شدید، به‌سرعت دچار طغیان می‌شوند. رواناب حاصل از این بارش‌ها معمولاً در قالب سیلاب‌های ناگهانی در بستر آبراهه‌ها جریان یافته و در صورت نبود سازه‌های مناسب کنترل سیلاب، می‌تواند موجب فرسایش بستر و کناره رودخانه‌ها، تخریب اراضی کشاورزی، آسیب به مسیرهای ارتباطی و تهدید سکونتگاه‌های واقع در مسیر جریان شود. در برخی سال‌ها، برای کنترل و مهار جریان‌های سیلابی، سازه‌هایی مانند آب‌بند یا بندهای موقت در مسیر رودخانه‌ها احداث شده است، اما شواهد محلی و گزارش‌های موجود نشان می‌دهد که شدت و حجم سیلاب‌های ناگهانی در مواردی موجب تخریب این سازه‌ها شده است [۱۶]. وقوع سیلاب بهار ۱۳۹۹ در رودخانه درختگان و خسارات ناشی از آن در محدوده شهداد نیز نشان‌دهنده تداوم خطر سیلاب در این منطقه است. از نظر فضایی، شهر شهداد و تعدادی از روستاهای پیرامون آن در مجاورت آبراهه‌ها، مسیرهای جریان و نواحی خروجی حوضه قرار گرفته‌اند. این موضوع، همراه با تمرکز بخشی از فعالیت‌های کشاورزی و سکونتگاهی در حاشیه رودخانه‌ها، اهمیت شناسایی مناطق پرخطر را افزایش می‌دهد. همچنین تغییرات شیب از نواحی کوهستانی به دشت، تراکم شبکه زهکشی، فاصله کم برخی سکونتگاه‌ها از آبراهه‌ها، نوع پوشش سطحی و ویژگی‌های زمین‌شناسی و خاک، از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر سیل‌خیزی و سیل‌گیری منطقه اثرگذار باشند. بر این اساس، حوضه آبخیز شهداد به دلیل قرارگیری در یک محیط خشک و بیابانی، برخورداری از بارش‌های رگباری و نامنظم، وجود ارتفاعات مولد رواناب در بالادست، توسعه مخروط‌افکنه‌ها و استقرار سکونتگاه‌ها و اراضی کشاورزی در مسیر جریان‌های سطحی، نمونه‌ای مناسب برای مطالعه و پهنه‌بندی خطر سیل محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، با استفاده از معیارهای طبیعی و محیطی مؤثر بر وقوع و گسترش سیلاب و با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، پهنه‌های مختلف خطر سیل در این حوضه شناسایی و طبقه‌بندی شده‌اند.



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه، ب) حوضه آبخیز شهداد

۳- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، با توجه به مطالعات پیشین و ویژگی‌های طبیعی حوضه آبخیز شهداد، نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب در دو بخش سیل‌خیزی و سیل‌گیری با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP تهیه و تحلیل شد. شکل ۲ فلوچارت مراحل انجام پژوهش را به صورت مرحله‌ای نشان می‌دهد. داده‌ها و مواد مورد استفاده در این پژوهش شامل نقشه زمین‌شناسی، داده‌های ماهواره‌ای، تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست و تصاویر ماهواره Sentinel-2 است. همچنین برای پردازش داده‌ها و تهیه لایه‌های مکانی از نرم‌افزارهای ArcGIS، ENVI، Google Earth و Expert Choice استفاده شد. مراحل کلی انجام پژوهش شامل جمع‌آوری مطالعات کتابخانه‌ای و داده‌های مکانی مرتبط با حوضه آبخیز، تعیین معیارها و شاخص‌های مؤثر بر سیلاب بر اساس نظر کارشناسان و مطالعات کتابخانه‌ای، تهیه تصاویر ماهواره‌ای و جمع‌آوری داده‌ها و نقشه‌ها، تهیه نقشه پهنه‌بندی، تعیین ارزش برای فاکتورها و ریز فاکتورها به وسیله پرسشنامه Expert choice و نرم‌افزار Expert choice، استاندارد سازی لایه‌ها و تبدیل لایه‌های وکتور به رستر بر اساس وزن‌های به دست آمده در نرم‌افزار Expert choice، تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه‌های نهایی بر اساس وزن‌های به دست آمده در نرم‌افزار Expert choice، طبقه‌بندی نهایی بر اساس میزان حساسیت سیل‌خیزی و سیل‌گیری



شکل ۲- مراحل تهیه نقشه‌های سیل‌خیزی و سیل‌گیری

۳-۱- معیارهای مؤثر بر سیل خیزی و سیل گیری

در این پژوهش، معیارهای مؤثر بر پهنه‌بندی سیل خیزی و سیل گیری بر اساس مطالعات پیشین، ویژگی‌های طبیعی حوضه آبخیز شه‌داد، دسترسی به داده‌ها و نظر کارشناسان انتخاب شدند. با توجه به تفاوت مفهومی میان سیل خیزی و سیل گیری، معیارهای مورد استفاده برای هر یک از این دو نقشه به صورت جداگانه تعیین شد. معیارهای مؤثر بر سیل خیزی شامل شیب، پوشش گیاهی، انحنا، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، تراکم شبکه زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص قدرت جریان بود. معیارهای مؤثر بر سیل گیری نیز شامل ارتفاع، شیب، انحنا، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه، شاخص قدرت جریان، وجود موانع در بستر رودخانه و پروفایل بستر رودخانه در نظر گرفته شد. نحوه تهیه هر یک از معیارها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. این معیارها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تصاویر مدل رقومی ارتفاع، نقشه‌های زمین‌شناسی و نقشه‌های توپوگرافی استخراج شدند.

جدول ۱- معیارهای مورد استفاده در پهنه‌بندی سیل خیزی و نحوه تهیه آنها

ردیف	معیار	نوع معیار	چگونگی تهیه
۱	شیب	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۲	پوشش گیاهی	کمی	با استفاده از لندست ۸ (OLI) در محیط ENVI و GIS
۳	انحنا	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۴	کاربری اراضی	کیفی	با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در محیط ENVI و GIS
۵	زمین شناسی	کیفی	با استفاده از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کرمان در محیط GIS
۶	تراکم شبکه زهکشی	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۷	شاخص رطوبت توپوگرافی	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۸	شاخص قدرت جریان	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS

جدول ۲- معیارهای مورد استفاده در پهنه‌بندی سیل گیری

ردیف	معیار	نوع معیار	چگونگی تهیه
۱	ارتفاع	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۲	شیب	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۳	انحنا	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۴	کاربری اراضی	کیفی	با استفاده از تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ در محیط ENVI و GIS
۵	فاصله از رودخانه	کمی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۶	شاخص قدرت جریان	کیفی	با استفاده از DEM ماهواره SRTM در محیط GIS
۷	وجود موانع در بستر رودخانه	کمی	با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدید میدانی در محیط GIS
۸	پروفایل بستر رودخانه	کمی	با استفاده از نقشه‌های رودخانه‌های اصلی منطقه

۳-۲- تهیه، طبقه‌بندی و استانداردسازی لایه‌های اطلاعاتی

پس از گردآوری داده‌ها، لایه‌های اطلاعاتی مربوط به معیارهای مؤثر بر سیل‌خیزی و سیل‌گیری در محیط GIS تهیه شدند. از آنجا که لایه‌های مورد استفاده دارای واحدهای اندازه‌گیری، دامنه عددی و ماهیت متفاوت بودند، به منظور فراهم شدن امکان مقایسه و تلفیق آن‌ها، فرآیند استانداردسازی انجام گرفت. در این مرحله، ابتدا لایه‌های برداری به فرمت رستری تبدیل شدند و سپس با توجه به نقش هر معیار در افزایش یا کاهش خطر سیلاب، طبقه‌بندی مجدد صورت گرفت. در مرحله طبقه‌بندی مجدد، برای هر یک از معیارها و زیرمعیارها بر اساس نظر کارشناسی، ویژگی‌های منطقه، هدف پژوهش و مبانی نظری مرتبط با سیلاب، ارزش مناسب اختصاص داده شد. از آنجا که برای تعیین مرزهای طبقاتی در بسیاری از مطالعات پهنه‌بندی سیلاب، استاندارد واحد و ثابتی وجود ندارد، محققان معمولاً حدود طبقات را بر اساس شرایط محیطی منطقه، مطالعات پیشین و نظر کارشناسان تعیین می‌کنند. در این پژوهش نیز با توجه به میزان تأثیر هر کلاس بر سیل‌خیزی و سیل‌گیری، ارزش‌هایی در دامنه ۱ تا ۱۰ اختصاص داده شد. در این ارزش‌گذاری، عدد ۱ بیانگر کمترین تأثیر و عدد ۱۰ بیانگر بیشترین تأثیر بر وقوع یا تشدید سیلاب در نظر گرفته شد. در ادامه، نحوه تهیه و طبقه‌بندی هر یک از لایه‌ها ارائه شده است.

شیب: شیب یکی از مهم‌ترین عوامل توپوگرافی مؤثر بر سیل‌خیزی و سیل‌گیری است. با افزایش شیب، سرعت جریان سطحی و توان تولید رواناب افزایش می‌یابد؛ بنابراین، شیب با سیل‌خیزی رابطه مستقیم دارد. در مقابل، در اراضی کم‌شیب، به دلیل کاهش سرعت جریان و افزایش احتمال تجمع آب، پتانسیل سیل‌گیری بیشتر است و در نتیجه رابطه شیب با سیل‌گیری معکوس در نظر گرفته شد. لایه شیب از مدل رقومی ارتفاع تهیه و بر اساس مطالعات پیشین و طبقات ارائه‌شده در جدول ۳ طبقه‌بندی شد (شکل ۳ الف).

جدول ۳- جدول طبقه‌بندی شیب

تعداد طبقات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
حدود طبقات (درجه)	۰-۲	۲-۵	۵-۸	۸-۱۲	۱۲-۲۰	۲۰-۲۷	۲۷-۳۵	۳۵-۴۵	>۴۵

ارتفاع: ارتفاع از جمله عوامل مؤثر در رفتار هیدرولوژیکی حوضه است. در نواحی مرتفع، به دلیل شیب بیشتر و زمان تمرکز کمتر، امکان تولید رواناب و شکل‌گیری جریان‌های سیلابی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، ارتفاع در تحلیل سیل‌خیزی اثر مستقیم دارد. در مقابل، نواحی کم‌ارتفاع به دلیل موقعیت پست‌تر و امکان تجمع جریان، معمولاً استعداد بیشتری برای سیل‌گیری دارند [۱۷]. از این‌رو، رابطه ارتفاع با سیل‌گیری معکوس در نظر گرفته شد. لایه ارتفاع از مدل رقومی ارتفاع استخراج و بر اساس مطالعات پیشین به پنج طبقه با فواصل مساوی تقسیم شد. (شکل ۳ ب).

تراکم شبکه زهکشی:^۴ تراکم زهکشی بیانگر نسبت طول آبراهه‌ها به مساحت حوضه است و نقش مهمی در تمرکز رواناب دارد. هرچه تراکم زهکشی بیشتر باشد، زمان تمرکز کاهش یافته و رواناب سریع‌تر به مجاری اصلی منتقل می‌شود؛ در نتیجه، خطر سیل‌خیزی افزایش می‌یابد. در این پژوهش، لایه تراکم زهکشی از شبکه آبراهه‌های استخراج‌شده از DEM تهیه و بر اساس مطالعات پیشین به پنج طبقه با فواصل مساوی تقسیم شد (شکل ۳ پ) [۱۸].

⁴ Drainage Density

انحناء^۵ شاخص انحنا نشان‌دهنده میزان انحراف سطح از صاف بودن و یا به بیان دیگر، محدب و مقعر بودن دامنه است و مقادیر مثبت و منفی در انحنای عرضی دامنه، به ترتیب بیانگر تحدب (واگرایی جریان) و تعقر (همگرایی جریان) بوده و مقادیر مثبت و منفی در انحنای طولی دامنه، به ترتیب بیانگر تعقر (کاهش سرعت جریان) و تحدب دامنه (افزایش سرعت جریان) هستند. تعدادی زیادی از محققان پیش‌بینی کرده‌اند که احتمال خطر سیلاب زمانی بیشتر است که میزان انحنا بین ۰/۱ تا ۰/۲ است. انحنا میزان سرعت و ناهمگونی‌های جریان را نشان می‌دهد، زیرا فرم بستر، عمق آب و توپوگرافی را پیش‌بینی می‌کند [۱۹]. با وجود تهیه لایه انحنا، بررسی‌های اولیه نشان داد که ورود این لایه به مدل، به دلیل هم‌پوشانی اثر آن با سایر شاخص‌های توپوگرافی، به‌ویژه شیب و شاخص قدرت جریان، موجب ایجاد اغتشاش مکانی در خروجی تلفیقی و کاهش تفکیک‌پذیری پهنه‌های خطر می‌شود. از این‌رو، به‌منظور افزایش سازگاری مدل و پایداری نقشه نهایی، این معیار از فرآیند تلفیق حذف شد (شکل ۳ت).

کاربری اراضی: کاربری اراضی یکی از معیارهای مهم در تحلیل سیل‌خیزی و سیل‌گیری است؛ زیرا نوع پوشش سطح زمین بر میزان نفوذپذیری، تولید رواناب و تجمع آب اثرگذار است. کاربری‌هایی با نفوذپذیری کمتر، مانند اراضی ساخته‌شده، سطوح فشرده و اراضی فاقد پوشش گیاهی، پتانسیل بیشتری برای تولید رواناب و سیل‌گیری دارند. در این پژوهش، لایه کاربری اراضی با استفاده از تصویر Sentinel-2 و روش طبقه‌بندی نظارت‌شده حداکثر احتمال^۶ در نرم‌افزار ENVI تهیه شد و هفت نوع کاربری اصلی در منطقه شناسایی گردید (شکل ۳ث).

پوشش گیاهی: پوشش گیاهی از طریق افزایش نفوذ، کاهش سرعت رواناب و حفاظت خاک در برابر فرسایش، نقش مؤثری در کاهش سیل‌خیزی دارد. در این پژوهش، برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی از شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده یا NDVI استفاده شد. این شاخص با استفاده از تصویر Landsat 8 OLI محاسبه شد و سپس طبقات پوشش گیاهی با استفاده از روش درخت تصمیم‌گیری استخراج گردید (شکل ۳ج). آستانه طبقات مختلف NDVI در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- آستانه طبقات مختلف در NDVI

طبقات	پوشش گیاهی مترکم	پوشش گیاهی متوسط	پوشش گیاهی کم	خاک	آب
حدود طبقات	> ۰/۳۵	۰/۲۰ - ۰/۳۵	۲ - ۰/۱۰	۱ - ۰/۰	< ۰

شاخص رطوبت توپوگرافی^۷ (TWI): شاخص رطوبت توپوگرافی یا TWI یکی از شاخص‌های مهم در تحلیل تجمع رطوبت، اشباع خاک و پتانسیل سیل‌گیری است. این شاخص ارتباط میان مساحت زهکشی بالادست و شیب محلی را نشان می‌دهد و معمولاً برای شناسایی نواحی مستعد تجمع آب و رطوبت خاک استفاده می‌شود. مقادیر بالاتر TWI نشان‌دهنده احتمال بیشتر اشباع خاک و تجمع جریان سطحی است. بین شاخص رطوبت توپوگرافی یک منطقه و ژئومورفولوژی، رابطه قوی وجود دارد. مقادیر شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط سیلابی بیشتر است [۲۰]. در این پژوهش، این شاخص از مدل رقومی ارتفاع استخراج و بر اساس روش شکست طبیعی^۸ به پنج طبقه تقسیم شد (شکل ۴ الف) [۲۱].

⁵ Curvature

⁶ Maximum Likelihood

⁷ Topographic Wetness Index (TWI)

⁸ Natural Breaks

فاصله از رودخانه: فاصله از رودخانه یکی از معیارهای اصلی در تحلیل سیل‌گیری است. نواحی نزدیک به آبراهه‌ها و رودخانه‌ها به دلیل مجاورت با مسیر جریان، بیشتر در معرض طغیان و غرقابی شدن قرار دارند. بنابراین، با کاهش فاصله از رودخانه، خطر سیل‌گیری افزایش می‌یابد. در این پژوهش، لایه فاصله از آبراهه‌ها در محیط GIS تهیه و بر اساس مطالعات پیشین در چهار طبقه مطابق جدول ۵ طبقه‌بندی شد (شکل ۴ ب) [۲۲].

جدول ۵- طبقه‌بندی فاصله از آبراهه

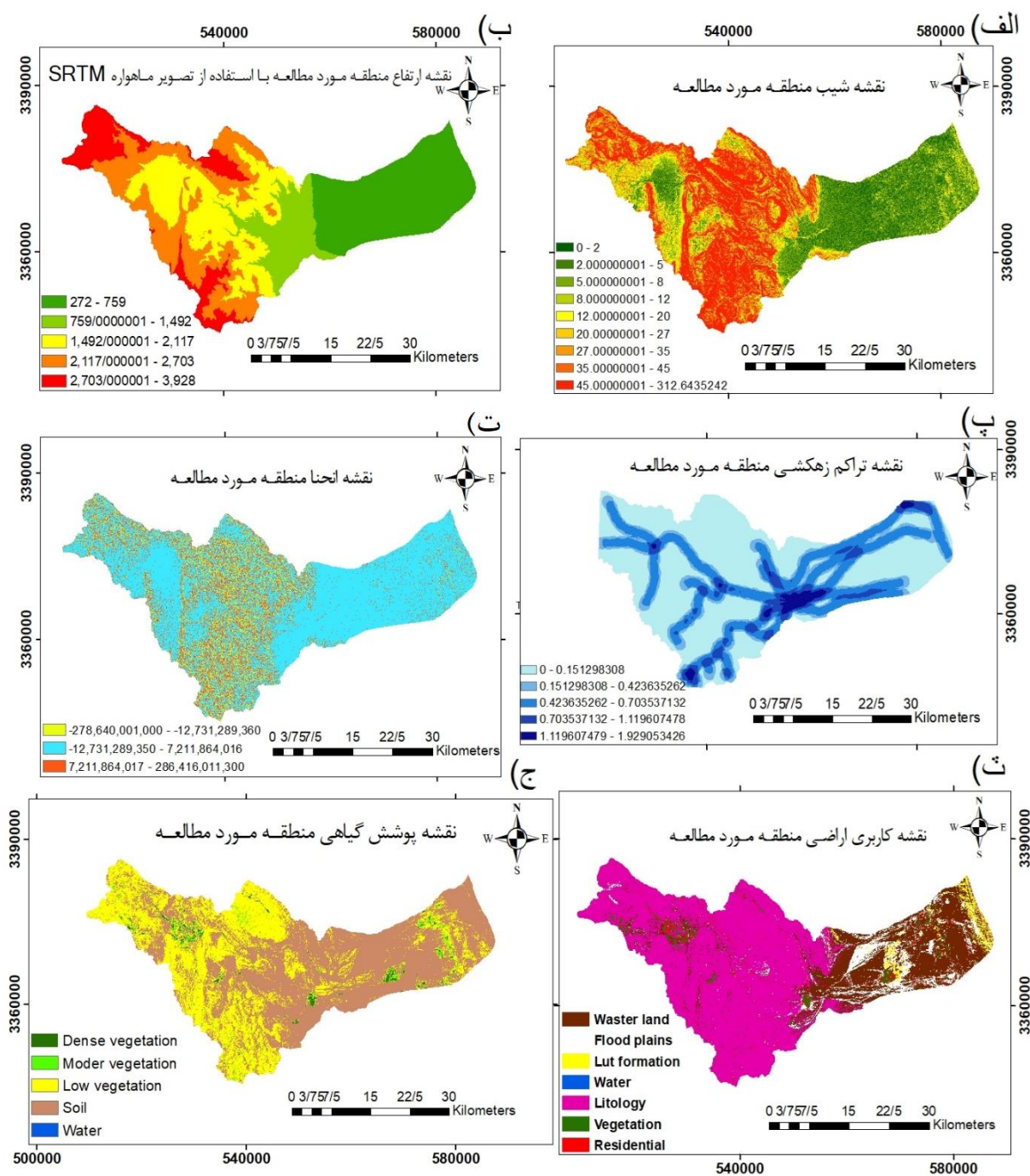
تعداد طبقات	۱	۲	۳	۴
حدود طبقات	۰-۱۰۰ متر	۱۰۰-۲۰۰ متر	۳۰۰-۴۰۰ متر	>۴۰۰ متر

وجود موانع در بستر رودخانه: وجود موانع در بستر و حریم آبراهه‌ها می‌تواند ظرفیت عبور جریان را کاهش داده و احتمال طغیان موضعی و سیل‌گیری را افزایش دهد. در این پژوهش، موانع احتمالی موجود در مسیر آبراهه‌ها، از جمله پوشش گیاهی متراکم و سازه‌های انسانی، با استفاده از تصاویر Google Earth و بررسی بصری مسیر آبراهه‌ها شناسایی شدند. سپس این اطلاعات به‌عنوان یکی از معیارهای مؤثر در تحلیل سیل‌گیری وارد مدل شد (شکل ۴ پ).

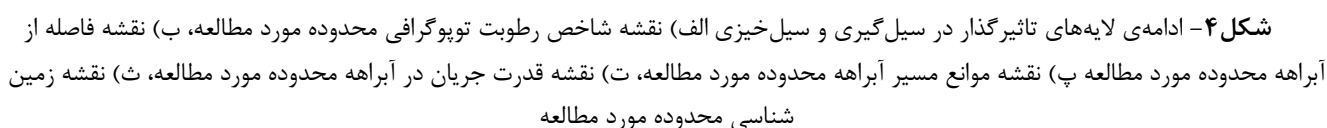
شاخص قدرت جریان^۹: شاخص قدرت جریان یا SPI نشان‌دهنده توان جریان در فرسایش، حمل رسوب و تمرکز رواناب است [۲۳]. مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر قدرت بیشتر جریان و احتمال بالاتر فرسایش و انتقال رسوب در مسیر آبراهه‌ها می‌باشد. در این پژوهش، SPI از مدل رقومی ارتفاع استخراج شد. این شاخص در تحلیل سیل‌خیزی دارای اثر مستقیم در نظر گرفته شد؛ زیرا افزایش توان جریان می‌تواند به تمرکز و تشدید رواناب کمک کند. در مقابل، در تحلیل سیل‌گیری، نواحی با قدرت جریان کمتر می‌توانند مستعد تجمع آب باشند؛ بنابراین، رابطه آن با سیل‌گیری به‌صورت معکوس لحاظ شد. طبقه‌بندی این لایه بر اساس روش شکست طبیعی و مطالعات پیشین در پنج طبقه انجام شد (شکل ۴ ت) [۲۱].

زمین‌شناسی: واحدهای زمین‌شناسی از طریق تأثیر بر نفوذپذیری، مقاومت سنگ‌ها و تولید رواناب، نقش مهمی در سیل‌خیزی دارند. واحدهای با نفوذپذیری بیشتر، به دلیل افزایش ظرفیت نفوذ آب، رواناب کمتری تولید کرده و امتیاز کمتری در سیل‌خیزی دریافت می‌کنند. در مقابل، واحدهای کم‌نفوذ یا مقاوم‌تر که امکان نفوذ آب در آنها کمتر است، پتانسیل بیشتری برای تولید رواناب داشته و امتیاز بالاتری دریافت می‌کنند. برای تهیه این لایه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ کرمان استفاده شد (شکل ۴ ث).

^۹ Stream Power Index (SPI)



شکل ۳- تعدادی از لایه‌های تاثیرگذار در سیل‌گیری و سیل‌خیزی (الف) نقشه شیب محدوده مورد مطالعه، (ب) نقشه ارتفاع محدوده مورد مطالعه (پ) نقشه تراکم زهکشی محدوده مورد مطالعه، (ت) نقشه انحنای محدوده مورد مطالعه، (ث) نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه (ج) نقشه پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه



۳-۳- تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه‌های نهایی

پس از استانداردسازی و طبقه‌بندی مجدد لایه‌ها، وزن معیارهای مؤثر بر سیل‌خیزی و سیل‌گیری با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی یا AHP تعیین شد. در این روش، معیارهای مؤثر بر وقوع و تشدید سیلاب به‌صورت زوجی با یکدیگر مقایسه شدند و اهمیت نسبی هر معیار نسبت به سایر معیارها مشخص گردید. وزن‌های نهایی حاصل از روش AHP برای معیارهای سیل‌خیزی و سیل‌گیری در جدول ۶ ارائه شده است. پس از تعیین وزن معیارها با استفاده از روش AHP، لایه‌های اطلاعاتی از نظر کیفیت داده، قابلیت تهیه در محیط GIS و میزان هم‌پوشانی با سایر معیارها بررسی شدند. در این مرحله، معیار انحنای به دلیل هم‌پوشانی با برخی شاخص‌های توپوگرافی و معیار پروفایل بستر رودخانه به دلیل محدودیت داده‌های دقیق، در تلفیق نهایی مورد استفاده قرار نگرفتند. از این‌رو، مدل نهایی WLC فقط بر اساس معیارهای قابل استفاده و ضرایب متناظر آن‌ها اجرا شد. در شکل‌های ۵ و ۶، لایه‌های وزن‌دار مؤثر بر سیل‌خیزی و سیل‌گیری نشان داده شده‌اند. این لایه‌ها پس از استانداردسازی و اعمال وزن نهایی، برای تلفیق و تولید نقشه نهایی مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۶- وزن معیارهای مؤثر در مدل‌های سیل‌خیزی و سیل‌گیری با استفاده از روش AHP

ردیف	معیار	وزن در مدل سیل‌گیری	وزن در مدل سیل‌خیزی
۱	شیب	۰/۱۸۰	۰/۳۶۶
۲	ارتفاع	۰/۱۵۹	—
۳	انحنای	۰/۱۴۳	۰/۲۱۳
۴	کاربری اراضی	۰/۱۰۸	۰/۱۲۷
۵	پوشش گیاهی	—	۰/۰۹۴
۶	زمین‌شناسی	—	۰/۰۸۴
۷	تراکم آبراهه	—	۰/۰۳۷
۸	شاخص رطوبت توپوگرافی	—	۰/۰۴۵
۹	شاخص قدرت جریان	۰/۰۹۴	۰/۰۳۵
۱۰	فاصله از آبراهه	۰/۱۳۲	—
۱۱	موانع مسیر آبراهه	۰/۱۰۰	—
۱۲	پروفایل بستر رودخانه	۰/۰۸۴	—
نرخ ناسازگاری		مدل سیل‌گیری ۰/۰۴ است	مدل سیل‌خیزی ۰/۲۲ است

در ادامه، لایه‌های استاندارد شده و وزن‌دار با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی یا WLC در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تلفیق شدند. در این روش، هر لایه استاندارد شده در وزن متناظر خود ضرب شده و سپس مجموع لایه‌های وزن‌دار محاسبه می‌شود [۲۴]. بر اساس وزن‌های به‌دست‌آمده از روش AHP، مدل نهایی سیل‌خیزی و سیل‌گیری به‌ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه شد.

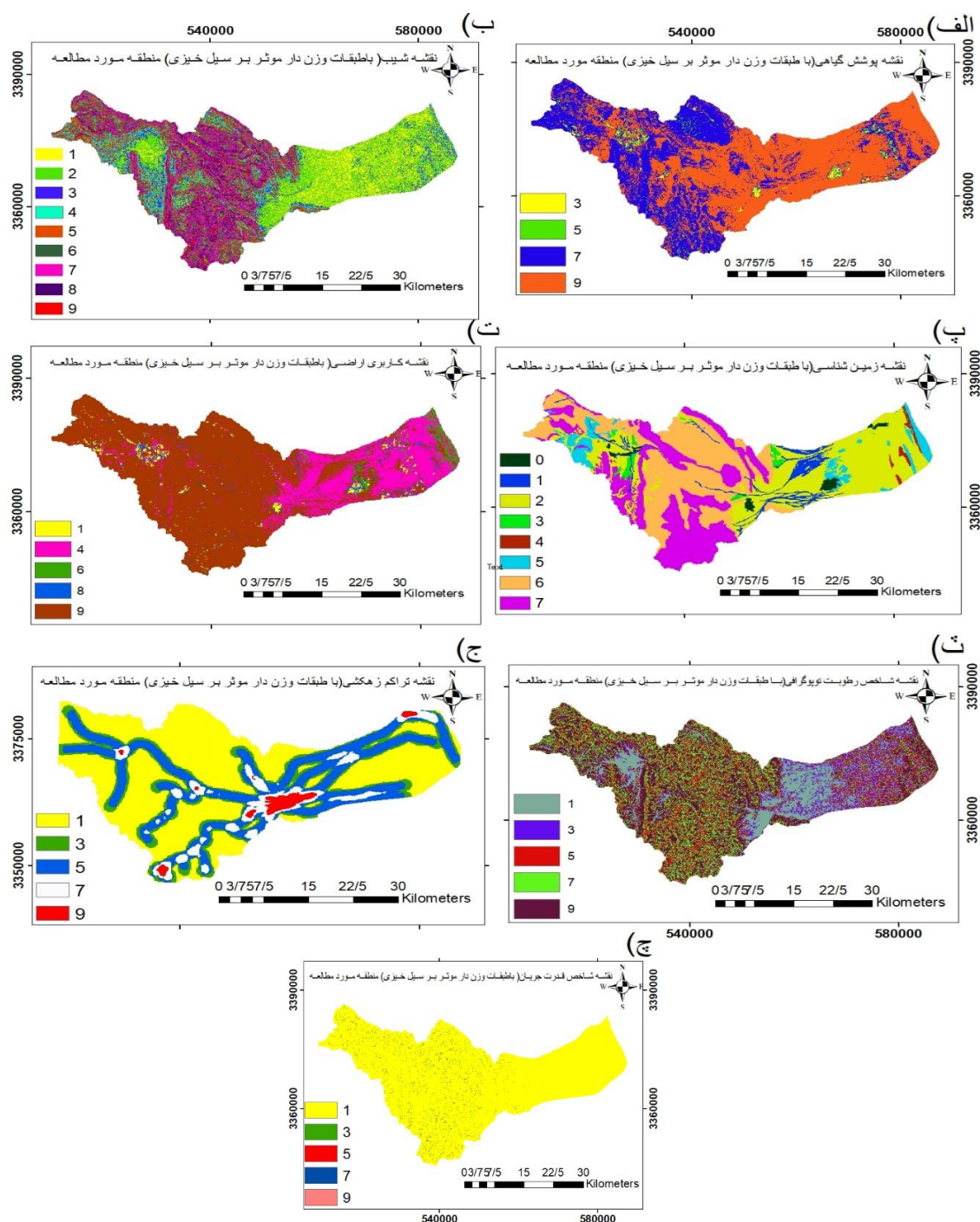
فرمول سیل‌خیزی ۱:

$$\text{Flood (Area affecting flood)} = (\text{Slope} \times 0.366) + (\text{Land use} \times 0.127) + (\text{NDVI} \times 0.094) + (\text{Geology} \times 0.084) + (\text{TWI} \times 0.045) + (\text{Drainage density} \times 0.037) + (\text{SPI} \times 0.035)$$

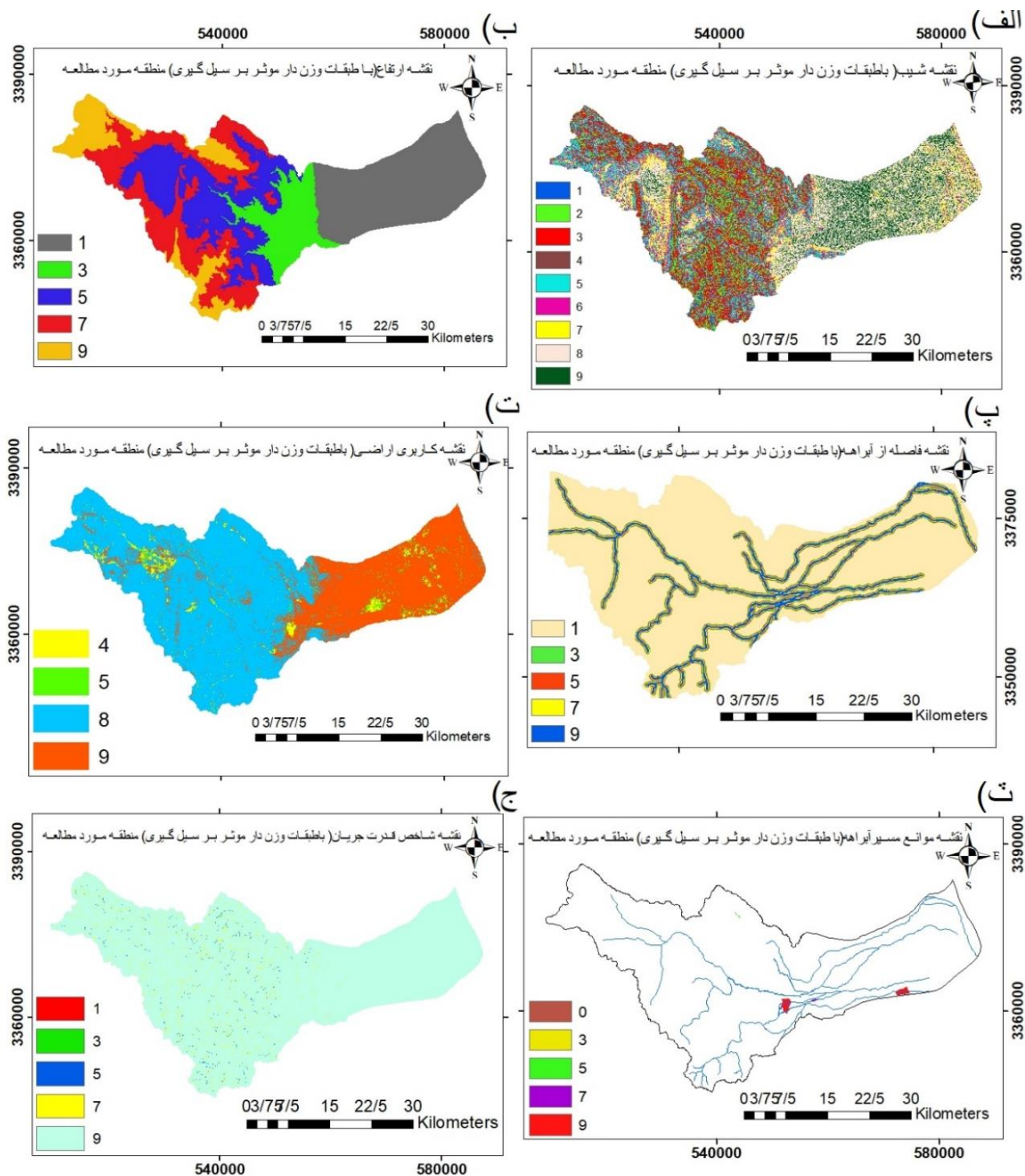
فرمول سیل‌گیری ۲:

$$\text{Flood (flooded area)} = (\text{Slope} \times 0.180) + (\text{Elevation} \times 0.159) + (\text{Distance} \times 0.132) + (\text{Land use} \times 0.108) + (\text{Obstacle} \times 0.100) + (\text{SPI} \times 0.094)$$

پس از محاسبه نقشه‌های نهایی، مقادیر خروجی با استفاده از روش شکست طبیعی به پنج طبقه خطر شامل بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم شدند. روش شکست طبیعی به دلیل توانایی در تشخیص تغییرات درونی داده‌ها و جداسازی بهتر گروه‌های مشابه، برای طبقه‌بندی نقشه‌های نهایی انتخاب شد.



شکل ۵- لایه‌های وزن دار موثر در سیل خیزی حوضه آبخیز شه‌داد



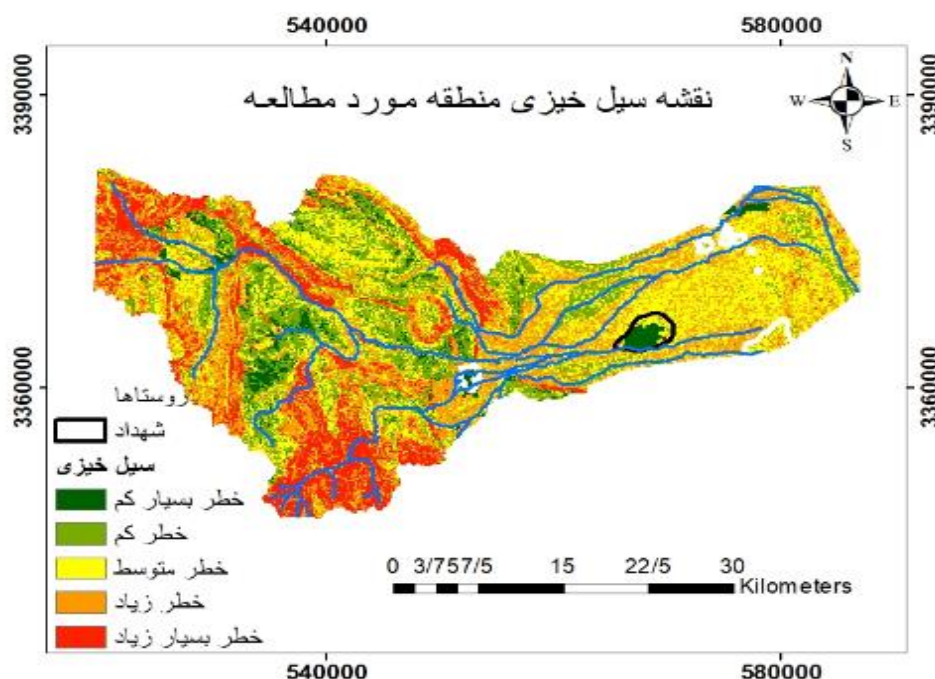
شکل ۶- لایه‌های وزن دار موثر در سیل‌گیری حوضه آبخیز شهداد

۴- بحث و نتایج

۴-۱- تحلیل نقشه پتانسیل سیل خیزی

نتایج حاصل از وزن‌دهی معیارهای مؤثر بر سیل‌خیزی نشان داد که شیب با وزن $0/366$ بیشترین نقش را در تولید رواناب و شکل‌گیری سیلاب در حوضه آبخیز شهداد دارد. اهمیت بالای شیب از نظر هیدرولوژیکی قابل توجه است؛ زیرا افزایش شیب موجب افزایش سرعت جریان سطحی، کاهش زمان تمرکز، کاهش فرصت نفوذ و در نتیجه افزایش پتانسیل تولید رواناب می‌شود. پس از شیب، معیارهای کاربری اراضی، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم شبکه زهکشی و شاخص قدرت جریان به ترتیب بیشترین نقش را در سیل‌خیزی منطقه داشته‌اند. نرخ ناسازگاری محاسبه‌شده برای مقایسات زوجی مربوط به سیل‌خیزی برابر با $0/22$ به دست آمد. اگرچه این مقدار از حد مطلوب پیشنهادی در روش AHP، یعنی $0/1$ بیشتر است، اما با توجه به ماهیت قضاوتی روش، تعداد معیارهای مورد بررسی، پیچیدگی عوامل مؤثر بر سیلاب و محدودیت دسترسی مجدد به داده‌ها و پاسخ‌دهندگان، این مقدار به‌عنوان سطحی از ناسازگاری متوسط در نظر گرفته شد. بنابراین نتایج مربوط به سیل‌خیزی با در نظر گرفتن این محدودیت و با احتیاط در تفسیر مورد استفاده قرار گرفتند.

نقشه نهایی سیل‌خیزی منطقه مورد مطالعه در پنج طبقه خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شد (شکل ۷). نتایج نشان داد که بخش قابل توجهی از حوضه در طبقات خطر متوسط تا بسیار زیاد قرار دارد. بر اساس جدول ۷، حدود ۳۶ درصد از مساحت منطقه در پهنه خطر متوسط، ۲۶ درصد در پهنه خطر زیاد و ۱۶ درصد در پهنه خطر بسیار زیاد واقع شده است. بنابراین، در مجموع حدود ۴۲ درصد از مساحت حوضه در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار دارد که نشان‌دهنده استعداد بالای بخشی از منطقه برای تولید رواناب و وقوع سیلاب است.



شکل ۷- نقشه پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبخیز شهداد

جدول ۷- مساحت پهنه‌های پتانسیل خطر سیل خیزی

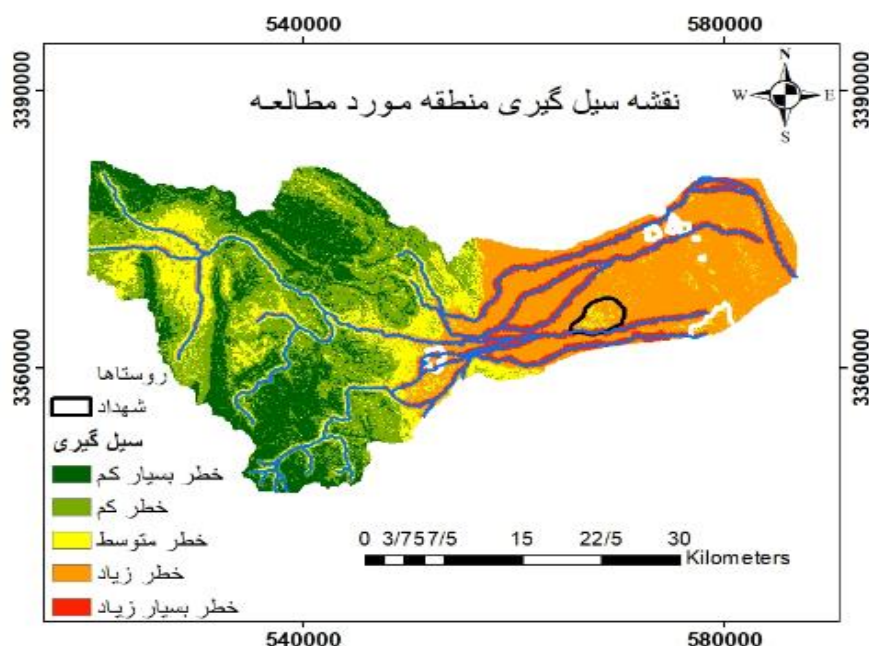
پهنه سیل خیزی	مساحت (Km ²)	درصد کل
خطر بسیار کم	۴۲/۹۰۷۶۵۶	۳
خطر کم	۲۳۴/۱۰۹۷۴۶	۱۸
خطر متوسط	۴۵۲/۰۵۹۹۶۸	۳۶
خطر زیاد	۳۳۵/۸۹۰۶۵۱	۲۶
خطر بسیار زیاد	۲۰۳/۱۶۰۴۷۹	۱۶

از نظر توزیع مکانی، پهنه‌های با خطر بسیار زیاد عمدتاً در بخش‌های جنوبی، شمالی، شمال غربی و غربی حوضه مشاهده می‌شوند. تمرکز این پهنه‌ها در نواحی یادشده را می‌توان به ترکیب چند عامل طبیعی از جمله شیب نسبتاً زیاد، نفوذپذیری پایین برخی واحدهای زمین‌شناسی، مقدار متوسط تا بالای شاخص قدرت جریان، مقدار متوسط شاخص رطوبت توپوگرافی و وجود تراکم زهکشی مؤثر در انتقال سریع رواناب نسبت داد. در چنین شرایطی، بارش‌های شدید می‌توانند در مدت‌زمان کوتاه به رواناب سطحی تبدیل شده و موجب تمرکز جریان در آبراهه‌ها شوند. در مقابل، بخش‌هایی از شرق منطقه به دلیل شیب کم، تراکم زهکشی پایین و وجود رسوبات رودخانه‌ای و تراس‌های جوان با نفوذپذیری بیشتر، در طبقات کم‌خطر یا نسبتاً کم‌خطر قرار گرفته‌اند. با این حال، کم‌خطر بودن این محدوده‌ها از نظر سیل‌خیزی به معنای نبود خطر سیلاب نیست؛ زیرا برخی نواحی پست و نزدیک به مسیر جریان، با وجود تولید رواناب کمتر، می‌توانند از نظر سیل‌گیری آسیب‌پذیر باشند. این موضوع نشان می‌دهد که تفکیک میان مفهوم سیل‌خیزی و سیل‌گیری در تحلیل خطر سیلاب ضروری است.

نتایج به‌دست‌آمده با مبانی نظری و نتایج بسیاری از مطالعات پیشین همخوانی دارد؛ زیرا در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با پهنه‌بندی خطر سیل، معیارهایی مانند شیب، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، پوشش گیاهی و ویژگی‌های زمین‌شناسی به‌عنوان عوامل اصلی کنترل‌کننده تولید رواناب معرفی شده‌اند. در این مطالعات نیز تأکید شده است که نواحی دارای شیب زیاد، پوشش گیاهی ضعیف، نفوذپذیری پایین و شبکه زهکشی توسعه‌یافته، استعداد بیشتری برای تولید رواناب و وقوع سیل دارند. بنابراین، قرارگیری بخش‌های شیب‌دار و کم‌نفوذ حوضه شهداد در طبقات خطر بالا از نظر هیدرولوژیکی قابل انتظار و قابل تأیید است. از نظر مدیریتی، وجود بند بتنی در بالادست شهر شهداد نقش مهمی در کاهش انتقال مستقیم سیلاب به سمت شهر داشته است؛ با این حال، سابقه تخریب این سازه در رخداد‌های سیلابی گذشته نشان می‌دهد که اتکای صرف به یک سازه کنترلی نمی‌تواند راهکار پایدار مدیریت سیلاب باشد. به دلیل شیب زیاد و توان بالای جریان در بخش‌های کوهستانی، سیلاب‌ها معمولاً حجم قابل توجهی از رسوبات را نیز به سمت پایین‌دست منتقل می‌کنند. این رسوبات می‌توانند ظرفیت عبور جریان را کاهش داده و موجب تشدید خسارات در پایین‌دست شوند. بر این اساس، احداث بندهای کوچک‌تر و پلکانی در بالادست، اجرای عملیات آبخیزداری، کاهش شیب مؤثر مسیر جریان، تثبیت بستر آبراهه‌ها و کنترل رسوب می‌تواند نقش مهمی در کاهش خطر سیلاب داشته باشد. همچنین وجود مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات نفوذپذیر در بخش‌هایی از منطقه، ظرفیت مناسبی برای اجرای طرح‌های پخش سیلاب فراهم می‌کند. پخش سیلاب در این نواحی می‌تواند علاوه بر کاهش انرژی جریان و کنترل سیلاب، به تغذیه آب‌های زیرزمینی، احیای قنات‌ها و بهبود منابع آبی روستاهای پایین‌دست کمک کند.

۴-۲- تحلیل نقشه پتانسیل سیل‌گیری

در تحلیل سیل‌گیری، معیار شیب با وزن $0/18$ بیشترین اهمیت را به خود اختصاص داده است. اهمیت بالای شیب در سیل‌گیری از این نظر قابل توجیه است که نواحی کم‌شیب، به دلیل کاهش سرعت جریان و افزایش زمان ماند آب، استعداد بیشتری برای تجمع آب و غرقابی شدن دارند. پس از شیب، معیارهای ارتفاع، فاصله از آبراهه، کاربری اراضی، موانع مسیر آبراهه و شاخص قدرت جریان بیشترین اثر را در تعیین پهنه‌های سیل‌گیر داشته‌اند (شکل ۸). نرخ ناسازگاری محاسبه‌شده برای مدل سیل‌گیری برابر با $0/04$ بود که کمتر از حد مجاز $0/1$ بوده و از نظر روش AHP قابل قبول است. نقشه نهایی سیل‌گیری نیز در پنج طبقه خطر بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شد. بر اساس نتایج جدول ۸، حدود ۲۸ درصد از منطقه در طبقه خطر زیاد و ۱۰ درصد در طبقه خطر بسیار زیاد قرار گرفته است. بنابراین، در مجموع حدود ۳۸ درصد از منطقه دارای پتانسیل زیاد و بسیار زیاد برای سیل‌گیری است. همچنین ۱۵ درصد از منطقه در طبقه خطر متوسط، ۲۶ درصد در طبقه خطر کم و ۲۱ درصد در طبقه خطر بسیار کم قرار دارد.



شکل ۸- نقشه پتانسیل سیل‌گیری حوزه آبخیز شهداد

جدول ۸- مساحت پهنه‌های پتانسیل خطر سیل‌گیری

پهنه سیل‌گیری	مساحت (Km ²)	درصد کل
خطر بسیار کم	۲۶۰/۷۱۷۶۰۲	۲۱
خطر کم	۳۳۵/۶۸۱۰۳۳	۲۶
خطر متوسط	۱۹۴/۰۴۴۴۶۶	۱۵
خطر زیاد	۳۵۱/۰۴۹۰۲	۲۸
خطر بسیار زیاد	۱۲۵/۹۳۹۱۹	۱۰

توزیع مکانی پهنه‌های سیل‌گیر نشان می‌دهد که بیشترین خطر سیل‌گیری در امتداد آبراهه‌ها، به‌ویژه رودخانه درختگان، و همچنین در نواحی پست و کم‌شیب شرق منطقه متمرکز شده است. این الگو از نظر هیدرولوژیکی منطقی است؛ زیرا نواحی نزدیک به رودخانه‌ها و آبراهه‌ها بیش از سایر بخش‌ها در معرض طغیان، سرریز جریان و گسترش پهنه سیلابی قرار دارند. همچنین دشت‌های کم‌ارتفاع و هموار شرق منطقه، به دلیل شیب کم و ظرفیت پایین تخلیه طبیعی جریان، شرایط مناسبی برای تجمع آب و افزایش مدت‌زمان ماند سیلاب فراهم می‌کنند. در بخش‌های غربی منطقه، با وجود ارتفاعات و شیب بیشتر، پتانسیل سیل‌گیری کمتر است؛ زیرا در این نواحی جریان به‌سرعت تخلیه شده و فرصت تجمع آب کاهش می‌یابد. با این حال، در حاشیه آبراهه‌ها و مسیرهای خروجی جریان، به‌ویژه در مناطقی که شیب کاهش می‌یابد یا زمین‌های بایر و کم‌نفوذ وجود دارند، خطر سیل‌گیری افزایش پیدا می‌کند. این وضعیت نشان می‌دهد که بالا بودن خطر سیل‌گیری الزاماً به معنای تولید رواناب بیشتر در همان محل نیست، بلکه می‌تواند ناشی از انتقال جریان از بالادست و تجمع آن در پایین‌دست باشد.

یکی دیگر از عوامل تشدیدکننده سیل‌گیری در منطقه، وجود موانع در مسیر آبراهه‌ها است. موانعی مانند پوشش گیاهی متراکم، رسوب‌گذاری در بستر، سازه‌های انسانی یا انسدادهای موضعی می‌توانند ظرفیت عبور جریان را کاهش دهند و موجب بالا آمدن سطح آب و طغیان موضعی شوند. بنابراین، پهنه‌هایی که در نزدیکی آبراهه‌ها قرار دارند و همزمان دارای موانع مسیر جریان هستند، در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. نتایج مکانی نقشه سیل‌گیری نشان می‌دهد که روستاهای ناصرآباد، کاظم‌آباد، فیض‌آباد، احمدآباد، رحیم‌آباد، تاج‌آباد، دولت‌آباد، علی‌آباد، ابراهیم‌آباد، امیرآباد و سالارآباد و همچنین مزرعه بزرگ کشاورزی منطقه، به دلیل قرارگیری در زمین‌های پست و هموار، نزدیکی به مسیر آبراهه‌ها و استقرار در محدوده‌های مستعد تجمع جریان، در معرض خطر سیل‌گیری قرار دارند. این یافته از نظر برنامه‌ریزی محیطی بسیار مهم است؛ زیرا نشان می‌دهد بخشی از سکونتگاه‌ها و اراضی کشاورزی پایین‌دست در پهنه‌های پرخطر قرار گرفته‌اند و نیازمند اقدامات حفاظتی و مدیریتی هستند (شکل ۹).

در حال حاضر، برای کاهش خطر سیلاب در اطراف مزرعه کشاورزی صنعتی، اقداماتی مانند دیوارکشی و حفر خندق در برخی بخش‌ها انجام شده است. با وجود این، چنین اقدامات موضعی در صورت نبود مدیریت یکپارچه حوضه، ممکن است تنها مسیر جریان را تغییر داده و خطر را به نواحی دیگر منتقل کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود مدیریت سیلاب در این منطقه بر اساس رویکرد حوضه‌ای انجام شود و علاوه بر حفاظت موضعی از سکونتگاه‌ها و اراضی کشاورزی، اقدامات بالادست مانند کنترل رسوب، اصلاح مسیر آبراهه‌ها، لایروبی نقاط مسدود، ساماندهی بستر رودخانه و اجرای طرح‌های پخش سیلاب نیز در اولویت قرار گیرد. از نظر مقایسه با مطالعات پیشین، تمرکز پهنه‌های سیل‌گیر در نواحی کم‌شیب، کم‌ارتفاع و نزدیک به آبراهه‌ها با یافته‌های بسیاری از پژوهش‌های پهنه‌بندی خطر سیل مطابقت دارد. در این مطالعات نیز فاصله از رودخانه، شیب، ارتفاع و کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر گسترش پهنه سیلابی معرفی شده‌اند. بنابراین، قرارگیری روستاها و اراضی کشاورزی پایین‌دست شهداد در طبقات خطر بالا، با منطق هیدرولوژیکی منطقه و نتایج پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد.



شکل ۹- روستاهای اطراف شهداد واقع در پهنه‌های مستعد سیل‌گیری؛ مرز روستاها با رنگ قرمز نشان داده شده است.

۴-۳- مقایسه سیل‌خیزی و سیل‌گیری در حوضه آبخیز شهداد

مقایسه دو نقشه سیل‌خیزی و سیل‌گیری نشان می‌دهد که پهنه‌های تولیدکننده رواناب و پهنه‌های مستعد تجمع سیلاب الزاماً بر یکدیگر منطبق نیستند. در بخش‌های شیب‌دار و کوهستانی، به‌ویژه در غرب، شمال‌غرب و جنوب حوضه، پتانسیل سیل‌خیزی بالا است؛ زیرا این نواحی به دلیل شیب زیاد، زمان تمرکز کوتاه و نفوذپذیری نسبتاً پایین، توان بالایی در تولید رواناب دارند. در مقابل، در نواحی پست‌تر و کم‌شیب پایین‌دست، به‌ویژه در شرق حوضه و حاشیه رودخانه درختگان، پتانسیل سیل‌گیری بیشتر است؛ زیرا این مناطق محل دریافت و تجمع جریان‌های منتقل‌شده از بالادست هستند.

این تفاوت نشان می‌دهد که مدیریت سیلاب در حوضه آبخیز شهداد باید همزمان دو رویکرد را دنبال کند. رویکرد نخست، کنترل تولید رواناب و رسوب در بالادست از طریق عملیات آبخیزداری، احداث بندهای کنترلی، تثبیت شیب‌ها و افزایش پوشش گیاهی است. رویکرد دوم، کاهش آسیب‌پذیری پایین‌دست از طریق ساماندهی بستر رودخانه، جلوگیری از ساخت‌وساز در حریم آبراهه‌ها، حفاظت از روستاهای در معرض خطر و هدایت سیلاب به پهنه‌های مناسب پخش سیلاب است. بر این اساس، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری در مدیریت خطر سیلاب، مکان‌یابی اقدامات آبخیزداری، تعیین اولویت‌های حفاظتی و برنامه‌ریزی کاربری اراضی در حوضه آبخیز شهداد مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پتانسیل سیل‌خیزی و سیل‌گیری حوضه آبخیز شهداد با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی AHP و تلفیق لایه‌های مؤثر در محیط GIS ارزیابی و پهنه‌بندی شد. نتایج نشان داد که حوضه مورد مطالعه از نظر خطر سیلاب دارای شرایط ناهمگن مکانی است و بخش‌های مختلف آن از نظر تولید رواناب و تجمع سیلاب رفتار یکسانی ندارند. بر اساس نقشه

نهایی سیل خیزی، حدود ۲۰۳/۱۶ کیلومتر مربع معادل ۱۶ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر بسیار زیاد، ۳۳۵/۸۹ کیلومترمربع معادل ۲۶ درصد در طبقه خطر زیاد، ۴۵۲/۰۵ کیلومترمربع معادل ۳۶ درصد در طبقه خطر متوسط، ۲۳۴/۱۰ کیلومترمربع معادل ۱۸ درصد در طبقه خطر کم و ۴۲/۹۰ کیلومترمربع معادل ۳ درصد در طبقه خطر بسیار کم قرار گرفته است. بنابراین، در مجموع حدود ۴۲ درصد از گستره حوضه شهاد در طبقات سیل خیزی زیاد و بسیار زیاد قرار دارد. این موضوع بیانگر استعداد قابل توجه بخش‌هایی از حوضه برای تولید رواناب و شکل‌گیری سیلاب است. از نظر توزیع مکانی، پهنه‌های با پتانسیل بالای سیل خیزی عمدتاً در بخش‌های بالادست، شیب‌دار و کوهستانی حوضه متمرکز شده‌اند. در این نواحی، عواملی مانند شیب زیاد، کاهش زمان تمرکز، تراکم زهکشی، نفوذپذیری پایین برخی واحدهای زمین‌شناسی و ضعف نسبی پوشش گیاهی موجب افزایش تولید رواناب سطحی می‌شوند. بنابراین، این بخش‌ها نقش مهمی در تولید و انتقال جریان‌های سیلابی به سمت پایین‌دست دارند. نتایج نقشه سیل‌گیری نیز نشان داد که حدود ۱۲۵/۹۳ کیلومتر مربع معادل ۱۰ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر بسیار زیاد، ۳۵۱/۰۴ کیلومترمربع معادل ۲۸ درصد در طبقه خطر زیاد، ۱۰۴/۱۹۴ کیلومترمربع معادل ۱۵ درصد در طبقه خطر متوسط، ۳۳۵/۶۸ کیلومترمربع معادل ۲۶ درصد در طبقه خطر کم و ۲۶۰/۷۱ کیلومترمربع معادل ۲۱ درصد در طبقه خطر بسیار کم قرار دارد. بر این اساس، حدود ۳۸ درصد از منطقه دارای پتانسیل زیاد تا بسیار زیاد برای سیل‌گیری است. بررسی نقشه سیل‌گیری نشان می‌دهد که پهنه‌های مستعد سیل‌گیری بیشتر در نواحی پایین‌دست، کم‌شیب، نزدیک به آبراهه‌ها و مسیرهای خروجی حوضه قرار دارند. شهر شهاد و برخی روستاهای اطراف آن به دلیل استقرار در مجاورت مسیل‌ها، شبکه زهکشی و مسیرهای انتقال جریان، در معرض خطر سیلاب قرار دارند. به‌ویژه روستاهای پایین‌دست از جمله دولت‌آباد، علی‌آباد، ابراهیم‌آباد، امیرآباد و سالارآباد به علت نزدیکی به آبراهه‌ها، شیب کم و شرایط نفوذپذیری محدود خاک، استعداد بیشتری برای سیل‌گیری دارند. همچنین روستاهایی مانند کاظم‌آباد و سکونتگاه‌های پیرامون آن به دلیل نزدیکی به ارتفاعات شیب‌دار و عبور جریان‌های اصلی، در معرض خطر قابل توجه سیلاب هستند. مقایسه نقشه‌های سیل خیزی و سیل‌گیری نشان داد که مناطق مولد رواناب و مناطق محل تجمع سیلاب الزاماً بر یکدیگر منطبق نیستند. بخش‌های بالادست و شیب‌دار حوضه بیشتر نقش تولیدکننده رواناب را دارند، در حالی که بخش‌های پایین‌دست و کم‌شیب، به‌ویژه در محدوده‌های نزدیک به آبراهه‌ها، بیشتر مستعد سیل‌گیری هستند. این نتیجه بیانگر ضرورت تفکیک مفهومی و مکانی میان سیل خیزی و سیل‌گیری در مطالعات پهنه‌بندی خطر سیلاب است. یافته‌های این پژوهش با نتایج بسیاری از مطالعات داخلی و خارجی در زمینه پهنه‌بندی خطر سیل همخوانی دارد. در بیشتر این مطالعات، عواملی مانند شیب، فاصله از رودخانه، تراکم شبکه زهکشی، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی و شرایط زمین‌شناسی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع و گسترش سیلاب معرفی شده‌اند. در حوضه شهاد نیز ترکیب همین عوامل موجب افزایش خطر سیل در بخش‌هایی از منطقه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، جلوگیری از ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها، مسیل‌ها و پهنه‌های دارای خطر زیاد و بسیار زیاد، باید به‌عنوان یکی از اولویت‌های اصلی مدیریت توسعه شهری و روستایی در منطقه مورد توجه قرار گیرد. همچنین اجرای اقدامات آبخیزداری در بالادست، کنترل رسوب، ساماندهی و لایروبی مسیر آبراهه‌ها، تثبیت بستر رودخانه، احداث سازه‌های کنترلی کوچک و پلکانی و هدایت سیلاب به پهنه‌های مناسب پخش سیلاب می‌تواند نقش مهمی در کاهش خطر سیلاب و خسارات ناشی از آن داشته باشد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان داد که روش AHP در ترکیب با قابلیت‌های GIS، روشی کارآمد و قابل استفاده برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل خیزی و سیل‌گیری است. نقشه‌های حاصل از این پژوهش می‌توانند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای برنامه‌ریزی توسعه شهری و روستایی، مدیریت کاربری اراضی، تعیین مناطق امن‌تر برای توسعه، کاهش آسیب‌پذیری سکونتگاه‌ها و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و آبخیزداری در حوضه آبخیز شهاد مورد استفاده قرار گیرند.

منابع:

- ۱- علیزاده، اصول هیدرولوژی کاربردی. دانشگاه امام رضا (ع)، ۱۳۸۸.
- ۲- هیات ویژه گزارش ملی سیلاب ها، روایت سیلاب های ۱۳۹۸-۱۳۹۷ ایران، مهر ۱۳۹۸.
- ۳- فتوحی ص، کیانی س، ریز پهنه بندی ریسک سیلاب شهری با استفاده از مدل فرایند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعه ی موردی: شهر نهاوند). نشریه علمی جغرافیایی آمایش محیط، ۱۳۹۴، ۲۹(۸)، صفحه ۱۳۳-۱۵۲. (DOI:10.30473/grup.2024.55316.2554)
- ۴- خسروی خ، معروفی نیا، نوحانی، ا، چپی ک، ارزیابی کارایی مدل رگرسیون لجستیک در تهیه نقشه حساسیت به وقوع سیل. نشریه علمی - پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۱۳۹۵، ۶۹(۴)، صفحه ۶۷۶-۸۶۳. (DOI:10.22059/jrwm.2017.61187)
- ۵- اسفندیاری دارآباد ف، رحیمی م، پورمرتضی غ، پهنه بندی سیلاب حوضه آبریز آجلو چای با استفاده از روش L-THIA و منطق فازی. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۱۳۹۸، ۸(۲)، صفحه ۱۵۵-۱۷۱.
- ۶- خلیلی ع، اسروش آ، ارزیابی آسیب پذیری ناشی از سیلاب در منطقه مکران با استفاده از نرم افزار ArcGIS. فصلنامه جغرافیایی سرزمین، ۱۳۹۹، ۱۱(۱)، صفحه ۱۱-۶۶.
- 7-Javan, F., Atashbahar, R., & Motalebpoor, A. (2025). Zoning of Environmental Hazards in Tourism Destinations with Emphasis on Flooding (Case Study: Sarvabad County, Kurdistan Province). Journal of Environmental Research in Mountainous Regions, 1(3), 43-56. (DOI: 10.22034/ermr.2025.144141.1025)
- 8- Pratik, Dash.Jishnu, Sar (2020). Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index, Journal of Flood Risk Management published by Chartered Institution of Water and Environmental Management and John Wiley & Sons Ltd. Pp123-145. (DOI:10.1111/jfr3.12620)
- 9- Lars Tierolfa. Hansde Moelb. Jaspervan Vlietb (2021). Modeling Urban Development and Its Exposure to River Flood Risk in Southeast Asia. Computers, Environment and Urban Systems. Volume 87, May 2021, 101620. (DOI:10.1016/j.compen.vurbsys.2021.101620)
- 10-Taoukidou, N., Karpouzou, D., & Georgiou, P. (2025). Flood Hazard Assessment Through AHP, Fuzzy AHP, and Frequency Ratio Methods: A Comparative Analysis. Water, 17(14), 2155. (DOI:10.3390/w17142155)
- 11- Islam, I., Rahman, M. A., Adham, M. I., Majumder, A. A. S., & Zaman, A. (2025). Assessment and Zonation of Flood Susceptibility in Sylhet Division, Bangladesh Using GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP). Journal of Flood Risk Management, 18(4), e70121. (DOI:10.1111/jfr3.70121)
- ۱۲- سلیمی موید س، دانش بومی انتقال و بهره برداری آب در شهداد. فصلنامه اثر، ۱۳۹۵، ۳۷(۷۳)، صفحه ۵۹-۹۲.
- ۱۳- جلال آبادی ل، رمضان زاده لسبویی م، شناسایی و تحلیل عوامل کلیدی مؤثر بر توسعه اکوتوریسم پایدار در بیابان لوت. نشریه گردشگری شهری، ۱۴۰۳، ۱۱(۴)، صفحه ۳۹-۵۸. (DOI:10.22059/jut.2024.376997.1212)
- ۱۴- علوی پناه ک، مطالعه دمای پدیده های سطحی حاشیه یاردانگ های بیابان لوت با استفاده از مطالعات میدانی و داده های حرارتی ماهواره. نشریه بیابان، ۱۳۸۱، ۷(۲)، صفحه ۶۷-۷۹.
- ۱۵- رامشت م، سیف ع، شاه زیدی س، انتظاری م، تأثیر تکتونیک جنبه بر مورفولوژی مخروط افکنه ی درختگان در منطقه ی شهداد کرمان. مجله جغرافیا و توسعه، ۱۳۸۸، ۷(۱۶)، صفحه ۲۹-۴۶. (DOI:10.22111/gdij.2009.1174)
- ۱۶- رستمی راوری، ا، ابراهیمی تولکانی ن، بررسی تخریب بند انحرافی بتنی رودخانه شهداد و راهکارهای مقابله با تخریب. کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، ۱۳۹۴.
- 17- Kamonchat seejataa, Aphiuha Yoddyinga, Tubtim Wongthadama, Nattapon Mahavika, Sarintip Tantaneeb, Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province, the International Conference on Building Resilieence; Using scientific knowledge to inform policy and practice in disaster risk reduction, ICBR2017, 27-29 November 2017, Bangkok, Thailand. (DOI: 10.1016/j.proeng.2018.01.044)
- 18- Kamonchat Seejataa, Aphiuha Yodyinga, Tubtim Wongthadama, Nattapon Mahavika Sarintip Tantaneeb, Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province, 2017. (DOI: 10.1016/j.proeng.2018.01.044)

- 19- Hong H, Panahi M, Shirzadi A Ma, Liu J, Zhu A, Chen W, & et al. Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Science of The Total Environment*. 2017; 621, 1124–1141. (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.114)
- 20- Hong H, Panahi M, Shirzadi A Ma, Liu J, Zhu A, Chen W, & et al. Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Science of The Total Environment*. 2017; 621, 1124–1141. (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.114)
- 21- Moore, I.D., Grayons, R.B, and Ladson, A.R., Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol Process*, 1991, v. 5, p.3-30. (DOI:10.1002/hyp.3360050103)
- 22- D.S Fernandez, M.A. Lutz, urban flood hazard zoning in tucman province, argentina, using GIS and multicritria decision analys, *Engineeing geology* 111, (2010) 90-80. (DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.12.006)
- 23- Dass S. Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2019; v. 14: 60-74. (DOI:10.1016/j.rsase.2019.02.006).

۲۴- شناور ب، حسینی م، اورک ن، ارزیابی توان سرزمین به منظور استقرار کاربری توسعه شهری با استفاده از روش ترکیب خطی وزن دار (WLC) در محیط سامانه اطلاعات مکانی (GIS) (مطالعه موردی: حوزه آبخیز زرد خوزستان). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۹۵، ۱۸(۳)، صفحه ۹۹-۱۱۶.