



Flood risk assessment using fuzzy logic and HEC-HMS model in Ojan Chay watershed, Northwest of Iran

Marziyeh Esmailpour*

Associate professor in Climatology, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: 3 May 2023

Revised: 23 May 2023

Accepted: 1 June 2023

Abstract

In the current study the flood risk in the Ojan Chay basin, which is situated in the province of East Azarbaijan, Bostan-Abad, was assessed. 16 spatial variables influencing the probability of flooding were taken into account, integrated, and examined using fuzzy logic within the geographic information system framework in order to extract the risk map. The application of the fuzzy gamma operator to the overlapping thematic maps revealed that about 4.8% of the basin's area falls into the high risk category. A considerable portion of these areas match the basin's major river beds and the surrounding terrain. The class with high risk is also located mostly in the vicinity of the mentioned class and includes more than 16.6% of the area of the study area. Floods with a ten-year or longer return period may damage these areas. In the high risk class, there are roughly 2.3% of residential areas with an area of 11.1 hectares. However approximately 42.9% with an area of 35.9 hectares are located in the high risk class. The HEC-HMS model was employed in the second phase of the study to simulate rainfall-runoff and pinpoint sub-basins with high potential for runoff generation. The findings demonstrated that geomorphometric features and land cover have a significant impact on the flood hydrograph of the sub-basins and the basin's output. High slope, low permeability, a high concentration of rocky outcrops, impermeable surfaces, and the least amount of protective cover are the characteristics of sub-basins that exhibit high peaks. The upstream sub-basins with the highest peak discharge are 1, 3, 7, 11, and 12.

Keywords: Flood risk assessment, Flood hazard mapping, Geographic Information System (GIS), HEC-HMS model, Ojan Chay basin, Northwest Iran

*. Email:m.esmaeilpour@maragheh.ac.ir

Tel:+989144215674

How to cite this Article: Esmailpour, M. (2024). Flood risk assessment using fuzzy logic and HEC-HMS: The case of Ojan Chay. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 65-91.





ارزیابی خطر سیلاب در حوضه آبریز اوجان‌چای با استفاده از منطق فازی و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

مرضیه اسمعیل پور^۱ - دانشیار اقلیم‌شناسی در برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۳/۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۱۱

چکیده

در پژوهش حاضر خطر سیلاب در سطح حوضه اوجان‌چای، واقع در شهرستان بستان‌آباد استان آذربایجان شرقی، ارزیابی شد. برای تهیه نقشه خطر تعداد ۱۶ متغیر مکانی تأثیرگذار بر وقوع سیلاب مورد توجه قرار گرفته و در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی با استفاده از منطق فازی ترکیب و تحلیل شدند. نتایج همپوشانی با کاربست اپراتور گامای فازی نشان داد بالغ بر ۴/۸ درصد از مساحت حوضه در کلاس با خطر بسیار زیاد قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از این پهنه‌ها منطبق بر بستر رودخانه-های اصلی حوضه و اراضی پیرامون آن‌هاست. کلاس با خطرپذیری زیاد نیز عمدتاً در مجاورت کلاس مذکور قرار گرفته و بالغ بر ۱۶/۶ درصد مساحت حوضه مطالعاتی را شامل می‌شود. این پهنه‌ها می‌توانند توسط سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ سال و بالاتر تحت تأثیر قرار گیرند. حدود ۳/۲ درصد از مناطق مسکونی با مساحتی بالغ ۱۱/۱ هکتار در کلاس با خطرپذیری بسیار زیاد و حدود ۴۲/۹ درصد با مساحتی بالغ بر ۳۵/۹ هکتار در کلاس با خطرپذیری زیاد واقع شده‌اند. در بخش دوم تحقیق از مدل HEC-HMS به منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب و شناسایی زیرحوضه‌های با پتانسیل تولید رواناب بالا استفاده شد. نتایج نشان داد هیدروگراف سیلاب زیرحوضه‌ها و خروجی حوضه تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی‌های ژئومورفومتری و پوشش زمین است. پیک‌های بالا در زیرحوضه‌های با کمترین میزان پوشش حفاظتی، شیب زیاد، نفوذپذیری کم، فراوانی برون‌زدهای سنگی و سطوح غیرقابل نفوذ مشاهده می‌شود. می‌توان به زیرحوضه‌های بالادست از جمله ۱، ۳، ۷، ۱۱ و ۱۲ اشاره کرد که از بالاترین میزان دبی پیک برخوردارند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی خطر سیلاب، نقشه‌سازی خطر سیلاب، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

، مدل HEC-HMS، حوضه اوجان‌چای، شمال غرب ایران

مقدمه

طی ۲۰ سال گذشته، فراوانی مخاطراتی مانند زمین‌لرزه‌ها، سونامی‌ها، فوران‌های آتشفشانی و حرکات توده‌ای تقریباً ثابت باقی مانده است، ولی مخاطرات مربوط به اقلیم (عمدتاً سیلاب‌ها و طوفان‌ها) به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, UN International Strategy for Disaster Reduction (CRED, UNISDR) (2015)). روند افزایشی رویدادهای اقلیمی حدی که ناشی از گرمایش جهانی می‌باشد یکی از مهم‌ترین مسائل جهانی به‌شمار می‌رود که نوع بشر با آن روبروست (Chen, et al., 2015; Sui, Lang, & Jiang, 2018). در واقع، رخدادهای اقلیمی حدی از جمله سیل و خشکسالی بیش از ۷۰ درصد از کل خسارت‌های اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی را به خود اختصاص داده‌اند (Toya & Skidmore, 2007). در این رابطه، سیل یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی به‌شمار می‌رود که باعث خسارت جانی و مالی قابل توجهی در سراسر جهان می‌شود. تا جایی که در سال‌های اخیر حدود ۴۰ درصد از کل خسارت اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی مربوط به وقوع سیلاب بوده است (یاریان^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). بدین ترتیب، سیل در طی صدها سال گذشته اثرات منفی اقتصادی-اجتماعی در اغلب کشورها برجای گذاشته است. در مواجهه با چنین تهدیدی، مطالعه علمی پارامترهای مؤثر بر سیل و یافتن راه‌حلی برای پیش‌بینی و به حداقل رساندن خسارت آن بر جان و مال انسان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین ترتیب، برای پیشگیری و کاهش خسارت ناشی از سیل، ارزیابی و تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب ضروری است (Dung, Long, Tran, & Tuyet, 2021).

پیشگیری کامل سیل ممکن نیست، ولی ارزیابی و مدیریت سیلاب‌های محتمل آینده امکان‌پذیر است. در سه دهه گذشته تعداد حوادث مرتبط با سیل در سراسر جهان به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. علل اصلی افزایش خطر سیل، تغییرات اقلیمی، تغییر کاربری اراضی و سایر مداخلات و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. رایج‌ترین اثرات آنتروپوژنیک عبارتند از: توسعه شهری، پل‌های با ابعاد نامناسب، جنگل‌زدایی و فرسایش متعاقب آن، ساخت جاده‌ها یا سایر سازه‌ها در مسیر آب، فرونشست به دلیل پمپاژ بیش‌ازحد و درنهایت تغییر یا انحراف مسیر جریان آب (Kourgialas & Karatzas, 2011). روند فعلی و سناریوهای آتی سیل به اطلاعات مکانی و زمانی دقیق نیاز دارد. از سوی دیگر، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر نسبت به سیل و اتخاذ اقدامات مقابله‌ای مناسب می‌تواند خسارت ناشی از آن را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. علاوه بر این، پهنه‌بندی خطر سیل نقشی اساسی در برنامه‌ریزی کاربری زمین، سیستم‌های هشدار اولیه، طراحی واکنش اضطراری و اقدامات کاهش خطر سیل دارد (Allafta & Opp, 2021)؛ به‌عبارت‌دیگر، پیشگیری از سیل فرایندی پیچیده است، اما وقوع آن را می‌توان با استفاده از روش‌ها و اقدامات مناسب پیش‌بینی و تا حدی کنترل کرد. در این

^۱ - Yariyan

رابطه، دسترسی به اطلاعات دقیق و به‌هنگام برای جلوگیری از سیل یا حداقل کاهش اثرات مخرب آن نقش کلیدی دارد. یکی از این اطلاعات کلیدی، نقشه پتانسیل سیل است (یاریان و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به موارد مذکور، در پژوهش حاضر خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز اوجان‌چای در شهرستان بستان‌آباد استان آذربایجان شرقی مورد تحلیل فضایی قرار گرفت. حوضه مطالعاتی یکی از حوضه‌های سیل‌خیز منطقه می‌باشد که در این زمینه می‌توان به سیلاب فروردین‌ماه سال ۱۳۹۶ اشاره کرد. اختلاف ارتفاع زیاد، درجه نام‌آوری بالا، شیب زیاد حوضه، وجود سازندهای زمین‌شناسی نفوذناپذیر یا با نفوذپذیری کم، اثرگذاری توده‌هواهای متعدد و دریافت بارش‌های همرفتی - رگباری، مشارکت ذوب برف در دبی رودخانه (مخصوصاً در اواخر فصل زمستان و اوایل فصل بهار)، تغییر کاربری اراضی و تخریب پوشش گیاهی طبیعی حوضه، وجود سکونتگاه‌های متعدد در مجاورت آبراهه‌های اصلی، دست‌اندازی و تجاوز به حریم آبراهه‌های اصلی حوضه و عوامل متعدد دیگر باعث افزایش مخاطره سیلاب در سطح حوضه آبریز اوجان‌چای شده است. بدین ترتیب ضرورت دارد که خطر سیلاب در سطح این حوضه مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

در ادامه برخی از پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی خطر سیلاب مورد اشاره قرار گرفته است. **(Ghanavati, Karam, & Aghaalikhani, (2013)** در پژوهشی سعی کردند تا پهنه‌های با بیشترین خطر وقوع سیلاب در حوضه فرحزاد را با استفاده از مدل فازی تعیین کنند. در این رابطه، لایه‌های مربوط به شیب، انحنا پروفیل و پلانیمتریک، ارتفاع، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه، لندفرم‌ها و کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفت. در نقشه نهایی، پهنه‌های با خطر بسیار زیاد در پایین‌دست حوضه و منطبق بر دره اصلی فرحزاد هستند. **(Moradnezehadi, Jourgholami, & Malekian, (2015)** به بررسی کارایی مدل هیدرولوژیک HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف حوضه‌های آبریز جنگلی خیرود پرداختند. کارایی مدل HEC-HMS پس از واسنجی آن برای شبیه‌سازی دبی اوج سیلاب در حوضه مطالعه‌شده، مورد تأیید قرار گرفت. **(Sistani Badooei, Negaresh, & Fotoohi, (2017)** مناطق سیل‌گیر را در حوضه آبریز گابریک در جنوب شرق ایران شناسایی و پهنه‌بندی کردند. نتایج حاصل از پهنه‌بندی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی نشان داد که ۲۳ درصد از مساحت حوضه در گروه مناطق با خطر بالا و بسیار بالا قرار گرفته است. عواملی همچون شیب و فرسایش - پذیری زیاد و نفوذپذیری کم از دلایل این وضعیت می‌باشند. **(Ganji, Gharechelou, & Ahmadi, (2022)** خطر سیلاب را در رودخانه گرگانرود در شهرستان آق‌قلا پهنه‌بندی کردند. ایشان ۱۸ معیار مؤثر بر سیل‌خیزی را با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی وزن‌دهی کردند و نتایج نشان داد معیارهای توپوگرافی و مورفولوژی در ایجاد سیل در حوضه مورد بررسی بالاترین تأثیر را دارند. نتایج پهنه‌بندی نیز نشان داد حدود ۱۴ درصد از مساحت شهرستان آق‌قلا در کلاس خیلی کم و ۲۶ درصد آن در پهنه خطر خیلی زیاد قرار دارند. **(Mesri Alamdari, (2021)** خطر سیلاب را در حوضه آبریز قلعه‌چای با استفاده از GIS و مدل HEC-HMS تحلیل

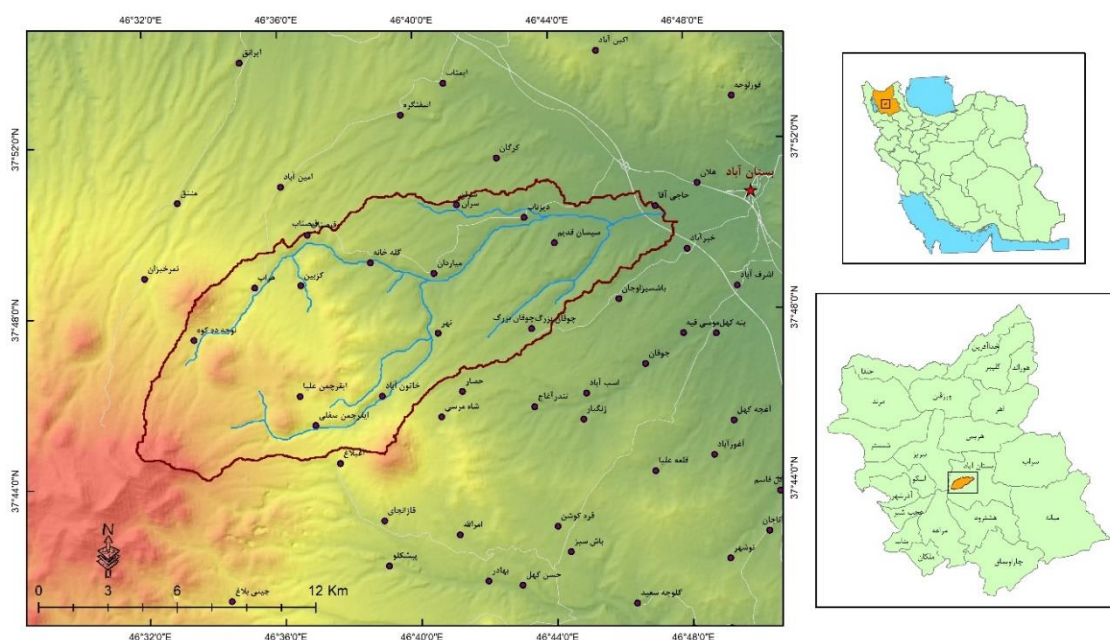
کردند. در این تحقیق تعداد هشت متغیر جهت پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از منطق فازی ترکیب شدند. مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نیز جهت شناسایی پهنه‌های با تولید رواناب بالاتر به کار برده شد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر سیلاب نشان داد که ۷/۷ درصد از مساحت حوضه قلعه‌چای از خطرپذیری بالایی در مقابل سیلاب برخوردار است. شبیه‌سازی بارش - رواناب نشان می‌دهد که بارش‌های با دوره بازگشت بالاتر می‌تواند دبی‌های سیلابی ایجاد کند. (Zare, Azari, & Rezaei Arefi, 2024) مناطق آسیب‌پذیر نسبت به سیلاب را در حوضه آبخیز کشف رود با استفاده از ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل تحلیل شبکه، ویکور، تاپسیس، تحلیل سلسله‌مراتبی و الکترو و با در نظر گرفتن ۱۶ شاخص مورفومتری مستخرج از مدل رقومی ارتفاع منطقه شناسایی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که در بین روش‌های موردبررسی، تحلیل شبکه برای تهیه نقشه سیل‌خیزی دارای دقت بالاتری می‌باشد. (Ali Mohammad, Aslam, & Khan, 2011) برای بررسی میزان تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رواناب سطحی در حوضه لینولاه در پاکستان از مدل بارش رواناب HEC-HMS استفاده کرد. نتایج نشان داد که در آینده با تغییر کاربری اراضی، رواناب کل بین ۵۱/۶ تا ۱۰۰ درصد افزایش خواهد یافت. (Nandalal & Ratnayake, 2011) در تحقیقی به ارزیابی کارایی رویکرد فازی به‌منظور بررسی ریسک سیلاب در سطح حوضه آبریز رودخانه کالوگانگا در سریلانکا پرداختند. گستره سیلاب برای بارندگی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله با استفاده از سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیک (HEC-HMS) و مدل‌های مبتنی بر سیستم تجزیه و تحلیل رودخانه HEC-River تعیین شد. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که منطق فازی عدم اطمینان در تعیین سطح خطر، آسیب‌پذیری و سطح خطر را به‌صورت دقیق‌تری در نظر می‌گیرد. (Ajin, Krishnamurthy, Jayaprakash, & Vinod, 2013) هند بر اساس ارزیابی چند معیاره و کاربست تکنیک‌های دورسنجی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مورد ارزیابی قرار دادند و منطقه مورد مطالعه را از نظر پتانسیل خطر سیلاب به پنج پهنه مجزا تقسیم کردند. (Rashetnia, 2016) به ارزیابی آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب در مورلندسیتی واقع در منطقه ملبورن استرالیا با کاربست منطق فازی پرداخت. یافته‌های این تحقیق نشان‌دهنده کارایی بالای منطق فازی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب است. این پژوهش نشان داد که مناطق بسیار پرجمعیت در طبقات آسیب‌پذیری زیاد و بسیار زیاد واقع‌اند. (Tella & Balogun, 2020) جهت ارزیابی مکانی خطر سیل در ایبادان در نیجریه از ترکیب روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و فازی استفاده کردند. برای بهبود دقت وزنی معیارهای ایجاد سیل، فازی AHP با سیستم اطلاعات جغرافیایی برای محاسبه وزن و فرآیند همپوشانی ترکیب شد. نقشه فازی AHP دارای ۹۱٪ سازگاری با مکان‌های تاریخی سیل بود. مروری بر پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که محققان با استفاده از روش‌های متعددی به ارزیابی خطر سیلاب پرداخته‌اند. این امر در طی سال‌های اخیر با تکیه بر تکنولوژی سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گرفته است. در پژوهش حاضر

نیز ارزیابی خطر سیلاب حوضه مطالعاتی تا حد زیادی بر GIS استوار است. با این حال، دو مفهوم سیل‌گیری و سیل‌خیزی تفکیک شده‌اند. برای ارزیابی خطر سیل‌گیری یا پتانسیل مکانی پخش سیلاب از منطق‌فازی استفاده شده است. ارزیابی سیل‌خیزی یا پتانسیل تولید رواناب نیز متکی بر مدل HEC-HMS در ترکیب با GIS می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز اوجان‌چای، واقع در شهرستان بستان‌آباد استان آذربایجان شرقی، ارزیابی شده است. از نظر موقعیت جغرافیایی حوضه مطالعاتی در ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۴۷ دقیقه و ۴۵ ثانیه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۴ دقیقه و ۸ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۵۱ دقیقه و ۵ ثانیه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت حوضه حدود ۱۶۲ کیلومتر مربع و محیط آن حدود ۸۴ کیلومتر می‌باشد. حوضه اوجان‌چای بخش‌هایی از دامنه‌های شمال شرقی توده آتشفشانی سهند را زهکشی می‌کند و از پایکوه‌ها تا نزدیک قله سهند امتداد یافته است. در محدوده حوضه مطالعاتی تعداد ۱۵ روستا وجود دارد که اکثراً در مجاورت یا بستر دره‌های اصلی حوضه استقرار یافته‌اند. افزون بر این، دره‌های اصلی حوضه آبریز اوجان‌چای کانون فعالیت‌های کشاورزی منطقه می‌باشند.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز اوجان‌چای در شمال غرب ایران

Fig.1. The location of the Ojan Chay watershed in the northwest of Iran

روش انجام پژوهش

متغیرهای متعددی بر وقوع سیلاب در یک حوضه آبخیز تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین عوامل و متغیرها عبارتند از: عوامل فیزیکی (مانند ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای دامنه، سنگ‌شناسی، موقعیت توپوگرافی و بارندگی)، عوامل هیدرولوژیکی (مانند تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، رطوبت توپوگرافی و قدرت جریان) و عوامل انسانی (مانند کاربری اراضی و فاصله از جاده) (پاریان و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به موارد مذکور در پژوهش حاضر به منظور ارزیابی سیل‌گیری (پهنه‌بندی سیلاب) و سیل‌خیزی (تولید رواناب) حوضه آبریز اوجان‌چای از داده‌هایی بدین شرح استفاده به عمل آمد: نقشه‌های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ (سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح)، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی کشور)؛ نقشه خاک (سازمان آب منطقه-ای)، تصاویر مدل رقومی ارتفاع (DEM) مربوط به ماهواره استرا^۱ با قدرت تفکیک مکانی ۲۷ متر، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ (مربوط به اوایل تابستان ۱۴۰۱ ه. ش) و گوگل ارث، داده‌های ایستگاه سینوپتیک بستان‌آباد و ایستگاه باران‌سنجی دیزناب و داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری بستان‌آباد و دیزناب. ارزیابی مکانی سیلاب مستلزم مشارکت عوامل متعددی بوده و می‌بایست به صورت ترکیبی و یکپارچه مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. بدین منظور در پژوهش حاضر مخاطره سیلاب در سطح حوضه آبریز اوجان‌چای با بهره‌گیری از قابلیت‌ها و امکانات تحلیل‌های مکانی سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به انجام رسید. به منظور استاندارد نمودن و ترکیب لایه‌های موضوعی مؤثر بر سیل‌گیری از رویکرد منطق فازی استفاده شد. همچنین به منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب در سطح حوضه و شناسایی پهنه‌های با بیشترین میزان تولید رواناب از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و اکستنشن آن در محیط نرم‌افزار ArcGIS یعنی HEC-GeoHMS بهره گرفته شد.

منطق فازی

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی به‌عنوان نظریه‌ای ریاضیاتی برای مدل‌سازی و صورت‌بندی ریاضی ابهام و عدم قطعیت موجود در فرایندهای شناختی انسانی، ابزارهای بسیار کارآمد و مفیدی به شمار می‌رود. این نظریه قادر است به بسیاری از مفاهیم، متغیرها و سیستم‌های نادقیق (فازی) و مبهم، صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد (Jahanbakhsh Asl, 2016). فرایند فازی‌سازی، عدم قطعیت کلاس‌ها را در خصوص پدیده‌هایی مشخص می‌سازد که دارای مرزهای دقیق نیستند. در فرایند فازی‌سازی، ایده‌آلی برای عضویت در مجموعه تعریف می‌شود. به هر مقداری از پدیده که نسبت به هسته مجموعه، محوری‌تر (مرکزی‌تر) باشد ارزش ۱ اختصاص خواهد یافت و به مقادیری که به‌طور قطع بخشی از مجموعه نیستند ارزش ۰ تخصیص می‌یابد. مقادیری که

^۱ - Aster

بین این دو حد واقع می‌شوند، در منطقه گذار مجموعه قرار می‌گیرند (Sarvar & Kherizadeh Arouq, 2015). تابع عضویت در مدل فازی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$A = \{X, \mu_A(X)\} \text{ for each } x \in X \dots \quad \text{رابطه (۱)}$$

μ_A تابع عضویتی است که درجه عضویت X را در مجموعه A تعریف می‌کند. بعد از فازی‌سازی لایه‌های موضوعی نسبت به ترکیب یا روی هم‌گذاری فازی آن‌ها اقدام شد. بسته نرم‌افزاری ArcGIS پنج عملگر فازی مختلف را جهت ترکیب فازی لایه‌های رستری در اختیار می‌گذارد این عملگرها به شرح زیرند (Lee, 2007):

$$\mu_{\text{combination}} = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad \text{رابطه (۲) - «و» فازی}$$

$$\mu_{\text{combination}} = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad \text{رابطه (۳) - «یا» فازی}$$

$$\mu_{\text{combination}} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad \text{رابطه (۴) - ضرب فازی}$$

$$\mu_{\text{combination}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad \text{رابطه (۵) - جمع فازی}$$

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^\lambda * (\text{Fuzzy algebraic product})^{1-\lambda} \quad \text{رابطه (۶) - گامای فازی}$$

در روابط فوق، μ_i تابع عضویت فازی برای لایه موضوعی i ام و λ یک پارامتر انتخابی در دامنه (۰ و ۱) می‌باشد.

مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی بارش- رواناب و بررسی پتانسیل تولید رواناب حوضه اوجانچای از روش مدل‌سازی هیدرولوژیکی HEC-HMS همراه با الحاقی HEC-GeoHMS استفاده شد. این سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی فرایندهای بارش- رواناب سیستم‌های حوضه آبریز طراحی شده است. طراحی سیستم به نحوی بوده تا در یک طیف گسترده‌ای از مناطق جغرافیایی برای حل مسائل متعدد قابل اجرا باشد. این‌گونه مسائل شامل تأمین آب و هیدرولوژی سیلاب حوضه‌های بزرگ رودخانه و رواناب حوضه‌های آبریز کوچک شهری یا طبیعی می‌شود. هیدروگراف‌های تولید شده توسط این برنامه به صورت مستقیم یا توأم با نرم‌افزارهای دیگر برای مطالعات قابلیت دسترسی آب، زهکشی شهری، پیش‌بینی جریان، اثرات آبی شهرنشینی، طراحی سرریز مخزن، کاهش خسارات سیلاب، منطقه‌بندی دشت سیلابی و عملیات سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Hydrologic Engineering Center, 2016). در این رابطه، HEC-GeoHMS به‌عنوان یک ابزار هیدرولوژی زمین- مکانی برای مهندسان و هیدرولوژیست‌ها با تجربه محدود GIS توسعه یافته است. این برنامه نمایان‌سازی اطلاعات مکانی، مستند کردن ویژگی‌های حوضه آبریز، تحلیل مکانی، تعیین حدود زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها، ایجاد ورودی‌ها به مدل‌های هیدرولوژیکی و تهیه گزارش‌ها برای کاربران را امکان‌پذیر می‌سازد (Hydrologic Engineering Center, 2013). برای مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS لازم است که سه مدل شامل مدل حوضه، مدل هواشناسی و مدل مشخصات کنترل

تعریف شود. در پژوهش حاضر شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه مطالعاتی بر مبنای روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) صورت گرفت. مدل مذکور در کتاب‌های هیدرولوژی به تفصیل تشریح شده است؛ بنابراین با توجه به حجم زیاد مطالب از بیان مدل مذکور در مقاله حاضر اجتناب شد.

نتایج و بحث

پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه اوجان‌چای با استفاده از منطق فازی

برای تهیه نقشه خطر سیلاب در سطح حوضه اوجان‌چای ابتدا توزیع فضایی مجموعه‌ای از عوامل مؤثر بر خطر سیلاب مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس عوامل مذکور با استفاده از توابع مختلف در بستر GIS فازی شدند. در نهایت، لایه‌های فازی با استفاده از اپراتورهای مختلف فازی ترکیب و یکپارچه شدند.

ارزیابی توزیع فضایی عوامل مؤثر بر خطر سیلاب

در این بخش از پژوهش توزیع فضایی عوامل مؤثر بر خطر سیلاب در سطح حوضه اوجان‌چای مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل (۲) توزیع فضایی عوامل مربوطه ارائه شده است.

- ارتفاع: بر اساس محاسبات پیکسل پایه، میانگین ارتفاع حوضه اوجان‌چای حدود ۲۲۴۹ متر می‌باشد. همچنین اختلاف ارتفاعی بالغ بر ۱۷۹۴ متر در سطح حوضه دیده می‌شود. سطوح مرتفع حوضه از نظر تولید رواناب و سیل‌خیزی حائز اهمیت زیادی می‌باشند. رواناب تولیدی به سمت اراضی پست و کم‌ارتفاع حوضه هدایت می‌شوند و به دلیل وجود سکونتگاه‌ها، تأسیسات و اراضی کشاورزی در پهنه‌های مذکور می‌توانند باعث مخاطراتی شوند؛ بنابراین، سطوح کم‌ارتفاع حوضه از نظر خطر سیل‌گیری دارای اهمیت بوده و در فرایند فازی‌سازی ارزش‌های زیادتری را به خود اختصاص می‌دهند.

- شیب: متوسط شیب در سطح حوضه اوجان‌چای حدود ۱۷ درصد می‌باشد. در رابطه با پهنه‌بندی، اراضی کم‌شیب همواره در معرض پخش سیلاب قرار دارند. در این رابطه طبقه شیب ۰ تا ۵ درصد از اهمیت بیشتری برخوردار است. در حوضه اوجان‌چای بالغ بر ۱۲ درصد مساحت حوضه در طبقه شیب مذکور قرار گرفته است. سطوح شیب مذکور از یک طرف در معرض سیلاب‌های رودخانه‌ای می‌باشند و از طرف دیگر می‌توانند توسط سیلاب‌های ورقه‌ای (شیت‌فلادها) تحت تأثیر قرار گیرند. از نظر تولید رواناب، عکس موارد مذکور صادق است. به بیان دیگر، اراضی پرشیب قسمت‌های میانی و بالادست حوضه از بیشترین میزان تولید رواناب برخوردارند.

- **جهت شیب:** اثر مستقیم جهت شیب به واسطه تأثیر بر ذوب برف و اثر غیرمستقیم آن به واسطه تأثیر بر پوشش گیاهی است. در دامنه‌های جنوبی و غربی، برف‌های حوضه با سرعت بالاتری ذوب می‌شوند. این امر در اواخر زمستان و اوایل بهار که منطقه بارش‌های همرفتی - رگباری فراوانی را تجربه می‌کند حائز اهمیت زیادی است. تراکم پوشش گیاهی اندک و در نتیجه اثرات محدود حفاظتی آن در مقابله با سیلاب را می‌توان به موارد مذکور اضافه نمود.

- **تحدب سطح زمین:** شاخص مذکور برای اولین بار توسط (Iwahashi & Pike, 2007) مطرح شد و هدف از ارائه آن طبقه‌بندی عوارض سطح زمین بود. تحدب سطح زمین معیاری مناسب برای ارزیابی پتانسیل پخش یا تجمع آب به‌شمار می‌رود. مقادیر بالاتر شاخص تحدب زمین معرف سطوح با تحدب زیاد و مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده سطوح با تحدب پایین (مقعر) می‌باشد. پهنه‌های با تقعر بالا شامل سطوح با مقادیر ۲۵ تا ۳۶ می‌باشند که در حدود ۱۲/۲ درصد از سطح حوضه اوجان‌چای را به خود اختصاص داده‌اند. این پهنه‌ها مشتمل بر سطوح مقعر حوضه بوده و به‌طور عمده منطبق بر بستر دره‌ها و سیرک‌های یخچالی بالادست حوضه می‌باشند. به دلیل ریخت‌شناسی مقعر، بخش قابل‌توجهی از رواناب‌های تولید شده به سطوح مذکور هدایت می‌شوند (شکل ۲).

- **طول دامنه:** عامل طول دامنه یکی از عوامل کلیدی تأثیرگذار بر حجم جریان و سرعت رواناب به‌شمار می‌رود. هر چه طول دامنه بیشتر باشد، سرعت جریان بالاتر و حجم رواناب بیشتر می‌شود. این امر به‌طور قابل‌توجهی شکل‌گیری سیل را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Dung, Tuyet, Ahmad, Long, 2020). در تحقیق حاضر، برای استخراج لایه طول دامنه از رابطه زیر استفاده شد (Luca, Conforti, & Robustelli, 2011):

$$\text{LSF} = (fa * \text{Cell_size} / 22.3)^{0.4} * (\text{Sin}\sigma / 0.0896)^{1.3} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن: LSF عامل طول دامنه و fa تجمع جریان می‌باشد. در حوضه مطالعاتی مقادیر طول دامنه از حداقل صفر تا حداکثر ۹۰ متر متغیر است. بین طول دامنه و وقوع سیلاب رابطه‌ای مستقیم وجود دارد.

- **توان رودخانه:** مقادیر بالاتر شاخص مذکور بیانگر این است که جریان رودخانه از توانایی انجام کار ژئومورفیک بیشتری برخوردار است. این امر از نظر تولید رسوب، فرسایش و افزایش توان تخریبی سیلاب‌ها حائز اهمیت می‌باشد. توان رودخانه را می‌توان از طریق فرمول زیر محاسبه نمود (Luca, Conforti, & Robustelli, 2011):

$$\text{SPI} = \ln(\text{As} / \tan\sigma) \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن: SPI شاخص قدرت جریان، As مساحت ویژه جریان و σ درجه شیب می‌باشد. در سطح حوضه مطالعاتی مقادیر شاخص توان رودخانه از تغییرپذیری مکانی زیادی برخوردار است. این امر تا حد زیادی در

ارتباط با تغییرپذیری شدید توپوگرافی منطقه می‌باشد. در این رابطه، در سطح حوضه آبریز اوجان‌چای مقادیر توان رودخانه از حداقل صفر تا حداکثر ۱۵۰۰۰ وات بر مترمربع متغیر است.

- **رطوبت توپوگرافیک:** این شاخص یکی از کارآمدترین شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی خطر سیلاب به‌شمار می‌رود. شاخص TWI متکی بر این فرض است که توپوگرافی کنترل‌کننده حرکت آب در چشم‌انداز است. در واقع، شاخص مذکور تأثیر توپوگرافی محلی در فرآیندهای هیدرولوژیکی را به‌صورت کمی نشان می‌دهد. شاخص رطوبت توپوگرافیک از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود (Kumar & Gupta, 2016; Qin, et al., 2011):

$$TWI = \text{Ln} \frac{(A_s * \text{Pixel area})}{\text{Tan}((S * \pi)/180)} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن: A_s مساحت زهکشی دامنه فوقانی در واحد عرض خط کانتور (مترمربع/ متر) و S شیب به درجه است. مقادیر این شاخص در سطح حوضه مطالعاتی از حداقل ۳ تا حداکثر ۲۳ متغیر است. رابطه‌ای مستقیم بین مقادیر این شاخص و خطرپذیری سیلاب در سطح حوضه برقرار است. در پهنه‌هایی که این شاخص مقادیر بالایی دارد احتمال وقوع سیلاب بیشتر است. در این رابطه کلاس با مقادیر TWI بیش از ۱۵ حائز اهمیت بیشتری می‌باشد.

- **شاخص همگرایی:** شاخص همگرایی پارامتری است که ساختمان ناهمواری را به‌صورت مجموعه‌ای از سطوح همگرا و واگرا نمایش می‌دهد. مقادیر منفی این شاخص نشان‌دهنده سطوح همگرا بوده که بیشتر در معرض سیلاب قرار می‌گیرند. در این رابطه کلاس با مقادیر همگرایی کمتر از ۲۰- معرف سطوح با همگرایی بسیار زیاد هستند. سطوح مذکور بالغ بر ۳ درصد مساحت حوضه را شامل می‌شوند. این سطوح مشتمل بر بستر آبراهه‌ها و اراضی مجاور آن‌ها بوده و همه‌ساله توسط دبی‌های معمول و طغیانی (سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱ تا ۳ ساله) تحت تأثیر قرار می‌گیرند. کلاس با مقادیر شاخص همگرایی ۲۰- تا ۴- نیز دلالت بر سطوح با همگرایی زیاد هستند که حدود ۱۳ درصد از مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به مطالعات میدانی و داده‌های هیدرومتری می‌توان گفت که سطوح مذکور در معرض سیلاب‌های با دوره بازگشت ۳ تا ۲۵ ساله می‌باشند.

- **عمق دره:** مقادیر بالاتر این شاخص دلالت بر عمق زیاد دره نسبت به خط‌الرأس‌ها دارد. این امر به دلایلی منجر به افزایش خطرپذیری نسبت به سیلاب می‌شود. در این رابطه می‌توان به مشارکت قابل توجه رواناب‌های دامنه‌های مشرف به این دره‌ها در دبی آبراهه‌های اصلی اشاره نمود که خطر وقوع سیلاب را به‌صورت محلی افزایش می‌دهد. بدین ترتیب طبقه با مقادیر بالاتر از ۲۳۰ متر از بیشترین میزان خطرپذیری نسبت به سیلاب برخوردار است.

- تراکم زهکشی: هرچه تراکم زهکشی حوضه‌ای بالاتر باشد تخلیه رواناب‌ها راحت‌تر صورت گرفته و زمان تمرکز زیرحوضه‌ها کاهش می‌یابد. این امر منجر به افزایش خطر سیلاب می‌گردد. مقادیر این شاخص در سطح حوضه مطالعاتی از ۰ تا ۵ کیلومتر در کیلومتر مربع متغیر است. در کل، از رأس قلل و ستیغ‌های منطقه در جهت پای دامنه‌ها و دره‌ها بر میزان تراکم زهکشی افزوده می‌شود.

- فاصله از رودخانه: نواحی مجاور رودخانه‌ها بیشتر تحت تأثیر سیلاب‌های رودخانه‌ای قرار می‌گیرند و با دور شدن از بستر رودخانه‌ها خطر سیلاب کاهش پیدا می‌کند. در این رابطه، حدود ۳۶ درصد از مساحت کاربری‌های مسکونی (حدود ۳۰/۲ هکتار) در فاصله صفر تا ۲۰۰ متری از رودخانه‌های حوضه استقرار یافته‌اند. پهنه‌های مذکور جزو خطرپذیرترین و آسیب‌پذیرترین پهنه‌های حوضه مطالعاتی نسبت به سیلاب می‌باشند.

- کاربری اراضی: کاربری‌هایی که باعث افزایش نفوذ آب می‌شوند به‌عنوان کاربری‌های تعدیل‌کننده سیلاب‌ها مطرح می‌شوند. در این رابطه می‌توان به مراتع با پوشش گیاهی خوب اشاره نمود که درصد قابل توجهی از آب ناشی از بارش را جذب می‌کنند. برعکس، کاربری‌هایی مانند کاربری مسکونی با کاهش نفوذ و افزایش آبدوی باعث تبدیل بخش قابل توجهی از آب بارش به رواناب سطحی می‌شوند و در نتیجه خطر سیلاب را افزایش می‌دهند.

- پوشش گیاهی: در این زمینه از شاخص NDVI استفاده شد که از رابطه زیر به دست می‌آید (لئو و ماسون^۱، ۲۰۰۹):

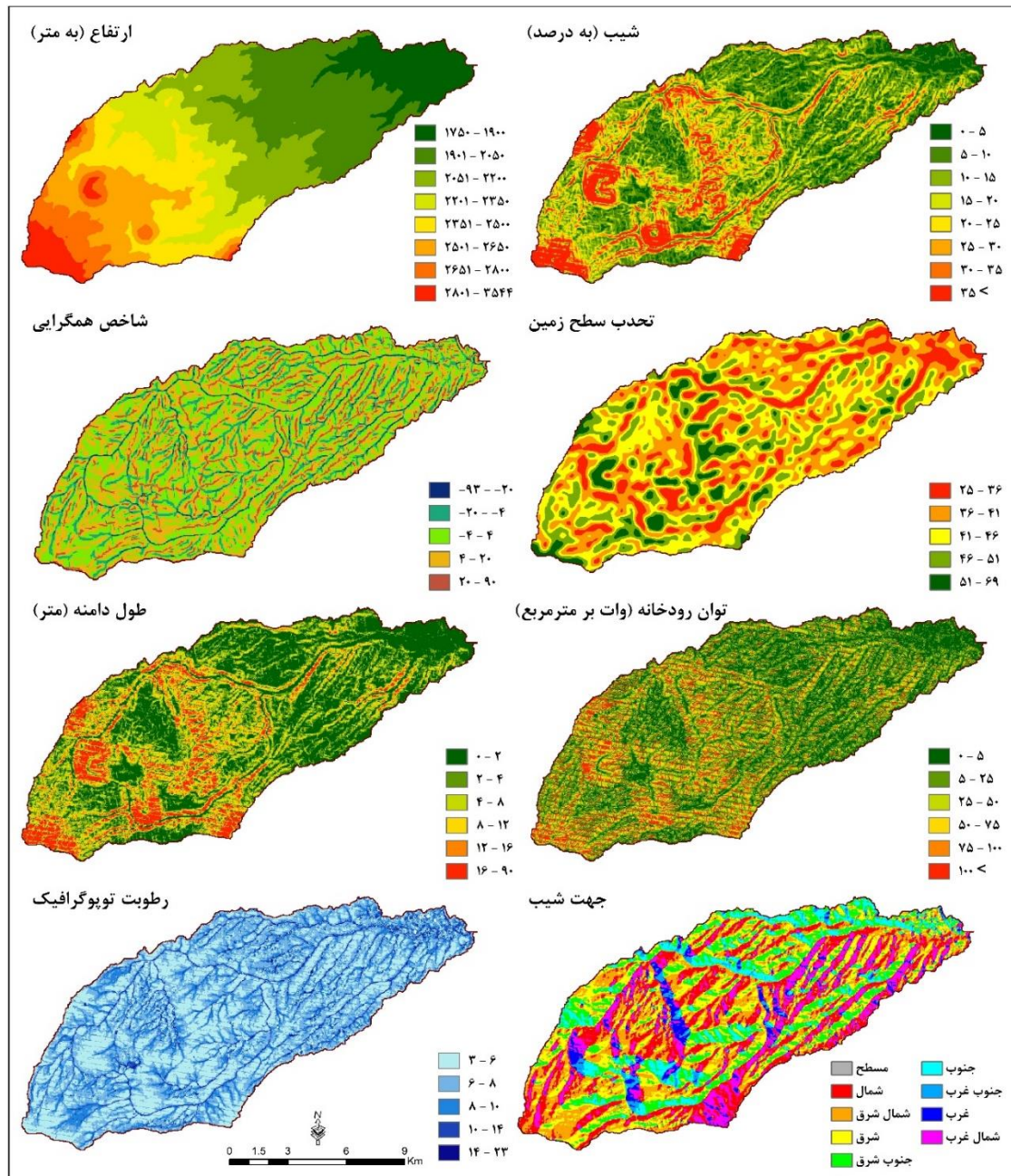
$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

که در آن: NIR و RED به ترتیب بازتاب‌ها در باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز هستند. بین تراکم پوشش گیاهی و خطر سیلاب رابطه‌ای معکوس برقرار است. این اصل در فرایند فازی‌سازی لایه NDVI به کار بسته شد و بدین ترتیب، پیکسل‌های با مقادیر NDVI اندک از ارزش بیشتری برخوردار شدند و برعکس.

- زمین‌شناسی: سازندهای زمین‌شناسی حوضه اوجان‌چای را با توجه به میزان نفوذپذیری و تأثیر آن بر وقوع سیلاب می‌توان به سه گروه طبقه‌بندی نمود: سازندهای با نفوذپذیری زیاد تا بسیار زیاد: این سازندها به ترتیب افزایش نفوذپذیری شامل پادگانه‌های آبرفتی قدیمی (Qt1)، پادگانه‌های آبرفتی جدید (Qt2) و آبرفت‌های عهد حاضر (Qal) می‌باشند. در طی کمی‌سازی کدهای ۱ تا ۳ به این سازندها اختصاص یافت. سازندهای با نفوذپذیری متوسط: این سازندها بر اساس کاهش میزان نفوذپذیری شامل لاهار و جریان‌های گلی (Plvc2la) با کد ۴)، توف برشی و توف‌های لایه‌ای (Et با کد ۵) و پومیس، خاکستر آتشفشانی و کنگلومرا (Plvclp) با کد ۶) می‌باشند. سازندهای با نفوذپذیری کم تا بسیار کم: این سازندها روی هم‌رفته بالغ بر ۵۸/۱ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شوند و عبارتند از: واحد Plvc2c (کنگلومرا با کد ۷)، واحد Eit (ایگنیمبریت - توف با کد

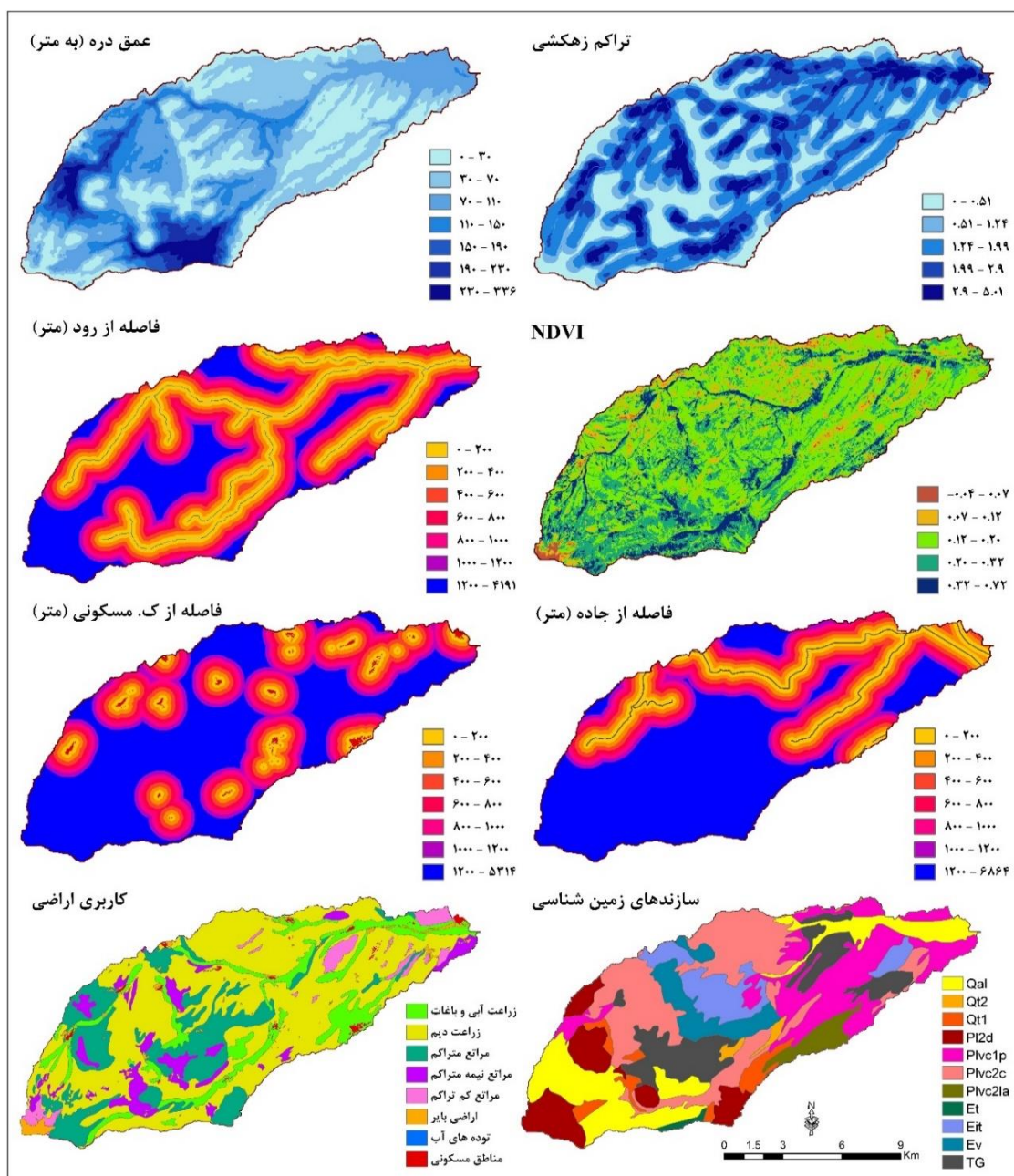
^۱ - Liu & Mason

۸)، واحد TG (گرانیت الکالی با کد ۹)، واحد EV (تراکی آندزیت - بازالت با کد ۱۰) و واحد PI2d (داسیت - آندزیت داسیتی با کد ۱۰).



شکل ۲- نقشه متغیرهای مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبریز اوچان‌چای

Fig.2. Map of variables used in flood risk zoning of Ojan Chay watershed



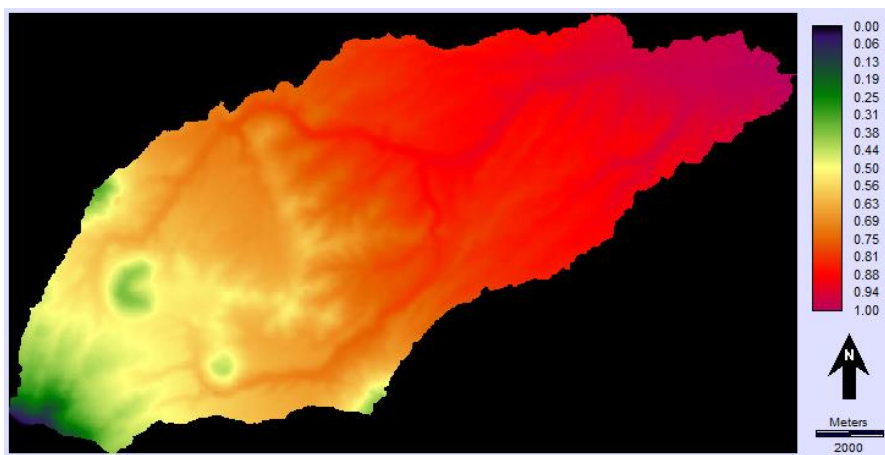
ادامه شکل ۲- نقشه متغیرهای مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبریز اوچان‌چای

Fig.2. Map of variables used in flood risk zoning of Ojan Chay watershed

فازی‌سازی لایه‌های موضوعی مؤثر بر سیلاب

فازی‌سازی لایه‌های موضوعی با هدف بی‌بعدسازی و همسان‌سازی لایه‌ها، ارزش‌گذاری مجدد لایه‌ها و رفع عدم قطعیت‌های کلاسه‌بندی لایه‌ها می‌باشد. در این رابطه، لایه‌های موضوعی مورد استفاده در پهنه‌بندی خطر

سیلاب را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی نمود: الف) لایه‌هایی که در آن‌ها ارزش‌های بالاتر منجر به افزایش خطر سیلاب می‌شوند. توان رودخانه، طول دامنه، عمق دره، رطوبت توپوگرافیک و تراکم زهکشی در این گروه قرار می‌گیرند. در نتیجه، به‌منظور فازی‌سازی لایه‌های مذکور می‌توان از توابعی مانند تابع خطی افزایشی یا بزرگ فازی استفاده نمود. ب) لایه‌هایی که در آن‌ها ارزش‌های پایین‌تر منجر به افزایش خطر سیلاب می‌شوند. ارتفاع، شیب، تحدب سطح زمین، همگرایی، فاصله از آبراهه و پوشش گیاهی در این گروه قرار می‌گیرند. دو تابع فازی خطی کاهشی و نزدیک فازی می‌توانند برای فازی‌سازی لایه‌های مذکور مورد استفاده قرار گیرند. سه لایه کاربری اراضی، لیتولوژی و جهت شیب لایه‌های کیفی تحقیق می‌باشند. از این‌رو در گام نخست لایه‌های موضوعی مذکور از طریق کدهی کمی گردیده و سپس فازی شدند. در شکل (۳) نمونه‌ای از نقشه فازی ارائه شده است.



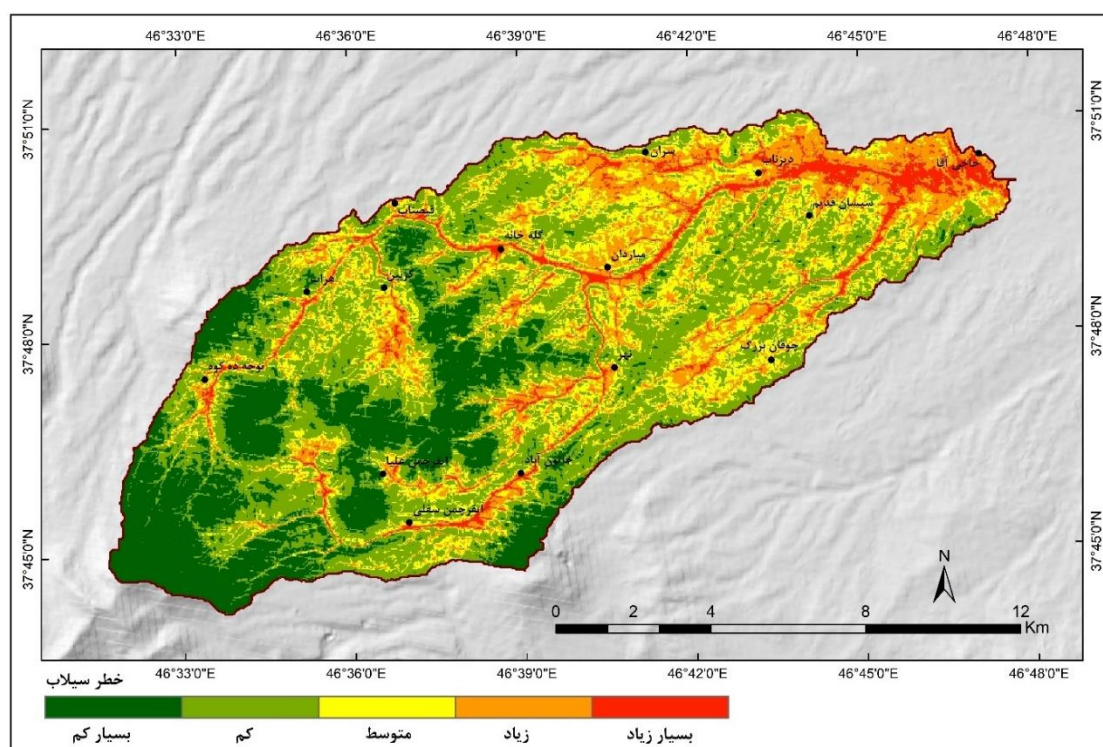
شکل ۳- نمونه‌ای از نقشه فازی تحقیق (لایه ارتفاع)

Fig.3. An example of a research fuzzy map (elevation layer)

ترکیب فازی لایه‌ها و تهیه نقشه خطر سیلاب

در پژوهش حاضر لایه‌های موضوعی فازی با کاربست پنج اپراتور «و» فازی، «یا» فازی، جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی و فازی گاما ترکیب شدند و نقشه خطر سیلاب حاصل گردید. در پهنه‌بندی با اپراتورهای «و» فازی و ضرب فازی اکثریت منطقه در کلاس با خطر بسیار پایین قرار گرفت. در واقع، مقادیر پیکسل‌ها در نقشه نهایی به سمت صفر میل می‌کند. نتایج حاصل از کاربست دو اپراتور «یا» فازی و جمع جبری فازی برعکس دو اپراتور فوق‌الذکر می‌باشد. در واقع، با اعمال اپراتورهای «یا» فازی و جمع جبری فازی، در لایه نهایی ارزش پیکسل‌ها به سمت یک تمایل پیدا می‌کند و تقریباً کل محدوده حوضه در کلاس بسیار پرخطر قرار گرفت. بدین ترتیب هر چهار اپراتور مذکور برای پهنه‌بندی خطر سیلاب از کارایی پایینی برخوردار می‌باشند. برعکس این اپراتورها، اپراتور گامای فازی جهت همپوشانی لایه‌های رستری و تهیه نقشه سیلاب به

نتایج مناسب و مقبولی منجر گردید. این اپراتور ترکیبی از اپراتورهای جمع جبری فازی و ضرب فازی به حساب می‌آید. در عملیات گامای فازی، هنگامی که λ برابر ۱ باشد تلفیق مشابه جمع جبری فازی و هنگامی که λ برابر ۰ باشد ترکیب معادل با ضرب جبری فازی می‌باشد. در پژوهش حاضر، ترکیب با بهره‌گیری از گامای ۰/۷ از دقت بالاتری برخوردار شد. این امر با توجه به نتیجه نهایی پهنه‌بندی در سطح منطقه و مقایسه آن با واقعیت‌های میدانی حاصل شد (شکل ۴).

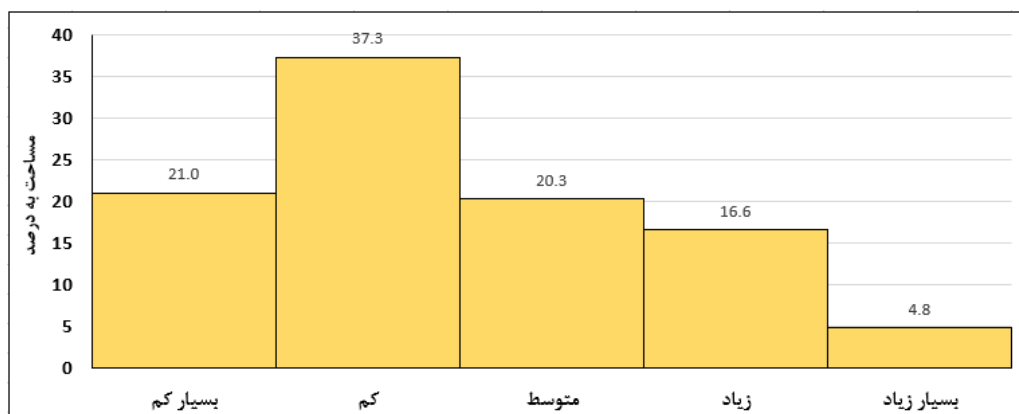


شکل ۴- پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبریز اوجان‌چای با استفاده از منطق فازی

Fig.4. Flood risk mapping of Ojan Chay watershed using fuzzy logic

با توجه به نقشه مذکور بالغ بر ۴/۸ درصد از مساحت حوضه اوجان‌چای در کلاس با خطر بسیار زیاد قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از این پهنه‌ها منطبق بر بستر رودخانه‌های اصلی حوضه و اراضی پیرامون آن‌ها می‌باشد. حوضه اوجان‌چای از درجه ناهمواری بالایی برخوردار بوده و عرض دره‌ها نیز از توسعه زیادی برخوردار نیستند. در مقاطعی که عرض دره افزایش پیدا می‌کند دشت سیلابی در بستر آن شکل گرفته که می‌تواند توسط سیلاب‌های مخرب تحت تأثیر قرار گیرد. کلاس با خطرپذیری زیاد نیز عمدتاً در مجاورت کلاس مذکور قرار گرفته و بالغ بر ۱۶/۶ درصد مساحت حوضه مطالعاتی را شامل می‌شود. این پهنه‌ها به‌طور عمده می‌توانند توسط سیلاب‌های با دوره بازگشت ۱۰ سال و بالاتر تحت تأثیر قرار گیرند. پهنه‌های مذکور عمدتاً در قسمت‌های پایین دست حوضه توزیع شده‌اند. افزایش عرض دره و وجود اراضی هموار در مجاورت

رودخانه‌ها از دلایل اساسی توزیع بیشتر پهنه‌های مذکور در قسمت‌های پایین دست می‌باشد. پهنه‌های مذکور در قسمت‌های میانی و بالادست حوضه در ارتباط با توسعه محلی عرض دره‌ها می‌باشد که از آسیب‌پذیری زیادی نسبت به سیلاب برخوردارند. بدین ترتیب مجموعه‌ای از اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای برای مهار سیلاب در پهنه‌های مذکور ضروری می‌باشد. در این رابطه، حدود ۳/۲ درصد از مناطق مسکونی با مساحتی بالغ ۱۱/۱ هکتار در کلاس با خطرپذیری بسیار زیاد و حدود ۴۲/۹ درصد با مساحتی بالغ بر ۳۵/۹ هکتار در کلاس با خطرپذیری زیاد واقع شده‌اند. کلاس با خطرپذیری متوسط بالغ بر ۲۰/۳ درصد مساحت حوضه اوجان چای را شامل می‌شود. کلاس مذکور به‌طور عمده در قسمت‌های پایین دست حوضه توزیع شده است. این پهنه‌ها در اکثر موارد منطبق بر پای کوه‌های ارتفاعات منطقه می‌باشند و می‌توانند توسط سیلاب‌های صفحه‌ای (شیت‌فلادها) و در مواردی محدود توسط سیلاب‌های رودخانه‌ای تحت تأثیر قرار گیرند. خطر وقوع سیلاب در پهنه‌های مذکور را تا حد زیادی می‌توان از طریق اقدامات غیرسازه‌ای کاهش داد. کلاس‌های با خطرپذیری کم و بسیار کم به ترتیب حدود ۳۷/۳ و ۲۱ درصد مساحت حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. کلاس‌های مذکور عمدتاً در قسمت‌های میانی و بالادست حوضه توزیع شده‌اند. توپوگرافی جزو مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کاهش خطر وقوع سیلاب در پهنه‌های مذکور می‌باشد. ضمن اینکه در پهنه‌های مذکور سکونتگاه‌های انسانی محدودی وجود دارد و در نتیجه، وقوع سیلاب به مخاطره جدی تبدیل نمی‌شود.



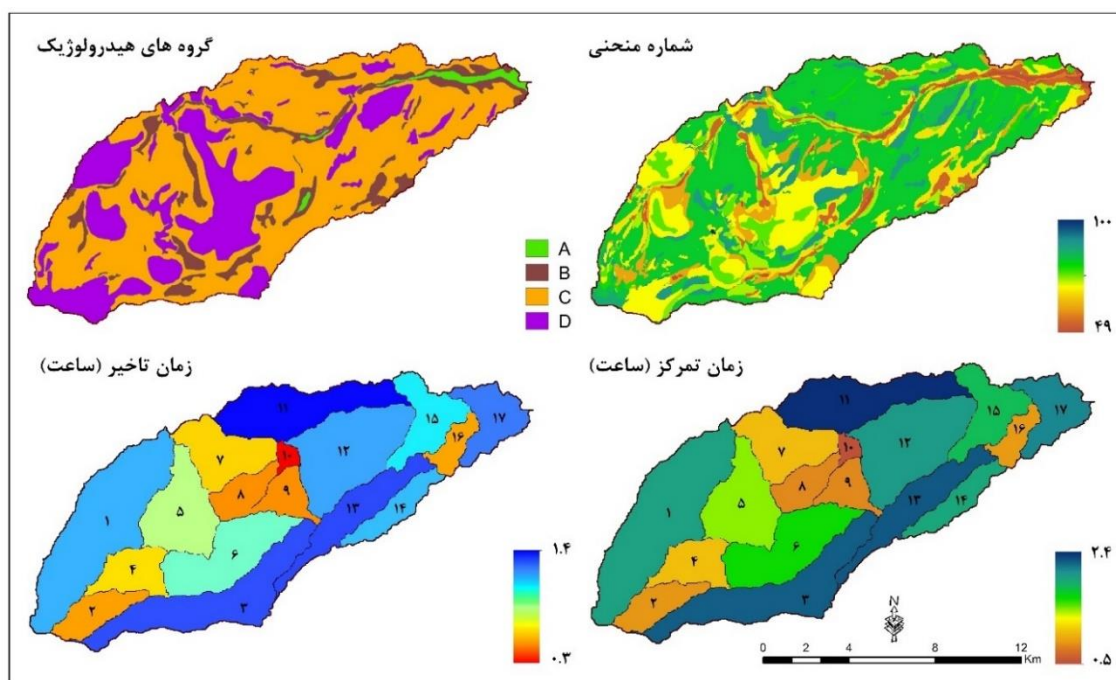
شکل ۵- درصد مساحت هر یک از کلاس‌های خطر سیلاب حوضه اوجان چای

Fig.5. The percentage of the area of each flood risk class in the Ojan Chay watershed

شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS

با شبیه‌سازی بارش - رواناب می‌توان پهنه‌های با بیشترین میزان تولید رواناب را شناسایی نمود که از نظر اقدامات مقابله‌ای و مدیریت سیلاب مهم‌اند. شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS مستلزم مدل‌سازی حوضه، هواشناسی و کنترل مشخصات دارد. در پژوهش حاضر بخش عمده‌ای از داده‌های مورد نیاز

از طریق اکستنشن HEC-GeoHMS در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه گردید. در این زمینه می‌توان به استخراج شبکه آبراهه‌ای، طولانی‌ترین آبراهه، مرکز ثقل زیرحوضه‌ها، زمان تأخیر، زمان تمرکز، شماره منحنی (CN)، کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، شیب زیرحوضه‌ها، شیب آبراهه‌ها، ارتفاع، مساحت، محیط و ... اشاره نمود. در شکل (۶) برخی از مهم‌ترین ورودی‌های داده‌های مکانی مدل ارائه شده است. لازم به ذکر است که توزیع مکانی برخی از ورودی‌های مهم مانند شیب و کاربری اراضی در مراحل قبلی تحقیق ارائه شده‌اند. در پژوهش حاضر روش شناسی SCS به‌عنوان مبنای محاسبات بسیاری از پارامترهای مربوطه استفاده شد. داده‌های مورد نیاز شبیه‌سازی بارش-رواناب پس از آماده‌سازی در محیط ArcGIS به نرم‌افزار HEC-HMS ارسال گردید. سایر داده‌های مورد نیاز از قبیل هیدروگراف‌ها و هایتوگراف‌ها در محیط نرم‌افزار مذکور وارد مدل گردید. به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب در سطح حوضه اوجان‌چای از داده‌های حداکثر بارش ۲۴ ساعته و همچنین هایتوگراف رگبارها استفاده شد. در جدول (۱) دوره‌های بازگشت حداکثر بارش ۲۴ ساعته برای حوضه آبریز اوجان‌چای ارائه شده است. برای محاسبه دوره‌های بازگشت از نرم‌افزار Smada بهره گرفته شد. داده‌های سیلاب نیز به‌عنوان دبی مشاهداتی وارد مدل گردید. در شکل (۷) شماتیک حوضه آبریز اوجان-چای در محیط اکستنشن HEC-GeoHMS نشان داده شده است.



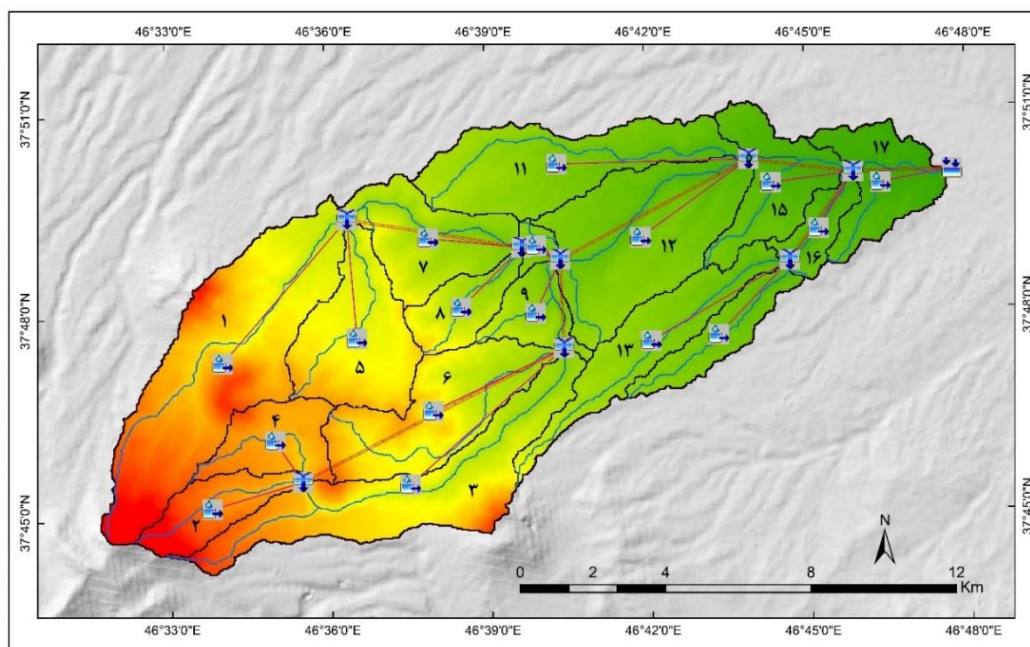
شکل ۶- مهم‌ترین ورودی‌های داده‌های مکانی مدل HEC-HMS

Fig.6. The most important spatial data inputs of HEC-HMS model

جدول ۱- مقادیر محاسبه شده حداکثر بارش ۲۴ ساعته حوضه اوجان‌چای

Table1- Calculated values of the maximum 24-hour rainfall of Ojan Chay watershed

انحراف معیار	مقدار محاسبه شده	دوره بازگشت	احتمال وقوع
۰/۶۹۷	۱۷/۴۰	۲	۰/۵۰۰
۰/۸۲۹	۱۹/۵۲	۳	۰/۶۶۷
۰/۹۸۰	۲۴/۶۳	۵	۰/۸۰۰
۲/۰۹۱	۳۳/۷۰	۱۰	۰/۹۰۰
۳/۹۰	۳۹/۴۳	۲۵	۰/۹۶۰
۴/۹۸۹	۴۶/۷۵	۵۰	۰/۹۸۰
۷/۶۹۹	۵۵/۸۶	۱۰۰	۰/۹۹۰
۱۰/۵۶۵	۶۱/۴۹	۲۰۰	۰/۹۹۵



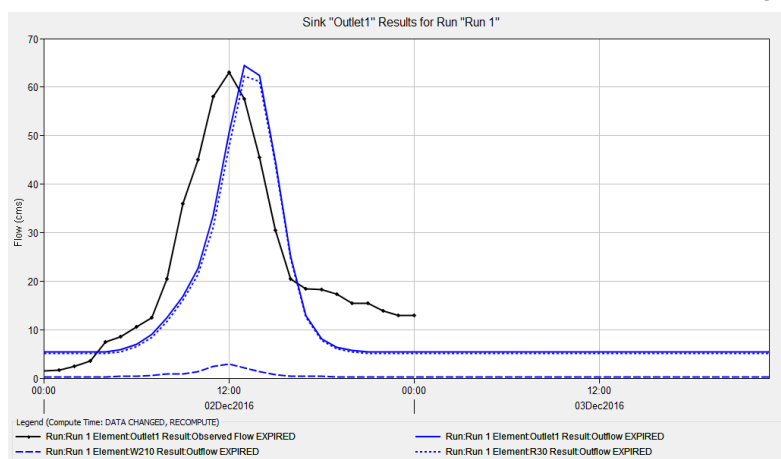
شکل ۷- شماتیک حوضه اوچان چای در محیط اکستنشن HEC-GeoHMS همراه با نام زیرحوضه‌ها

Fig.7. Schematic of Ojan Chay watershed in the HEC-GeoHMS extension along with the names of the sub-basins

برای تخمین پارامترها در نرم‌افزار HEC-HMS از فرایند بهینه‌سازی^۱ که فرایندی تکرار شونده است، استفاده می‌شود. در این فرایند برای کمینه کردن میزان اختلاف هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی، یک تابع هدف در عنصری که در آن هیدروگراف مشاهداتی وجود دارد، بکار می‌رود و این تابع به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که اگر مقدار هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی در عنصر موردنظر کاملاً برابر شوند، مقدار آن برابر صفر شود. همچنین، برای این تابع هدف، قیود به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که مقادیر پارامترهای تخمین زده شده در

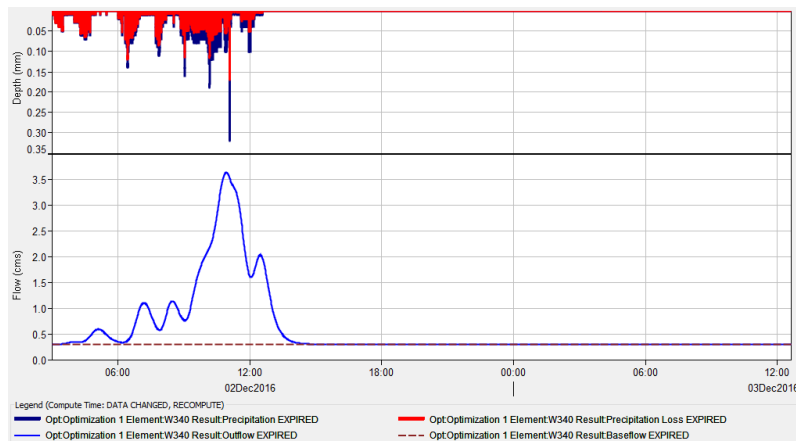
^۱ - Optimization

محدوده مجاز باشند. در این فرایند بهینه‌سازی از دو روش بهینه‌سازی یک و چندمتغیره با شروع از مقداری مشخص و تعیین شده توسط کاربر استفاده می‌شود و مبنای توقف آن، رسیدن مقدار تابع هدف به حد مشخص و یا انجام شدن تعداد تکرارهای مشخص است (Modaresi & Araghinejad, 2017). در تحقیق حاضر از ارائه نتایج مدل بدون فرایند بهینه‌سازی خودداری می‌شود. در شکل (۸) هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی سیلاب در خروجی حوضه اوجان‌چای نمایش داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده کارایی نسبتاً خوب مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش- رواناب حوضه آبریز اوجان‌چای- مخصوصاً در برآورد دبی‌های پیک سیلاب- می‌باشد. به طوری که مقایسه دبی پیک هیدروگراف سیلاب مشاهداتی و محاسباتی نشان‌دهنده اختلاف کمتر از ۷ درصد می‌باشد.



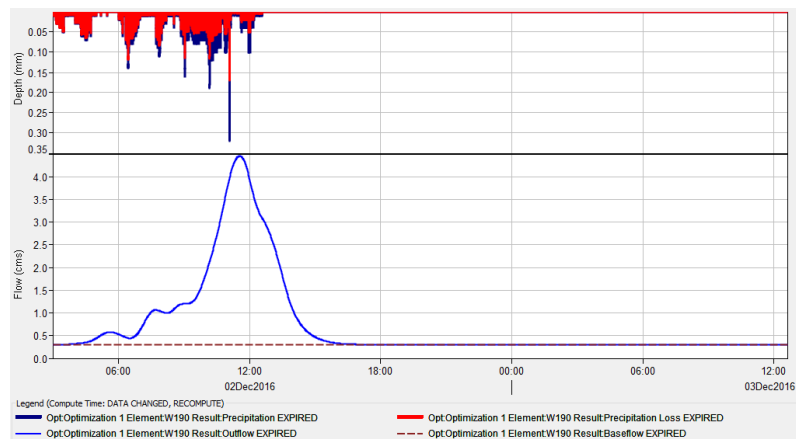
شکل ۸- هیدروگراف خروجی مشاهداتی و محاسباتی حوضه آبریز اوجان‌چای

Fig.8. Observational and computational output hydrograph of Ojan Chay watershed



شکل ۹- نمونه‌ای از شبیه‌سازی بارش - رواناب برای زیرحوضه شماره ۱

Fig.9. An example of rainfall-runoff simulation for sub-basin no1



شکل ۱۰- نمونه‌ای از شبیه‌سازی بارش - رواناب برای زیرحوضه شماره ۱۵

Fig.10. An example of rainfall-runoff simulation for sub-basin no15

در جدول (۲) دبی‌های پیک سیلاب‌های حوضه اوجان‌چای به ازای بارش‌های با دوره بازگشت مختلف ارائه گردیده است. همچنین در شکل (۱۱) دبی پیک سیلاب‌های زیرحوضه‌ها به ازای بارش با دوره بازگشت ۱۰ ساله ارائه شده است. نتایج حاصله را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- تغییرپذیری زیادی در دبی پیک سیلاب زیرحوضه‌ها وجود دارد. در این رابطه عوامل متعددی از قبیل ویژگی‌های مورفولوژیکی، پوشش زمین، شماره منحنی و ... در تغییرات شدید دبی اوج سیلاب‌های زیرحوضه-ها مؤثرند. بیشترین میزان دبی‌های پیک سیلاب‌ها مربوط به زیرحوضه‌های شماره ۱، ۱۲ و ۷ می‌باشد. در این رابطه، دبی پیک سیلاب برای بارش با دوره بازگشت ۱۰ ساله در زیرحوضه‌های مذکور به ترتیب بالغ بر ۱۰/۷، ۸/۹ و ۷/۱ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. در زیرحوضه‌های مذکور علاوه بر مساحت زیاد، عوامل متعدد دیگری

از قبیل شماره منحنی بالا (به دلیل وجود خاک‌های با نفوذپذیری اندک و پوشش زمین) باعث افزایش رواناب-های ناشی از بارش می‌شود.

- با اینکه مساحت در میزان دبی‌های پیک سیلاب‌های زیرحوضه‌ها مؤثر است؛ با این حال همبستگی قوی بین مساحت و مقدار دبی پیک مشاهده نمی‌شود. این امر بیانگر این است که نقش سایر فاکتورهای حوضه‌ای در میزان تولید و نحوه انتقال رواناب از اهمیت بالایی برخوردار است. در این زمینه، شیب، کاربری اراضی، پوشش گیاهی و شکل زیرحوضه‌ها به دلیل تأثیر زیاد بر پارامترهایی نظیر نفوذپذیری و تلفات بارش، زمان تأخیر و زمان تمرکز از اهمیت بالایی برخوردارند.

- در پهنه‌هایی از قسمت‌های میانی و بالادست حوضه به دلیل عوامل متعددی از قبیل وجود سازندهای زمین‌شناسی با نفوذپذیری اندک، پوشش ضعیف زمین، درجه ناهمواری بالا و شیب زیاد، پتانسیل تولید رواناب بالاست. در این رابطه می‌توان به زیرحوضه‌های ۱، ۳، ۷، ۱۱ و ۱۲ اشاره کرد که از بالاترین میزان دبی پیک برخوردارند. بدین ترتیب، در زیرحوضه‌های مذکور اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای در رابطه با مهار سیلاب در سرچشمه‌ها لازم به نظر می‌رسد.

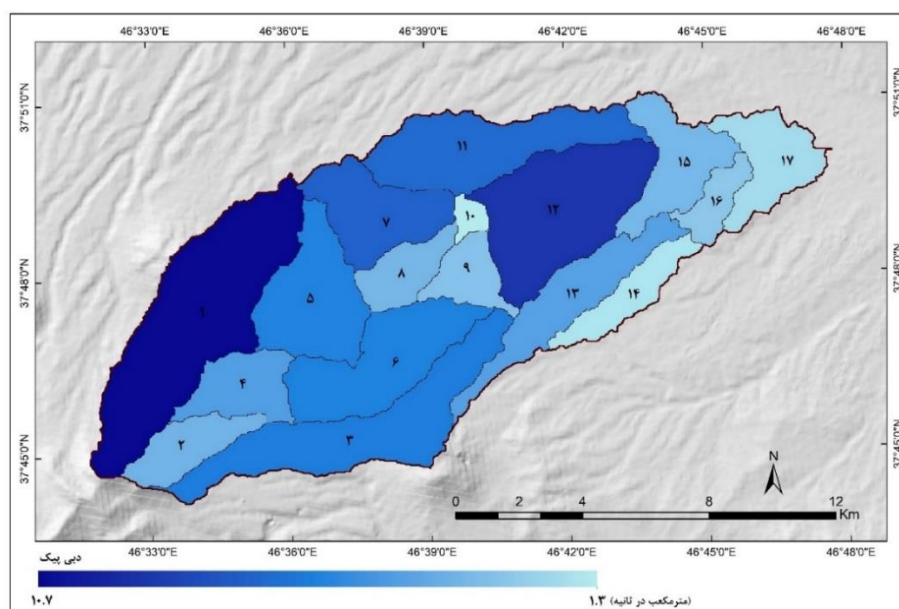
- بارش‌های با دوره بازگشت بیش از ۱۰ سال می‌توانند منجر به سیلاب‌هایی شوند که همراه با مخاطرات می‌باشند. در این رابطه دبی پیک حوضه آبریز اوجان‌چای برای بارش با دوره بازگشت ۱۰ سال حدود ۵۴/۷ مترمکعب در ثانیه، برای بارش با دوره بازگشت ۲۵ ساله حدود ۶۴/۲ مترمکعب در ثانیه، برای بارش با دوره بازگشت ۵۰ ساله حدود ۹۱/۴ مترمکعب در ثانیه، برای بارش با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله حدود ۱۲۸/۴ مترمکعب در ثانیه و برای بارش با دوره بازگشت ۲۰۰ ساله حدود ۱۵۲/۷ مترمکعب در ثانیه است. سیلاب‌های مذکور می‌توانند شهر بستان‌آباد را نیز تحت تأثیر قرار دهند.

جدول ۲- دبی پیک سیل‌های حوضه اوجان‌چای (مترمکعب در ثانیه) برای بارش‌های با دوره‌های بازگشت مختلف

Table 2-Peak discharge of floods in Ojan Chay basin (cubic meters per second) for rains with different return periods

زیرحوضه	سال ۲	سال ۳	سال ۵	سال ۱۰	سال ۲۵	سال ۵۰	سال ۱۰۰	سال ۲۰۰
شماره ۱	۰/۷۵	۱/۴۱	۳/۰۱	۸/۹۵	۱۰/۶۶	۱۵/۳۲	۲۱/۷۰	۲۵/۹۰
شماره ۲	۰/۲۸	۰/۴۷	۱/۰۷	۲/۶۰	۳/۶۹	۵/۳۳	۷/۵۸	۹/۰۶
شماره ۳	۰/۴۳	۰/۷۳	۱/۷۳	۵/۹۲	۶/۱۴	۸/۹۱	۱۲/۷۳	۱۵/۲۶
شماره ۴	۰/۵۵	۰/۸۱	۱/۵۹	۴/۲۷	۴/۷۱	۶/۵۶	۹/۰۶	۱۰/۶۸
شماره ۵	۰/۴۷	۰/۷۷	۱/۷۳	۵/۷۰	۵/۹۲	۸/۵۲	۱۲/۰۸	۱۴/۴۳
شماره ۶	۰/۴۵	۰/۷۵	۱/۷۲	۵/۷۴	۵/۹۷	۸/۶۲	۱۲/۲۶	۱۴/۶۶
شماره ۷	۰/۶۳	۱/۱۲	۲/۱۳	۵/۹۴	۷/۱۲	۹/۹۹	۱۳/۸۷	۱۶/۴۰

۸/۴۶	۷/۱۱	۵/۰۵	۳/۵۵	۲/۴۷	۱/۰۹	۰/۵۰	۰/۳۲	شماره ۸
۷/۳۶	۶/۱۶	۴/۳۴	۳/۰۱	۱/۶۷	۰/۸۸	۰/۳۹	۰/۲۳	شماره ۹
۳/۱۰	۲/۶۱	۱/۸۶	۱/۳۱	۰/۷۵	۰/۴۱	۰/۱۹	۰/۱۲	شماره ۱۰
۱۵/۱۸	۱۲/۹۴	۹/۴۷	۶/۸۸	۷/۵۱	۲/۴۴	۱/۲۹	۰/۹۰	شماره ۱۱
۲۰/۲۶	۱۷/۱۸	۱۲/۴۴	۸/۹۲	۸/۷۶	۲/۹۹	۱/۴۴	۰/۹۲	شماره ۱۲
۱۰/۳۰	۸/۷۵	۶/۳۵	۴/۵۷	۴/۰۹	۱/۵۶	۰/۸۰	۰/۵۴	شماره ۱۳
۴/۴۰	۳/۶۳	۲/۴۹	۱/۶۷	۱/۹۰	۰/۴۲	۰/۱۶	۰/۰۸	شماره ۱۴
۸/۵۱	۷/۱۲	۵/۰۱	۳/۴۸	۲/۳۱	۱/۰۱	۰/۴۴	۰/۲۷	شماره ۱۵
۶/۲۸	۵/۳۳	۳/۸۷	۲/۷۸	۱/۵۰	۰/۹۵	۰/۴۸	۰/۳۳	شماره ۱۶
۵/۴۸	۴/۴۹	۳/۰۱	۱/۹۷	۰/۰۴	۰/۴۳	۰/۱۳	۰/۰۶	شماره ۱۷
۱۵۲/۶۶	۱۲۸/۳۸	۹۱/۳۷	۶۴/۲۴	۵۴/۶۹	۱۹/۶۲	۹/۲۸	۵/۷۳	خروجی



شکل ۱۱- دبی پیک زیرحوضه‌های اوچان‌چای برای بارش با دوره بازگشت ۱۰ ساله (حدود ۳۴ میلی‌متر)

Fig.11. Peak discharge of Ojan Chay sub-basins for rainfall with a return period of 10 years (about 34 mm)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به‌منظور تهیه نقشه سیلاب حوضه اوچان‌چای تعداد ۱۶ متغیر مکانی موردتوجه قرار گرفته و با کاربست منطق فازی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی ترکیب شدند. نتایج نشان داد که بالغ بر ۳/۲ درصد از مناطق مسکونی با مساحتی در حدود ۱۱/۱ هکتار در کلاس با خطرپذیری بسیار زیاد و حدود ۴۲/۹ درصد با مساحتی بالغ بر ۳۵/۹ هکتار در کلاس با خطرپذیری زیاد واقع شده‌اند. حوضه اوچان‌چای دارای

توپوگرافی و شیب تندی بوده که این امر باعث محدودیت شدید فضا جهت توسعه سکونتگاه‌ها شده است. بدین ترتیب، بخش عمده‌ای از توسعه فضایی - کالبدی سکونتگاه‌های موجود در منطقه در بستر دره‌های اصلی حوضه صورت گرفته است. در سال‌های اخیر ساخت ویلاها و خانه‌باغ‌ها به پدیده‌ای رایج در سطح منطقه تبدیل شده است. هر چند سیلاب‌های با دوره بازگشت پایین خطر جدی برای سکونتگاه‌ها و فعالیت‌های انسانی موجود در بستر دره‌ها ایجاد نمی‌کند؛ با این حال، نتایج شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS نشان داد که سیلاب‌های با دوره بازگشت بیشتر از ۱۰ سال و مخصوصاً بالاتر از ۲۵ سال از دبی قابل توجهی برخوردار می‌باشند که می‌توانند بخش‌های قابل توجهی از بستر دره‌های کم‌عرض منطقه را غرقاب سازند. بدین ترتیب توسعه ساخت‌وساز در بستر و حریم رودخانه‌های حوضه باعث افزایش جدی خطر سیلاب شده است. همچنین ارزیابی متغیرهای مؤثر بر سیلاب و نتایج شبیه‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نشان داد که حوضه آبریز اوجان‌چای دارای پتانسیل تولید رواناب بالایی می‌باشد. نتایج تحقیق بیانگر کارایی بالای مدل HEC-HMS به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب در سطح حوضه اوجان - چای می‌باشد. مخصوصاً دقت این مدل در برآورد دبی‌های پیک حوضه مناسب می‌باشد. به طوری که اختلاف بین دبی پیک هیدروگراف سیلاب مشاهداتی و محاسباتی کمتر از ۷ درصد می‌باشد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان داد که هیدروگراف سیلاب زیرحوضه‌ها و خروجی حوضه اوجان‌چای تا حد زیادی تحت تأثیر ویژگی - های ژئومورفومتری و پوشش زمین می‌باشد. پیک‌های بالا در زیرحوضه‌های با کمترین میزان پوشش حفاظتی، شیب زیاد، نفوذپذیری کم، فراوانی برون‌زدهای سنگی و سطوح غیرقابل نفوذ مشاهده می‌شود. این زیرحوضه‌ها مخصوصاً در قسمت‌های بالادست حوضه واقع شده‌اند. (Yousefi, Golshan, & Pirnia, 2018) کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS را جهت شبیه‌سازی سیل در دو حوضه کسلیان (با اقلیم مرطوب) و حوضه کارده (با اقلیم خشک) مورد بررسی قرار دادند. نتایج کارایی مدل نشان داد که HEC-HMS در هر دو حوضه آبخیز از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. ولی کارایی مدل مذکور جهت مدیریت وقایع در حوضه آبخیز کسلیان نسبت به حوضه کارده سیل نسبتاً بالاتر است. (Rahimzadeh, & Habibi, 2018) با استفاده از مدل HEC-HMS حجم و دبی اوج سیلاب حوضه روانسر کرمانشاه را شبیه‌سازی کردند. ایشان نتیجه‌گیری کردند که در صورتی که پارامترهای متغیر مدل مانند شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تأخیر به درستی محاسبه شده باشند، مدل از توان بالایی جهت برآورد دبی اوج و حجم سیلاب برخوردار می‌باشد. همچنین نتایج مطالعه (Mazidi, & Kooshki, 2015) در مورد شبیه‌سازی بارش - رواناب و تخمین سیل در حوضه آبریز خرم‌آباد با استفاده از مدل HEC-HMS نشان داد که بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سازگاری وجود دارد. همچنین اعتبارسنجی مدل با شاخص‌هایی مانند ناش - ساتکلیف و ضریب واریانس نیز کارایی بالای مدل را در برآورد دبی پیک در حوضه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

References

- Ajin, R.S., Krishnamurthy, R.R., Jayaprakash, M., & Vinod, P.G. (2013). Flood Hazard Assessment of Vamanapuram River Basin, Kerala, India: An Approach Using Remote Sensing & GIS Techniques. *Advances in Applied Science Research*, 4(3), 263–274. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2331182>
- Ali Mohammad, J.K., Aslam, I., & Khan, Z. (2011). Simulation of the Impacts of Landuse Change on Surface Runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 102(4), 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.05.006>
- Allafta, H., & Opp, C. (2021). GIS-Based Multi-Criteria Analysis for Flood Prone Areas Mapping in the Trans-Boundary Shatt Al-Arab Basin, Iraq-Iran, Geomatics. *Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2087–2116. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1955755>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, UN International Strategy for Disaster Reduction (CRED, UNISDR) (2015). The Human Cost of Natural Disasters 2015: A Global Perspective, Report available at <https://reliefweb.int/report/world/human-cost-natural-disasters-2015-global-perspective>
- Chen, Y., Liu, R.D., Barrett, D., Gao, L., Zhou, M., Renzullo, L., & Emelyanova, I. (2015). A Spatial Assessment Framework for Evaluating Flood Risk under Extreme Climates. *Science of the Total Environment*, 538, 512–523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.094>
- Dung, N.B., Long, N.Q., Tran, A.D., & Tuyet, M.D. (2021). Multi-Geospatial Flood Hazard Modelling for a Large and Complex River Basin with Data Sparsity: A Case Study of the Lam River Basin, Vietnam. *Earth Systems and Environment*, 6 (20), 715–731. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00215-8>
- Dung NB, Tuyet MD, Ahmad A, Long NQ. (2020). The Role Of Relative Slope Length In Flood Hazard Mapping Using Ahp And Gis (Case Study: Lam River Basin, Vietnam). *Geography, Environment, Sustainability*, 13(2): 118-126. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-48>
- Ganji, K., Gharechelou, S., & Ahmadi, A. (2022). Determining Effective Factors on Gorganrood River Flooding and Micro-Zoning of Flood Risk Analysis in Aq'Qala County Using AHP Method. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(4), 25-46. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.68419.1011>
- Ghanavati, E., Karam, A., & Aghaalikhani, M. (2013). Flood Risk Zonation in the Farahzad Basin (Tehran) Using Fuzzy Model. *Geography and Environmental Planning*, 23(4), 121-138. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085362.1391.23.4.8.2>
- Hydrologic Engineering Center. (2013). HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension. US Army Corps of Engineers.
- Hydrologic Engineering Center. (2016). Hydrologic Modeling System HEC-HMS. US Army Corps of Engineers.
- Iwahashi, J., Pike, R.J. (2007). Automated Classifications of Topography from DEMs by an Unsupervised Nested-Means Algorithm and a Three-Part Geometric Signature. *Geomorphology*, 86(3-4), 409–440. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>
- Jahanbakhsh Asl, S., Asad, M., & Akbari, E. (2016). The Potential Evaluation of Wind Power Plants by Using the Fuzzy- AHP Methods in GIS (Case Study: North East of IRAN).

- Journal of Geography and Planning*, 20(56), 55-72. [In Persian]
https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_4981.html
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. (2011). Flood Management and a GIS Modelling Method to Assess Flood-Hazard Areas—A Case Study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212-225.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>
- Kumar, S., Gupta, S. (2016). Geospatial Approach in Mapping Soil Erodibility Using CartoDEM – A Case Study in Hilly Watershed of Lower Himalayan Range. *Journal of Earth System Science*, 125, 1463–1472. <https://doi.org/10.1007/s12040-016-0738-2>
- Lee, S. (2007). Application and Verification of Fuzzy Algebraic Operators to Landslide Susceptibility Mapping. *Environmental Geology* 52, 615–623.
<https://doi.org/10.1007/s00254-006-0491-y>
- Liu, J.G., & Mason, P.J. (2009). *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. New Jersey, John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118687963>
- Luca, F., Conforti, M., & Robustelli, G. (2011). Comparison of GIS-based Gullying Susceptibility Mapping Using Bivariate and Multivariate Statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphology*, 134(3-4), 297-308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.006>
- Mazidi, A., & Kooshki, S. (2015). Simulation of Rainfall-Runoff Process and Estimate of Flood with HEC-HMS Model in Khorramabad Catchment Area. *Geography and Development*, 13(41), 1-10. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2015.2236>
- Mesri Alamdari, P. (2021). Spatial Analysis of Flood Hazard in Ajabshir Ghaleh Chay Catchment using GIS and HEC-HMS Model. *Quantitative Geomorphological Research*, 10(1), 93-111. [In Persian] https://www.geomorphologyjournal.ir/article_134562.html
- Modaresi, F. & Araghinejad, Sh. (2017) Practical training of the hydrological modelling of the watershed in HEC-HMS and HEC-GeoHMS, Noavar publication.
- Moradnezehadi, M., Jourgholami, M., & Malekian, A. (2015). Evaluating the HEC-HMS Hydrologic Model in Order to Simulating Flood Hydrograph in Forest Basin (Case Study: Kheyroud Forest). *Forest and Wood Products*, 68(3), 625-639. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jfwpp.2015.55594>
- Nandalal, H.K., Ratnayake, U.R. (2011). Flood Risk Analysis Using Fuzzy Models. *Journal of Flood Risk Management*, 4, 128–139. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01097.x>
- Qin C.Z., Zhu, A.X., Pei, T., & Li B.L., Scholten, T., Behrens, T., & Zhou, C.H. (2011). An Approach to Computing Topographic Wetness Index Based on Maximum Downslope Gradient. *Precision Agric* 12, 32–43. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9152-y>
- Rahimzadeh, Z., & Habibi, M. (2018). Simulation of Hydrograph of Flood with Hydrological Model HEC-HMS and Prediction of Return Period in Kermanshah Ravansar Basin. *Geography and Development*, 16(53), 175-194. [In persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2018.4186>
- Rashetnia, S. (2016). Flood Vulnerability Assessment by Applying a Fuzzy Logic Method: A Case Study from Melbourne. Thesis Submitted in Fulfilment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering, College of Engineering and Science Victoria University, Melbourne, Australia. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:132844539>
- Sarvar, H., & Kherizadeh Arouq, M. (2015) Feasibility of optimal physical development of Maragheh city using geographic information system (GIS). Research project, Maragheh University.

- Sistani Badooei, M., Negaresh, H., & Fotoohi, S. (2017). Zoning Flood Hazard in the Gabrik Drainage Basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(2), 163-182. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i2.59833>
- Sui, Y., Lang, X., & Jiang, D. (2018). Projected Signals in Climate Extremes Over China Associated with a 2°C Global Warming Under Two RCP Scenarios. *International Journal of Climatology*, 38 (S1): 678–697. <https://doi.org/10.1002/joc.5399>
- Tella, A., & Balogun, A.L. (2020). Ensemble Fuzzy MCDM for Spatial Assessment of Flood Susceptibility in Ibadan, Nigeria. *Nat Hazards*, 104, 2277–2306. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04272-6>
- Toya, H., Skidmore, M. (2007). Economic Development and the Impacts of Natural Disasters. *Econ. Lett*, 94 (1), 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2006.06.020>
- Yariyan, P., Avand, M., Ali Abbaspour, R., Torabi Haghighi, A., Costache, R., Ghorbanzadeh, O., Janizadeh, S., & Blaschke, T. (2020). Flood Susceptibility Mapping Using an Improved Analytic Network Process with Statistical Models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2282-2314. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836036>
- Yousefi, H., Golshan, M., & Pirnia, A. (2018). Performance of HEC-HMS Hydrological Model in Simulation of Flood Hydrograph in Arid and Humid Watersheds. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(1), 319-330. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2018.240802.715>
- Zare, M., Azari, M., & Rezaei Arefi, M. (2024). Comparison of different multi-criteria decision-making methods for prioritization of flood source areas in Kashafrood basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), -. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2024.88777.1498>