

Prioritization and Spatial Analysis of Flood Potential based on FUZZY-AHP Approach (Case Study: Ghamsar Watershed)

Daniyal sayyad ^a, Hoda Ghasemieh ^{b*}, Zahra Naserianasl ^c

^a PhD Candidate in Watershed Management Sciences and Engineering, University of kashan, Kashan, Iran

^b Associate Professor in Watershed Management Sciences and Engineering, University of kashan, Kashan, Iran

^c PhD Candidate in Watershed Management Sciences and Engineering, University of kashan, Kashan, Iran

Received: 7 March 2022

Revised: 22 April 2022

Accepted: 7 June 2022

Abstract

Flood is one of the natural disasters that can threaten economic, social and environmental sustainability activities. Therefore, identifying flood-prone areas in the basins is essential. The aim of this research was to prioritize and analyze flooding potential in Ghamsar watershed using multi-criteria decision making models and fuzzy logic. For this purpose, first, 14 effective criteria on basin flooding (including precipitation, elevation, land use, soil texture, lithology, distance to river, slope, drainage density, stream order, Topographic Wetness Index, Stream Power Index, flow accumulation, plan curvature, profile curvature) were identified. Then, pairwise comparisons were made between the criteria using the AHP method in Expert choice 11 software and the final weight of each criterion was obtained. Moreover, the criteria were fuzzified using linear and large fuzzy functions, and finally, the final weights obtained for each criterion were applied in the respective layers and the final flood risk map of the basin was prepared. The results of prioritizing quantitative and qualitative criteria based on the opinion of watershed management experts using the AHP method showed that among the 14 proposed criteria, the precipitation criterion with a final weight of 0.229 has the most impact on the flood risk of the basin. Moreover, the criteria of heavy to very heavy soil texture (0.499), Plvav stone unit (0.252), water areas and bare lands with final weights of 0.345 and 0.225, respectively, have a stronger role in the flood risk of the basin. The results of the final flood risk map of the basin showed that about 30.841, 27.056 and 12.406 percent of the total area of the basin are in the medium, high and very high flood risk categories, respectively, and these areas are located mostly in the central part and along the southeast of the basin. Therefore, knowing flood potential of the basin can be effective in formulating crisis management plans when faced with floods.

Keywords: Fuzzy Function, Flood-Prone Areas, Semi-Arid Areas, Expert Choice Software

*. Corresponding author: Hoda Ghasemieh

Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

Tel: +983155913227

How to cite this Article: Sayyad, D., Ghasemieh, H., & Naserianasl, Z. (2024). Prioritization and spatial analysis of flood potential based on FUZZY-AHP approach (Case study: Ghamsar watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 139-159.

DOI: 10.22067/geoh.2022.76678.1226



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 4 - Number 48, Winter 2024


<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76678.1226> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شماره چهل و هشتم، زمستان ۱۴۰۲، صص ۱۵۹-۱۳۹
مقاله پژوهشی

اولویت‌بندی و تحلیل فضایی پتانسیل سیل‌خیزی مبتنی بر رویکرد FUZZY-AHP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز قمصر)

دانیال صیاد- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری- آب، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

 هدی قاسمیه^۱- دانشیار علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

زهرا نصریان اصل- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز- حفاظت آب‌وخاک، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۲/۲ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۳/۱۷

چکیده

سیل یکی از بلاهای طبیعی است که می‌تواند فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی و پایداری محیط را تهدید کند؛ بنابراین شناسایی مناطق مستعد سیل‌خیز حوزه آبخیز امری ضروری در این زمینه است. هدف پژوهش حاضر، اولویت‌بندی و تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوزه آبخیز قمصر با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و منطق فازی است که با رویکرد توصیفی - تحلیلی و با روش FUZZY-AHP انجام شده است. برای این منظور ابتدا ۱۴ معیار مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه (شامل باران، ارتفاع، کاربری اراضی، بافت خاک، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، شیب، تراکم زهکشی، رتبه آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، تجمع جریان، انحنا سطح، انحنا طولی) شناسایی شد و سپس در نرم‌افزار Expert choice 11 بین معیارها با روش AHP مقایسه‌های زوجی انجام گردید و وزن نهایی هر معیار به دست آمد. در ادامه، معیارها با استفاده از توابع فازی linear و large فازی‌سازی شدند و در نهایت وزن‌های نهایی به دست آمده برای هر معیار در لایه‌های مربوطه اعمال شد و نقشه نهایی سیل‌خیزی حوضه تهیه گردید. نتایج حاصل از اولویت‌بندی معیارهای کمی و کیفی بر اساس نظر کارشناسان آبخیزداری با

Email: h.ghasemieh@kashanu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۳۱۵۵۹۱۳۲۲۷

نحوه ارجاع به این مقاله:

صیاد، دانیال؛ قاسمیه، هدی؛ نصریان اصل، زهرا؛ ۱۴۰۲. اولویت‌بندی و تحلیل فضایی پتانسیل سیل‌خیزی مبتنی بر رویکرد

FUZZY-AHP (مطالعه موردی: حوزه آبخیز قمصر). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۴). صص ۱۵۹-۱۳۹

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76678.1226>

روش AHP نشان داد از بین ۱۴ معیار پیشنهادی، معیار باران با وزن نهایی ۰/۲۲۹ بیشترین تأثیر را در سیل خیزی حوضه دارد. همچنین معیارهای بافت خاک سنگین تا خیلی سنگین (۰/۴۹۹)، واحد سنگی Plvav (۰/۲۵۲)، کاربری‌های پهنه‌های آبی و اراضی لخت به ترتیب با وزن نهایی ۰/۳۴۵ و ۰/۲۲۵ نقش پررنگ‌تری در سیل خیزی حوضه دارند. نتایج حاصل از نقشه نهایی سیل خیزی حوضه نشان داد که حدود ۳۰/۸۴۱، ۲۷/۰۵۶ و ۱۲/۴۰۶ درصد از مساحت کل حوضه به ترتیب در طبقه سیل خیزی متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارند که این مناطق بیشتر در بخش مرکزی و در امتداد جنوب شرقی حوضه واقع شده‌اند؛ بنابراین آگاهی از پتانسیل سیل خیزی حوضه می‌تواند در جهت تدوین برنامه‌های مدیریت بحران در هنگام مواجه شدن با سیلاب مؤثر واقع شود.

کلیدواژه‌ها: توابع فازی، مناطق مستعد سیل خیز، مناطق نیمه خشک، نرم افزار Expert choice

۱- مقدمه

سیل را می‌توان جریان‌هایی که فراتر از ظرفیت حمل و نقل کانال و دریاچه است، تعریف نمود که می‌تواند به دلایل طبیعی و مصنوعی مانند بارندگی شدید، شکست ناگهانی سد در حوضه‌ها و غیره باشد (تنزین و باسکار^۱، ۲۰۲۰). سیل با آسیب‌های وارده به ساختمان‌ها، اقتصاد و فعالیت‌های اجتماعی، پایداری محیط را تهدید می‌کند که منجر به از دست رفتن زندگی می‌شود (اکمکچی اوغلو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). از این جهت سیل به فاجعه‌ای تبدیل شده است که اثرات زیان‌بار آن از سایر بلایای طبیعی از جمله زمین‌لرزه بیش‌تر است (کای^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). طبق بررسی اولیه پایگاه داده فاجعه بین‌المللی از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۶ حدود هفت میلیون نفر در اثر سیل کشته شده‌اند و همچنین بیش از ۷۰۰ میلیارد دلار خسارت در سراسر جهان برجا گذاشته است (وانگ^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به مطالب بیان شده، بیش‌تر آسیب‌های ناشی از بلایای سیل در مقیاس محلی رخ می‌دهد که بر زندگی مردم، زیرساخت‌ها، کشاورزی و ساختار اقتصادی اثر می‌گذارد که در نهایت، توسعه اقتصادی محلی را محدود می‌کند و از این جهت، ارزیابی خطر سیل برای کاهش خسارات ناشی از سیل امری ضروری است (گوا^۵ و همکاران، ۲۰۱۴). امروزه چندین روش برای تخمین حساسیت سیل در منطقه وجود دارد که هر رویکرد، جنبه‌های منفی و مثبت خود را دارد. در این راستا می‌توان به رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره بر پایه تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۶، منطق

1 Tenzin & Bhaskar

2 Ekmekcioglu

3 Cai

4 Wang

5 Guo

6 Analytical Hierarchy Processes

فازی (FL)^۱، رگرسیون لجستیک (LR)^۲، درخت تصمیم (DT)^۳، یادگیری ماشین (ML)^۴، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۵، اشاره کرد که به‌طور گسترده مورد پذیرش محققین قرار گرفته است (مالیک^۶ و همکاران، ۲۰۲۰). تصمیم‌گیری چند معیاره^۷ بر پایه مجموعه‌ای از روش‌ها و فرآیندهایی است که برای ارزیابی و انتخاب بهترین گزینه‌های تصمیم بر اساس معیارهای متعدد استوار است (فرناندز^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). فرآیند سلسله مراتبی یک تحلیل ساختاری است که تعصب در تصمیم‌گیری را کاهش می‌دهد و می‌تواند ابزار مناسبی در برابر تصمیمات پیچیده باشد (کولیموشی^۹ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین منطق فازی یکی از رویکردهای مرسوم برای تعیین حساسیت سیل در منطقه است که برای مقابله با مشکلات پیچیده کارآمد است (مالیک و همکاران، ۲۰۲۰). امروزه مفهوم منطق فازی در علوم محیطی به یک روش آماری پیشرفته و مهم تبدیل شده است (سینشاو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۱). رویکرد FUZZY-AHP یک روش بهبودیافته برای تنظیم وزن‌های حاصل از AHP بر اساس مجموعه فازی و منطق فازی است که خطر ابتلا به سیل را نسبت به روش AHP معقول نشان می‌دهد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). از این جهت در پژوهش حاضر از رویکرد FUZZY-AHP برای اولویت‌بندی تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوزه آبخیز واقع در منطقه نیمه‌خشک (حوضه قمصر کاشان) استفاده شد. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه شناسایی مناطق مستعد سیل‌خیزی با تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی انجام شده است که از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تحقیق‌های زیر اشاره کرد: مصابی و مکونی^{۱۱} (۲۰۲۱)، طی تحقیقی در تانزانیا برای تهیه نقشه حساسیت سیل از تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره و سامانه اطلاعات جغرافیایی استفاده کردند. نتیجه مطالعات آن‌ها نشان داد که به ترتیب حدود ۴۰/۲۷ و ۵۹/۷۳ درصد در محدود احتمال خطر سیل زیاد تا خیلی زیاد و خیلی کم تا متوسط قرار دارند. جیا^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی باهدف منطقه‌بندی خطر سیل با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و تئوری فازی بیان داشتند، احتمال خطر از شمال غربی به جنوب شرقی به تدریج افزایش یافته است. همچنین این محققین بیان داشتند حساس‌ترین مناطق، مناطقی با توپوگرافی نسبتاً کم بودند. یودینگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۹)، به بررسی خطر سیل با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و تحلیل فازی در تایلند پرداختند. نتیجه پژوهش آن‌ها نشان داد بیش‌تر

- 1 Fuzzy Logic
- 2 Logistic Regression
- 3 Decision Trees
- 4 Machine Learning
- 5 Artificial Neural Network
- 6 Malik
- 7 Multiple Criteria Decision Making
- 8 Fernandez
- 9 Kulimushi
- 10 Sinshaw
- 11 Msabi & Makony
- 12 Jia
- 13 Yodying

مناطق نزدیک به شبکه زهکشی در ناحیه خطر خیلی زیاد قرار دارند. **زیاری و همکاران (۱۴۰۰)**، به منظور پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی با روش تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی در شهر ایلام به این نتیجه دست یافتند که نواحی شمال و شمال غربی بیش‌ترین ظرفیت در برابر خطر سیل را دارند. **محمدپور و وفایی‌نژاد (۱۳۹۹)**، طی پژوهشی به منظور اولویت‌بندی و شناسایی عوامل مؤثر بر رخداد سیل در حوضه تجن با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین تمرکز مناطق حساس سیل در محدوده رودخانه اصلی و محدوده دلتای رودخانه در مصب است. **نجفی و کریمی کردآبادی (۱۳۹۹)**، در پژوهش خود با استفاده از مدل ترکیبی AHP-FUZZY به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب در منطقه یک کلان‌شهر تهران پرداختند و به این نتیجه دست یافتند پهنه‌های با خطر خیلی کم، خطر کم و متوسط در شمال و مرکز محدوده مورد مطالعه قرار دارند. همچنین این محققین بیان داشتند پهنه‌های با خطر خیلی زیاد و زیاد در محدوده شهری منطقه و منطبق بر نقاط خروجی حوضه‌ها است. **صالحی و همکاران (۱۳۹۲)**، با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی به پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در تهران پرداختند و به این نتیجه دست یافتند نواحی مرکزی تا جنوب شهر و همچنین آبراهه‌ها و حرایم آن‌ها بیش‌ترین پتانسیل ازلحاظ سیل‌خیزی را دارند. علی‌رغم مطالعات فراوان در زمینه پهنه‌بندی خطر سیلاب در مناطق مختلف، در کم‌تر پژوهشی به بحث سیل‌خیزی در مناطق نیمه‌خشک پرداخته شده است؛ بنابراین پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی و ناحیه‌بندی مناطق مستعد سیل‌خیز با انتخاب معیارهای گسترده و مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه از جمله باران، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی (تصاویر سستینال ۲۰۲۰^{۱۲})، شیب، ارتفاع، بافت خاک، تراکم زهکشی، فاصله تا آبراهه، رتبه آبراهه‌ها، تجمع جریان، شاخص رطوبت توپوگرافی^۲، شاخص توان آبراهه^۳، انحنا^۴ سطح و انحنا^۵ طولی در تعیین پتانسیل سیل‌خیزی حوزه آبخیز واقع در مناطق نیمه‌خشک با استفاده از رویکرد تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDA) و منطق فازی (FUZZY LOGIC) انجام شده است.

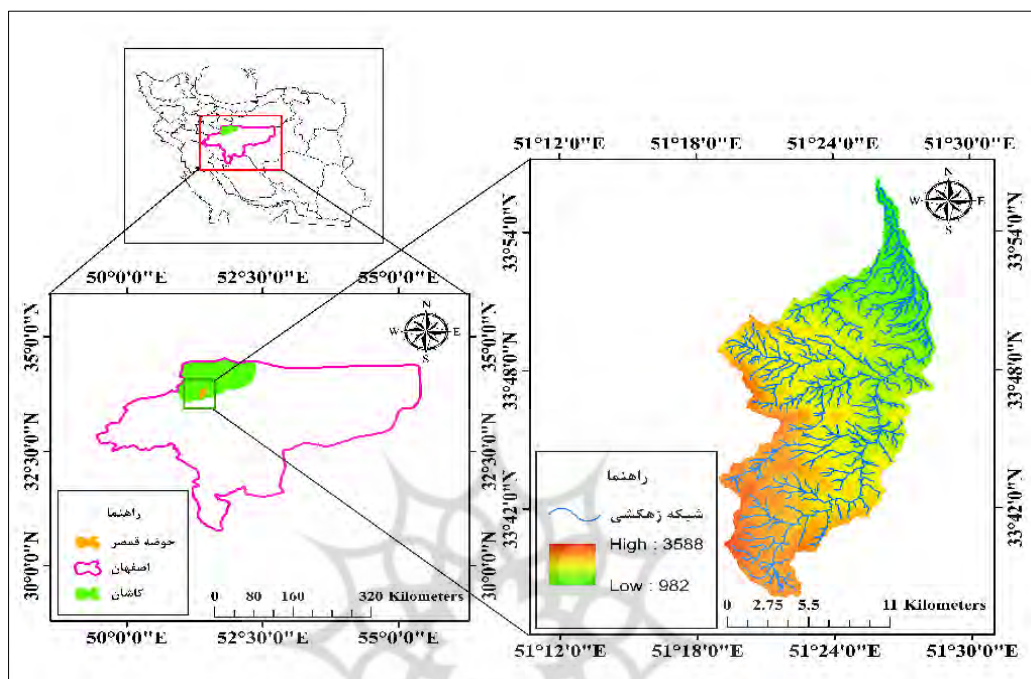
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز قمصر با مساحت حدود ۲۴۶ کیلومتر مربع در محدوده بین طول جغرافیایی $51^{\circ} 18' 56''$ تا $28^{\circ} 27'$ شرقی و عرض جغرافیایی $33^{\circ} 38' 8''$ تا $33^{\circ} 56' 18''$ شمالی قرار دارد (شکل ۱). بر اساس آمار ۳ ایستگاه

- 1 Sentinel-2
- 2 Topographic Wetness Index
- 3 Stream Power Index
- 4 Plan Curvature
- 5 Profile Curvature

باران‌سنجی بن رود، برزک و فین میانگین متوسط بارندگی سالانه (۳۶ سال) این حوضه برابر با ۱۹۴ میلی‌متر است. با توجه به سابقه سیل در منطقه طی سال‌های اخیر این حوضه، از پتانسیل سیل بالایی برخوردار است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نوع توصیفی-تحلیلی و با روش FUZZY-AHP و در نرم‌افزارهای Expert choice 11 و Arc Gis10.5 انجام شده است. برای این منظور، ابتدا داده‌های مورد نیاز از جمله نقشه طبقات ارتفاعی منطقه (DEM) با اندازه سلولی $12/5 \times 12/5$ تهیه شد. نقشه کاربری اراضی با اندازه سلولی 10×10 متر برای سال ۲۰۲۰ از تصاویر استینال ۲ تهیه شد. در جدول (۱)، منابع تأمین داده‌های اولیه آورده شده است. همچنین نقشه بافت خاک منطقه از شهرداری کاشان تهیه شد. در ادامه با بررسی در پژوهش‌های مرتبط معیارهای مؤثر بر سیل‌خیزی منطقه شناسایی شدند. سپس معیارهای انتخابی در نرم‌افزار Expert choice 11 بر اساس تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و مقایسه‌های زوجی وارد شدند و با قضاوت کارشناسان (اساتید گروه آبخیزداری و دانشجویان دکتری آبخیزداری)، وزن نهایی هر لایه و زیرمعیارهای لایه‌های کیفی (نقشه بافت خاک، کاربری اراضی و واحد سنگ‌شناسی) با در نظر گرفتن نرخ سازگاری در قضاوت‌ها، تعیین شد. در پژوهش حاضر برای مقایسه‌های زوجی از مقیاس عددی ۱ تا ۹ استفاده شد

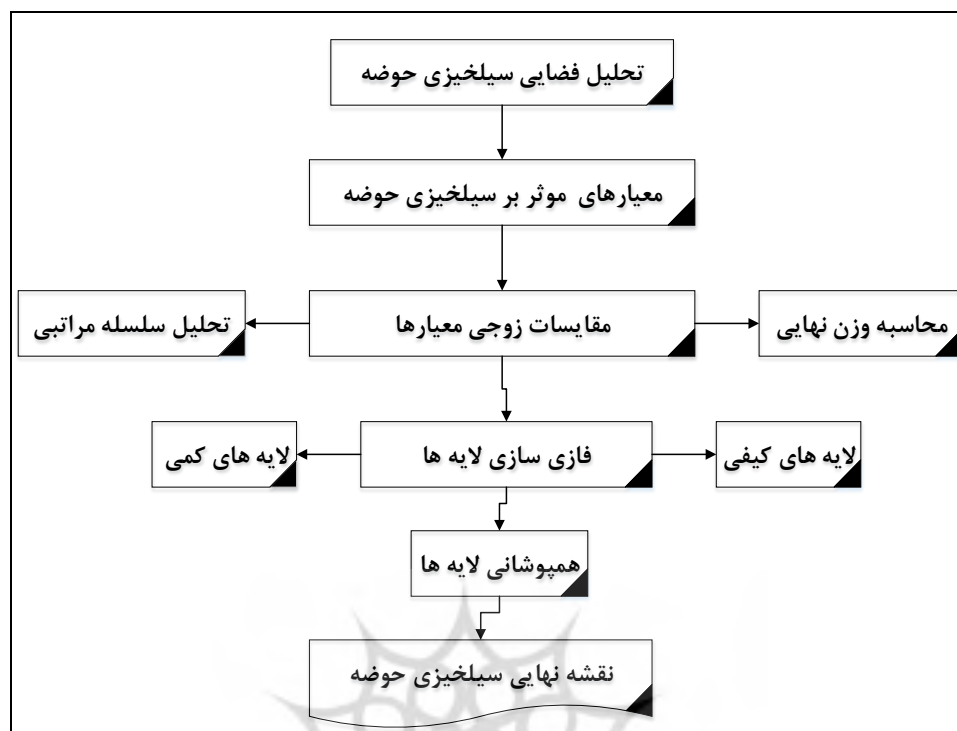
که مقایسه ۱ بیانگر ترجیح برابر و مقایسه ۹ بیانگر ترجیح مطلق در مقایسه‌های زوجی است (تلا و بالوگون، ۲۰۲۰). همچنین برای ارزیابی قضاوت‌های انجام‌شده (مقایسه‌های زوجی) از شاخص ناسازگاری استفاده شد. سپس معیارهای مؤثر بر تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوضه قمصر اولویت‌بندی شدند. در نهایت لایه‌های انتخابی (معیارها) با استفاده از ابزار Fuzzy Membership در نرم‌افزار Arc Gis 10.5 استانداردسازی (فازی) شده و در درجه عضویت صفر تا یک قرار گرفتند. از آنجایی که مقادیر اندازه‌گیری شده از معیارها ممکن است در واحد و دامنه‌های متفاوتی به ثبت رسیده باشند، باید تمام لایه‌ها در دامنه همسانی ۰ تا ۱ جا به جا شوند تا استانداردسازی شوند. به بیان دیگر، تابع عضویت برابر ۱ بیانگر عضویت کامل در مجموعه و تابع عضویت صفر بیانگر عضویت نداشتن کامل در مجموعه فازی است (زیاری و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین فازی سازی نقشه‌های کیفی با استفاده از وزن نهایی طبقات آن‌ها در نرم‌افزار Expert choice 11 با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و قضاوت کارشناسی تعیین و با استفاده از تابع فازی large فازی سازی شدند. در ادامه برای تحلیل فضایی سیل‌خیزی با تلفیق وزن‌های به‌دست‌آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در نقشه‌های فازی شده هر لایه (معیار)، نقشه سیل‌گیری حوضه به دست آمد. در نهایت به منظور تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوضه نتایج در پنج گروه خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند (دانو^۲ و همکاران، ۲۰۱۹). در شکل ۲، مراحل انجام پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۱- منابع اولیه تهیه داده‌ها

ردیف	داده	دقت مکانی	منبع
۱	مدل رقومی ارتفاعی	۱۲/۵ × ۱۲/۵ متر	https://search.asf.alaska.edu
۲	نقشه کاربری اراضی	۱۰ × ۱۰ متر	Esri 2020 Land Cover
۳	نقشه خاک		شهرداری کاشان
۴	داده‌های باران‌سنجی		شرکت آب منطقه‌ای اصفهان

1 Tella & Balogun

2 Dano



شکل ۲- مراحل انجام پژوهش

۲-۲-۱- تاثیر هر معیار بر سیل‌خیزی حوزه آبخیز و فازی سازی لایه‌ها

در پژوهش حاضر، ابتدا با بررسی در پژوهش‌های مختلف (تلا و بالوگون، ۲۰۲۰؛ داس^۱، ۲۰۱۸؛ مالیک و همکاران، ۲۰۲۰؛ مصابی و مکونی، ۲۰۲۱؛ سوین^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) معیارهای مؤثر بر سیلاب شناسایی شد.

بارندگی

بارندگی مهم‌ترین عامل در ایجاد سیل است (بوامرانه^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). هرچه شدت و فراوانی بارندگی بیش‌تر باشد، احتمال وقوع سیلاب بیشتر می‌شود (تلا و بالوگون، ۲۰۲۰). در این تحقیق، برای فازی‌سازی نقشه پهنه باران از تابع خطی^۴ - افزایش استفاده شد. همچنین نقشه پهنه باران با استفاده از میانگین بارندگی سالانه (۳۶ ساله) سه ایستگاه بن رود، فین و برزک (جدول ۲) به روش IDW (معکوس فاصله)^۵ در Arc Gis10.5 تهیه شد.

1 Das

2 Swain

3 Bouamrane

4 linear

5 Inverse Distance Weighting

جدول ۲- موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
بن رود	۵۱° ۲۶' ۵۰"	۳۳° ۴۴' ۴۳"	۱۹۵۰
برزک	۵۱° ۱۳' ۲۴"	۳۳° ۴۷' ۲۸"	۲۰۸۰
فین	۵۱° ۲۲' ۱۶"	۳۳° ۵۶' ۳۹"	۱۰۵۰

زمین‌شناسی (سنگ‌شناسی)

زمین‌شناسی بر بزرگی رویدادهای سیل اثر می‌گذارد، بدین صورت که از این جهت سنگ‌های نفوذناپذیر باعث افزایش شدت سیل و رواناب سطحی می‌شود (پاتریکاکلی^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). با توجه تأثیر کیفی نقشه زمین‌شناسی بر سیل‌خیزی حوضه، در این پژوهش برای فازی‌سازی این نقشه از تابع large استفاده شد. در جدول ۳، مشخصات سنگ‌شناسی حوضه ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه

واحد سنگی	مشخصه	سن	مساحت (km ²)
Etliv	توف آتش‌فشانی آندزیتی	ائوسن	۸۹/۲
K1aml	سنگ‌آهک خاکستری با بستر ضخیم تا سنگ‌آهک اوربیتولینا	کرتاسه	۱/۳۱
Oiiv	دیوریت	الیگوسن	۴۲/۷۶
OMI	سنگ‌آهک مرجانی	الیگوسن - میوسن	۵۰/۰۳
OMsm	سنگ‌آهک، مارن، مارن گچی، ماسه شنی و ماسه‌سنگ (سازند قم)	الیگوسن میوسن	۱/۰۴
OMviv	آتش‌فشان آندزیتی	الیگوسن	۱۶/۱۲
PLvav	آتش‌فشان‌های ریولیتی تا ریوداسیتی	پلیوسن	۴/۴۲
Qt2	نهشته‌های تراسی	کواترنر	۳۸/۶۲
URig	مارن قرمز، مارن گچی، ماسه‌سنگ و کنگلومرا (سازند قرمز بالایی)	میوسن	۲/۵

کاربری اراضی

کاربری اراضی عامل مهمی در مطالعات خطر سیل است و می‌تواند بر اجزای فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه مانند رواناب، نفوذ و تبخیر و تعرق تأثیر بگذارد (سوئسی^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). از آنجایی که نقشه کاربری اراضی ماهیت کیفی دارند، برای فازی‌سازی نقشه کاربری اراضی در پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از قضاوت کارشناسی و مقایسه‌های زوجی بین هر نوع کاربری با فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن نهایی هر نوع کاربری تعیین شد و سپس این اوزان در نقشه کاربری اراضی اعمال شد و در نهایت به نقشه رستری تبدیل گردید. سپس کاربری‌ها با توجه به طبقه‌بندی سستینل ۲ در ۸ طبقه به صورت **جدول ۴** طبقه‌بندی شدند. برای فازی‌سازی نقشه کاربری اراضی نیز از تابع Large در Arc Gis10.5 استفاده شد.

جدول ۴- طبقه‌بندی کاربری اراضی بر اساس تصاویر سستینل ۲

مساحت (km ²)	کاربری اراضی
۰/۰۶۴	Water
۰/۹۶۱	Trees
۰/۰۰۲	Grass
۰/۰۰۰۴	Flooded vegetation
۱/۳۵	Crops
۲۱۱/۱۱۵	Scrub/shrub
۷/۷۴۹۶	Built Area
۲۴/۷۵۸	Bare ground

شیب

با کاهش شیب (سطوح مسطح) سرعت جریان آب کاهش یافته و باعث تجمع آب می‌شود. از این جهت مناطق مسطح نسبت به مناطق شیب‌دار از خطر ابتلا به سیل‌خیزی بالاتری برخوردار هستند (ریمبا^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). در پژوهش حاضر نقشه شیب از روی نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه^۳ در Arc Gis10.5 تهیه گردید. همچنین برای فازی‌سازی نقشه شیب از تابع خطی - کاهنده استفاده شد.

1 Souissi

2 Rimba

3 Digital Elevation Model

خاک

بافت خاک با توجه نقش آن در نفوذ آب به داخل خاک، بر وقوع سیل در منطقه مؤثر است، به طوری که خاک‌های درشت‌دانه (بافت سبک)، سیل‌گیری کم‌تری نسبت به خاک‌های ریزدانه (بافت سبک) دارند (ابراهیم بتیس و احمد، ۲۰۱۶). از آنجایی که لایه بافت خاک، یک لایه کیفی محسوب می‌شود، برای فازی‌سازی لایه خاک از تابع Large در Arc Gis10.5 استفاده شد.

ارتفاع

آب به دلیل نیروی گرانش به سرعت از مناطق بالادست و ارتفاعات بالاتر به سمت مناطق پایین‌دست حرکت می‌کند و با رسیدن آب به مناطق پایین‌دست (مناطق کم ارتفاع) گسترش می‌یابد و باعث سیل‌خیزی می‌شود (داس، ۲۰۲۰). در این پژوهش با توجه به تأثیر عامل ارتفاع در سیل‌خیزی حوضه، برای فازی‌سازی لایه ارتفاع از تابع خطی – کاهنده استفاده شد.

تراکم زهکشی

یکی از عوامل اصلی که باعث وقوع سیل می‌شود تراکم زهکشی است که با بالا رفتن تراکم زهکشی، میزان خطر ناشی از سیلاب افزایش می‌یابد (سوئسی و همکاران، ۲۰۲۰). نقشه تراکم زهکشی در این پژوهش در Arc Gis10.5 و با ابزار Line distance تولید شد. سپس برای فازی‌سازی نقشه مذکور از تابع خطی – افزایشی استفاده شد.

فاصله از آبراه

مناطق نزدیک به شبکه زهکشی رودخانه به شدت تحت تأثیر خطر سیل قرار دارند. در حالی که تأثیر این پارامتر بر سیل‌خیزی حوضه با فاصله گرفتن از شبکه زهکشی کاهش می‌یابد (فرناندز و لوتز، ۲۰۱۰). از این جهت مناطق نزدیک به رودخانه پتانسیل سیل‌خیزی بالایی دارند و برای فازی‌سازی نقشه فاصله از آبراه از تابع خطی – کاهنده استفاده شد. همچنین نقشه فاصله از آبراه با استفاده از ابزار Euclidean Distance در Arc Gis10.5 تولید شد.

رتبه‌بندی آبراه

با بزرگ‌تر شدن رتبه آبراه، شدت، سرعت و دبی جریان افزایش می‌یابد (کاستا، ۱۹۸۷)؛ بنابراین آبراه‌های با رتبه بالاتر از پتانسیل ایجاد سیل بالاتری برخوردارند. در این مطالعه نقشه رتبه آبراه با استفاده از ابزار Hydrology و با روش استرالر در نرم‌افزار Arc Gis10.5 تهیه گردید و برای فازی‌سازی این لایه نیز، برای فازی‌سازی لایه رتبه آبراه از تابع خطی – افزایشی استفاده شد.

تجمع جریان

تجمع جریان معیار مهمی در ارزیابی سیل‌خیزی حوضه است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، تجمع جریان از ارتفاع بالا به سمت ارتفاع پایین در حوضه زیاد می‌شود و با بیش‌تر شدن تجمع جریان بر سیل‌خیزی حوضه افزوده می‌شود (پاتریکاکي و همکاران، ۲۰۱۸). از این جهت برای فازی‌سازی نقشه تراکم جریان از تابع خطی - افزاینده استفاده شد. همچنین نقشه تجمع جریان با استفاده از نقشه مدل رقمی ارتفاعی و با اکستنشن Hydrology در نرم‌افزار Arc Gis10.5 تهیه شد.

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافی یک مفهوم فضایی است که انباشت جریان و توانایی حرکت آب به دلیل شیب و نیروی گرانش از هر حوضه را مدل می‌کند؛ بنابراین مقادیر بالا برای شاخص رطوبت توپوگرافی نشان از حضور مناطق مستعد با توپوگرافی مرطوب و پتانسیل تولید رواناب سطحی در حوضه است (هندینی^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). در این پژوهش برای فازی‌سازی نقشه رطوبت توپوگرافی، از تابع خطی - افزاینده استفاده شد. همچنین نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی با استفاده از نقشه مدل رقمی ارتفاعی و از رابطه (۱) در Arc Gis10.5 به دست آمد.

$$TWI = \ln(As / \tan \beta) \quad (1)$$

شاخص توان آبراهه (SPI)

شاخص توان آبراهه به توصیف پتانسیل فرسایشی و میزان رواناب سطحی می‌پردازد، به طوری که مقادیر بالا برای SPI بیانگر بالا بودن ظرفیت رواناب سطحی در حوضه است (مالیک و همکاران، ۲۰۲۰). از این جهت برای فازی‌سازی لایه توان جریان از تابع خطی - افزاینده استفاده شد. شاخص توان جریان با استفاده از نقشه مدل رقمی ارتفاعی حوضه از رابطه (۲) در Arc Gis10.5 تهیه شد.

$$SPI = (AS \times \tan \beta) \quad (2)$$

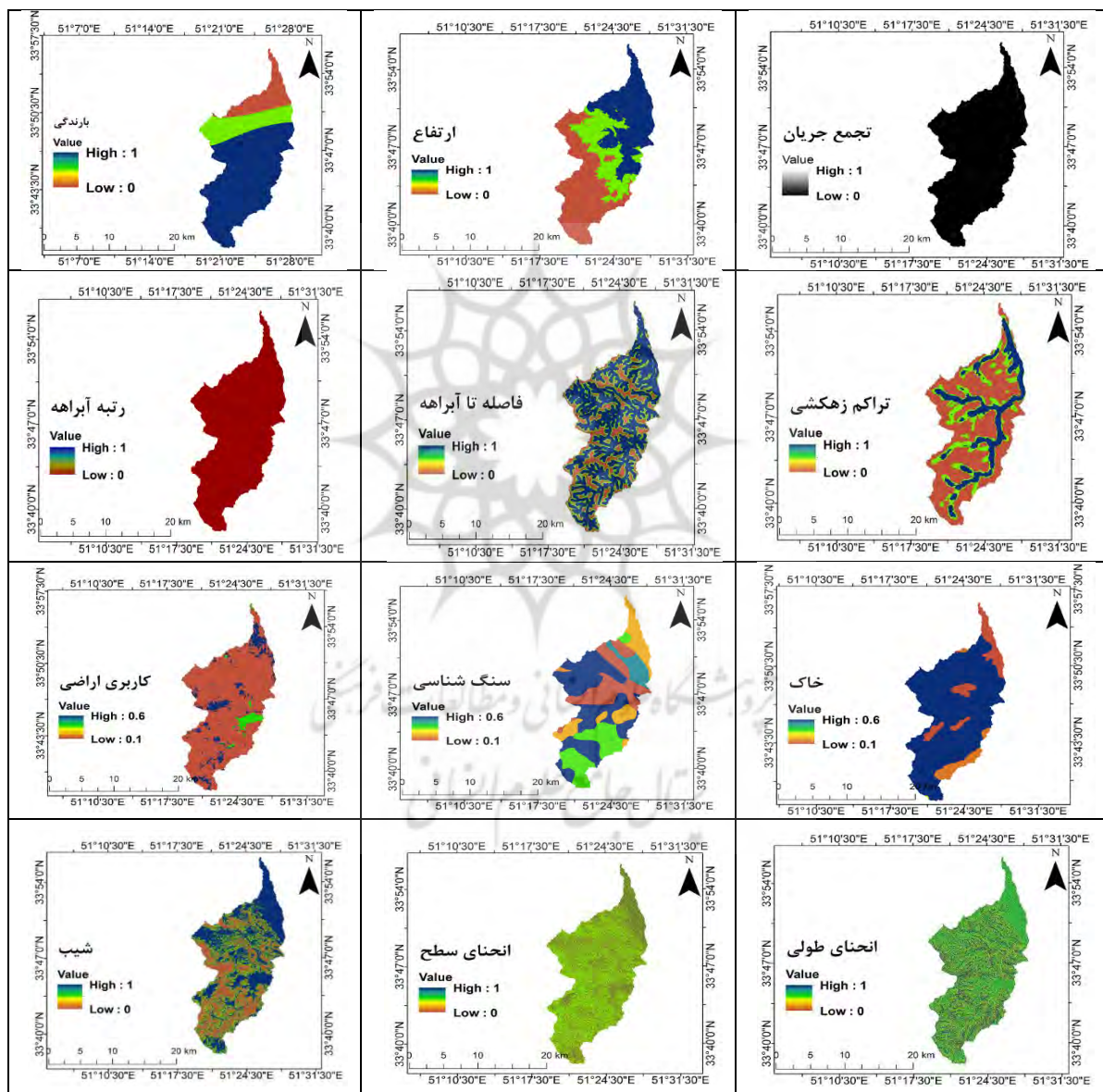
در رابطه‌های ۱ و ۲، AS مساحت حوضه (m²/m) و β شیب بر حسب درجه است (نمپاک^۲ و همکاران، ۲۰۱۴).

انحنای سطح و انحنای طولی

انحنای توپوگرافی تأثیر کمی بر وقوع سیلاب دارد، باین حال، نقش انحنای سطح و انحنای طولی بر وقوع سیلاب را نمی‌توان نادیده گرفت (داس^۳، ۲۰۱۸). در انحنای سطح، مقادیر منفی، صفر و مثبت به ترتیب بیانگر مقعر، سطح

1 Handini
2 Nampak
3 Das

صاف و محدب است (مالیک و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین در انحناى طولی، مقادیر منفی و مثبت به ترتیب باعث زیاد و کم شدن رواناب می‌شود (کوستاچ^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). برای فازی‌سازی لایه‌های انحناى سطح و طولی از تابع خطی - کاهنده استفاده شد. انحناى سطح و طولی با استفاده از افزونه DEM Surface و با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاعی در نرم‌افزار Arc Gis10.5 حاصل شد. همچنین در **Error! Reference source not found.** (۳)، لایه‌های فازی شده معیارهای مؤثر بر وقوع سیل خیزی حوضه نشان داده شده است.



شکل ۳- نقشه‌های فازی‌سازی شده معیارها

1 Costache

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اولویت‌بندی معیارها

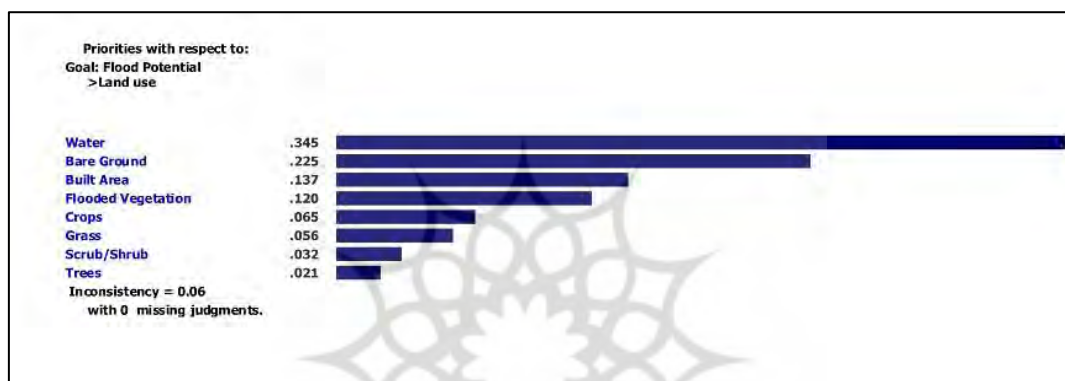
نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه‌های زوجی بین معیارهای انتخابی مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه بر اساس نظر کارشناسان آبخیزداری نشان داد که معیارهای باران، کاربری اراضی، بافت خاک، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، شیب، رتبه آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی، تجمع جریان، شاخص توان جریان، انحنای سطح، انحنای طولی و ارتفاع به ترتیب با وزن‌های نهایی ۰/۲۲۹، ۰/۱۵۹، ۰/۱۲۶، ۰/۱۱۳، ۰/۰۷۹، ۰/۰۶۱، ۰/۰۵۴، ۰/۰۴۶، ۰/۰۳۰، ۰/۰۲۹، ۰/۰۲۵، ۰/۰۱۹، ۰/۰۱۸ و ۰/۰۱۳ بیش‌ترین تا کم‌ترین میزان تأثیرگذاری در سیل‌خیزی حوضه دارند (شکل ۴). در پژوهش حاضر، معیار باران به دلیل شروع کننده رواناب و مهم‌ترین عاملی است که به‌طور مستقیم در چرخه هیدرولوژی دخالت دارد، با وزن نهایی (۰/۲۲۹) بیش‌ترین میزان تأثیرگذاری سیل‌خیزی را در حوضه دارد. در پژوهش میرموسوی و اسمعیلی (۱۴۰۰) نیز، معیار باران بیش‌ترین وزن (۰/۲۱۴) را در سیل‌خیزی حوضه داشت. همچنین نرخ شاخص ناسازگاری برای مقایسه‌های زوجی بین معیارها ۰/۰۸ به دست آمد که حاکی از قابل قبول بودن قضاوت‌ها است. به‌طورکلی اگر شاخص ناسازگاری کم‌تر از ۱/۰ باشد، قضاوت‌های انجام شده سازگار و موردقبول هستند (ساعتی، ۱۹۷۷).



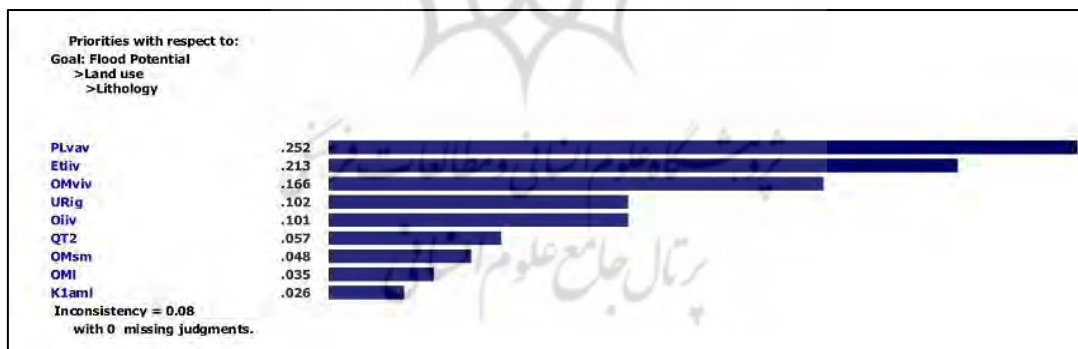
شکل ۴- مقایسه زوجی بین معیارها

از آنجایی که نقشه‌های کاربری اراضی، بافت خاک و سنگ‌شناسی ماهیت کیفی دارند، برای فازی‌سازی این نقشه‌ها ابتدا با نظر کارشناسان مقایسه‌های زوجی انجام شد و وزن نهایی هر طبقه کاربری اراضی بر اساس میزان تأثیر در سیل‌خیزی حوضه به دست آمد بر این اساس از نظر کارشناسان، کاربری پهنه‌های آبی (۰/۳۴۵) و اراضی لخت (۰/۲۲۵) بیش‌ترین تأثیر را در سیل‌خیزی حوضه دارند به‌بیان‌دیگر، کاربری‌های پهنه‌های آبی و اراضی لخت پتانسیل

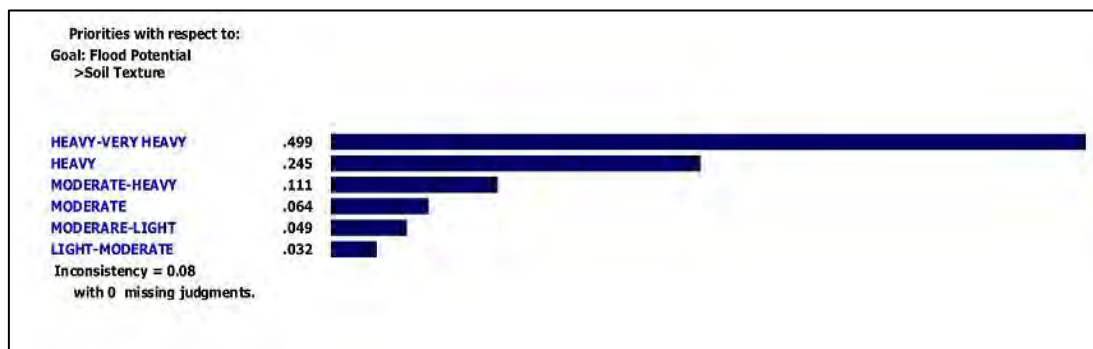
سیل خیزی بالاتری ایجاد می‌کنند (شکل ۵). نتیجه پژوهش حاضر از نظر تأثیر کاربری‌های پهنه‌های آبی و اراضی لخت در سیل خیزی حوضه با پژوهش **شهابی (۱۴۰۰)** مطابقت دارد. همچنین واحدهای سنگ‌شناسی plvav (۰/۲۵۲) و Etliv (۰/۲۱۳) بیش‌ترین وزن نهایی را به خود اختصاص دادند که در سیل خیزی حوضه نقش مؤثرتری دارند (شکل ۶). همچنین نتایج مقایسه‌های زوجی برای لایه بافت خاک از نظر کارشناسان حاکی از آن است که کلاس بافت خاک سنگین-خیلی سنگین و سنگین با وزن نهایی به ترتیب ۰/۴۹۹ و ۰/۲۴۵ بیشترین تأثیر را در سیل خیزی حوضه دارند (شکل ۷) که این امر به ماهیت نفوذپذیری این خاک‌ها در ارتباط با نفوذ آب به داخل خاک مرتبط است که در خاک‌های سنگین نفوذپذیری آب کم است.



شکل ۵- مقایسه زوجی بین طبقات کاربری اراضی



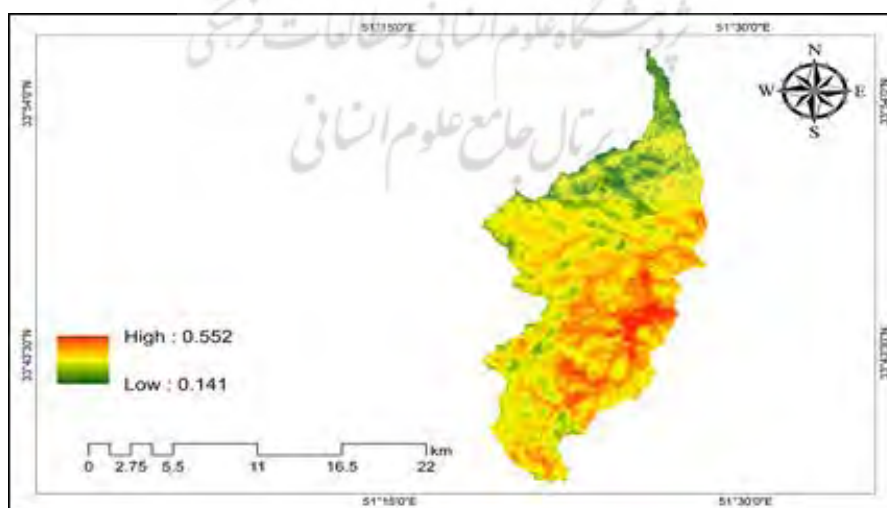
شکل ۶- مقایسه زوجی بین طبقات واحدهای سنگ‌شناسی



شکل ۷- مقایسه زوجی بین طبقات بافت خاک

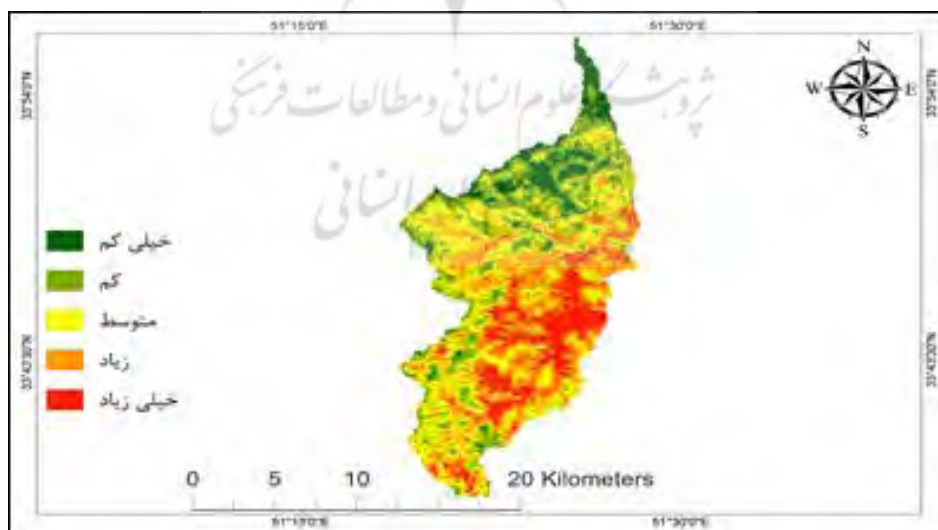
۳-۲- تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوضه

پژوهش حاضر با هدف اولویت‌بندی و تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوضه در مناطق نیمه‌خشک انجام شد. همچنین نقشه‌های سیل‌خیزی حوضه با استفاده از ۱۴ معیار انتخابی مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه با تلفیق لایه‌ها و با استفاده از روش FUZZY-AHP در محیط نرم‌افزار Arc Gis10.5 به دست آمد. نتایج حاصل از نقشه نهایی سیل‌خیزی به دست آمده از حوضه نشان داد که نقشه نهایی سیل‌خیزی حوضه، ارزشی بین ۰/۵۵۲-۰/۱۴۱ دارد که به ۵ کلاس سیل‌خیزی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب با ارزش (۰/۲۹۱-۰/۱۴۱)، (۰/۳۸۳-۰/۲۹۱)، (۰/۴۳۱-۰/۳۸۳)، (۰/۵۵۳-۰/۴۳۱) و (۰/۶۳۱-۰/۵۵۳) تقسیم شد (شکل ۸). همچنین در پژوهش حسین‌زاده و همکاران (۱۳۹۹) ارزش نهایی نقشه خطر سیلاب در محدوده بین ۰/۹۵-۰/۶۳ گزارش شده است که این محققین نقشه نهایی خطر سیلاب را به ۵ کلاس خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم کردند.



شکل ۸- ارزش نهایی نقشه سیل‌گیری حوضه

نتایج حاصل از نقشه نهایی سیل خیزی حوضه مطالعاتی (شکل ۹) نشان داد که بیشترین قسمت‌های سیل خیز حوضه منطبق بر قسمت‌های مرکزی تا جنوب شرقی حوضه است که این موضوع می‌تواند به دلیل بافت خاک متوسط تا خیلی سنگین، وجود واحدهای سنگی Omviv، Oiiv، Etilv (به دلیل کاهش نفوذپذیری و تجمع جریان)، میزان باران دریافتی ۳۶ ساله بیش‌تر، شیب و ارتفاع نسبتاً کم و وجود آبراهه با رتبه بالا باشد. در پژوهش عرب‌عامری و همکاران (۱۳۹۶) نیز، بیشتر مناطق حساس به سیل خیزی در بخش‌های شمالی و شمال غربی واقع شده‌اند و مناطق مرکزی حساسیت کمی نسبت به سیل خیزی حوضه دارد. نتایج حاصل از مساحت‌های سیل خیزی (جدول ۵) حاکی از این است که از کل مساحت حوضه، حدود ۲۱/۰۹، ۵۱/۹۶، ۷۵/۸۷، ۶۶/۵۶ و ۳۰/۵۲ کیلومترمربع به ترتیب در طبقه سیل خیزی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار دارند. به این ترتیب بیش‌تر مساحت حوضه در طبقه با سیل خیزی متوسط تا خیلی زیاد قرار دارند؛ بنابراین باید اقدامات حفاظتی و کنترل سیل در این حوضه مورد توجه قرار گیرد. همچنین ۲۷/۰۵۶، ۱۲/۴۰۶ درصد حوضه به ترتیب از پتانسیل سیل خیزی زیاد تا خیلی زیاد برخوردار است. در پژوهش داس (۱۰۱۸) نیز، ۲۰ درصد حوضه در طبقه بسیار زیاد گزارش شده است. از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان به این موضوع اشاره کرد که مناطق با سیل خیزی خیلی کم تا کم منطبق بر قسمت‌های انتهایی حوضه است که می‌تواند ناشی از عوامل همچون فاصله زیاد تا آبراهه، وجود سازندهای زمین‌شناسی QT2 (نهشته‌های تراسی کواترنری)، میزان بارش ۳۶ ساله دریافتی کم‌تر و جنس بافت خاک سبک تا متوسط (به دلیل نفوذپذیری بالا) و تمرکز بالای آبراهه‌های با رتبه ۱ اشاره کرد. همچنین روستاهای قصر و قزآن در پهنه سیل‌گیری زیاد تا خیلی زیاد قرار دارند لذا اقدامات مدیریتی - حفاظتی برای این روستاها و اراضی کشاورزی و باغ‌های آن‌ها امری ضروری است.



شکل ۹- نقشه نهایی تحلیل فضایی سیل‌گیری حوضه

جدول ۵- مساحت و درصد سیل‌گیری حوضه در هر طبقه

درصد	مساحت (km ²)	طبقه‌بندی سیل‌گیری
۸/۵۷۶	۲۱/۰۹	خیلی کم
۲۱/۱۲۱	۵۱/۹۶	کم
۳۰/۸۴۱	۷۵/۸۷	متوسط
۲۷/۰۵۶	۶۶/۵۶	زیاد
۱۲/۴۰۶	۳۰/۵۲	خیلی زیاد

۴- نتیجه‌گیری

سیلاب یکی از مخاطرات محیطی است که با ایجاد خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی منجر به از بین رفتن زندگی شده که خسارت‌های ناشی از آن، از سایر بلایای طبیعی بیش‌تر است. بر این اساس و با توجه به سابقه سیل در منطقه مورد مطالعه طی سال‌های اخیر تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوضه و شناسایی مناطق با سیل‌خیزی بالا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش با اهداف شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای مؤثر بر سیل‌خیزی حوضه و تحلیل فضایی سیل‌خیزی حوضه انجام شد. بدین منظور در راستای هدف پژوهش حاضر، از روش FUZZY- AHP برای اولویت‌بندی و تحلیل پتانسیل سیل‌خیزی حوزه آبخیز قمصر از ۱۴ معیار (لایه‌ها) باران، ارتفاع، کاربری اراضی، بافت خاک، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، شیب، تراکم زهکشی، رتبه آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، تجمع جریان، انحنا سطح و انحنا طولی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل سلسله مراتبی و مقایسه‌های زوجی نشان داد که معیار باران با وزن نهایی ۰/۲۲۹ مهم‌ترین عامل مؤثر در تحلیل پتانسیل سیل‌خیزی حوضه است. نتایج حاصل از نقشه نهایی سیل‌خیزی حوضه نشان می‌دهد، از کل مساحت حوضه، حدود ۷۵/۸۷ کیلومتر مربع از پتانسیل سیل‌خیزی متوسط برخوردار است که با توجه به این‌که این مناطق از قابلیت تبدیلی بالایی به مناطق با سیل‌خیزی زیاد تا خیلی زیاد برخوردارند؛ لذا این مناطق باید برای اقدامات مدیریتی کنترل سیلاب و آبخیزداری در اولویت قرار گیرند. همچنین بخش‌های مرکزی و امتداد جنوب شرقی حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد تا خیلی زیاد قرار دارند که این می‌تواند ناشی از میزان باران دریافتی بیش‌تر، بافت خاک متوسط تا خیلی سنگین، سنگ‌شناسی نفوذناپذیر Omviv, Oiiv, Etilv, شیب و ارتفاع نسبتاً کم، تمرکز آبراهه با رتبه بالا (۳) و (۴) در این بخش‌ها باشد. همچنین دو روستای قمصر و قزآن در محدوده سیل‌خیزی زیاد تا خیلی زیاد قرار دارند که سیل می‌تواند به اراضی بافت روستایی و کشاورزی و باغ‌های این روستاها خسارت وارد کند. از این جهت باید اقدامات حفاظتی برای این روستاها مورد توجه قرار گیرد. با توجه به نتایج پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که نقشه نهایی سیل‌خیزی پژوهش حاضر می‌تواند به درک صحیح از شناخت و شناسایی بخش‌های با پتانسیل

سیل خیزی بالا حوضه و ارائه برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برای منطقه به همراه داشته باشد؛ بنابراین آگاهی از پتانسیل سیل خیزی حوضه می‌تواند برای تدوین برنامه‌های مدیریت بحران در هنگام مواجهه‌شدن با سیلاب مؤثر واقع شود. با توجه به شناسایی مناطق سیل خیز در منطقه مورد مطالعه پیشنهاد می‌شود در جهت کاهش خسارات ناشی از سیلاب و تعدیل اثرات آن در محدوده دارای طبقه‌بندی سیل خیزی متوسط تا خیلی زیاد، از ساخت‌وساز اصولی استفاده گردد و سازه‌هایی که حساس به تخریب در اثر سیلاب هستند مقاوم‌سازی صورت گیرد.

کتابنامه

حسین‌زاده، محمدمهدی؛ پناهی، رؤیا؛ تربند، توران؛ ۱۳۹۹. پهنه‌بندی حساسیت سیل در حوضه آبریز سنقر در استان کرمانشاه. *اکوهیدرولوژی*. شماره ۴. صص ۸۷۳-۸۸۹.

<https://doi.org/10.22059/ije.2020.305793.1350>.

زیاری، کرامت‌اله؛ رجایی، سید عباس؛ داراب‌خانی، رسول؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی ظرفیت سیل خیزی با استفاده از تحلیل سلسه‌مراتبی و منطق فازی در محیط GIS نمونه موردی: شهر ایلام. *مدیریت بحران*. شماره ۱. صص ۲۱-۳۰.

<https://dori.net/dor/20.1001.1.23453915.1400.10.1.2.2>

شهابی، هومن؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی حساسیت وقوع سیل در مناطق شمالی ایران با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته داده کاوی (منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز هراز). *فصلنامه برنامه ریزی منطقه‌ای*. شماره ۴۱. صص ۱۶۷-۱۸۴.

<https://doi.org/10.30495/jzpm.2021.4246>

صالحی، اسماعیل؛ رفیعی، یوسف؛ فرزاد بهتاش، محمدرضا؛ آقابابایی، محمدتقی؛ ۱۳۹۲. پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از GIS و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: تهران). *محیط‌شناسی*. شماره ۳. صص ۱۷۹-۱۸۸.

<https://doi.org/10.22059/jes.2013.35901>

عرب‌عامری، علیرضا؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ شیرانی، کورش؛ ۱۳۹۶. پهنه‌بندی حساسیت سیل‌گیری با استفاده از روش ترکیبی نوین تئوری بیزین — فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نکا — استان مازندران).

اکوهیدرولوژی. شماره ۲. صص ۴۴۷-۴۶۲. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.61481>

محمدپور، امیرحسین؛ وفائی‌نژاد، علیرضا؛ ۱۳۹۹. ارزیابی خطرپذیری رخداد سیل در حوضه تجن با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی. *اکوهیدرولوژی*. شماره ۳. صص ۷۳۱-۷۴۱.

<https://doi.org/10.22059/ije.2020.300640.1314>.

میرموسوی، سید حسین؛ اسمعیلی، حسین؛ ۱۴۰۰. پهنه‌بندی نواحی سیل خیز با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) مطالعه موردی: شهرستان داراب. *مخاطرات محیط طبیعی*. شماره ۲۷. صص ۲۱-۴۶.

<https://doi.org/10.22111/jneh.2020.32986.1613>.

نجفی، اسماعیل؛ کریمی کردآبادی، مرتضی؛ ۱۳۹۹. ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از مدل ترکیبی-AHP

FUZZY با تأکید بر امنیت شهری (مطالعه موردی: منطقه یک کلان‌شهر تهران). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. شماره ۳۴، صص ۴۳-۶۰. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i2.86110>

- Bouamrane, A., Derdous, O., Dahri, N., Tachi, S.-E., Boutebba, K., and Bouziane, M. T., 2020. A comparison of the analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach for flood susceptibility mapping in a semi-arid ungauged basin (Biskra basin: Algeria). *International Journal of River Basin Management*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/15715124.2020.1830786>.
- Cai, T., Li, X., Ding, X., Wang, J., and Zhan, J., 2019. Flood risk assessment based on hydrodynamic model and fuzzy comprehensive evaluation with GIS technique. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35, 101077. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101077>.
- Costa, J. E., 1987. Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 93(3-4), 313-338. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90102-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90102-8).
- Costache, R., Barbulescu, A., & and Pham, Q. B., 2021. Integrated Framework for Detecting the Areas Prone to Flooding Generated by Flash-Floods in Small River Catchments. *Water*, 13(6), 1-24. <https://doi.org/10.3390/w13060758>.
- Dano, U.L., Balogun, A.L., Matori, A.N., Wan Yusouf, K., Abubakar, I.R., Said Mohamed, M.A., Aina, Y.A. and Pradhan, B., 2019. Flood susceptibility mapping using GIS-based analytic network process: A case study of Perlis, Malaysia. *Water*, 11(3), 1-28. <https://doi.org/10.3390/w11030615>.
- Das, S. 2018. Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3933-4>.
- Das, S., 2020. Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100379>.
- Ekmekcioğlu, O., Koc, K., & Ozger, M., 2021. District based flood risk assessment in Istanbul using fuzzy analytical hierarchy process. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(3), 617-637. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01924-8>.
- Fernandez, D., and Lutz, M. A. 2010. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>.
- Fernandez, P., Mourato, S., and Moreira, M., 2016. Social vulnerability assessment of flood risk using GIS-based multicriteria decision analysis. A case study of Vila Nova de Gaia (Portugal). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(4), 1367-1389. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1052021>.
- Guo, E., Zhang, J., Ren, X., Zhang, Q., and Sun, Z., 2014. Integrated risk assessment of flood disaster based on improved set pair analysis and the variable fuzzy set theory in central Liaoning Province, China. *Natural hazards*, 74(2), 947-965. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1238-9>.
- Handini, D. R., Hidayah, E., and Halik, G., 2021. Flash Flood Susceptibility Mapping at Andungbiru Watershed, East Java Using AHP-Information Weighted Method. *Geosfera Indonesia*, 6(2), 127-142. <https://doi.org/10.19184/geosi.v6i2.24173>.
- Ibrahim-Bathis, K., and Ahmed, S., 2016. Geospatial technology for delineating groundwater potential zones in Doddahalla watershed of Chitradurga district, India. *The Egyptian Journal*

- of Remote Sensing and Space Science, 19(2), 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.06.002>.
- Jia, J., Wang, X., Hersi, N. A., Zhao, W., and Liu, Y., 2019. Flood-risk zoning based on analytic hierarchy process and fuzzy variable set theory. *Natural Hazards Review*, 20(3), 04019006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000329](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000329).
- Kulimushi, L. C., Choudhari, P., Maniragaba, A., Elbeltagi, A., Mugabowindekwe, M., Rwanyiziri, G., and Singh, S. K. (2021). Erosion risk assessment through prioritization of sub-watersheds in Nyabarongo river catchment, Rwanda. *Environmental Challenges*, 5, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100260>.
- Malik, S., Pal, S. C., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P., and Das, B., 2020. Prediction of highly flood prone areas by GIS based heuristic and statistical model in a monsoon dominated region of Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100343>.
- Msabi, M. M., and Makonyo, M., 2021. Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: a case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>.
- Nampak, H., Pradhan, B., & Abd Manap, M., 2014. Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, 513, 283-300. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.053>.
- Patrikaki, O., Kazakis, N., Kougias, I., Patsialis, T., Theodossiou, N., and Voudouris, K., 2018. Assessing flood hazard at river basin scale with an index-based approach: The case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8(2), 1-13. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020050>.
- Rimba, A. B., Setiawati, M. D., Sambah, A. B., and Miura, F., 2017. Physical flood vulnerability mapping applying geospatial techniques in Okazaki City, Aichi Prefecture, Japan. *Urban Science*, 1(1), 7. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010007>.
- Saaty, T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- Sinshaw, B. G., Belete, A. M., Tefera, A. K., Dessie, A. B., Bizuneh, B. B., Alem, H. T., and Atinkut, H. B., 2021. Prioritization of potential soil erosion susceptibility region Using fuzzy Logic and Analytical Hierarchy process, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Water-Energy Nexus*. 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.01.001>.
- Souissi, D., Zouhri, L., Hammami, S., Msaddek, M. H., Zghibi, A., and Dlala, M., 2020. GIS-based MCDM-AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*, 35(9), 991-1017. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1566405>.
- Swain, K. C., Singha, C., and Nayak, L., 2020. Flood susceptibility mapping through the GIS-AHP technique using the cloud. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 1-23. <https://doi.org/10.3390/ijgi9120720>.
- Tella, A., and Balogun, A.-L., 2020. Ensemble fuzzy MCDM for spatial assessment of flood susceptibility in Ibadan, Nigeria. *Natural hazards*, 104(3), 2277-2306. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04272-6>.
- Tenzin, J., and Bhaskar, A. S., 2020. Flash Flood Hazard Zone Mapping Using GIS: Sarpang. *International Journal of New Innovations in Engineering and Technology*, 13. 2319-6319. <http://www.ijniet.org/wp-content/uploads/2020/03/2.pdf>.
- Wang, G., Liu, Y., Hu, Z., Lyu, Y., Zhang, G., Liu, J., and Zheng, H., 2020. Flood risk assessment based on fuzzy synthetic evaluation method in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China. *Sustainability*, 12(4), 1-30. <https://doi.org/10.3390/su12041451>.

- Wang, G., Liu, Y., Hu, Z., Zhang, G., Liu, J., Lyu, Y., and Liu, L., 2021. Flood Risk Assessment of Subway Systems in Metropolitan Areas under Land Subsidence Scenario: A Case Study of Beijing. *Remote Sensing*, 13(4), 1-33. <https://doi.org/10.3390/rs13040637>.
- Yodying, A., Kamonchat, S., Sasithon, C., Polpreecha, C., Nattapon, M., Charatdao, K., and Sarintip, T., 2019. Flood hazard assessment using fuzzy analytic hierarchy process: A case study of Bang Rakam model in Thailand. Paper presented at the Proceedings of the 40th Asian conference on remote sensing, (ACRS 2019) October, 14-18. <http://acrs2019.sigongji.com/wp/pdf/TuD2-4.pdf>.

