



## Identification and prioritization of flooding areas using GIS-based analytical hierarchy process, case study: Karun Watershed

**Mahmoud Habibnejad Roshan<sup>1\*</sup>, Kaka Shahedi<sup>1</sup> and Sayed Hussein Roshun<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Professor, Watershed Management and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

<sup>2</sup> Ph.D Graduate, Watershed Management and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 16 May 2022

Accepted: 21 September 2022

### Extended abstract

#### Introduction

Floods are one of the most destructive natural disasters that cause severe injuries and loss of life, major infrastructure damage, significant economic losses, and social unrest worldwide. Due to the fact that flood is a dynamic and multidimensional phenomenon, Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing (RS) data are used to a large extent to discover the extent of flooded areas and play a special role in preparing flood risk and susceptibility maps. Flood susceptibility mapping is essential for characterizing flood risk areas and planning flood control schemes.

#### Materials and methods

In this research, the identification of flooded areas in the Karun Watershed based on the Analytical Hierarchy Process (AHP) in the GIS environment and its validation with the NDWI blue index extracted from Landsat 8 satellite images has been considered. For this purpose, first, 15 effective parameters in floods occurrence including slope, aspect, elevation, curvature, rainfall, distance from stream, stream density, distance from fault, fault density, distance from road, road density, lithology, Curve Number (CN), land use, Topographic Wetness Index (TWI) and Stream Power Index (SPI) were selected and the weighting of these parameters was done based on AHP method in the Expert Choice software environment. Finally, by using the command to combine the layers based on the weighting of the AHP method in GIS, the final flood risk zoning map was obtained. NDWI water index was used to validate the flood risk map obtained.

#### Results and discussion

The results of the AHP model showed that the most effective factors in the occurrence of flood risk in the Karun Watershed include rainfall, the amount of slope and the height classes, which should be considered in order to reduce flood damage and provide management solutions for these factors. Also, the results show that the downstream areas of the watershed have the highest risk of flooding and more than half of the watershed's surface (52.24%) has a medium flood potential.

#### Conclusion

Preparing a map of flood-prone areas is one of the most constructive methods that enable the reduction of flood risk damages and help planners, stakeholders and decision-makers to

\* Corresponding author: roshanbah@yahoo.com

properly monitor flood-prone areas and ensure appropriate and sustainable socio-economic development.

**Keywords:** Flood damage, Karun, Landsat 8, NDWI index, Zoning

Cite this article: Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., Roshun, S.H., 2023. Identification and prioritization of flooding areas using GIS-based analytical hierarchy process, case study: Karun Watershed. *Watershed Engineering and Management* 15 (3), 367-385.

© 2023, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





## شناسایی و اولویت‌بندی مناطق سیل‌گیر با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی مبنی بر GIS، مطالعه موردی: حوزه آبخیز کارون

محمود حبیب‌نژاد روشان<sup>۱</sup>، کاکا شاهدی<sup>۱</sup> و سیدحسین روشان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران  
<sup>۲</sup> دانشآموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

سیل، به عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که باعث تلفات جانی، خسارت‌های زیرساختی و اقتصادی قابل توجه و نابسامانی‌های اجتماعی، در سراسر جهان می‌شود. با توجه به این‌که سیل پدیده‌ای پویا و چند بعدی است، داده‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) تا حدود زیادی برای کشف وسعت مناطق سیل‌زده کاربرد دارد و در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری و خطر سیل نقش ویژه‌ای دارند. نقشه حساسیت به سیل، برای توصیف مناطق در خطر سیل و برنامه‌ریزی برای ایجاد طرح‌های کنترل سیل، ضروری است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، شناسایی مناطق سیل‌گیر در حوضه کارون بر اساس فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی و صحت‌سنجی آن با شاخص آبی NDWI، استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست، مدنظر بوده است. به این منظور، ابتدا ۱۵ پارامتر موثر در وقوع سیلاب از جمله مقدار و جهت شیب، طبقات ارتفاعی، انحنای زمین، بارندگی، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از جاده، تراکم جاده، لیتو‌لولوژی، شماره منحنی (CN)، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) و شاخص قدرت جریان (SPI)، انتخاب شدند. وزن‌دهی این پارامترها، بر اساس روش فرایند AHP در محیط نرم‌افزار Expert Choice انجام شد. در نهایت، با استفاده از دستور تلفیق لایه‌ها، بر اساس وزن‌دهی روش AHP در GIS، نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر سیلاب به دست آمد. برای صحت‌سنجی نقشه خطر سیلاب به دست آمده، از شاخص آبی NDWI بهره گرفته شد.

### نتایج و بحث

نتایج مدل AHP نشان داد که موثرترین عوامل در بروز خطر سیلاب در حوضه کارون به ترتیب بارندگی، مقدار شیب و طبقات ارتفاعی هستند که برای کاهش خسارات سیلاب و ارائه راهکارهای مدیریتی، این عوامل بایستی مورد توجه قرار گیرند. همچنین، نتایج بیانگر آن است که مناطق پایین‌دست حوضه دارای بیشترین خطر سیل‌گیری را دارند و بیش از نیمی از سطح حوضه (۵۲/۲۴ درصد)، دارای پتانسیل سیل‌خیزی متوسط است.

## نتیجه‌گیری

تهیه نقشه مناطق مستعد سیل، یکی از سازنده‌ترین روش‌هایی است که امکان کاهش خسارت‌های خطر سیل را فراهم می‌کند و به برنامه‌ریزان، ذی‌نفعان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا نظارت مناسبی بر مناطق سیل خیز داشته باشند و توسعه اقتصادی-اجتماعی مناسب و پایدار را تضمین کنند.

## واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، خسارات سیل، شاخص NDWI، کارون، لندهست ۸

### مقدمه

سیلاب، یکی از شایع‌ترین و گستردگرین بلایای طبیعی است که بهطور فراوان در جهان رخ می‌دهد و هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی را به دنبال دارد Bahremand and Hatami; Patra et al., 2015; Jongman et al., 2014; Golmakani, 2020 پدیده سیل یکی از پیچیده‌ترین رخدادهای مخاطره آمیز است که بیش از سایر بلایای طبیعی دیگر، همه ساله در نقاط مختلف دنیا منجر به ایجاد خسارت‌های جانی و مالی و تخریب اراضی کشاورزی می‌شود Avand et al., 2020; Hoseini, 2021).

ارزیابی خطر سیل است که امروزه به عنوان یک نقطه عطف در مدیریت بحران، مدیریت منابع آب و تحلیل مخاطرات طبیعی مطرح شده است ( Wang et al., 2009).

علاوه‌بر این، شناسایی مناطق سیل خیز، یک گام اساسی برای مدیریت ریسک سیل است و منطقه‌بندی خطر سیلاب، اندازه‌گیری کمی از خطر سیل را فراهم می‌کند که در نتیجه، امکان ارسال هشدارهای مناسب در موقع خطر سیل و تسهیل عملیات امداد و نجات، فراهم می‌شود (Valizadeh Kamran, 2019). نقشه پهنه‌بندی میزان خطر سیلاب، می‌تواند ابزاری کارآمد در برنامه‌ریزی برای کاهش خطر سیل در سکونتگاه‌های انسانی و توسعه زیرساخت‌های شهری باشد (Büchele et al., 2006).

پیش‌بینی وقوع سیلاب، به بررسی عوامل ایجاد کننده آن نیاز دارد و بایستی سهم هر یک از عوامل در تولید سیل مشخص شود. مهمترین این عوامل، شامل خصوصیات بارندگی، توپوگرافی، مورفولوژی رودخانه، خصوصیات سیمای سرزمین، کاربری اراضی و پوشش زمین، فاصله از رودخانه، ارتفاع، تراکم زهکشی، زمین‌شناسی، ساختارهای طبیعی و فعالیت‌های بشری Shafapour et al., 2013; Halwatura and Najim, 2013) هستند (Tehrany et al., 2015).

امروزه روش‌های مختلفی به منظور تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل روش‌های آماری (Black and Burns, 2002)، شامل Voogd, 1982)، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور (Mejía-Navarro et al., 1994)، مدل‌های کمی (Schumann et al., 2000 Lyu et al., 2000)، روشن‌های سامانه Yerramilli, 2012)، روشن‌های سامانه تصمیم‌گیری چند معیاره (Ogato et al., 2020) و

سیلاب، عبارت است از افزایش جریان آب رودخانه بیش از حد متعارف که نتیجه بارش بیش از حد، در یک مدت زمان کوتاه است، بهطوری که حجم آب از ظرفیت عبوری رودخانه بیشتر شود و آب از سستر اصلی خارج شود و روی دشت‌های کناری جریان یابد و موجب تأثیرات مخرب بر جامعه بشري، زیرساختها و Hong et al., 2018) محیط زیست شود (Chowdhuri et al., 2020). بهطور کلی، عوامل موثر در ایجاد سیلاب‌ها را می‌توان به دو گروه عوامل اقلیمی و عوامل مربوط به فیزیوگرافی منطقه، طبقه‌بندی کرد. عوامل اقلیمی، شامل درجه حرارت، تبخیر و تعرق و بارش هستند و از مهمترین عوامل فیزیوگرافی می‌توان به کاربری اراضی، وضعیت زمین‌شناسی، توپوگرافی و شبکه زهکشی و بهطور کلی، عوامل مورفومتریک اشاره کرد (Saghafian et al., 2007).

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، از روش‌های کاهش خطر سیلاب است که اطلاعات ارزشمندی در رابطه با طبیعت، سیلاب‌ها و آثار آن بر اراضی دشت سیلابی و تعیین حریم رودخانه‌ها ارائه می‌دهد Niknejad and Alizadeh, 2006) (Aghazadeh et al., 2007). این روش، به عنوان یکی از رویکردهای مهم و کارآمد مطرح در زمینه

آبراهه، جهت جریان، فاصله از آبراهه، تراکم شبکه زهکشی و کاربری اراضی، با روش AHP در محیط GIS، نقشه خطر سیلاب را برای استان Kampong Speu در کشور کامبوج تهیه کردند.

Dash and Tantaneey (2020) پارامتر تجمع جریان، قابلیت زهکشی، طبقات ارتفاعی، عمق آب زیرزمینی، کاربری اراضی، ضریب رواناب، شیب و زمین‌شناسی، نقشه خطر سیلاب را با استفاده از روش AHP، برای منطقه Allahabad در کشور هند بهدست آورده‌اند. سپس، با استفاده از شاخص NDWI استخراج شده از تصاویر ماهواره لندست ۸، اقدام به ارزیابی نقشه تولید شده، کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که ۸۱ درصد منطقه در طبقه خطر زیاد تا خیلی زیاد قرار دارد و زمین‌های کشاورزی بیش از سایر انواع کاربری‌ها در معرض خطر وقوع سیلاب هستند.

حوضه کارون، یکی از حوزه‌های آبخیز کشور است که تقریباً هر ساله سیلاب‌های شدید در آن اتفاق می‌افتد و موجب ایجاد خسارت‌های متعددی اعم از جانی و مالی شده است. با توجه به این که تحقیقاتی در زمینه استفاده از روش AHP در پتانسیل‌یابی مناطق سیل‌خیز در مناطق مختلف انجام شده است، ولی صحت‌سنجی آن با شاخص‌های آبی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، کمتر به چشم می‌خورد و در حوضه مورد نظر نیز این پژوهش، تهیه نقشه خطر سیلاب بنابراین، هدف این پژوهش، تهیه نقشه خطر سیلاب با استفاده از روش AHP در حوضه مورد نظر و صحت‌سنجی آن با داده‌های ماهواره لندست ۸، است.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** حوزه آبخیز کارون، به عنوان یکی از مهمترین حوضه‌های کشور در تامین منابع آب شرب و کشاورزی محسوب می‌شود و زیرمجموعه حوضه بزرگ خلیج فارس و دریای عمان است. این حوضه در مختصات جغرافیایی "۳۳° ۵۴' ۰۹" تا "۱۰° ۲۹' ۰۹" و "۵۰° ۳۲' ۰۰" عرض شمالی و "۵۲° ۰۰' ۴۸" تا "۰۰° ۴۰' ۰۰" طول شرقی، قرار دارد. حوضه کارون در استان‌های چهارمحال و بختیاری، خوزستان، اصفهان، فارس و کهگیلویه و بویراحمد، به مساحت ۴۳۶۸۰/۹۵ کیلومتر مربع، گسترش دارد. متوسط بارندگی سالانه

روش‌های یادگیری ماشین (Mosavi et al., 2018) هستند.

از روش سامانه تصمیم‌گیری چند معیاره که مهمترین آن فرایند تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> است، در مناطق مختلف جهان، در تحقیقات مختلفی استفاده شده است که چند نمونه از آن پژوهش‌ها در ادامه بیان می‌شود. Ghanavati et al., (2014) پتانسیل سیل‌خیزی حوضه رودخانه Balekhlo از مدل هیدرولوژیکی CN و AHP در محیط GIS استفاده کردند. آن‌ها عوامل رواناب، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک، شیب، کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی و تراکم زهکشی را بر اساس روش AHP، وزن دهنده کردند. سپس، با اعمال وزن لایه‌ها در محیط GIS، نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی را برای دوره بازگشت‌های مختلف پنج، ۲۵ و ۵۰ ساله به دست آورده‌اند. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که ۴۰ تا ۴۷ درصد مساحت حوضه طی دوره‌های پنج تا ۵۰ ساله، دارای بیشترین پتانسیل سیل‌خیزی متوسط بوده و ۱۴ تا ۲۴ درصد، دارای پتانسیل زیاد است.

Rostami and Kazemi (2019) پارامترهای شماره منحنی<sup>۲</sup>، ارتفاع، فاصله از آبراهه، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، جمعیت، شیب، خاک، تراکم ساختمان، بافت فرسوده و تجمع جریان، اقدام به پهنه‌بندی خطر سیلاب در محدوده شهر ایلام با استفاده از روش AHP و GIS کردند. به این منظور، پس از وزن دهنی لایه‌ها در محیط نرم‌افزار Expert Choice، با استفاده از GIS، لایه‌ها به همراه وزن نهایی خود با هم تلفیق شدند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مناطق با خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۰/۸، ۸/۵، ۴۹/۶، ۳۲/۵۴ و ۸/۵۶ درصد از مساحت حوضه آبخیز شهر ایلام را تشکیل داده است. همچنین، آن‌ها بیان داشتند که موثرترین عوامل در بروز خطر سیلاب در منطقه مورد مطالعه، به ترتیب شامل فاصله از آبراهه، شماره منحنی، ارتفاع و کاربری اراضی بوده است. Koem and Tantaneey (2020)، با وزن دهنی پارامترهای بارندگی، زمین‌شناسی، خاک، طبقات ارتفاعی، شیب، درجه

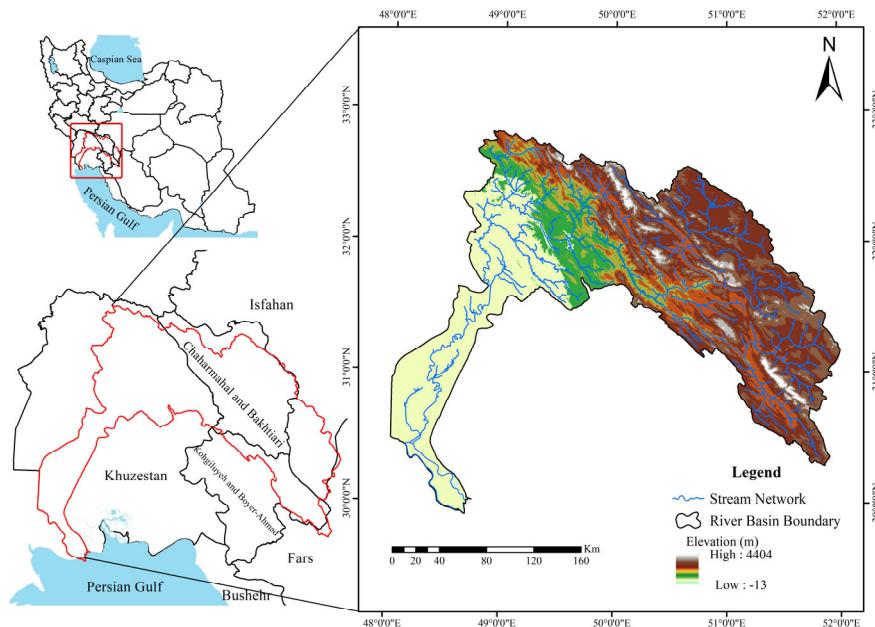
<sup>1</sup> Analytic Hierarchy Process (AHP)

<sup>2</sup> Curve Number (CN)

بازفت، از زردکوه سرچشمه می‌گیرند و بعد از تلاقی با یکدیگر، رود کارون تشکیل می‌شود. پس از تلاقی با رود خرسان، این رود ادامه می‌یابد و در شمال شوشتر، به دو شاخه تقسیم می‌شود که در بند قیر، دوباره دو شاخه به یکدیگر می‌پیوندد. در همین نقطه، رود دز نیز به آن متصل می‌شود و در نهایت، در آبادان وارد اروندرود می‌شود. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه کارون در ایران را نشان می‌دهد.

حوضه، ۴۶۴/۱ میلی‌متر است. با توجه به گستره وسیع این حوضه، تنوع اقلیمی زیادی دارد، به طوری که بر اساس روش طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده، اقلیم‌های خشک تا نیمه‌خشک و فراسرده در حوضه دیده می‌شود (Saeedifar et al., 2021).

رودخانه اصلی این حوضه، رود کارون، به عنوان پرآب‌ترین، بزرگ‌ترین و طولانی‌ترین رودخانه ایران است که شاخه‌های اصلی آن یعنی رودهای کوهرنگ و



شکل ۱-موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

Fig. 1. Geographic location of study area

عوامل از پرسشنامه‌ای که در اختیار ۳۵ نفر (کارشناسان ارشد و دانش‌آموختگان دکتری رشته آبخیزداری و استادی گروه آبخیزداری) قرار گرفت، استخراج شد و برای تعیین وزن‌دهی به این عوامل بر اساس روش AHP از نرم‌افزار Expert Choice بهره گرفته شد. سرانجام، با استفاده از دستور تلفیق لایه‌ها بر اساس وزن‌دهی روش AHP، نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر سیلاب به دست آمد. برای ارزیابی نقشه تولید شده از نقشه شاخص تفاوت نرمال شده آب<sup>۲</sup> به دست آمده از تصاویر سنجنده<sup>۳</sup> OLI در ماهواره‌ای لندست ۸ در زمان وقوع سیلاب، استفاده شد. عوامل موثر در

روش تحقیق: به منظور تولید نقشه سیل‌گیر حوضه مورد مطالعه، ابتدا با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای، اسناد و تحقیقات قبلی، عوامل موثر در وقوع سیلاب ارزیابی و انتخاب شدند. این عوامل شامل مقدار و جهت شب، طبقات ارتفاعی، انحنای زمین، بارندگی، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از جاده، تراکم جاده، لیتوژوئی، شماره منحنی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۱</sup> و شاخص قدرت جریان<sup>۲</sup> هستند (Islam et al., 2021; Arabameri et al., 2020).

در ادامه، لایه رسته هر کدام از عوامل با استفاده از GIS و RS تهیه شد. مقایسات زوجی و اولویت

<sup>3</sup> Normalized Difference Water Index (NDWI)

<sup>4</sup> Operational Land Imager

<sup>1</sup> Topographic Wetness Index (TWI)

<sup>2</sup> Stream Power Index (SPI)

در سطوح محدب، خطر سیل‌خیزی افزایش و خطر سیل‌گیری، کاهش می‌یابد. نقشه انحنای زمین، در سه طبقه مقعر، محدب و مسطح، با استفاده از DEM، در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد.

**بارندگی:** بارندگی، مهمترین عاملی است که به طور مستقیم در چرخه هیدرولوژی دخالت دارد. هرگاه شدت بارش از ظرفیت نفوذ آب در خاک بیشتر باشد، منجر به ایجاد رواناب در سطح زمین می‌شود. اگر بارندگی رخ ندهد، سیلی ایجاد نمی‌شود، پس، ایجاد سیل در درجه اول به بارش وابسته است. شدت تاثیر عامل بارش در ناپایداری دامنه‌ها به شرایط آب و هوایی، توپوگرافی منطقه، ساختار زمین‌شناسی دامنه‌ها، نفوذپذیری و سایر ویژگی‌های توده‌های سنگی و خاکی، بستگی دارد. لایه توزیع مکانی بارندگی، از متوسط سالانه بارندگی ۴۴ ایستگاه باران‌سنگی موجود در حوضه، طی دوره آماری ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۸ به دست آمد. بدین ترتیب که ابتدا با رفع نواقص آماری و تکمیل داده‌ها، آزمون نرمال بودن و کفایت داده‌ها انجام شد. سپس، با استفاده از روش وزن‌دهی فاصله معکوس<sup>۲</sup>، نقشه توزیع مکانی بارندگی در سطح حوضه در محیط ArcGIS 10.8 استخراج شد.

**فاصله از آبراهه و تراکم آن:** شبکه آبراهه، به عنوان مجرای اصلی عبور سیلاب در حوزه‌های آبخیز، نقش مهمی در پخش و بزرگی سیلاب دارد. از طرفی، وجود موادی از جمله ساخت و سازها در حریم رودخانه‌ها و برداشت غیراصولی و بی‌رویه مصالح بستر رودخانه احتمال وقوع سیلاب را افزایش می‌دهد. به طوری که با کاهش فاصله، آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود و تلفات انسانی را نیز به همراه خواهد داشت. نقشه عوامل هیدرولوژی به همراه پارامترهای اقلیمی، مانند بارش، مشخصات شبکه زهکشی مانند تراکم شبکه آبراهه، به صورت غیرمستقیم نشان‌دهنده میزان نفوذپذیری است. به طوری که بالا بودن تراکم آبراهه، نشان‌دهنده کاهش نفوذ و کم بودن تراکم آبراهه، به شرط مهیا بودن شرایط زمین‌شناسی، خاک و پوشش گیاهی، نشان‌دهنده زیاد شدن نفوذ است. تراکم زهکشی، از

تهیه نقشه خطر سیلاب و نحوه تهیه آن‌ها به صورت زیر تشریح می‌شود.

**مقدار شیب و جهت آن:** شیب منطقه، نقش مهمی در تولید رواناب و ایجاد جریان سیلابی، تخریب و فرسایش خاک، حرکات توده‌ای، پراکنش پوشش گیاهی و غیره دارد. شیب زمین، به‌دلیل تاثیر مستقیم بر رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در وقوع سیلاب در حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود. نقشه مقدار و جهت شیب، بر اساس مدل رقمی ارتفاع<sup>۱</sup> حوضه با استفاده از ابزار Spatial Analyst در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد.

**طبقات ارتفاعی:** ارتفاع، نقش مهمی در مقدار و نوع بارندگی، میزان تبخیر و تعرق و وضعیت پوشش گیاهی منطقه داشته است که در نتیجه، بر روی ضریب رواناب اثر می‌گذارد. در سال‌های اخیر، به‌دلیل تغییر اقلیم، بارندگی‌ها بیشتر به صورت رگباری بوده و موجب جاری شدن حجم زیادی از رواناب از دامنه کوه‌ها شده است که در ارتفاعات پایین‌تر و مناطق با شیب کم، سیل‌های مهیبی رخ می‌دهد. نقشه طبقات ارتفاعی از لایه DEM در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 استخراج شد.

**انحنای زمین:** انحنای دامنه اشتقاق خط عمود از بیشینه شیب در راستای جهت دامنه است که امکان بر جسته کردن همگرایی (انحنای مقعر) و واگرایی (انحنای محدب) جریان آب را فراهم می‌آورد. انحنای سطح، دارای دامنه‌ای از اعداد منفی، صفر و مثبت است که منفی حاکی از حالت تغیر، مثبت نشانگر تحدب و صفر نشانه مسطح بودن دامنه است. دامنه‌های موجود در طبیعت بر اساس شکل پلان آن‌ها، به سه شکل همگرا، موازی و واگرا و بر اساس انحنای پروفیل آن‌ها، به سه شکل مقعر، صاف و محدب طبقه‌بندی می‌شوند.

انحنای پروفیل، معرف تغییر شیب منحنی‌های میزان در طول یک مسیر جریان است. انحنای پروفیل، بر روی شدت جریان آب و فرایندهای حمل و رسوبگذاری موثر است. در سطوح مقعر، خطر سیل‌خیزی کاهش و خطر سیل‌گیری افزایش می‌یابد و

<sup>2</sup> Inverse Distance Weighted (IDW)

<sup>1</sup> Digital Elevation Model (DEM)

۱:۱۰۰۰۰ که از سایت سازمان زمین‌شناسی ایران اخذ شد، با استفاده از ابزار Editor در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8، لایه خطی گسل تولید شد. سپس، با استفاده از ابزارهای Euclidean Distance و Line Density بهترتیب لایه فاصله از خطوط گسل و تراکم آن‌ها در حوضه بهدست آمد.

فاصله از جاده و تراکم آن: جاده‌ها، به عنوان سطوح با ضریب نفوذپذیری خیلی کم، در حوزه‌های آبخیز نقش مهمی در ایجاد رواناب دارند. وجود مناطق با ضریب نفوذپذیری زیاد در سطح حوزه آبخیز، تبدیل بارش به رواناب را تسهیل کرده است که شرایط را برای تشکیل جریان‌های سیلابی مهیا می‌سازند.

همچنین، تراکم و گذر جاده‌ها در حاشیه رودخانه‌ها در هنگام وقوع سیلاب افزایش آسیب‌پذیری را به دنبال دارد و با افزایش فاصله از حاشیه رودخانه، آسیب‌پذیری آن‌ها کاهش می‌یابد. در این پژوهش، به‌منظور تهیه لایه‌های فاصله از جاده و تراکم آن در سطح حوضه، از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ استفاده شد. به این‌منظور، نقشه مورد نظر به محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 وارد و با استفاده از ابزار Editor لایه جاده ایجاد شد. سپس، نقشه نهایی فاصله از جاده‌ها و تراکم آن‌ها به ترتیب با استفاده از ابزارهای Euclidean Distance و Line Density در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد.

لیتوژوئی: به طور کلی، لیتوژوئی سنگ‌ها به دلیل تاثیر مستقیم بر میزان نفوذپذیری و رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در پدیده سیل در حوزه‌های آبخیز است. نفوذپذیری اراضی و میزان نفوذ آب در تشکیلات سطحی و سنگ‌های مختلف،تابع ویژگی‌های ساختمان سنگ و به خصوص میزان تخلخل، درز و شکاف و شکستگی‌های سنگ بستر است. با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی سازنده، وضعیت تکتونیک و زمین‌ساخت و با استفاده از نظر فاصله گرفتن از آبراهه‌ها، خطر ایجاد سیلاب و سیل‌خیزی، نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

این عامل نیز، بر اساس نقشه زمین‌شناسی اخذ شده از سایت سازمان زمین‌شناسی ایران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰ و ابزار Editor در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 رقومی‌سازی شد.

تقسیم طول کل شبکه هیدروگرافی شامل رودخانه‌های فرعی و آبراهه‌ها به مساحت کل حوضه به دست می‌آید که این شاخص با دبی حداکثر حوضه‌ها همبستگی دارد. میزان تراکم زهکشی در یک حوضه، می‌تواند نشان‌دهنده وضعیت شدت و ضعف رواناب و فرسایش در قسمت‌های مختلف آن باشد. تراکم آبراهه (رهکشی) با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$(1) Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

که در آن،  $Dd$  تراکم زهکشی،  $Li$  طول آبراهه‌ها (کیلومتر) و  $A$  مساحت حوضه (کیلومتر مربع) است. برای تهیه نقشه فاصله از آبراهه و تراکم آن، ابتدا نقشه شبکه رودخانه منطقه مورد مطالعه با استفاده از لایه DEM منطقه به دست آمد. سپس، نقشه نهایی فاصله از آبراهه و تراکم آن به ترتیب با استفاده از ابزارهای Euclidean Distance و Line Density در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 تهیه شد.

فاصله از گسل و تراکم آن: گسل‌ها، به عنوان عامل زمین‌شناسی که ممکن است باعث نفوذ رواناب و تغییر مسیر جریان شوند، می‌تواند در وقوع سیلاب در حوزه‌های آبخیز تاثیر زیادی داشته باشند. گسل‌ها، در خردشده‌گی سنگ‌های پیرامون خود موثرند و این خردشده‌گی باعث لغزش‌های سنگی در مناطق با شیب متوسط می‌شود. نفوذ آب درون این مناطق خردشده، باعث بالا رفتن سطح آب زیرزمینی و فشار منفذی می‌شود. با توجه به این که بخشی زیادی از حوضه کارون در ارتفاعات زاگرس دارای سازندهای آهکی (از جمله آسماری، بختیاری و غیره) هستند و ضمن وجود گسل‌های متعدد در این حوضه، بهویژه در این ناحیه از حوضه، تلاش شد تا نقش گسل‌ها در وقوع سیلاب در نظر گرفته شود.

وجود این گسل‌ها و شیارهای ناشی از آن در سنگ‌های آهکی، موجب نفوذ بیشتر باران به درون این منافذ شده است و همچنین، برای بررسی تاثیر تکتونیک منطقه بر سایر ویژگی‌های مربوط به فرایند بارش-رواناب، از این پارامتر استفاده شد. ذکر این نکته ضروری است که انتخاب پارامترها بر اساس آخرین مطالعات در داخل و خارج از کشور انجام شده است. به‌منظور تهیه لایه فاصله و تراکم گسل، ابتدا نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه به مقیاس

این‌که قبل از استفاده کاربر، بر روی تصاویر ماهواره‌های لندهای ۸ تصحیحات هندسی انجام شده است، در این پژوهش، از انجام این تصحیحات خودداری شد.

بهمنظور انجام تصحیحات اتمسفری بر روی تصاویر، از الگوریتم FLAASH، استفاده شد. بعد از انجام تصحیحات، اقدام به موزاییک کردن تصاویر و سپس، ترکیب رنگی مناسب انتخاب شد (Tong et al., 2018). در مرحله بعدی، پس از انتخاب مناطق تعیینی از تصاویر سال ۱۳۹۸ با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم بیشینه احتمال که دقت بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، طبقه‌بندی تصاویر انجام شد (Munasinghe et al., 2018). نقاط کنترل زمینی<sup>۲</sup>، حاصل از بازدیدهای میدانی که به صورت سیستماتیک و به تعداد ۳۰ نمونه برای هر کاربری با دستگاه GPS برداشت شد، مقایسه شدند و درستی نمونه‌ها تایید شد. نقشه‌های تولیدی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 اصلاح و در نهایت، نقشه کاربری اراضی برای حوضه مورد مطالعه تهیه و دقت طبقه‌بندی برای تصاویر طبقه‌بندی شده نیز با استفاده از ضریب کاپا<sup>۳</sup> محاسبه شد.

**شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI):** نظریه شاخص رطوبت توپوگرافی، اولين بار بهوسيله Beven و Top Kirkby در سال ۱۹۷۹ در مدل بارش-رواناب Model معرفی شد که می‌تواند تاثیر توپوگرافی را بر روی تولید رواناب بهصورت کمی بیان کند و بهعنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را تقریب بزند (Qin et al., 2011). شاخص TWI، یک پارامترسازی ساده ریاضی از وضعیت رطوبت خاک است که در بسیاری از تحقیقات به کار برده شده است و بهصورت رابطه (۴) تعریف می‌شود.

$$TWI = Ln\left(\frac{a}{tan \beta}\right) \quad (4)$$

که در آن،  $a$  مساحت بالادست در واحد طول خط تراز یا مساحت ویژه حوضه و  $\beta tan \beta$  شیب زمین (درجه) برای تخمین زاویه هیدرولیک است (Qin et al., 2011). این شاخص که بهعنوان شاخص مرتبط با آب،

شماره منحنی (CN): شماره منحنی رواناب، یک پارامتر تجربی برای پیش‌بینی مقادیر رواناب و نفوذ به دنبال یک بارش است. شماره منحنی رواناب بهوسیله سازمان حفاظت از منابع طبیعی آمریکا<sup>۱</sup> به کمک آزمایش‌های تجربی محاسبات رواناب و پایش شب توبوگرافی حوضه‌های کوچک، توسعه یافته است. شماره منحنی رواناب، بر مشخصات هیدرولوژیکی خاک، کاربری اراضی و وضعیت پوشش گیاهی یک منطقه استوار است. CN، یک پارامتر بی‌بعد است که در روش SCS، برای تعیین پارامتر اتلاف اولیه و نیز زمان تاخیر حوضه کاربرد دارد. از جمله روش‌های معمول در هیدرولوژی، روش SCS، روش پیشنهادی برای حوضه‌هایی که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری دبی رواناب وجود ندارد، است. در روش SCS، ارتفاع رواناب حاصل از یک بارندگی بهصورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (2)$$

در این رابطه،  $Q$  ارتفاع رواناب بر حسب اینچ،  $P$  ارتفاع بارندگی ۲۴ ساعه بر حسب اینچ،  $S$  عامل مربوط به نگهداشت آب در سطح زمین است که مقدار آن از رابطه (۳) بهدست می‌آید.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3)$$

که در آن،  $CN$  شماره منحنی مربوط به مقدار نفوذ آب است.

بهمنظور تهیه نقشه شماره منحنی از دو لایه نقشه کاربری اراضی و گروههای هیدرولوژیکی خاک، استفاده شد. این دو لایه، در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 با استفاده از الحاقیه ArcCN Runoff ترکیب شدند. سپس، با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) نقشه نهایی با ابزار Raster Calculator بهدست آمد.

**کاربری اراضی:** در این پژوهش، از داده‌های سنجنده OLI ماهواره‌های لندهای ۸، برای استخراج نقشه کاربری سال ۱۳۹۸ استفاده شد. قبل از استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، ضروری است که کیفیت داده‌ها از نظر رادیومتریکی و هندسی مورد بررسی قرار گیرد و اطمینان حاصل شود که این تصاویر عاری از هرگونه خطای رادیومتریکی و هندسی هستند. با توجه به

<sup>2</sup> Ground Control Point (GCP)

<sup>3</sup> Kappa Coefficient

<sup>1</sup> Soil Conservation Service (SCS)

تعیین مجموعه‌ای از معیارها برای ارزیابی گزینه‌های تصمیم‌گیری، لازم است هر معیار به صورت یک لایه نقشه در پایگاه داده‌های مبتنی بر GIS نشان داده شود (Ishizaka and Nemeny, 2011)، پس از انتخاب لایه‌های مورد نیاز، به لایه‌ها وزن داده شد که هدف از وزن‌دهی معیار، تعیین اهمیت هر معیار نسبت به معیارهای دیگر است (Banihabib and Laghabdoost 2014). این روش طی مراحلی که در ادامه آورده می‌شود، صورت می‌گیرد.

(الف) ساختن سلسله مراتب: سلسله مراتب، یک نمایش گرافیکی از مساله پیچیده واقعی است که در راس آن هدف کلی مساله و در سطوح بعدی، معیارها، زیر معیارها و گزینه‌ها قرار می‌گیرند (Ghodsypour, 2009). تبدیل موضوع یا مساله مورد بررسی به ساختار سلسله مراتبی، مهمترین قسمت فرایند تحلیل سلسله مراتبی محسوب می‌شود. زیرا در این قسمت با تجزیه مسایل پیچیده، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، آن‌ها را به شکل ساده که با ذهن و با طبیعت انسان مطابقت داشته باشند، تبدیل می‌کند. به عبارت دیگر، این فرایند مسایل پیچیده را به عناصر جزئی‌تر و ساده‌تر تجزیه می‌کند تا قابل درک باشند (Bowen, 1990).

(ب) محاسبه وزن: در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوطه خود در سطح بالاتر به صورت زوچی مقایسه شده و وزن آن‌ها محاسبه می‌شود که این وزن‌ها را وزن نسبی می‌نامند. سپس، با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌شود که آن را وزن مطلق می‌نامند (Ghodsypour, 2009). در تعیین ضریب اهمیت معیارها روش‌های زیادی وجود دارد که معمول‌ترین روش، روش مقایسه دوتایی است که به‌وسیله Saaty ارائه شده است و به عنوان روشی مناسب در وزن‌دهی معیارها در روش AHP معرفی شده است (Saaty, 1980). در روش AHP، ابتدا بر اساس روش دلفی، پرسشنامه‌هایی بین کارشناسان توزیع می‌شود و بر اساس روش مقایسه زوچی یا دو به دو، وزن‌های نسبی و نهایی محاسبه می‌شود (Ghodsypour, 2009).

(ج) روش مقایسه دو به دو: در بیشتر مطالعات، بررسی فعالیت‌ها و گزینه‌های مختلف، غالب در شکل مقایسه‌ای بهتر نشان داده می‌شوند، زیرا کمی کردن

مشهور و شناخته شده است، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (بر حسب  $\alpha$ ) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین‌دست (بر حسب  $\beta \tan \beta$ tan به عنوان شبیه هیدرولیکی تقریبی) توصیف می‌کند. در نتیجه، محاسبه  $\alpha$  و  $\beta \tan \beta$ tan نشان دادن تاثیر عوارض زمین بر روی زهکشی محل نیاز است (Endreny and Wood, 2003). شاخص TWI، به عنوان یکی از شاخص‌های تاثیرگذار بر وقوع پتانسیل سیل در حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود (Shafapour Tehrany et al., 2014). نشانه این شاخص بر پایه DEM حوضه با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS 7.0 تولید شد.

شاخص قدرت جریان (SPI): شاخص قدرت جریان، گویای میزان قدرت فرسایندگی جریان آب است. بر این اساس، آبگذری متناسب با مساحت ویژه حوضه و شبیه است. چنانچه، سطح حوضه و شبیه آن افزایش پیدا کند، مقدار آب مشارکت کننده در مناطق بالادست شبیه‌ها و سرعت آن بالا می‌رود. از این رو، شاخص قدرت جریان و میزان خطر فرسایش زیاد می‌شود (Florinsky, 2016). این شاخص اخیراً به عنوان عاملی مهم در پتانسیل سیل خیزی حوزه آبخیز در مطالعات مختلف در نظر گرفته شده است و با استفاده از رابطه (۵) قابل محاسبه است (Shafapour Tehrany et al., 2014)

$$SPI = A_S \tan \beta \quad (5)$$

برای تهیه شاخص SPI نیز از DEM حوضه در نرم‌افزار SAGA GIS 7.2.0 استفاده شد. بعد از تهیه عوامل موثر در وقوع سیلاب از روش فرایند AHP برای تهیه نقشه نهایی خطر سیلاب استفاده شد. فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP): مدل فرایند AHP به‌وسیله Saaty (1977, 1980) پیشنهاد و ارائه شد. این مدل، یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره است که برای بررسی اثرات معیارهای مختلف اعم از داده‌های کمی و کیفی است. اولین قدم در فرایند AHP، ساختن نمودار سلسله مراتبی مساله است که عموماً به‌ترتیب در آن هدف، معیارها (و در صورت وجود زیرمعیارها) و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند و امکان بررسی سناریوهای مختلف را به کارشناسان و مدیران می‌دهد. روش کار بدین صورت است که با

نسبت به معیار B، C، D و غیره است که به نام مقایسه‌های دوتایی معروف است. این مقایسه‌ها بر اساس یک مقیاس نسبی صورت می‌گیرد که از یک تا نه است و بر اساس میزان ارجحیت (جدول ۱)، از نه به پایین، میزان ارجحیت بین دو گزینه مورد مقایسه کاهش پیدا می‌کند (Saaty and Vargas, 2001).

اطلاعات مربوط به عوامل بهطور مطلق بسیار دشوار و در بعضی موارد غیرقابل انجام است. اما در حالت مقایسه‌ای می‌توان گفت که این عامل در مقایسه با عامل دیگر محدودیت بیشتری را ایجاد می‌کند. داده های ورودی در روش AHP، پاسخ تصمیم گیرنده‌گان به یک سری از سوال‌ها در مورد میزان اهمیت معیار A

**جدول ۱- مقادیر ترجیحات برای مقایسات زوجی**  
Table 1. Preference values for pairwise comparisons

Reciprocal	Scale	Intensity of importance
1/9	Extremely importance	9
1/8	Very to extremely strongly importance	8
1/7	Very strongly importance	7
1/6	Strongly to very strongly importance	6
1/5	Strongly importance	5
1/4	Moderately to strongly importance	4
1/3	Moderately importance	3
1/2	Equally to moderately importance	2
1	Equally importance	1

مناسب بودن قضاوت نرخ ناسازگاری<sup>۱</sup> است که ضمن وارد کردن مقایسات زوجی در نرم‌افزار، این شاخص هم‌زمان با وزن لایه‌ها محاسبه می‌شود. چنانچه این شاخص کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری سامانه قابل قبول است و گرنه باید در قضاوت‌ها تجدید نظر کرد.

**تل斐ق وزن‌ها با لایه‌ها:** با تکمیل پرسشنامه بهوسیله کارشناسان، نتایج مقایسات زوجی به محیط نرم‌افزار Expert Choice انتقال داده شد و وزن نهایی لایه‌های موثر در ایجاد سیلاب مشخص شد. پس از تعیین وزن نهایی برای هر کدام از لایه‌ها، این وزن‌ها با توانایی GIS در اعمال وزن به لایه‌ها و سپس، روی هم گذاری آن‌ها با توجه به میزان تاثیرشان بر فرایند وقوع سیلاب، انجام شد و در نهایت، نقشه نهایی خطر سیلاب به دست آمد.

**صحت‌سنگی نقشه خطر سیلاب:** صحت‌سنگی نقشه تولید شده، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لنdest ۸، ارزیابی شد. بدین ترتیب که تصاویر سنگنده OLI ماهواره لنdest ۸، مربوط به سیلاب سال ۱۳۹۸ حوضه کارون مورد پردازش قرار گرفت و بر اساس شاخص NDWI، گستره مربوط به سیلاب به دست آمد. شاخص NDWI، برای بیشینه رساندن بازتاب آب با استفاده از طول موج سیز، به کمینه

(د) محاسبه وزن نسبی: هر ماتریس مقایسه زوجی، ممکن است سازگار یا ناسازگار باشد. در حالتی که این ماتریس سازگار باشد، محاسبه وزن‌های نسبی ساده بوده است و از نرمال کردن عناصر هر ستون به دست می‌آید. اما در حالتی که ماتریس ناسازگار باشد، محاسبه وزن‌ها ساده نبوده است و برای به دست آوردن آن‌ها از چهار روش عده کمینه مربعات، کمینه مربعات لگاریتمی، بردار ویژه و تقریبی استفاده می‌شود.

از آنجایی که این روش‌ها، دارای محاسبات سنگین هستند، معمولاً از روش‌های تقریبی که دارای دقت کمتری اما قابل قبول هستند و محاسبات کمتر و ساده‌تری دارند، استفاده می‌شود. این روش‌ها عمدتاً تقریبی از روش بردار ویژه هستند که شامل روش‌های مجموع سطري، مجموع ستونی، ميانگين حسابي و ميانگين هندسي (Ghodsypour, 2009) هستند. در اين پژوهش، از روش ميانگين هندسي که روش اجرائي در نرم‌افزار Expert Choice است، استفاده شد.

**(ت) محاسبه وزن نهایی:** بهمنظور، رتبه‌بندی گزینه های تصميم، وزن نهایي از حاصل ضرب وزن نسبی هر عنصر در وزن عناصر بالاتر به دست می‌آيد. با انجام اين مرحله برای هر گزينه، مقدار وزن نهایي به دست می‌آيد (Ghodsypour, 2009). در مدل AHP، معیار

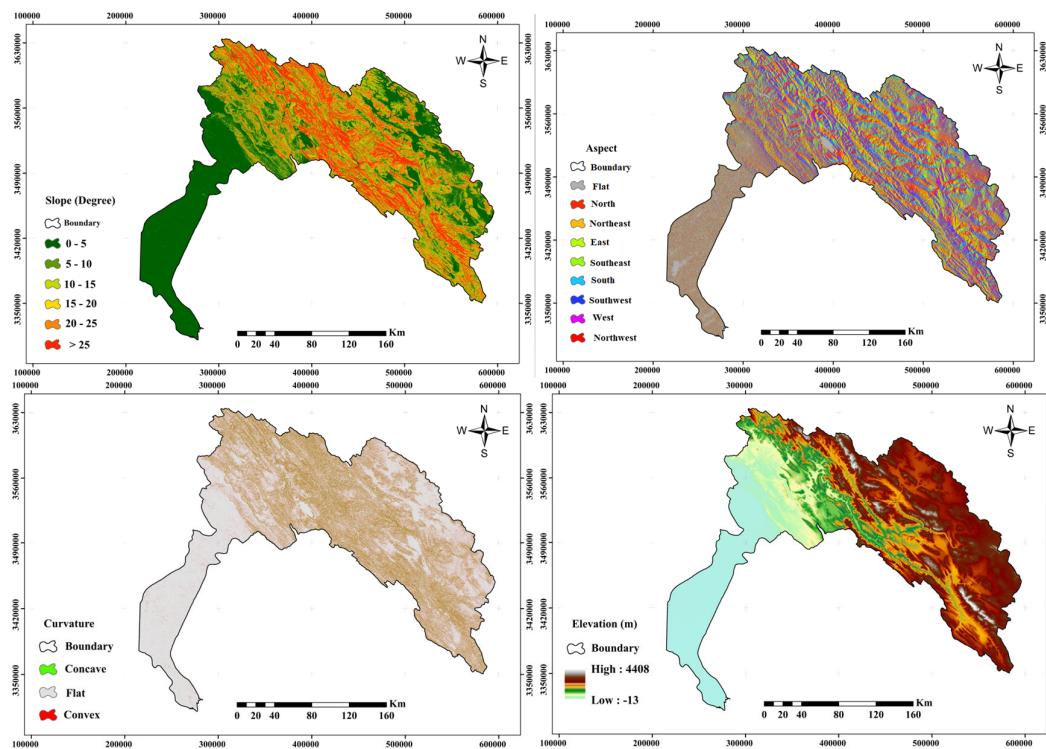
<sup>۱</sup> Inconsistency Ratio (CI)

$$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR} \quad (6)$$

### نتایج و بحث

عوامل متعددی در وقوع سیلاب موثر هستند که با پژوهش‌های گذشته و اسناد علمی، مهمترین آن‌ها شامل مقدار شیب، جهت شیب، طبقات ارتفاعی، انحنای زمین، بارندگی، فاصله از آبراهه، تراکم آبراهه، فاصله از گسل، تراکم گسل، فاصله از جاده، تراکم جاده، لیتولوژی، CN، کاربری اراضی، شاخص TWI و شاخص SPI در این پژوهش، در نظر گرفته شدند. لایه اطلاعاتی این عوامل در محیط نرم‌افزارهای ArcGIS 5.3، ENVI 5.3 و SAGA GIS 2.3.2 استخراج شدند (شکل ۲).

رساندن بازتاب کم NIR (Near Infrared) با ویژگی‌های آب و بازتاب زیاد NIR بهوسیله ویژگی‌های پوشش گیاهی و خاک، در قسمتی که NIR GREEN به ترتیب مقدار بازتابی طیفی به دست آمده در بخش مادون قرمز نزدیک و سبز طیف الکترومغناطیسی هستند، طراحی شده است. مقدار NDWI بین -۱ تا +۱ است که مقدار منفی یا نزدیک به صفر به معنای بدون آب است، در حالی که مقدار نزدیک به +۱ نشان‌دهنده رطوبت بسیار زیاد است (Mcfeeters, 1996). این شاخص در نرم‌افزار ENVI 5.3 با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شد.



شکل ۲- عوامل موثر در تهیه نقشه خطر سیلاب حوضه کارون  
Fig. 2. Effective factors in preparing flood risk map of Karun Watershed

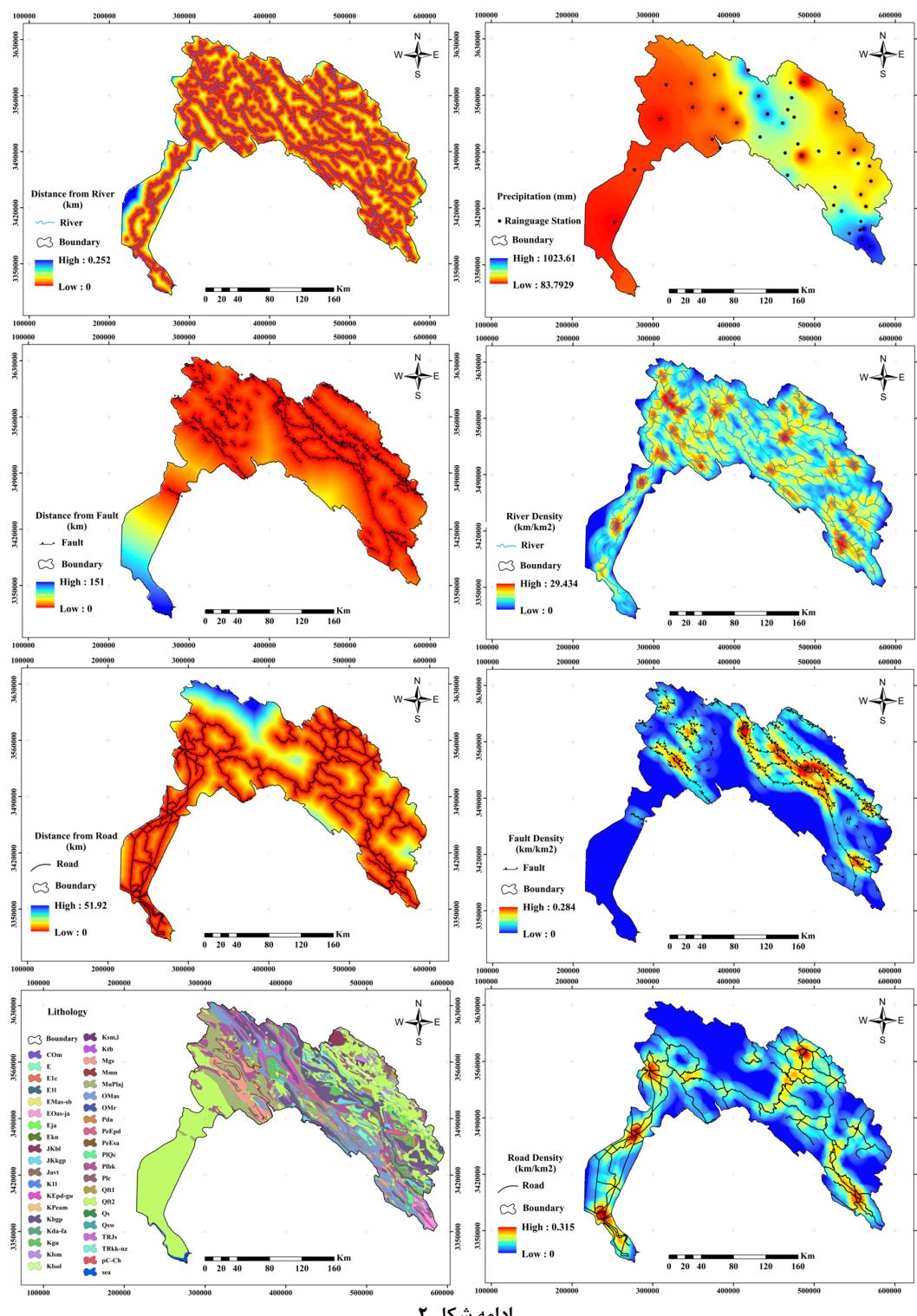
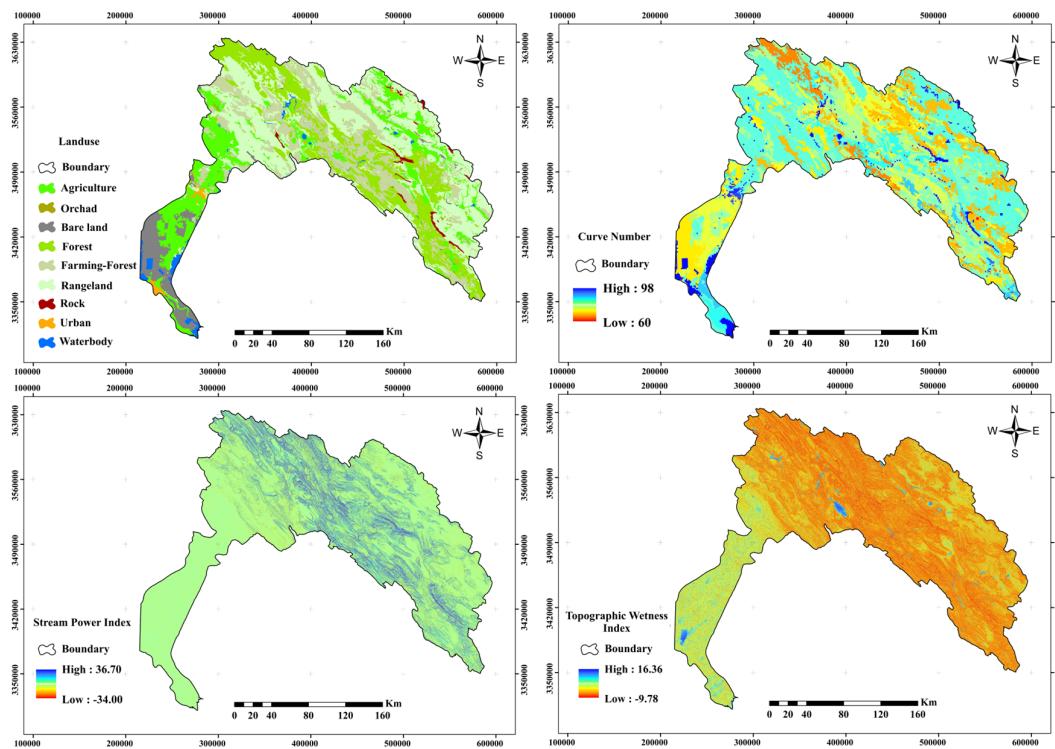


Fig. 2 continued

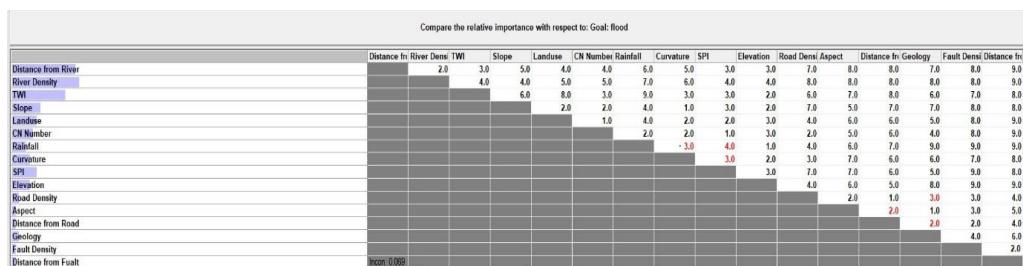


ادامه شکل ۲

Fig. 2 continued

ورود نظرات اساتید و کارشناسان به نرم‌افزار، مقدار نهایی امتیاز هر کدام از پارامترها از طریق آماره مدد محاسبه شد (شکل ۳).

برای انجام مقایسات زوجی، پرسشنامه‌ای طراحی و در اختیار شماری از کارشناسان و اساتید قرار گرفت. پرسشنامه‌ها پس از تکمیل، جمع‌آوری و بهمنظور

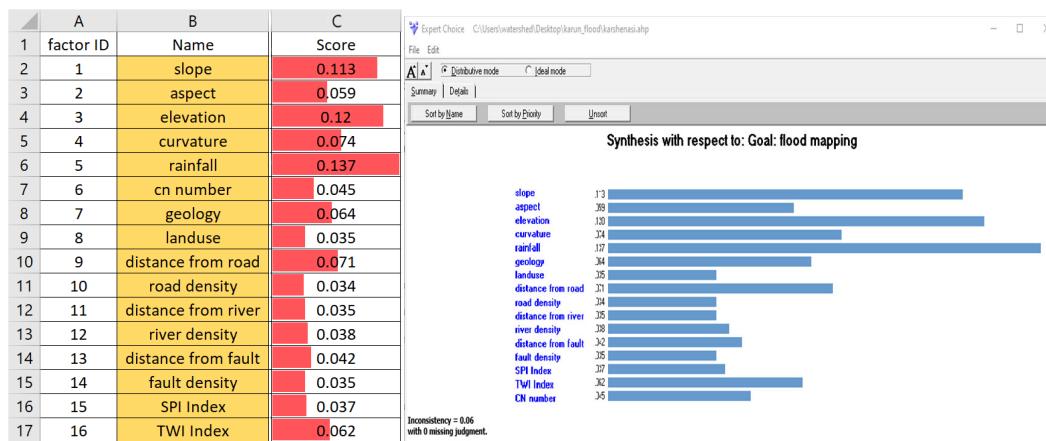


شکل ۳- نتایج مقایسات زوجی کارشناسان بر اساس آماره مدد در محیط نرم‌افزار Expert Choice

Fig. 3. The results of pairwise comparisons of experts based on mode statistics in the Expert Choice software environment

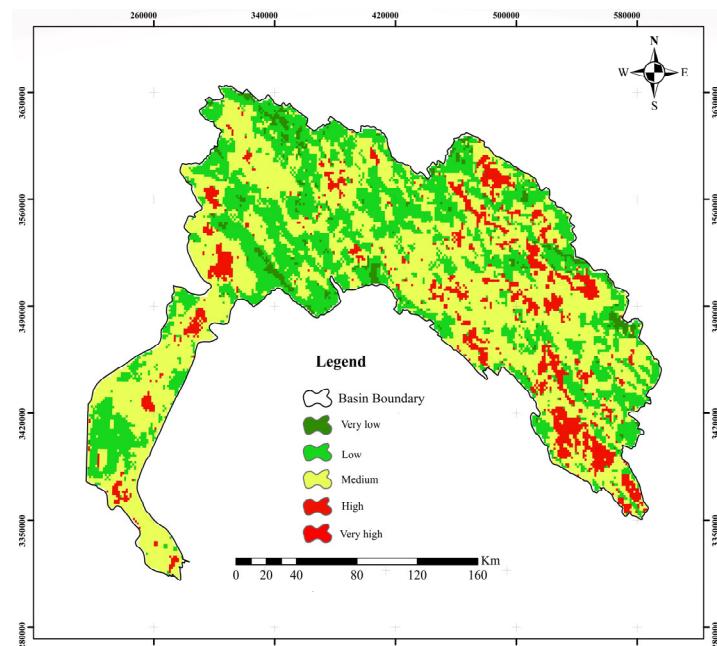
دارای بیشترین اثر و تراکم جاده و کاربری زمین، دارای کمترین اثر هستند. با مشخص شدن وزن هر کدام از پارامترهای موثر در وقوع سیلاب با استفاده از مدل AHP، نقشه نهایی به صورت اهمیت خطر در پنج طبقه، با اعمال وزن لایه‌ها با استفاده از دستور Raster Calculator در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 به دست آمد (شکل ۵).

مقدار وزن نهایی هر کدام از پارامترها در محیط نرم‌افزار Expert Choice به صورت شکل ۴، به دست آمد. بر اساس شکل ۴، میزان ناسازگاری برابر ۰/۰۶ و کمتر از ۰/۱ بوده که مقدار قابل قبولی است و نشان‌دهنده سازگار بودن داده‌ها است. همچنین، با توجه به وزن پارامترهای موثر در وقوع سیلاب، پارامترهای بارندگی، مقدار شیب و طبقات ارتفاعی



شکل ۴- وزن نهایی هر عامل بر اساس روش AHP در نرم‌افزار

Fig. 4. Final weight of each factor based on AHP method in expert choice software



شکل ۵- خطر تولید سیلاب بر اساس روش AHP

Fig. 5. Flood production risk based on AHP method

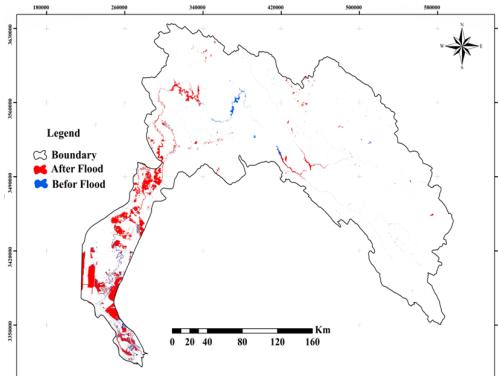
متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم بندی شد. نتایج گستره هر کدام از این طبقات به صورت جدول ۲، محاسبه شد.

جدول ۲- نتایج درصد مساحت طبقات پتانسیل سیل خیزی در حوضه مورد مطالعه

Table 2. The results of the area percentage of flood potential classes in the study watershed

Row	Class	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)
1	Very low	1178.11	2.70
2	Low	15332.37	35.10
3	Medium	22823.16	52.24
4	High	4303.44	9.85
5	Very high	43.87	0.11
Sum	-	43680.95	100

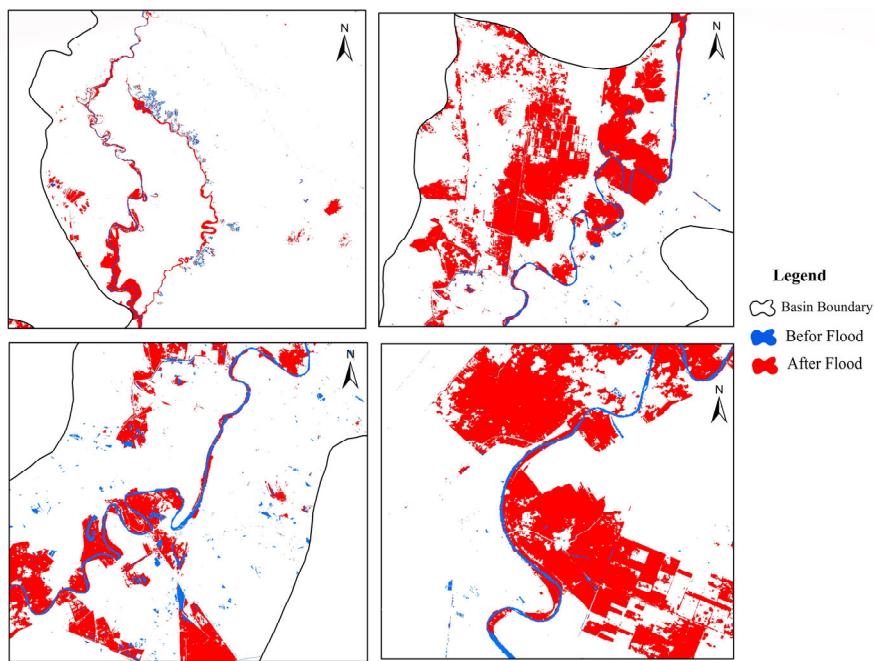
با توجه به شکل ۵، مناطق با درصد خطر زیاد و خیلی زیاد در نواحی کوهستانی واقع شده‌اند که این مناطق به دلیل شبیه زیاد، زمان تمرکز، نفوذپذیری و پوشش گیاهی کم، توان زیادی در تولید رواناب دارند. در حالی که در مناطق پایین دست با افزایش زمان تمرکز، کاهش شبیه، افزایش پوشش گیاهی و نفوذ سرعت جریان کم شده است و توان تولید رواناب کمتری از خود نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، پتانسیل سیل خیزی حوضه مورد مطالعه به پنج طبقه با سیل خیزی خیلی کم، کم،



شکل ۶- مناطق سیل‌گیر بر اساس شاخص NDWI در حوضه کارون

Fig. 6. Flooded areas based on NDWI index in Karun Watershed

با توجه به جدول ۲، طبقه متوسط بیشترین درصد مساحت را به خود اختصاص داده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که خطر تولید سیلاب در حوضه مورد مطالعه بر اساس روش AHP در طبقه متوسط است. برای ارزیابی نقشه نهایی خطر تولید سیلاب به دست آمده به روش AHP، از تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸، در سیلاب رخ داده در سال ۱۳۹۸ حوضه، استفاده شد. شاخص آبی NDWI، برای دوره‌های قبل و بعد از وقوع سیلاب به دست آمد (شکل ۶). مناطق با خطر سیل‌گیری بالا نیز که اغلب در پایین‌دست و در بخش جلگه خوزستان بودند نیز مشخص شدند (شکل ۷).



شکل ۷- نقشه مناطق پرخطر سیل‌گیر بر اساس شاخص NDWI در حوضه کارون

Fig. 7. Flood very risk areas based on NDWI index in Karun Watershed

ایجاد شده هستند، وجود دارند. نواحی بالادست حوضه بهدلیل ارتفاع زیاد و توپوگرافی و شیب شدید، نقش مهمی در تولید و وقوع سیلاب دارند.

به عبارت دیگر، این مناطق نقش مهمی در مشارکت تولید سیلاب داشته‌اند و سیل خیزی آن‌ها بالاست که این تایید کننده نقشه تولید شده به روش AHP است. در مناطق پایین‌دست، اغلب زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی پرجمعیت از جمله کلان

با روی هم گذاشتن نقشه خطر سیل تولید شده به روش AHP و نقشه شاخص NDWI استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای در بعد و قبل از وقوع سیلاب، نقشه سیل‌گیر بودن حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این روی هم گذاشتن، بیانگر آن است که در نواحی پایین‌دست حوضه و در دشت خوزستان، مناطق سیل‌گیر یا به عبارتی مناطقی که بعد از وقوع سیلاب تحت آثر آن قرار گرفته‌اند و مستعد اثرات زیان‌بار سیل

نقشه تولید شده با استفاده از مدل AHP، می‌توان نتیجه گرفت که مناطق سیل‌خیز در نواحی با ارتفاع بالا و مناطق سیل‌گیر بیشتر در نواحی با ارتفاع و شیب کم قرار دارد. در نواحی سیل‌گیر، پوشش سطح زمین بیشتر اراضی کشاورزی با پوشش خوب بوده است، در حالی که نواحی سیل‌خیز دارای پوشش کمتری هستند.

همچنین، نتایج نقشه خطر وقوع سیلاب بیانگر آن است که ۲/۷۰ درصد سطح حوضه در گروه خطر خیلی کم، ۳۵/۱۰ درصد، در طبقه خطر کم، ۵۲/۲۴ درصد متوسط، ۹/۸۵ درصد سطح حوضه در طبقه زیاد و ۰/۱۱ درصد در طبقه خیلی زیاد قرار می‌گیرد. بهطور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس روش AHP، حوضه مورد مطالعه در گروه خطر متوسط قرار دارد و پیشنهاد می‌شود، محققین از روش‌های نوین دیگر از جمله روش‌های یادگیری ماشین برای تهیه نقشه خطر سیلاب در این حوضه اقدام کرده و نتایج را با روش AHP مقایسه کنند. همچنین، برای ارزیابی خطر و بررسی جزئیات بیشتر، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالاتر توصیه می‌شود.

### تشکر و قدردانی

این پژوهش، از طرح تحقیقاتی که در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام گرفت، استخراج شده است. نویسنده‌گان لازم می‌دانند که از دانشگاه مذکور که هزینه‌های این طرح را تامین کرده است، کمال تقدیر و تشکر را داشته باشند.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسنده‌گان است.

شهر اهواز وجود دارند که سیلاب خسارات زیادی به این مناطق وارد می‌کند.

### نتیجه‌گیری

در طی سال‌های اخیر، سیلاب‌های زیادی در کشور رخ داده است که موجب ایجاد خسارات جانی و مالی زیادی در استان‌های مختلف شده است. پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب، یکی از ابزار شناسایی مناطق پرخطر و تولید کننده جریان‌های سیلابی هستند که با تهیه آن و به کارگیری نتایج، می‌توان برای کاهش سیلاب در سال‌های آینده، برنامه جامعی را در نظر گرفت. در پژوهش‌های گذشته به موضوع تلفیق خروجی مدل‌های تصمیم‌گیری و نحوه توزیع مناطق سیل‌گیر در حوزه آبخیز با داده‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، کمتر مورد توجه بوده است. بنابراین، در این پژوهش نقشه خطر وقوع سیلاب بر اساس پارامترهای تاثیرگذار برای حوضه کارون با استفاده از روش AHP به دست آمد و سپس، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لنdest، نتیجه تولید شده صحت‌سنجی شد. نتایج وزن‌دهی روش AHP بیانگر آن است که پارامترهای بارندگی، مقدار شیب و طبقات ارتفاعی، بیشترین اثر و تراکم جاده و کاربری زمین، دارای کمترین اثر را در سیل‌خیزی حوضه دارا هستند. Malekian et al., (2012) نتایج این پژوهش، با تحقیقات Yahaya (2010) که بیان داشتند بارندگی سالانه، دارای بیشترین وزن و پوشش زمین دارای کمترین وزن و تاثیر در بروز سیلاب دارند، مطابقت دارد. همچنین، Karimi Dehbakari and Shabani Iraqi (2012) موثرترین عامل سیل‌خیزی حوضه شفارود بر اساس روش AHP را عامل شیب معرفی کردند. با توجه به

## منابع مورد استفاده

- Arabameri, A., Saha, S., Chen, W., Roy, J., Pradhan, B., Bui, D.T., 2020. Flash flood susceptibility modelling using functional tree and hybrid ensemble techniques. *J. Hydrol.* 587, 125007.
- Avand, M.T., Moradi, H.R., Ramazanzadeh, M., 2020. Flood susceptibility mapping using random forest machine learning and generalized bayesian linear model. *Environ. Water Eng.* 6(1), 83-95 (in Persian).
- Bahremand, A., Hatami Golmakan, P., 2020. Evaluation of the potential flooding of Ziarat Watershed by CN-based method and WetSpa hydrological model. *Irrig. Water Eng.* 11(1), 38-51 (in Persian).
- Banihabib, M.E., Laghabdoost Arani, A., 2014. Flood management options using analytical hierarchy process and evaluation and mixed criteria. *Irrig. Water Eng.* 4(2), 72-82 (in Persian).
- Black, A.R., Burns, J.C., 2002. Re-assessing the flood risk in Scotland. *Sci. Total Environ.* 294(1-3), 169-184.
- Bowen, W.M., 1990. Subjective judgements and data envelopment analysis in site selection. *Comput. Environ. Urban Syst.* 14(2), 133-144.
- Büchele, B., Kreibich, H., Kron, A., Thielen, A., Ihringer, J., Oberle, P., Merz, B., Nestmann, F., 2006. Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6(4), 485-503.
- Chowdhuri, I., Pal, S.C., Chakraborty, R., 2020. Flood susceptibility mapping by ensemble evidential belief function and binomial logistic regression model on river basin of Eastern India. *Adv. Space Res.* 65(5), 1466-1489.
- Dash, P., Sar, J., 2020. Identification and validation of potential flood hazard area using GIS-based multi-criteria analysis and satellite data-derived water index. *J. Flood Risk Manag.* 13(3), 1-14.
- Endreny, T.A., Wood, E.F., 2003. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 17(7), 699-713.
- Florinsky, I., 2016. Digital terrain analysis in soil science and geology. Elsevier, London, New York, Oxford, Paris.
- Ghanavati, E.A., Safari, A., Beheshti Javid, E., Mansourian, E., 2014. Flood risk zonation using compilation CN model and AHP via GIS, case study: Balekhlo River Basin. *Phys. Geogr. Quarterly* 7(25), 67-80 (in Persian).
- Ghodsypour, H., 2009. Analytic Hierarchy Process (AHP). Amirkabir University of Technology Publition, Tehran (in Persian).
- Halwatura, D., Najim, M.M.M., 2013. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environ Model Softw.* 46, 155-162.
- Hong, H., Tsangaratos, P., Ilia, I., Liu, J., Zhu, A.X., Chen, W., 2018. Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Sci. Total Environ.* 625, 575-588.
- Hoseini, Y., 2021. Estimation of flood discharge in Darrehrood sub-basins of Ardebil Province using basin physiographic characteristics. *Hydrogeomorphology* 7(25), 83-98 (in Persian).
- Ishizaka, A., Labib, A., 2011. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Syst. Appl.* 38(11), 14336-14345.
- Islam, A.R.M.T., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., Eibek, K.U., Pham, Q.B., Kuriqi, A., Linh, N.T.T., 2021. Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geosci. Front.* 12(3), 101075.
- Jongman, B., Hochrainer-Stigler, S., Feyen, L., Aerts, J.C., Mechler, R., Botzen, W.W., Laurens, M.B., Georg, P., Rodrigo, R., Ward, P.J., 2014. Increasing stress on disaster-risk finance due to large floods. *Nat. Clim. Change.* 4(4), 264-268.
- Karimi Dehbakari, S., Shabani Iraqi, A., 2012. Zoning of flood potential in Shafa River Basin located in Rezvanshahr City. 4<sup>th</sup> National Scientific Conference on Student Geography, 8-9 May, Tehran, Iran (in Persian).
- Koem, C., Tantanee, S., 2020. Flash flood hazard mapping based on AHP with GIS and satellite information in Kampong Speu Province, Cambodia. *Int. J. Disaster Resil. Built Environ.* 12(5), 457-470.
- Lyu, H.M., Shen, S.L., Zhou, A., Yang, J., 2019. Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 84, 31-44.
- Malekian, A., Oftadegan Khuzani, A., Ashurnejad, G., 2012. Flood hazard zoning in watershed scale using fuzzy logic, case study: Akhtar Abad Watershed. *Phys. Geog. Res. Quarterly* 44(4), 131-152 (in Persian).
- McFeeters, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.* 17(7), 1425-1432.

- Mejía-Navarro, M., Wohl, E.E., Oaks, S.D., 1994. Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology* 10(1-4), 331-354.
- Mosavi, A., Ozturk, P., Chau, K.W., 2018. Flood prediction using machine learning models: literature review. *Water* 10(11), 1-40.
- Munasinghe, D., Cohen, S., Huang, Y.F., Tsang, Y.P., Zhang, J., Fang, Z., 2018. Intercomparison of satellite remote sensing-based flood inundation mapping techniques. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 54(4), 834-846.
- Niknejad, D., Alizadeh, A., 2006. Study of flood and its control in two sub-basins leading to Lake Urmia. Technical Workshop on Coexistence with Floods. National Committee for Irrigation and Drainage of Iran, 16 August, Tehran, Iran (in Persian).
- Ogato, G.S., Bantider, A., Abebe, K., Geneletti, D., 2020. Geographic Information System (GIS)-Based multicriteria analysis of flooding hazard and risk in Ambo Town and its watershed, West shoa zone, Oromia regional state, Ethiopia. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 27, 100659.
- Patra, J.P., Kumar, R., Mani, P., 2016. Combined fluvial and pluvial flood inundation modelling for a project site. *Procedia Technology* 24, 93-100.
- 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 Agriculture* 12(1), 32-43.
- Rostami, N., Kazemi, Y., 2019. Flood hazard zoning in the Ilam City using AHP and GIS. *J. Spat. Analys. Environ. Hazards* 6(1), 179-192 (in Persian).
- Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol.* 15(3), 234-281.
- Saaty, T.L., 1980. The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource Allocation RWS publications, USA.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., 2001. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. Second ed, Springer New York, NY.
- Saeedifar, Z., Khosroshahi, M., Jalili, A., Razavizadeh, S., Dargahian, F., Zandifar, S., Lotfinasabasl, S., Gohardust, A., Teimuri, S., Fayaz, M., 2021. Analysis of the effect of climatic factors and drought on inflow and outflow from the Khuzestan Plain in the Karun Basin. *J. Water Sustain. Dev.* 8(3), 43-54 (in Persian).
- Saghafian, B., Eslami, A., Ghermezcheshmeh, B., 2007. A new method in mapping the spatial variation of flood indices in the waterway network. *Iran-Watershed Manage. Sci. Eng.* 1(2), 30-38 (in Persian).
- Schumann, A.H., Funke, R., Schultz, G.A., 2000. Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. *J. Hydrol.* 240(1-2), 45-61.
- Shafapour Tehrany, M., Pradhan, B., Jebur, M.N., 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *J. Hydrol.* 512, 332-343.
- Shafapour Tehrany, M., Pradhan, B., Jebur, M.N., 2015. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29(4), 1149-1165.
- Tong, X., Luo, X., Liu, S., Xie, H., Chao, W., Liu, S., Liu, S., Makhinov, A.N., Makhinova, A.F., Jiang, Y., 2018. An approach for flood monitoring by the combined use of Landsat 8 optical imagery and COSMO-SkyMed radar imagery. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 136, 144-153.
- Valizadeh Kamran, K., Delire Hasannia, R., Azari Amghani, K., 2019. Flood zoning and its impact on land use in the surrounding area using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) images and GIS. *J. GIS RS for Natur Res.* 10(3), 59-75 (in Persian).
- Voogd, J.H., 1982. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. PhD Thesis 1 (Research TU/e/ Graduation TU/e), Built Environment. Delftsche Uitgevers Maatschappij. <https://doi.org/10.6100/IR102252>
- Wang, Y., Mitchell, B.R., Nugranad-Marzilli, J., Bonynge, G., Zhou, Y., Shriver, G., 2009. Remote sensing of land-cover changes and landscape context of the national parks: a case study of the northeast temperate network. *Remote Sens. Environ.* 113(7), 1453-1461.
- Yahaya, S., Ahmad, N., Abdalla, R.F., 2010. Multicriteria analysis for flood vulnerable areas in Hadejia-Jama'are River Basin, Nigeria. *Eur. J. Sci. Res.* 42(1), 71-83.
- Yerramilli, S., 2012. A hybrid approach of integrating HEC-RAS and GIS towards the identification and assessment of flood risk vulnerability in the city of Jackson. *MS. J. Geogr. Inf. Syst.* 1(1), 7-16.