

پایداری، توسعه و محیط زیست، دوره سوم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، صص ۶۷-۸۶

## تعیین محدوده خطر سیلاب با استفاده از تحلیل مکانی هیدرولوژیک در GIS و تفسیر تصاویر ماهواره ای: مطالعه موردی حوضه آبریز اهرچای

مهدی قره خانی<sup>۱</sup>

حسین آقامحمدی<sup>۲</sup>

محمد حسن وحیدنیا<sup>۳\*</sup>

[mhvahidnia@srbiau.ac.ir](mailto:mhvahidnia@srbiau.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۹

### چکیده

زمینه و هدف: شناخت محدوده های سیلاب و تحلیل مکانی آن گامی موثر در پیشگیری از خسارات مالی و جانی این بلای طبیعی بوده و در نتیجه موجب پایداری محیط زیست می شود. در پژوهش حاضر به ارزیابی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای واقع در استان آذربایجان شرقی پرداخته می شود.

روش بررسی: در این راستا از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تحلیل های مکانی استفاده می شود و به منظور ایجاد انعطاف پذیری در تلفیق اطلاعات موجود، منطق فازی برای پهنه بندی خطر سیلاب بکار می رود. همچنین از روش SCS برای برآورد ارتفاع رواناب و دبی پیک بهره گرفته شد.

یافته ها: پهنه بندی خطر سیلاب با کاربست منطق فازی نشان می دهد که در حدود ۱۰ درصد سطح حوضه آبریز اهرچای در کلاس های با خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته اند. بر این اساس دشت های سیلابی و سطوح هموار پایکوه ها به دلایلی از جمله ارتفاع نسبی پایین، شیب اندک، نزدیکی به آبراهه های اصلی، تلاقی انشعابات و تراکم زهکشی بالا، مقادیر زیاد شاخص عمق دره و مقادیر پایین شاخص تحذب سطح زمین از خطر پذیری و آسیب پذیری بیشتری نسبت به سیلاب ها برخوردارند. محاسبات بیانگر تباین فضایی زیاد ارتفاع رواناب و دبی پیک در سطح زیرحوضه های اهرچای می باشد.

۱- کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (مسئول

**بحث و نتیجه گیری:** به کمک روش پیشنهادی عوامل تعیین کننده در وقوع سیلاب و همچنین نواحی پتانسیل رواناب مشخص گردید. در حالت کلی زیرحوضه های جنوبی حوضه آبریز اهرچای از پتانسیل تولید رواناب و دبی های پیک پایینی برخوردارند. برعکس، بخش قابل توجهی از زیرحوضه های شمالی حوضه مطالعاتی از پتانسیل تولید رواناب و دبی پیک بالایی برخوردارند. نیمه شمالی حوضه اهرچای منطبق بر دامنه های جنوبی رشته کوه قره داغ می باشد که ساختار زمین شناسی عمدتاً متشکل از سنگ های آذرین با نفوذپذیری پایین است. بدین ترتیب زیرحوضه های نیمه شمالی حوضه به دلیل دریافت بارش بیشتر و نفوذپذیری اندک خاک از پتانسیل تولید رواناب بالایی برخوردارند.

**واژه های کلیدی:** نقشه خطر سیلاب، روش SCS، منطق فازی، GIS، حوضه اهرچای

# **Flood Hazard Zonation Using Spatial Hydrologic Analysis in GIS and Interpretation of Satellite Images: A Case Study on Aharchay Catchment**

**Mehdi Gharakhani**<sup>1</sup>

**Hossein Aghamohammadi**<sup>2</sup>

**Mohammad H. Vahidnia**<sup>3\*</sup>

[mhvahidnia@srbiau.ac.ir](mailto:mhvahidnia@srbiau.ac.ir)

Received: August 10, 2022

Accepted: October 4, 2022

## **Abstract**

**Background and Purpose:** Recognizing the flood hazard zones and its spatial analysis is an effective step in preventing financial and human losses from this natural disaster, and as a result, it contributes to the sustainability of the environment. In the current research, the flood risk assessment in the Aharchai catchment area located in East Azarbaijan province is presented.

**Methods:** In this regard, geographic information system and spatial analysis are used, and in order to create flexibility in the integration of existing information, fuzzy logic is used for flood risk zoning. SCS method was also used to estimate runoff height and peak discharge.

**Findings:** Flood risk zoning using fuzzy logic shows that about 10% of Aharchai catchment area is in high and very high-risk classes. Based on this, the floodplains and flat surfaces of the foothills for reasons such as low relative height, low slope, proximity to the main waterways, intersection of branches and high drainage density, high values of valley depth and low values of land surface convexity are more vulnerable to floods. The findings show the high spatial variation of runoff height and peak discharge at the level of Aharchai sub-basins.

**Discussion and Conclusion:** With the help of the proposed method, the determining factors in the occurrence of floods and also the potential areas of runoff were determined. In general, the southern sub-basins of Aharchai catchment have the potential to produce runoff and low peak flows. On the contrary, a significant part of the northern sub-basins of the study basin has high runoff and peak flow production potential. The northern half of the Aharchai basin corresponds to the southern slopes of the Qara Dagh mountain range, whose geological structure is mainly composed of igneous rocks with low permeability. In this way, the sub-basins in the northern half of the basin have a high potential for producing runoff due to receiving more rainfall and low permeability of the soil.

**Keywords:** Flood susceptibility map, SCS method, fuzzy logic, GIS, Aharchay basin.

---

1- Master of Science in Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. (Corresponding Author)

### زمینه و هدف

وقوع مکرر بلایای طبیعی مانند خشکسالی ها و سیلاب ها در سراسر جهان مسائل جدی ایجاد کرده و مشخصاً زمین، اقتصاد و رفاه عمومی مردم را تحت تأثیر قرار داده است [۱]. بلایای مرتبط با رخدادهای اقلیمی بیش از ۷۰ درصد از کل خسارات اقتصادی ناشی از بلایای طبیعی را به خود اختصاص داده اند [۲]. با گرمایش جهانی، رخدادهای اقلیمی تاحد زیادی افزایش یافته و این امر یکی از مهم ترین مسائل جهانی به شمار می رود که نوع بشر با آن روبرو است [۳]. در طی چند سال گذشته سیل یکی از شایع ترین و مخرب ترین بلایای طبیعی در تمدن بشری بوده و تقریباً نیمی از مردم را با مخاطرات طبیعی خود تحت تأثیر سوء قرار داده است. تقریباً ۳۱ درصد از خسارات اقتصادی ناشی از حوادث خطرناک طبیعی را بلایای مرتبط با سیل تشکیل می دهند [۴]. از این رو، سازمان ملل متحد با عطف به آمارهای طولانی مدت از مناطق مختلف دنیا، سیلاب را در زمره جدی ترین بلایای طبیعی به شمار آورده است. آمارها حاکی از این است که تنها شمار اندکی از کشورها بطور جدی از خسارات این سانحه طبیعی ایمن هستند [۵].

سیلاب غرقاب شدن موقت اراضی است که در حالت عادی زیر آب نمی روند و علت آن می تواند سیلاب رودخانه ها، بالا آمدن سطح آب دریاها و اقیانوس ها در نوار ساحلی، شکسته شدن ناگهانی سازه های حفاظتی و کنترل سیلاب، شکسته شدن سدها و سایر موارد باشد [۶]. سازمان زمین شناسی ایالات متحده از سیلاب تعریفی بدین صورت ارائه می کند: «آب با تراز نسبتاً بالا که از کناره های طبیعی یا مصنوعی یک رودخانه یا ناحیه ساحلی سرریز می کند و زمین هایی که در شرایط عادی زیر آب قرار ندارند را غرقاب می نماید» (USGS). در تعریف دیگر می توان بیان داشت که سیلاب وضعیتی هیدرولوژیکی محسوب می گردد که طی آن دبی رودخانه بیشتر از ظرفیت عبوری جریان رودخانه می باشد. جریان، سرریز شده و گستردگی پهنه غرقاب شدگی به اندازه و بزرگی سیل وابسته است که در حالت کلی با فراوانی وقوع سیل در ارتباط است. در تمامی مناطق دنیا سیلاب های بزرگ عموماً از فراوانی وقوع کمتری برخوردارند، در حالی که

فراوانی وقوع سیلاب های کوچک تر متداول است. در واقع می توان گفت که سیل های کوچک با دبی قابل قبول یک فرایند کاملاً طبیعی و عادی مجرای رودخانه ها به شمار می رود. با این حال از آنجایی که اراضی مجاور رودخانه عموماً تحت اشغال انسان می باشند، سیلاب های بزرگ تر می توانند بسیار خطرناک باشند و یک بلای طبیعی به حساب می آیند [۷]. بدین ترتیب رخداد سیلاب جزو دینامیک ذاتی رودخانه ها می باشد و پدیده ای اجتناب ناپذیر به شمار می رود. با اینکه نمی توان از وقوع سیلاب جلوگیری کرد اما با مجموعه ای از اقدامات و راهکارها می توان خسارات و تلفات جانی و مالی ناشی از آن را به حداقل ممکن کاهش داد [۸]. در این رابطه، نظارت بر تغییرات کاربری اراضی، پهنه بندی خطر سیلاب و برنامه ریزی از جمله مهم ترین و اساسی ترین اقدامات محسوب می گردد.

سیلاب فرایندی پویا و دینامیک به شمار می رود و دارای مولفه های مکانی- فضایی می باشد. بدین ترتیب سیلاب ها غالباً در مکان ها و موقعیت های خاصی که عوامل مختلف موثر برای وقوع آن وجود دارند رخ می دهند. به عنوان مثال می توان بیان داشت که شرایط متداول وقوع سیلاب مشتمل بر مکان هایی با شیب ملایم، بارش شدید باران، خاک اشباع یافته و کانال های مسدود شده است [۹]. در این رابطه به منظور طراحی و پیاده سازی یک برنامه مدیریت موثر سیل به طیف گسترده ای از پارامترهای مشارکت کننده و حجم قابل توجهی از اطلاعات جغرافیایی از منطقه مطالعاتی مورد نیاز است [۱۰]. اطلاعات فیزیکی ضروری برای مدیریت سیلاب مشتمل بر مواردی از قبیل: نوع خاک، توپوگرافی زمین، نوع پوشش زمین و شدت فاکتورهای آغازکننده (محرک) است. سرانجام در کنار داده های فیزیکی، مدیریت موثر و دقیق مخاطرات مرتبط با سیلاب مستلزم وجود داده ها و اطلاعات اقتصادی- اجتماعی از قبیل محل سکونت، ساختار جمعیتی، اطلاعات سرشماری و نیز اطلاعات مرتبط با کاربری اراضی و محدودیت های زیست محیطی می باشد [۱۱]. در این زمینه تکنیک های نوین سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS) با تجزیه و تحلیل داده های مرتبط با

پهنه‌بندی سیل‌خیزی در منطقه نشان می‌دهد که بیشتر مساحت حوضه (حدود ۶۵/۶ درصد) دارای پتانسیل سیل‌خیزی کم، خیلی کم و متوسط می‌باشد. فتحعلی زاده و همکاران [۱۸] به بررسی علل وقوع سیلاب و مخاطرات آن در حوضه آبریز زوزچای پرداختند. در این تحقیق برای ارزیابی سیل‌خیزی حوضه مطالعاتی و شبیه‌سازی بارش- رواناب از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و اکستنشن HEC-GeoHMS در بستر نرم‌افزار ArcGIS بهره گرفته شد. برای تهیه نقشه خطر سیلاب حوضه مطالعاتی ۱۰ متغیر موثر بر وقوع سیلاب با کاربست منطق فازی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب شدند. نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای رویکرد مورد استفاده در شناسایی پهنه‌های سیل‌خیز و سیل‌گیر می‌باشد. فرناندز و لوتز [۱۹] با کاربست سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به پهنه‌بندی مخاطره سیلاب شهری در استان توکومان آرژانتین پرداختند. نقشه نهایی حاصل از ترکیب لایه‌های موضوعی مذکور بیانگر این است که خطرپذیرترین پهنه‌ها منطبق بر اراضی هموار و پست با شیب کمتر از ۰/۶ درصد و وجود کانال‌های با ساماندهی ضعیف می‌باشد. تیلانگاتوانی و همکاران [۲۰]، با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) توانستند پهنه‌های در معرض ریسک سیلاب در استان پاپاناسام در شمال هند را نقشه برداری و پهنه‌بندی کنند. پهنه‌های پرخطر منطبق بر اراضی هموار و کم‌شیب منطقه می‌باشد. ناندالال و راتنایاکه [۲۱] در تحقیقی به ارزیابی کارایی رویکرد فازی به منظور بررسی ریسک سیلاب در سطح حوضه آبریز رودخانه کالو گانگا در سریلانکا پرداختند. گستره سیلاب برای بارندگی با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله با استفاده از سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی مرکز مهندسی (HEC-HMS) و مدل‌های مبتنی بر سیستم تجزیه و تحلیل رودخانه (HEC-River) تعیین شد. راش‌نیا [۲۲] به ارزیابی آسیب‌پذیری نسبت به سیلاب در مورلندسیتی واقع در منطقه ملیورن 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. شارما

سیلاب و شبیه‌سازی جریان برای دوره‌های بازگشت مختلف می‌تواند نقش بارزی در کاهش مخاطرات سیلاب ایفا نماید [۱۲]. این داده‌ها و تکنیک‌های جدید جغرافیایی نقش عمده‌ای در کاهش خسارت‌های جانی و مالی مردم ساکن در حاشیه‌دشت‌های سیلابی و نیز کاهش هزینه‌های جامعه دارد [۱۳]. در پژوهش حاضر به پهنه‌بندی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای با استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و دورسنجی (RS) پرداخته می‌شود. حوضه مذکور یکی از بزرگ‌ترین حوضه‌های آبریز شمال غرب کشور محسوب می‌شود و سکونتگاه‌های متعددی در محدوده آن مکان‌گزینی شده‌اند. بدین ترتیب ارزیابی خطر سیلاب در محدوده آن ضروری می‌نماید.

#### پیشینه و مبانی نظری تحقیق

در رابطه با ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب تحقیقات متعددی توسط محققان داخلی و خارجی انجام گرفته است که می‌توان به مواردی بدین شرح اشاره داشت: روستایی و همکاران [۱۴] در پژوهشی به تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب در حوضه آبخیز نکارود با استفاده از مدل SCS-CN و GIS/RS اقدام نمودند. این تحقیق نشان داد که بکارگیری توأمان از تکنولوژی سنجش از دور و GIS و با استفاده از مدل SCS-CN می‌تواند در تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب حوضه‌های آبخیز مفید باشد. محمودزاده و باکویی [۱۵] به پهنه‌بندی سیلاب در شهر ساری با استفاده از تحلیل فازی پرداختند. نقشه پهنه‌بندی خطر سیل نشان می‌دهد که ۲۴/۱۲ درصد از محدوده نقشه در پهنه خطر خیلی زیاد و ۳۷/۰۵ درصد در پهنه خطر خیلی کم قرار گرفته‌اند. مددی و همکاران [۱۶] به پهنه‌بندی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز خیاوچای مشگین‌شهر با استفاده از تلفیق روش‌های SCS-CN و WLC پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که عوامل ارتفاع، لیتولوژی، شیب و بارش به ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۷۳، ۰/۱۶۳، ۰/۱۳۹ و ۰/۱۳۳، بیشترین تأثیر را بر ایجاد سیل در حوضه مطالعاتی دارند. اسفندیاری و همکاران [۱۷] به پهنه‌بندی سیلاب حوضه آبریز آجرلوچای با استفاده از روش L-THIA و منطق فازی پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از

داده های ایستگاه سینوپتیک اهر و همچنین ایستگاه های باران سنجی اهر، تازه کند، وردین، اولیق، ورزقان و سد ستارخان. در راستای آماده سازی لایه های موضوعی و تجزیه و تحلیل های مکانی از نرم افزارهای ENVI، SAGA GIS، TerrSet و ArcGIS به همراه اکستنشن های ArcHydro و HEC-GeoHMS بهره گرفته شد. روش شناسی پژوهش حاضر را می توان به سه بخش اصلی ارزیابی خطر سیل گیری، شاخص های سنجش از دوری و ارزیابی سیل خیزی یا برآورد تولید رواناب تقسیم بندی نمود.

#### پهنه بندی خطر سیلاب با کاربست منطق فازی

به منظور ارزیابی مکانی و پهنه بندی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای از رویکردی هم گذاری فازی لایه های موضوعی موثر بر پخش سیلاب بهره گرفته شد. ریسک بلاای مرتبط با سیلاب با استفاده از روش های فازی مورد ارزیابی قرار گرفته و بسیار مفید ارزیابی شده اند [۲۶]. نظریه مجموعه های فازی بر منطق فازی استوار بوده و اساساً به منظور اقدام در شرایط ابهام ارائه گردیده است. هر فرد همزمان در مجموعه های مختلف ولی به درجات متفاوت عضویت دارد. درجات عضویت مقادیر بین صفر و یک و نیز خود این دو حد را می پذیرد. این نظریه در برابر منطق کلاسیک مطرح شده است که هر چیز را بر اساس سیستم دودویی نشان می دهد (درست یا غلط، صفر یا یک، سیاه یا سفید). روی هم-گذاری فازی لایه های موضوعی و تهیه نقشه خطر سیلاب حوضه آبریز اهرچای شامل سه مرحله اساسی است: آماده سازی و ارزیابی مکانی- فضایی لایه های موضوعی موثر بر خطر سیلاب؛ فازی سازی لایه های موضوعی موثر بر خطر سیلاب با استفاده از توابع مختلف عضویت فازی؛ روی هم گذاری فازی لایه های فازی شده با استفاده از عملگرهای فازی. به منظور روی هم گذاری و ترکیب لایه های موضوعی فازی پنج اپراتور موسوم به «و» فازی، «یا» فازی، ضرب جبری فازی، جمع جبری فازی و گامای فازی به کار گرفته می شوند [۲۷].

و همکاران [۲۳] با استفاده از تکنیک های مبتنی بر تصمیم گیری چندمعیاره به ارزیابی خطر سیلاب در حوضه رودخانه کوپیلی واقع در آسام هندوستان پرداختند. آنها در این تحقیق داده هایی مشتمل بر تصاویر ماهواره ای چندزمانه، اطلاعات اجتماعی- اقتصادی (مبتنی بر پنج متغیر سرشماری)، زیرساخت ها (شبکه ارتباطی) و کاربری اراضی را مورد استفاده قرار دادند. نتایج این تحقیق بیانگر کارایی زیاد رویکرد مورد استفاده در ارزیابی خطر سیلاب می باشد. دنیاری و همکاران [۲۴] پهنه بندی خطر سیل را با تلفیق مدل هیدرولیکی و نرم افزار ArcGIS از طریق الحاقی HEC-Geo RAS در طول ۳۳ کیلومتر از رودخانه کارون انجام دادند. آن ها به این روش نقشه دوره های مختلف بازگشت آب را بدست آورده و با سیل اخیر مقایسه نمودند. رضایی و وحیدنیا [۲۵] از تلفیق مدلسازی عامل مبنا با منطق فازی برای پیش بینی مناطق پرخطر سیل استفاده کردند. آن ها نشان دادند روش های مبتنی بر هوش مصنوعی سریعتر ما را به یک ارزیابی از منطقه می رساند.

#### روش بررسی

در این تحقیق مهم ترین متغیرهای مورد استفاده برای ارزیابی مکانی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای شامل: توزیع ارتفاعات منطقه، شیب سطح زمین، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، تراکم زهکشی، گروه های هیدرولوژیک خاک، شاخص عمق دره، تحدب سطح زمین، شاخص رطوبت توپوگرافیک، سازندهای زمین شناسی، فاصله از آبراهه ها، توزیع بارش و برخی متغیرهای مورفومتریکی می باشند. در این چارچوب از داده هایی مشتمل بر نقشه های توپوگرافی مقیاس ۱:۵۰۰۰۰، نقشه های زمین شناسی مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (برگه های اهر، ورزقان و خوجا)، تصاویر مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه با قدرت تفکیک مکانی ۲۷ متر مربوط به ماهواره Aster، تصاویر ماهواره ای Sentinel با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر مربوط به اوایل تابستان ۱۳۹۹، داده های ایستگاه های هیدرومتری منطقه و

$$\mu_{\text{combination}} = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (۱)$$

$$\mu_{\text{combination}} = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (۲)$$

$$\mu_{\text{combination}} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (3)$$

$$\mu_{\text{combination}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (4)$$

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{Fuzzy algebraic sum})^\lambda * (\text{Fuzzy algebraic product})^{1-\lambda} \quad (5)$$

$$Q_p = \frac{0.0208 \times A \times Q_d}{T_p} \quad (10)$$

که در آن QP دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)، A مساحت حوضه (هکتار)، Qd ارتفاع رواناب (سانتیمتر) و Tp زمان رسیدن دبی به مرحله اوج (برحسب ساعت) که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_p = 0.6 T_c + \sqrt{T_c} \quad (11)$$

در رابطه مذکور TC زمان تمرکز است.

#### معرفی منطقه مطالعاتی

حوضه مطالعاتی در شمال استان آذربایجان شرقی و محدوده سیاسی- اداری شهرستان های اهر و ورزقان قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه از نظر موقعیت مطلق در مختصات جغرافیایی ۰۲° ۲۰' ۴۶" تا ۰۲° ۳۸' ۴۰" عرض شمالی واقع شده است. مساحت حوضه آبریز اهرچای بالغ بر ۲۱۹۵ کیلومتر مربع و محیط آن در حدود ۳۷۴ کیلومتر می باشد. حوضه مطالعاتی جزئی از سیستم زهکشی رودخانه ارس (دریای خزر) محسوب می شود و با روند عمومی غربی- شرقی بخش هایی از رشته کوه های قره داغ و قوشاداغ را زهکشی می کند. نیمه شمالی حوضه مطالعاتی منطبق بر رشته کوه های قره داغ و نیمه جنوبی آن منطبق بر رشته کوه های قوشاداغ می باشد. قسمت های میانی حوضه نیز شامل چاله ساختمانی اهر است. از مهم ترین سکونتگاه های واقع در محدوده حوضه اهرچای می توان به شهرهای اهر و ورزقان و ده ها روستای بزرگ و کوچک اشاره نمود. رودخانه اهرچای آبراهه اصلی حوضه آبریز مطالعاتی محسوب می گردد که در محدوده مطالعاتی از غرب به شرق جریان می یابد و در مسیر خود انشعابات متعددی را دریافت می کند. میانگین دبی سالانه رودخانه اهرچای (در محدوده ایستگاه تازه کند) بالغ بر ۳/۴ مترمکعب در ثانیه می باشد.

در روابط فوق،  $\mu_i$  تابع عضویت فازی برای لایه موضوعی  $i$  ام و  $\lambda$  یک پارامتر انتخابی در دامنه (۰ و ۱) می باشد.

#### شاخص های سنجش از دوری

از شاخص TWI به طور گسترده ای برای توصیف توزیع فضایی و گستره پهنه های اشباع و سطوح منبع متغیر برای تولید رواناب استفاده شده است. شاخص رطوبت توپوگرافیک از طریق رابطه زیر محاسبه می شود [۲۸ و ۲۹]:

$$TWI = \ln \frac{(A_s \times \text{Pixel Area})}{\tan((S \times \pi)/180)} \quad (6)$$

که در آن  $A_s$  مساحت زهکشی دامنه فوقانی در واحد عرض خط کانتور (مترمربع/متر) و  $S$  شیب به درجه است. همچنین شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) جزو متداول ترین و بهترین شاخص ها برای ارزیابی رشد گیاه و تراکم توزیع فضایی پوشش گیاهی محسوب می شود که از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۰]:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (7)$$

در رابطه فوق NIR و RED به ترتیب نشان دهنده بازتاب ها در باند مادون قرمز نزدیک و باند قرمز می باشند. مقادیر NDVI در دامنه بین -۱ تا +۱ قرار می گیرد.

#### ارزیابی سیل خیزی با استفاده از روش SCS

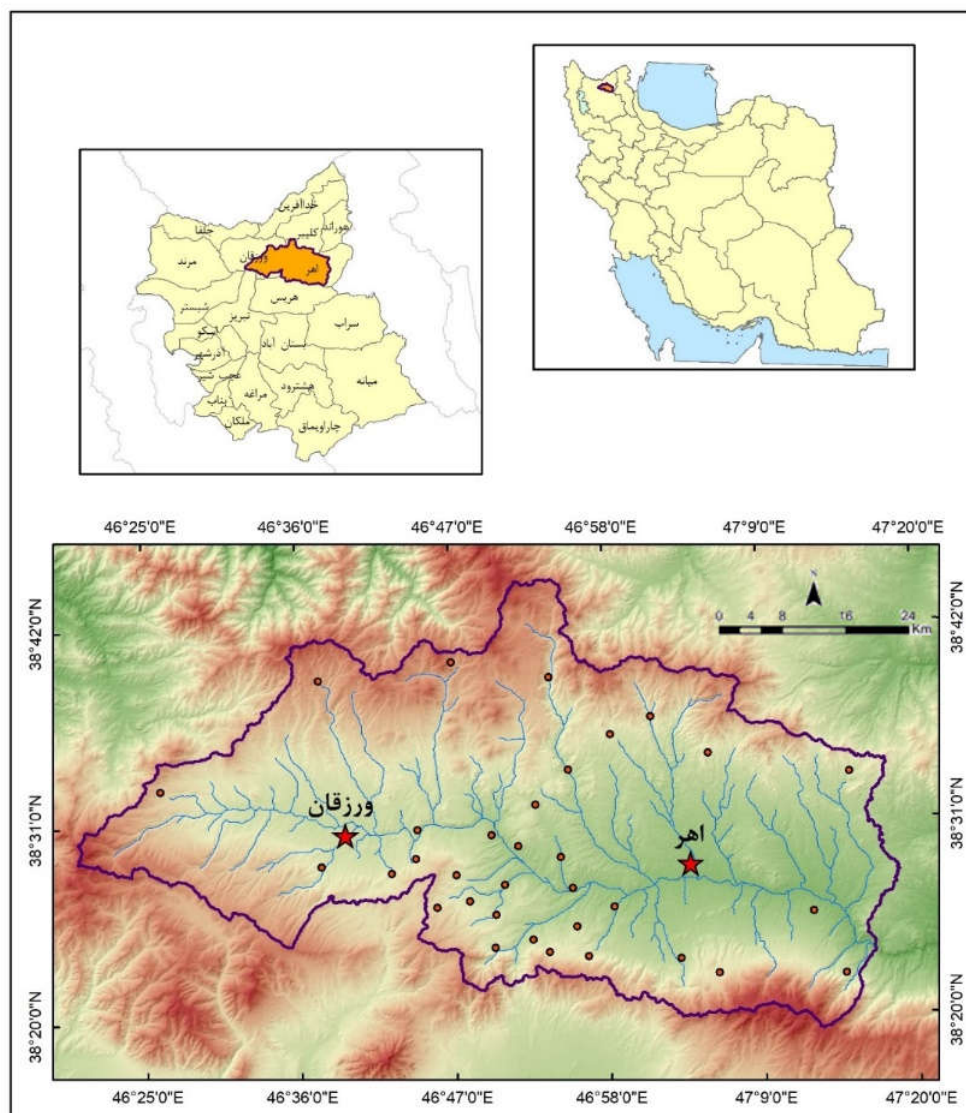
در این روش ارتفاع رواناب برای شرایط کلی به صورت زیر است [۳۱]:

$$Q_d = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (8)$$

در رابطه فوق P مقدار بارش برحسب سانتیمتر و S حداکثر یا پتانسیل نگهداشت بارش روی زمین برحسب سانتیمتر است. مقدار S بستگی به شماره ی منحنی CN داشته و مقدار آن در سیستم متریک برابر است با:

$$CN = \frac{2540}{25.4 + S} \quad (9)$$

در این صورت حداکثر دبی لحظه ای سیل برابر خواهد بود با:



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز اهرچای در شمال غرب کشور

Figure 1- Geographical location of Aharchai watershed in the northwest of the country

اساس متوسط ارتفاع منطقه بالغ بر ۱۸۱۶ متر از سطح آزاد دریاها، حداکثر ارتفاع در حدود ۳۱۲۶ متر و حداقل ارتفاع در حدود ۱۱۶۹ متر از سطح آزاد دریاها است. درجه ناهمواری بالا و وجود حصارهای کوهستانی در شمال و جنوب حوزه باعث هدایت رواناب ها به قسمت های کم ارتفاع مرکزی حوزه می گردد. با توجه به استقرار اغلب سکونتگاه های منطقه در قسمت های کم ارتفاع مرکزی حوزه و تمرکز فعالیت های کشاورزی و سایر فعالیت های انسانی در این بخش از حوزه فرایندهای

یافته ها

#### ارزیابی مکانی خطر سیلاب در سطح حوزه آبریز اهرچای

در این بخش از تحقیق به پهنه بندی خطر سیلاب در سطح حوزه آبریز اهرچای به شرح مراحل زیر پرداخته می شود. در ادامه توضیحات مربوط به نقشه های معیار به دست آمده در GIS و بعضاً با استفاده از تصاویر ماهواره ای ارائه می گردد.

ارتفاع: به منظور ارزیابی ارتفاع در سطح حوزه آبریز اهرچای از مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه استفاده به عمل آمد. بر این



در این رابطه کلاس با مقادیر بیشتر از ۱۵ از اهمیت بیشتری برخوردار است. سطوح مذکور عمدتاً منطبق بر قسمت های مرکزی بستر دره های حوضه مطالعاتی می باشند که به دلیل عبور آبراهه ها و تمرکز رواناب ها همیشه در معرض سیلاب های رودخانه ای می باشند.

تراکم زهکشی: پهنه های با مقادیر بالای تراکم زهکشی در حالت تطبیقی از خطرپذیری بیشتری نسبت به سیلاب برخوردارند. مقادیر تراکم زهکشی در سطح حوضه آبریز اهرچای از حداقل ۰/۰۵ تا حداکثر ۲/۸۵ متغیر است. در حالت کلی می توان بیان داشت که در جهت پایین دست ارتفاعات بر میزان تراکم زهکشی افزوده می شود. از سوی دیگر در جهت پایین دست میزان انشعابات و در نتیجه میزان دبی آبراهه ها افزایش پیدا می کند که به نوبه خود باعث افزایش احتمال وقوع سیلاب می گردد.

فاصله از رودخانه: پرواضح است که نواحی مجاور رودخانه ها بیشتر تحت تاثیر سیلاب های رودخانه ای قرار می گیرند و با دور شدن از بستر رودخانه ها خطر سیلاب کاهش پیدا می کند. در پژوهش حاضر در تهیه لایه فاصله از رودخانه تنها آبراهه های با رده بالاتر از ۳ مورد توجه قرار گرفتند. از طریق تقطیع لایه فاصله از آبراهه و لایه سکونتگاه های موجود در محدوده حوضه مطالعاتی می توان موقعیت استقرار سکونتگاه های منطقه نسبت به آبراهه ها را مورد ارزیابی قرار داد. بر این اساس حدود ۲۱ درصد از مساحت کاربری های مسکونی (حدود ۶۰۸ هکتار) در فاصله صفر تا ۲۰۰ متری از رودخانه های حوضه استقرار یافته اند. پهنه های مذکور جزو خطرپذیرترین و آسیب پذیرترین پهنه های حوضه مطالعاتی نسبت به رخداد سیلاب می باشند. پهنه های مذکور در اکثر موارد منطبق بر دشت های سیلابی منطقه بوده که همیشه در معرض سیلاب های رودخانه ای قرار دارند.

کاربری اراضی: کاربری اراضی به همراه پوشش گیاهی نقش قابل توجهی در نفوذپذیری و تولید رواناب برعهده دارند و بدین ترتیب وقوع سیلاب در سطح حوضه های آبریز را تحت تاثیر قرار می دهند. برای تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز اهرچای از تصاویر ماهواره ای سنتینل (مربوط به اوایل تابستان ۱۳۹۹) استفاده شد. کاربری اراضی بایر و مسکونی به دلیل افزایش تولید

مرتبط با سیلاب رودخانه ای می توانند تبدیل به مخاطراتی جدی شوند.

شیب: در اراضی هموار و کم شیب خطر پخش سیلاب و غرقاب شدن اراضی افزایش پیدا می کند و در نتیجه رابطه ای معکوس بین شیب و مخاطره سیلاب برقرار است. بر این اساس، اراضی با شیب های کمتر از ۵ درصد از بیشترین میزان خطرپذیری نسبت به سیلاب برخوردارند. این اراضی بالغ بر ۱۳ درصد از سطح حوضه آبریز اهرچای را پوشش می دهند که عمدتاً منطبق بر دشت های سیلابی و اراضی هموار پایکوه های منطقه می باشند. این اراضی غالباً در معرض سیلاب های رودخانه ای یا سیلاب های ورقه ای قرار دارند.

تحذب سطح زمین: شاخص تحذب سطح زمین توسط ایوآهاسی و پیکه [۳۲] به منظور طبقه بندی عوارض زمین ارائه گردیده است. شاخص مذکور با استفاده از تصویر DEM منطقه در بستر نرم افزار SAGA GIS قابل محاسبه است. رابطه ای معکوس بین مقادیر این شاخص و خطر سیلاب برقرار است. در این رابطه، پهنه های با مقادیر شاخص تحذب ۱/۲ تا ۲۸/۳ در حدود ۱/۶ درصد از سطح حوضه آبریز اهرچای را شامل می شوند. در واقع این پهنه ها سطوح مقعر حوضه بوده و عمدتاً منطبق بر بستر دره اصلی حوضه مطالعاتی می باشند. به دلیل مورفولوژی مقعر، بخش عمده ای از رواناب های حوضه به سمت این پهنه ها سرازیر شده و در واقع محل انباشت و تجمع رواناب ها محسوب می شوند. بدین ترتیب سطوح مذکور خطرپذیرترین پهنه های حوضه آبریز مطالعاتی نسبت به پدیده سیلاب می باشند.

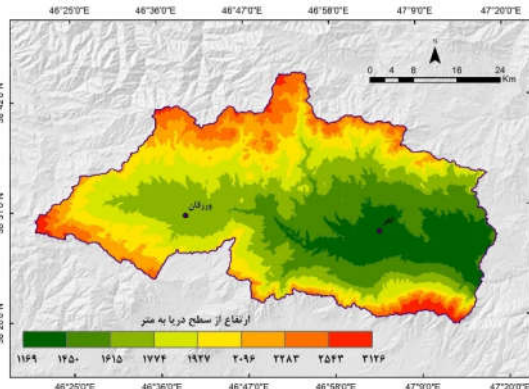
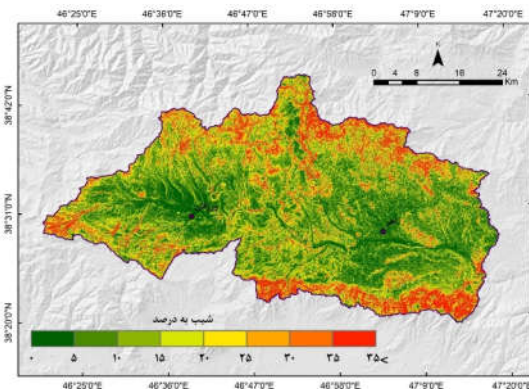
عمق دره: مقادیر بیشتر این شاخص دلالت بر تمرکز و دریافت رواناب های بیشتر دارد که باعث افزایش خطر سیلاب در سطح حوضه می شود. در این رابطه، پهنه های با مقادیر شاخص عمق دره بیشتر از ۲۴۰ متر بالغ بر ۱۲/۳ درصد از سطح حوضه آبریز اهرچای را به خود اختصاص داده اند. این پهنه ها عمدتاً در پایین دست حوضه پراکنده شده اند و در حالت تطبیقی از بالاترین میزان خطرپذیری نسبت به سیلاب های رودخانه ای برخوردارند. شاخص رطوبت توپوگرافیک: رابطه ای مستقیم بین مقادیر شاخص TWI و خطرپذیری سیلاب در سطح حوضه برقرار است.

پوشش بوده و در نتیجه، نفوذپذیری پایین و برعکس تولید رواناب بیشتر می باشد. بدین ترتیب از نظر تولید رواناب و خطر سیلاب حائز اهمیت زیادی هستند.

لیتولوژی: ظرفیت نفوذ در سطح حوضه به شدت تحت تاثیر نوع سنگ و پوشش خاک می باشد. خاک یا سنگ متخلخل و با نفوذپذیری بالا شرایط مساعدی را برای نفوذ آب به درون زمین مهیا می سازد و تخلیه آب به آبراهه اصلی را به تاخیر انداخته و بدین ترتیب رواناب سطحی را کاهش می دهد. این در حالی است که حوضه های با سنگ بستر یا خاک نسبتاً غیر قابل نفوذ باعث ایجاد رواناب قابل توجهی می شوند [۳۳]. حدود ۴۰ درصد سطح حوضه آبریز اهرچای توسط سازندهای آذرین (نفوذی و آتشفشانی) و دگرگونی پوشیده شده است که از نفوذپذیری بسیار پایینی برخوردارند. اغلب سازندهای آذرین حوضه مطالعاتی در نیمه شمالی حوضه و منطبق بر رشته کوه های قره داغ می باشند که از بارش بیشتری نیز برخوردارند. سازندهای با نفوذپذیری کم تا متوسط عمدتاً شامل سازندهای رسوبی حوضه می باشند و بخش عمده ای از سطح حوضه را پوشش می دهند. این سازندها مخلوطی از انواع مارن ها، سنگ های آهکی، ماسه سنگ و کنگلومرا می باشند. سازندهای با نفوذپذیری زیاد مشتمل بر آبرفت های جدید کواترنری می باشد که از گستردگی اندکی در سطح حوضه برخوردارند. سازندهای مذکور تنها در حدود ۲/۷ درصد از مساحت حوضه مطالعاتی را شامل می شوند که به طور عمده در بستر دره اصلی اهرچای پراکنده شده اند (شکل ۲).

رواناب باعث افزایش خطر سیلاب در سطح حوضه مطالعاتی می شوند. اراضی بایر یا با پوشش گیاهی ضعیف با مساحتی بالغ بر ۳۱۴ کیلومترمربع حدود ۱۴ درصد از سطح حوضه را به خود اختصاص داده اند. این نوع کاربری عمدتاً در قسمت های پایین دست حوضه پراکنده شده اند. مساحت کاربری مسکونی در منطقه مطالعاتی بالغ بر ۲۹ کیلومترمربع می باشد که حدود ۱/۳ درصد از سطح حوضه را شامل می شود. این نوع کاربری- مخصوصاً پهنه های شهری- به دلیل عدم نفوذپذیری باعث افزایش تولید رواناب و بدین ترتیب افزایش خطر سیلاب می گردد.

پوشش گیاهی: به منظور محاسبه تراکم پوشش گیاهی در سطح حوضه آبریز اهرچای شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) به کار بسته شد. در این چارچوب از تصاویر ماهواره ای Sentinel2 (مربوط به اوایل تابستان ۱۳۹۹) استفاده به عمل آمد. شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) جزو متداول ترین و بهترین شاخص ها برای ارزیابی رشد گیاه و تراکم توزیع فضایی پوشش گیاهی محسوب می شود. تنها پوشش گیاهی فعال دارای NDVI مثبت می باشد که مقادیر آن معمولاً در دامنه بین ۰/۱ و ۰/۶ قرار می گیرد. بالغ بر ۱۸ درصد از منطقه مطالعاتی دارای پوشش گیاهی بسیار ضعیف تا بایر می باشند. مقادیر بسیار پایین این شاخص (کمتر از ۰/۱۸) عمدتاً در دامنه های جنوبی رشته کوه قره داغ در نیمه پایینی حوضه اهرچای مشاهده می گردد. در واقع، در این پهنه ها سطح زمین بدون





**فازی سازی لایه های موضوعی**

در پژوهش حاضر فرایند فازی سازی لایه های موضوعی موثر بر خطر سیلاب سه هدف اساسی را دنبال می کند: همسان نمودن واحدهای لایه های موضوعی، ارزش گذاری مجدد لایه های موضوعی و کاهش عدم قطعیت های مرتبط با کلاسه بندی لایه ها. بدین منظور از چندین تابع فازی ساز به منظور بی بعد کردن و ارزش گذاری مجدد لایه های موضوعی استفاده به عمل آمد. در تعدادی از لایه های موضوعی مقادیر بیشتر باعث افزایش خطر سیلاب می گردد. لایه های موضوعی عمق دره، رطوبت توپوگرافیک و تراکم زهکشی در این گروه قرار می گیرند. برای فازی سازی لایه های مذکور می توان از تابع خطی افزایشی یا بزرگ فازی استفاده نمود. در تعدادی دیگر از لایه های موضوعی مقادیر کمتر باعث افزایش خطر سیلاب می گردد. لایه های موضوعی ارتفاع، شیب، تحذب سطح زمین، فاصله از آبراهه و پوشش گیاهی در این گروه جای می گیرند. در واقع، رابطه ای معکوس بین مقادیر لایه های مذکور و خطر سیلاب برقرار است. بدین ترتیب مقادیر کمتر لایه های مذکور به عنوان نقاط ایده آل مجموعه فازی (مقدار عددی ۱) تعریف گردیده و با افزایش مقادیر از میزان عضویت فازی مجموعه کاسته می شود. دو تابع فازی خطی کاهش و نزدیک فازی می توانند برای فازی سازی لایه های مذکور مورد استفاده قرار گیرند. دو لایه موضوعی کاربری اراضی و لیتولوژی جزو لایه های کیفی پژوهش حاضر به شمار می رود. بدین ترتیب ابتدا لازم است که با توجه به هدف تحقیق (پهنه بندی خطر سیلاب) نسبت به کمی سازی لایه های موضوعی مذکور اقدام گردد و سپس فرایند فازی سازی طی شود.

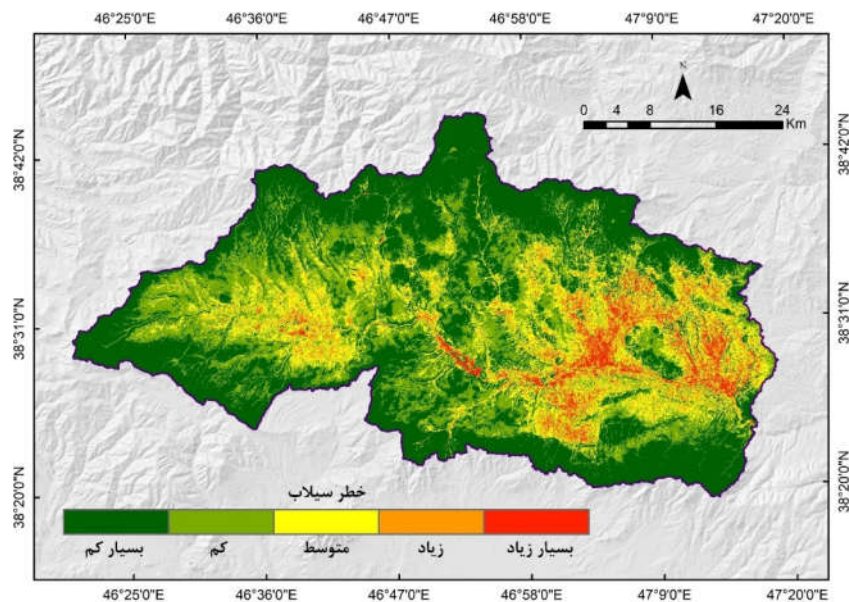
**روی هم گذاری فازی لایه های موضوعی و تهیه نقشه خطر****سیلاب**

در ادامه می بایست لایه های ۱۰ گانه مذکور با کاربری ابراهای مختلف فازی ترکیب شوند. در ادامه توضیحاتی در این رابطه ارائه می شود.

با کاربری عملگر ابراهای «و» در بین تمامی لایه های موضوعی

مورد استفاده برای پهنه بندی خطر سیلاب حداقل ارزش هر سلول انتخاب شده و در لایه نهایی خطر سیلاب اعمال می شود. بدین ترتیب در لایه نهایی پهنه بندی خطر سیلاب تقریباً تمامی سطح حوضه آبریز مطالعاتی در کلاس با خطرپذیری بسیار کم واقع می شود. نتایج حاصل از اعمال ابراهای ضرب فازی نیز تا حد زیادی مشابه ابراهای مذکور است. در واقع با کاربری ابراهای ضرب فازی تمامی ۱۰ لایه مورد استفاده برای پهنه بندی خطر سیلاب به یکدیگر ضرب می شوند و بدین ترتیب ارزش های پیکسل های لایه نهایی خطر سیلاب به مقدار عددی صفر میل می کند. بدین ترتیب دو عملگر «و» فازی و «ضرب» فازی در تهیه نقشه پهنه بندی خطر سیلاب حساسیت بسیار بالایی را اعمال می کنند و در نتیجه، نتایج مطلوبی را به همراه ندارند. عملکرد دو ابراهای «یا» فازی و جمع فازی برعکس دو ابراهای فوق الذکر است. عملگر «یا» فازی (اجتماع)، حداکثر درجه عضویت فازی اعضا را برداشت می کند. در جمع جبری فازی لایه های موثر بر پهنه بندی خطر سیلاب نیز مقادیر سلول ها در لایه نهایی به سمت مقدار عددی ۱ میل می نماید. بدین ترتیب با کاربری ابراهای «یا» فازی و جمع جبری فازی تقریباً کل محدوده حوضه آبریز اهرچای در کلاس با خطرپذیری بسیار زیاد سیلاب قرار می گیرد. بنابراین، ابراهای مذکور نیز از دقت پایینی در ترکیب لایه های موضوعی و پهنه بندی خطر سیلاب برخوردارند. ابراهای گامای فازی ترکیبی از ابراهای جمع جبری فازی و ضرب فازی به شمار می رود. ابراهای مذکور در بسیاری از تحلیل های مرتبط با مکان یابی، پهنه بندی و ارزیابی تناسب اراضی به نحو مطلوبی مورد استفاده قرار گرفته است و از کارایی بالایی نیز برخوردار می باشد. در پژوهش حاضر نیز پهنه بندی خطر سیلاب با استفاده از ابراهای گامای فازی نتایج مطلوبی را به همراه داشت و بدین ترتیب مبنای تهیه نقشه و ارزیابی مکانی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای قرار گرفت. در شکل (۳) نقشه پهنه بندی خطر سیلاب حوضه آبریز اهرچای با کاربری گامای فازی ارائه شده است.





شکل ۳- پهنه‌بندی خطر سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای با کاربست منطق فازی

Figure 3- Flood risk zoning in Ahrchai catchment area using fuzzy logic

پهنه‌های با خطر سیلاب زیاد و بسیار زیاد به ترتیب بالغ بر ۷ و ۳ درصد از سطح حوضه آبریز اهرچای را شامل می‌شوند. مقادیر عضویت فازی در کلاس خطر زیاد بین ۰/۲۸ تا ۰/۳۶ و در کلاس خطر بسیار زیاد بیشتر از ۰/۳۶ می‌باشد. پهنه‌های مذکور عمدتاً در قسمت‌های پایین دست حوضه آبریز مطالعاتی پراکنده شده‌اند. در این پهنه‌ها شمار زیادی از فاکتورهای موثر بر خطر سیلاب از شرایط مستعدی برای بروز سیلاب برخوردارند. در این رابطه می‌توان به مواردی از قبیل شیب پایین، وجود اراضی بایر یا با پوشش گیاهی ضعیف، وجود انشعابات و تراکم زهکشی بالا، تلاقی آبراه‌های متعدد و هدایت رواناب‌های قسمت‌های میانی و فوقانی حوضه به سمت سطوح مذکور، وجود سازندهای زمین‌شناسی با نفوذپذیری اندک، وجود سکونتگاه‌های متعدد، مقادیر پایین شاخص تحدب سطح زمین و مقادیر بالای شاخص عمق دره اشاره نمود. بدین ترتیب پهنه‌های مذکور هم توسط سیلاب‌های رودخانه‌ای (مخصوصاً رودخانه اهرچای) و هم توسط سیلاب‌های صفحه‌ای تحت تاثیر قرار می‌گیرند. به این گونه سیلاب‌ها می‌توان سیلاب‌های ناشی از مسیل‌ها را نیز افزود که رخداد آنها ناشی از رگبارهای شدید و کوتاه مدت می‌باشد.

نتایج حاصل از پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از گامای فازی را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

بخش عمده‌ای از مساحت حوضه آبریز اهرچای در کلاس خطر سیلاب کم تا بسیار کم قرار می‌گیرد. در این رابطه، بالغ بر ۲۸ درصد مساحت حوضه در کلاس خطر کم و ۴۵ درصد آن در کلاس با خطر بسیار کم واقع شده است. از دلایل اساسی این امر می‌توان به درجه ناهمواری بالا، شیب زیاد، تحدب بالا، مقادیر پایین شاخص عمق دره و ... اشاره نمود. در واقع، سطوح ناهموار و پرشیب حوضه مطالعاتی به دلیل عدم امکان پخش سیلاب و محدود بودن سکونتگاه‌های انسانی از خطرپذیری پایینی نسبت به سیلاب برخوردارند.

پهنه‌های با خطر سیلاب متوسط بالغ بر ۱۷ درصد از سطح حوضه آبریز اهرچای را به خود اختصاص داده‌اند. پیکسل‌های با مقادیر عضویت فازی بین ۰/۲۰ تا ۰/۲۸ در این گروه جای گرفتند. این پهنه‌ها عمدتاً منطبق بر پایکوه‌ها می‌باشند و توسط سیلاب‌های ورقه‌ای (شیت‌فلادها) و همچنین سیلاب‌های رودخانه‌ای با دوره بازگشت بالا (بیشتر از ۲۵ سال) تحت تاثیر قرار می‌گیرند.

بارش باران علت اساسی وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای می باشد. در پژوهش حاضر به منظور محاسبه ارتفاع رواناب و دبی های پیک در سطح حوضه آبریز مطالعاتی از داده های حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه سینوپتیک اهر استفاده به عمل آمد. این نوع بارش ها از پتانسیل بالایی برای ایجاد سیلاب برخوردارند و به همین دلیل در پژوهش حاضر مبنای محاسبات قرار گرفتند. برای محاسبه حداکثر بارش ۲۴ ساعته به ازای دوره های بازگشت مختلف، چندین تابع توزیع در نرم افزار Smada مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت تابع لوگ پیرسون تیپ ۳ به عنوان بهترین توزیع انتخاب شده و مبنای محاسبات قرار گرفت. در جدول (۱) مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه سینوپتیک اهر برای دوره های بازگشت مختلف ارائه شده است.

### برآورد تولید رواناب در سطح حوضه آبریز اهرچای با استفاده از روش SCS

در پژوهش حاضر به منظور برآورد تولید رواناب و دبی پیک زیرحوضه های اهرچای از روش SCS استفاده به عمل آمد. مهم ترین داده های مورد نیاز مدل مذکور شامل لایه های مدل رقومی ارتفاع (DEM)، شیب، بارش، کاربری اراضی، گروه های هیدرولوژیک خاک، شماره منحنی (CN) و برخی از متغیرهای مورفومتریکی نظیر مساحت و زمان تمرکز زیرحوضه ها می باشد. توزیع فضایی ارتفاع، شیب، کاربری اراضی و پوشش گیاهی در سطح حوضه آبریز اهرچای در بخش های قبلی پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفتند. در ادامه سایر متغیرهای مورد نیاز مدل به همراه نتایج مدل تشریح می شوند.

جدول ۱- مقادیر محاسباتی حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه سینوپتیک اهر برای دوره های بازگشت

Table 1- Calculated values of maximum 24-hour rainfall of Ahar synoptic station for return periods

احتمال وقوع	دوره بازگشت (سال)	بارش محاسباتی (میلی متر)	انحراف معیار
۰/۹۹۵	۲۰۰	۴۵/۹	۱۰/۲
۰/۹۹۰	۱۰۰	۴۳/۵	۸/۲
۰/۹۸۰	۵۰	۴۰/۶	۶/۱
۰/۹۶۰	۲۵	۳۶/۸	۴/۱
۰/۹۰۰	۱۰	۳۰/۴	۲/۰
۰/۸۰۰	۵	۲۴/۰	۱/۳
۰/۶۶۷	۳	۱۸/۳	۱/۳
۰/۵۰۰	۲	۱۲/۹	۱/۱

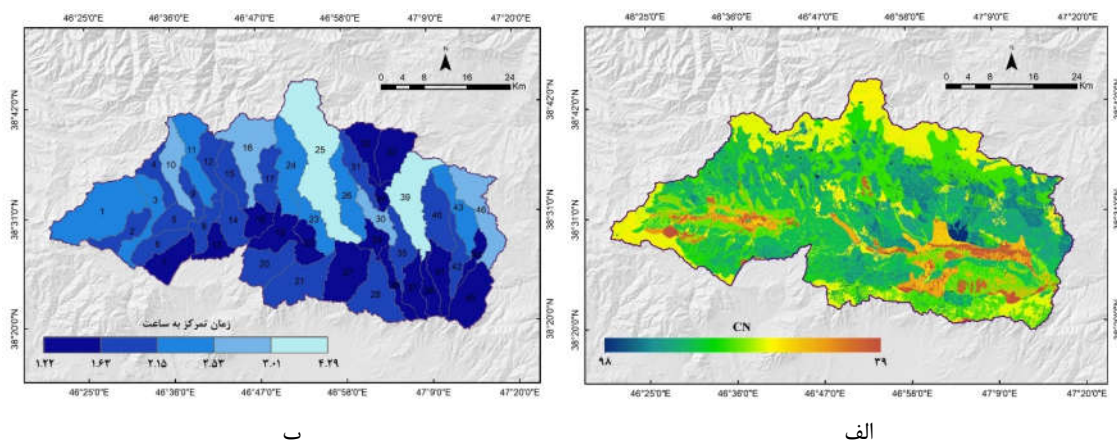
نفوذپذیری کم تا بسیار کم است. این سطوح مخصوصاً در نیمه شمالی حوضه پراکنده شده اند. نیمه شمالی حوضه منطبق بر دامنه های جنوبی رشته کوه قره داغ می باشد و عمدتاً شامل سنگ های آذرین (آتشفشانی و نفوذی) است که از نفوذپذیری پایینی برخوردارند.

زمان تمرکز در حوضه مطالعاتی از حداقل ۱/۲۲ ساعت در زیرحوضه شماره ۱۸ تا حداکثر ۴/۲۹ ساعت در زیرحوضه شماره ۲۵ متغیر است (شکل ۴-ب). رطبه ای معکوس بین زمان تمرکز و سیل خیزی حوضه ها برقرار است. شمار زیادی از زیرحوضه

توزیع فضایی شماره منحنی (CN) حوضه از طریق تقطیع لایه های کاربری اراضی و گروه های هیدرولوژیک و اعمال DEM هیدرولوژیکی و استفاده از جداول مربوطه (به عنوان مثال مراجعه شود به علیزاده، ۱۳۸۲: ۴۸۵) در محیط اکستنشن HECGeo-HMS در بستر نرم افزار ArcGIS تهیه شد. شماره منحنی در سطح حوضه آبریز اهرچای از حداقل ۳۹ تا حداکثر ۹۸ متغیر است (شکل ۴-الف). میانگین شماره منحنی در سطح حوضه مطالعاتی نیز حدود ۸۴ است که رقم نسبتاً بالایی است. در واقع، بخش قابل توجهی از حوضه آبریز اهرچای شامل سطوح با

جنوبی یا جنوبی- شمالی به آبراهه اصلی حوضه مطالعاتی زهکشی می شوند. این امر می تواند باعث کاهش زمان تاخیر آبراهه اصلی حوضه و افزایش مخاطرات ناشی از سیلاب گردد.

های اهرچای طویل و کشیده هستند که باعث افزایش زمان تمرکز، افزایش زمان تاخیر و کاهش سیل خیزی می شود. با این حال، اکثریت قریب به اتفاق زیرحوضه ها با امتداد کلی شمالی-



شکل ۴- شماره منحنی (CN) در سطح حوضه اهرچای (الف) و زمان تمرکز زیرحوضه های اهرچای (ب)

Figure 4- Curve number (CN) at the level of Aharchai basin (a) and concentration time of Aharchai sub-basins (b)

میزان تولید رواناب با مقدار  $0/365$  سانتی متر مربوط به زیرحوضه شماره ۴۳ می باشد. مقادیر ارتفاع رواناب زیرحوضه ها بیانگر این است که میزان ارتفاع رواناب تولید شده برای بارش های مشخص در سطح حوضه آبریز اهرچای از تغییرپذیری مکانی زیادی برخوردار است.

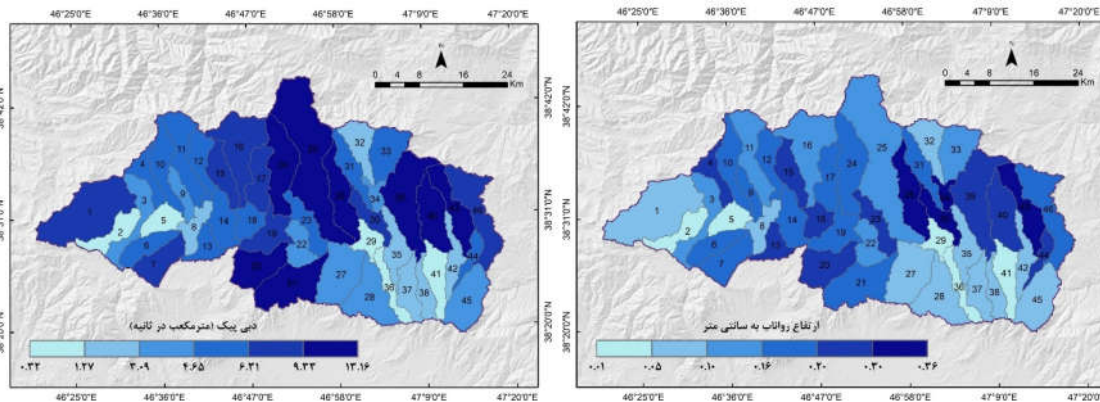
زیرحوضه های شماره ۲، ۵، ۲۹، ۳۶، ۳۸ و ۴۱ با میزان ارتفاع رواناب  $0/05$  یا کمتر، از پتانسیل تولید رواناب بسیار پایینی برخوردارند. دلیل اساسی این امر در ارتباط با فراوانی خاک های نفوذپذیر و کاربری اراضی کشاورزی آبی، مراتع خوب و یا پوشش جنگلی می باشد. این عوامل باعث می شوند که بخش قابل توجهی از بارش به داخل زمین نفوذ پیدا کنند. بدین ترتیب این زیرحوضه ها و تاحدودی زیرحوضه های شماره ۲۷، ۲۸، ۳۷ و ۴۵ از پتانسیل تولید رواناب پایینی برخوردارند و در فرایند مدیریت ریسک سیلاب نیازمند مداخلات محدودی می باشند. تمامی زیرحوضه های مذکور در نیمه جنوبی حوضه قرار گرفته اند. در حالت کلی، پتانسیل تولید رواناب در بخش شرقی و غربی نیمه جنوبی حوضه مطالعاتی پایین می باشد.

در ادامه با کاربست داده ها و لایه های موضوعی مربوطه و استفاده از روابط ذکر شده در روش شناسی تحقیق، ارتفاع رواناب در سطح زیرحوضه های اهرچای محاسبه گردید. در اینجا جهت اجتناب از اطاله کلام و حجم زیاد محاسبات تنها به ذکر نتایج ارتفاع رواناب و دبی بیک محاسباتی برای حداکثر بارش های ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۳ ساله ( $18/3$  میلی متر) اکتفا می شود. در واقع، تغییرپذیری فضایی ارتفاع رواناب و دبی پیک سیلاب ها تا حد زیادی قابل تعمیم به تمامی بارش های با دوره بازگشت مختلف می باشد. در شکل (الف-۵) ارتفاع رواناب (بر حسب سانتی متر) در سطح زیرحوضه های اهرچای به ازای بارش های با دوره بازگشت ۳ ساله ( $18/3$  میلی متر) ارائه شده است. با توجه به نتایج محاسبات و تغییرپذیری مکانی مقادیر ارتفاع رواناب در سطح حوضه آبریز اهرچای می توان به نتایج زیر دست یافت: میانگین مقادیر ارتفاع رواناب برای حداکثر بارش ۲۴ ساعته با دوره بازگشت ۳ سال در سطح حوضه آبریز اهرچای در حدود  $0/16$  سانتی متر محاسبه گردید. کمترین میزان ارتفاع رواناب با مقدار  $0/07$  سانتی متر مربوط به زیرحوضه شماره ۴۱ و حداکثر

۱۸، ۲۰، ۲۳، ۳۱، ۳۹ و ۴۰ در مرتبه بعدی اهمیت قرار می گیرند. در برنامه های مدیریت ریسک سیلاب و مهار سیلاب ها در سرچشمه ها توجه به زیرحوضه های با بیشترین میزان تولید رواناب حائز اهمیت زیادی است.

در محاسبه دبی پیک لحظه ای زیرحوضه ها علاوه بر ارتفاع رواناب، متغیرهای مساحت (به هکتار) و زمان تمرکز (به ساعت) نیز دخالت داده می شوند. در اینجا مقادیر دبی پیک محاسباتی برای بارش های با دوره بازگشت ۳ ساله (۱۸/۳ میلی متر) مورد بررسی قرار می گیرد. مقادیر محاسباتی در شکل (۵-ب) ارائه شده است. نتایج را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

شناسایی زیرحوضه های با بالاترین پتانسیل تولید رواناب از اهمیت قابل توجهی در مدیریت ریسک سیلاب برخوردار است. بر این اساس زیرحوضه های شماره ۴، ۱۵، ۲۶، ۳۰، ۳۴، ۴۳ و ۴۴ با میزان تولید رواناب ۰/۲۵ تا ۰/۳۷ از بیشترین میزان تولید رواناب برخوردارند. تمامی زیرحوضه های مذکور در نیمه شمالی حوضه و منطبق بر دامنه های جنوبی رشته کوه قره داغ واقع شده اند. فقر پوشش گیاهی (مخصوصاً در قسمت های میانی دامنه ها)، فقدان یا محدود بودن خاک های نفوذپذیر، فراوانی برونزدهای سنگی، شیب زیاد و ... جزو مهم ترین عوامل موثر در بالا بودن پتانسیل تولید رواناب در بسیاری از زیرحوضه های نیمه شمالی حوضه اهرچای می باشد. زیرحوضه های شماره ۷، ۱۳،



ب

الف

شکل ۵- ارتفاع رواناب (الف) و دبی های پیک در زیرحوضه های اهرچای (ب)

Figure 5- Height of runoff (a) and peak discharges in Aharchai sub-basins (b)

که مقادیر دبی پیک برای زیرحوضه های مذکور بین ۰/۳۲ تا ۱/۷۸ مترمکعب در ثانیه متغیر است. زیرحوضه های مذکور در نیمه جنوبی حوضه مطالعاتی توزیع شده اند. در رابطه با پایین بودن دبی های پیک زیرحوضه های مذکور هرچند که متغیر مساحت نیز موثر است؛ با این حال بخش قابل توجهی از دبی های پایین پیک در زیرحوضه مذکور در ارتباط با پتانسیل پایین تولید رواناب می باشد. در مرتبه بعدی زیرحوضه های شماره ۳، ۸، ۹، ۲۷، ۲۸، ۳۲، ۳۵ و ۳۷ قرار دارند که تمامی این زیرحوضه ها (به استثنای زیرحوضه شماره ۳۲) در نیمه جنوبی حوضه

میانگین دبی پیک برای بارش های با دوره بازگشت ۳ ساله در زیرحوضه های اهرچای در حدود ۵/۷ مترمکعب در ثانیه می باشد. مقادیر دبی های پیک از حداقل ۰/۳۲ مترمکعب در ثانیه برای زیرحوضه شماره ۴۱ تا حداکثر ۱۳/۱۶ مترمکعب در ثانیه برای زیرحوضه شماره ۲۶ متغیر است. بدین ترتیب، همانند ارتفاع رواناب، تغییرپذیری فضایی زیادی در دبی های پیک لحظه ای زیرحوضه های اهرچای دیده می شود.

زیرحوضه های شماره ۲، ۵، ۲۹، ۳۶، ۳۸، ۴۱ و ۴۲ برای بارش های محاسباتی از کمترین میزان دبی برخوردارند؛ به گونه ای



که در حدود ۱۰ درصد سطح حوضه آبریز اهرچای در کلاس های با خطر وقوع سیلاب زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته اند. پهنه های مذکور عمدتاً در قسمت های پایین دست حوضه مطالعاتی واقع شده اند. به دلیل مکان گزینی بخش عمده ای از سکونتگاه های منطقه مطالعاتی در پهنه های مذکور مخاطرات ناشی از سیلاب ها افزایش پیدا می کند. کلاس های با خطرپذیری زیاد و بسیار زیاد توسط سیلاب های رودخانه ای، سیلاب های ناگهانی ناشی از مسیل ها (فلش فلادها) و سیلاب های صفحه ای (شیت فلادها) حاصل از ترازهای میانی و فوقانی دامنه ها تحت تاثیر قرار می گیرند. در سال های اخیر سیلاب های متعددی در پهنه های مذکور اتفاق افتاده که در بسیاری از موارد همراه با خسارات های فراوان نیز بوده است. یکی از دلایل اساسی افزایش خطر سیلاب در منطقه مطالعاتی در ارتباط با دخالت های عامل انسانی نظیر تغییر و دستکاری حوضه های زهکشی، گسترش فعالیت های کشاورزی و ساخت و ساز در دشت های سیلابی و عدم توجه به حریم مسیل ها و رودخانه ها بوده است. در تحقیق انجام شده در رابطه با حریم رودخانه به یک فاصله حریم قابل اطمینان اکتفا گردید. در مطالعات دقیق تر در آینده می توان حریم های متفاوتی در شاخه های مختلف رودخانه و با توجه به کاربری های مجاور در نظر گرفت.

محاسبات بیانگر تباین فضایی قابل توجه ارتفاع رواناب و دبی پیک در سطح زیرحوضه های اهرچای می باشد. این امر در ارتباط با تغییرپذیری زیاد عناصر محیطی مورد استفاده در روش SCS است. تغییرپذیری زیاد در متغیرهای ارتفاع، شیب، نفوذپذیری خاک و کاربری اراضی باعث افزایش تغییرات در متغیر شماره منحنی (CN) و در نتیجه ارتفاع رواناب و دبی های پیک در سطح حوضه آبریز اهرچای شده است. در حالت کلی زیرحوضه های جنوبی حوضه آبریز اهرچای از پتانسیل تولید رواناب و دبی های پیک پایینی برخوردارند. این امر در ارتباط مستقیم با نفوذپذیری پوشش خاک در این بخش از حوضه است. در واقع، نیمه جنوبی حوضه آبریز اهرچای منطبق بر دامنه های شمالی رشته کوه قوشاداغ می باشد. سازندهای زمین شناسی تشکیل دهنده این دامنه ها به دلیل ناهمگن بودن مواد از تخلخل

مطالعاتی قرار گرفته اند. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که نیمه جنوبی حوضه مطالعاتی از پتانسیل تولید رواناب و دبی های پیک پایینی برخوردار است. دلیل اساسی این امر مربوط به نفوذپذیری زیاد تا نسبتاً زیاد خاک های این بخش از حوضه، شیب کمتر، فراوانی کاربری های کشاورزی آبی و ... می باشد. در واقع در نیمه جنوبی حوضه مطالعاتی (دامنه های شمالی قوشاداغ) به دلیل هوازدگی سازندهای زمین شناسی قشر ضخیمی از مواد هوازده دامنه ها را پوشانده اند که نقش قابل توجهی در افزایش نفوذپذیری زمین در این قسمت از حوضه دارند.

زیرحوضه های شماره ۲۰، ۲۱، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۳۹، ۴۰ و ۴۳ از بیشترین میزان دبی پیک لحظه ای برخوردارند. در خروجی این زیرحوضه ها دبی های پیک بین ۹/۳ تا ۱۳/۲ مترمکعب در ثانیه متغیر است. در مرتبه بعد زیرحوضه های شماره ۱، ۷، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۹ و ۴۶ قرار دارند که مقدار دبی پیک در سطح آنها بین ۷/۱ تا ۸/۸ مترمکعب در ثانیه متغیر است. اکثر زیرحوضه های مذکور در نیمه شمالی حوضه آبریز مطالعاتی واقع شده اند. بالا بودن دبی پیک در برخی از این زیرحوضه ها در ارتباط با مساحت بیشتر آنها می باشد اما در بسیاری از موارد، مساحت کنترل کننده اصلی میزان دبی های پیک نبوده و عوامل متعدد دیگری دخالت می کنند. در این رابطه، بالا بودن پتانسیل تولید رواناب در محدوده زیرحوضه های مذکور جزو مهم ترین عوامل به شمار می رود که خود نتیجه ی شیب زیاد زمین، وجود اراضی بایر یا با پوشش حفاظتی ضعیف و نفوذپذیری پایین خاک می باشد.

### بحث و نتیجه گیری

در پژوهش حاضر ارزیابی مخاطره سیلاب در سطح حوضه آبریز اهرچای شامل دو بخش عمده پهنه بندی خطر سیلاب و برآورد ارتفاع رواناب و دبی های پیک است. پهنه بندی خطر سیلاب با کاربست منطق فازی بیانگر این است که استفاده از عملگر گامای فازی برای ترکیب و روی گذاری فازی لایه های موضوعی موثر بر خطر سیلاب نتایج مطلوبی را به همراه دارد و بدین ترتیب مبنای تهیه نقشه خطر سیلاب قرار گرفت. نتایج نشان می دهد

- spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. *Science of the Total Environment*. 2015 Dec 15;538:512-23.
- 4- Alderman K, Turner LR, Tong S. Floods and human health: a systematic review. *Environment international*. 2012 Oct 15;47:37-47.
  - 5- Behrooz, M., Alimohammadi, S., Atari, J. Sensitivity Analysis of Hydrologic, Hydraulic and Economic Uncertainties in Design of Flood Control Systems. *Iran-Water Resources Research*, 2014; 10(2): 69-81.
  - 6- Poursamsam H, Akbari E, Hemmadi K, Akhond Ali AM. Location of Dez River flood risk maps with passive defense approach (Study area: Dezful city). *Passive Defense Quarterly*. 2022 Jun 21.
  - 7- Alcántara I, Goudie AS, editors. *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Cambridge University Press; 2010 Mar 4.
  - 8- Proverbs DG, Soetanto R. *Flood damaged property: a guide to repair*. John Wiley & Sons; 2008 Apr 15.
  - 9- Alkema D. RS and GIS applications in flood forecasting. In *Proceedings of the national workshop on flood disaster management: space inputs 2004 Jun* (pp. 3-4).
  - 10- Murphy A, Colleton N, Downs R, Goodchild M, Hanson S, Lawson V, Macdonald G, Magilligan F, Moseley W, Polsky C, Seto K, Wright D. *Understanding the Changing Planet: Strategic Directions for the Geographical Sciences*. National Research Council. The National
- و نفوذپذیری بالایی نیز برخوردارند. بدین ترتیب بخش قابل توجهی از بارش بر روی این دامنه ها در مواد هوازده و خاک های دامنه ها نفوذ می کند و تبدیل به رواناب نمی شود. برعکس، زیرحوضه های نیمه شمالی حوضه به دلیل دریافت بارش بیشتر و نفوذپذیری اندک خاک از پتانسیل تولید رواناب بالایی برخوردارند. به این موارد می توان ذوب برف ترازهای میانی و فوقانی ارتفاعات قره داغ در اواخر زمستان و اوایل فصل بهار را نیز اضافه کرد. هم زمانی ذوب برف ارتفاعات با بارش های همرفتی- رگباری می تواند حجم زیادی از رواناب را تولید کرده و خطر وقوع سیلاب را به شدت افزایش دهد.
- با توجه به مباحث عنوان شده، تصمیم گیران می توانند اقدامات موثری جهت پیشگیری از وقوع خسارات ناشی از سیل یا کاهش اثرات آن در منطقه انجام دهند. با توجه به اینکه طبق نتایج تحقیق پهنه های پایین دست حوضه مطالعاتی در اولویت قرار می گیرند، یکی از اقدامات موثر می تواند جلوگیری از ساخت و سازهای در حال اجرا در این منطقه و یا الزام به بتن سازی کف و جایگزینی موادی مقاوم تر در بنای ساختمان ها و همچنین ساخت سازه ها با ارتفاع بالاتر از سطح سیل، یعنی بیش از یک تا دو متر بالاتر از سطح زمین باشد. اقدام موثر دیگر رسوب زدایی و لایروبی از بستر رودخانه با اولویت در قسمت پایین دست حوضه آبریز اهرچای می باشد. تلاش برای حفظ پوشش گیاهی و تقویت آن در این ناحیه نیز راهکار دیگری است که می تواند مورد توجه قرار گیرد.

## References

- 1- Li MS, Li ZC, Wang DL, Yang X, Zhong X, Li Z, Li Y. Impact of natural disasters change on grain yield in China in the past 50 years. *Journal of Natural Disasters*. 2005;14(2):55-60.
- 2- Toya H, Skidmore M. Economic development and the impacts of natural disasters. *Economics letters*. 2007 Jan 1;94(1):20-5.
- 3- Chen Y, Liu R, Barrett D, Gao L, Zhou M, Renzullo L, Emelyanova I. A

- Geomorphological Research*, 2019; 8(2): 155-171.
- 18- Fathalizadeh B, Abedini M, Rajabi M. Investigating the Causes and Hazards of flood in Zunuzchay Watershed Using HEC-HMS Hydrological Model and Fuzzy Logic. *Quantitative Geomorphological Research*. 2020 Jun 21;9(1):134-55.
  - 19- Fernández DS, Lutz MA. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*. 2010 Feb 26;111(1-4):90-8.
  - 20- Thilagavathi G, Tamilenth S, Ramu C, Baskaran R. Application of GIS in flood hazard zonation studies in Papanasam Taluk, Thanjavur District, Tamilnadu. *Advances in Applied Science Research*. 2011;2(3):574-85.
  - 21- Nandalal HK, Ratnayake UR. Flood risk analysis using fuzzy models. *Journal of Flood risk management*. 2011 Jun;4(2):128-39.
  - 22- Rashednia S. *Flood vulnerability assessment by applying a fuzzy logic method: a case study from Melbourne* (Doctoral dissertation, Victoria University), 2016.
  - 23- Shivaprasad Sharma SV, Roy PS, Chakravarthi V, Srinivasa Rao G. Flood risk assessment using multi-criteria analysis: a case study from Kopili River Basin, Assam, India. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2018;9(1):79-93.
  - 24- Donyari S, Vahidnia MH, Baikpour S. Investigation of urban flooding in Ahvaz using the combination of spatial and hydrological analysis in GIS and HEC-RAS plugin. *Iranian journal of Ecohydrology*. 2022 Feb 20;8(4):989-1006.
  - Academies Press. Washington, D.C. 2010.
  - 11- Al-Tahir A, Baban SM, Ramlal B. Utilizing emerging geo-imaging technologies for the management of tropical coastal environments. *West Indian Journal of Engineering*. 2006 Jul 1;29(1).
  - 12- Altan O, Kemper G. Spatial information for disaster management using examples from Istanbul. In *Geographic Information and Cartography for Risk and Crisis Management 2010* (pp. 23-37). Springer, Berlin, Heidelberg.
  - 13- Ehlers M. Remote sensing for GIS applications: New sensors and analysis methods. In *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology III* 2004 Feb 13 (Vol. 5239, pp. 1-13). SPIE.
  - 14- Roustaei S, Mousavi R, Alizadeh G. Watershed Flood Zoning Map Preparation Using CN and GIS/RS Methods: A Case Study on Nekarood. *Quantitative Geomorphological Research*, 2018; 6(1): 108-118.
  - 15- Mahmoudzadeh H, Bakoi M. Flood zoning using fuzzy analysis (case study: Sari city). *Journal of Natural Environmental Hazards*. 2019 Feb 20;7(18):51-68.
  - 16- Madadi A, Piroozi E, Aghayary L. Flood Hazard Zonation by Combining SCS-CN and WLC Methods (Case study: Khiyave Chay Meshkinshahr Basin). *Hydrogeomorphology*. 2019 Mar 16;5(17):85-102.
  - 17- Esfandiary Darabad, F., rahimi, M., Pourmortaza, G. Flood zonation of Agerloo Cay Basin using the L-THIA method and fuzzy logic. *Quantitative*

- using CartoDEM—A case study in hilly watershed of Lower Himalayan Range. *Journal of Earth System Science*. 2016 Oct;125(7):1463-72.
- 30- Liu JG, Mason PJ. Image processing and GIS for remote sensing: techniques and applications. John Wiley & Sons; 2016 Mar 21.
- 31- Alizadeh A, 1386. Principles of Applied Hydrology, Astan Qods Razavi Publications. (In Persian)
- 32- Iwahashi J, Pike RJ. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology*. 2007 May 1;86(3-4):409-40.
- 33- Reisenbüchler M, Bui MD, Skublics D, Rutschmann P. An integrated approach for investigating the correlation between floods and river morphology: A case study of the Saalach River, Germany. *Science of the Total Environment*. 2019 Jan 10;647:814-26.
- 25- Rezaee Z, Vahidnia MH. Offering flood prevention solutions using remote sensing and approaches integrating fuzzy logic and agent-based modeling. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*. 2022 May 22;31(121):111-25.
- 26- Dattawadkar DJ, Vani SB. A Review on Fuzzy Based Flood Warning Expert System using IoT and LoRa Technology. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021 08;03:1601-1603.
- 27- Lee S. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*. 2007 Apr;52(4):615-23.
- 28- Qin CZ, Zhu AX, Pei T, Li BL, Scholten T, Behrens T, Zhou CH. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision agriculture*. 2011 Feb;12(1):32-43.
- 29- Kumar S, Gupta S. Geospatial approach in mapping soil erodibility