

## تعیین مناطق مستعد سیل با مدل‌های SI، FR و Shannon به منظور کاهش مخاطرات سیل (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کشکان)

حسین یوسفی<sup>۱</sup>، حجت‌الله یونسی<sup>۲\*</sup>، آزاده ارشیا<sup>۳</sup>، یزدان یاراحمدی<sup>۴</sup>، احمد گودرزی<sup>۵</sup>

۱. دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۳. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۴. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۵. کارشناس آب منطقه‌ای لرستان و دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۸/۱۵، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۱/۱۲)

### چکیده

تعیین نقشه مناطق مستعد سیل با هدف ذخیره رواناب‌ها به منظور تأمین آب مورد نیاز برای اهداف مختلف و نیز کنترل خسارت‌های ناشی از سیل، اهمیت و ضرورت زیاد این موضوع را برای حفاظت از منابع طبیعی و انسانی نشان می‌دهد. استان لرستان و به‌ویژه حوضه کشکان شامل سلسله، دلفان، دوره، خرم‌آباد، پلدختر و کوه‌دشت، بسیار سیل‌خیز است و بارها دچار خسارت‌های ناشی از سیل شده و در فروردین ۱۳۹۸ بزرگ‌ترین سیل ۲۰۰ سال اخیر را تجربه کرده است. در پژوهش حاضر، تلاش شده است تا نقشه پهنه‌بندی سیلاب به‌منظور کاهش مخاطرات سیل حوضه آبخیز کشکان با استفاده از مدل‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی شانون و نیز با بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر ArcGIS برای بهبود تصمیم‌گیری و مدیریت سیل در این منطقه ارائه شود. به این منظور، موقعیت جغرافیایی ۱۲۳ نقطه سیل‌گیر در منطقه به دو گروه واسنجی و اعتبارسنجی تقسیم شدند. در اجرای هر سه مدل از پارامترهای مؤثر بر سیل شامل شیب، جهت شیب، انحنای زمین، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، خاک‌شناسی، شاخص رطوبت توپوگرافی، بارش، تراکم آبراهه، فاصله از آبراهه و مدل ارتفاعی رقومی منطقه استفاده شد. همچنین، برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌ها از منحنی مشخصه عملکرد در نرم‌افزار SPSS استفاده شد. حساسیت‌سنجی پارامترها برای هر سه مدل نیز انجام شد که فاصله از رودخانه، مؤثرترین پارامتر مشترک در هر سه مدل بود. بیشترین صحت برای این منطقه به مدل آنتروپی شانون (۰/۸۲، خیلی خوب) اختصاص داشت و بعد از آن، مدل نسبت فراوانی و شاخص آماری (۰/۷۸، خوب)، مناسب این منطقه معرفی شدند. نتایج نشان داد مدل آنتروپی شانون، مساحت بیشتری از حوضه را تحت شرایط پتانسیل زیاد خطر سیل‌گیری نشان می‌دهد (حدود ۴۰ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر سیل زیاد و خیلی زیاد) که اغلب مناطق غربی و همچنین، مناطق مرکزی حوضه را شامل می‌شوند که در کوه‌دشت، خرم‌آباد و پلدختر قرار دارند و باید در اولویت اول برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک سیل در این حوضه قرار گیرند.

**کلیدواژگان:** حوضه کشکان، مدل Shannon، مدل FR، مدل SI، نقشه سیل.

## مقدمه

با وجود اهمیت زیادی که آب در اقتصاد کشور دارد، سیلاب‌ها اغلب هر ساله حجم زیادی از آب‌ها و خاک‌های حاصلخیز کشور را از دسترس خارج می‌کنند و به کویرها و دریاها و دریاچه‌ها انتقال می‌دهند [۱]. ذخیره و بهره‌برداری از رواناب‌ها به وسیله عملیات پخش سیلاب هنگام بارش‌های شدید و وسیع، می‌تواند سبب افزایش ذخایر آب زیرزمینی و نیز مهار سیل شود. مهار و انحراف سیلاب روی پهنه‌های سطحی آبخوان‌ها به منظور حفاظت و توسعه منابع طبیعی و بهبود کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی در اصطلاح «پخش سیلاب» نام دارد [۲]. اهمیت این کار در کشور ایران بیشتر به این دلیل است که بهره‌برداری بیش از اندازه از منابع آب و خشکسالی‌های پی‌درپی، سطح آب آبخوان‌های آزاد را با افت شدیدی مواجه کرده است. پخش سیلاب، ساده‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش تغذیه مصنوعی است که از سال‌ها پیش در کشورهای مختلف از جمله ایران رواج داشته است. پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل، اولین و مهم‌ترین گام در جلوگیری از زمین‌لغزش است [۳]. روش‌های مختلفی از جمله روش‌های فازی، سلسله‌مراتبی [۴]، ارزیابی چندمعیاره فضایی [۵]، فاکتور وزنی [۶]، مدل ترکیبی هوش مصنوعی [۷]، مدل‌های EBF و WOE [۳] و بسیاری دیگر از روش‌ها به دلیل اهمیت تعیین نقشه حساسیت سیل، همواره در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. عابدینی و فتحی [۸] به پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از فرایند تحلیل شبکه در حوضه خیاو چای پرداختند و مدل را با استفاده از پارامترهای مختلف مؤثر بر سیل اجرا کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بیش از ۱۵ درصد مساحت حوضه در معرض خطر سیلاب با پتانسیل بسیار زیاد است. این سطوح اغلب با شیب کمتر از ۳۵ درصد، درصد پوشش گیاهی کم، نواحی پست و نیز حاشیه رودخانه‌ها را تشکیل می‌دهند. حسینی و همکاران [۹] به تعیین پهنه‌های سیل‌گیر رود کشکان استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS پرداختند. در پژوهش یادشده، بازه‌ای به طول ۵ کیلومتر از رودخانه کشکان بررسی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد از کل مساحت سیل‌گیر مربوط به دوره بازگشت ۱۰۰ سال، ۷۷ درصد آن مستعد سیل‌گیری در دوره بازگشت‌های کوتاه‌مدت است و حتی برای دوره بازگشت دو سال هم زمین‌های زراعی اطراف رودخانه در معرض خطر سیل قرار دارند. سیاه‌کمری و

زینی‌وند [۱۰] در مطالعه‌ای به تهیه نقشه پتانسیل سیل حوضه مادرسو در استان گلستان با روش‌های آماری WOE و SI پرداختند و دقت این روش‌ها را با استفاده از منحنی ROC خیلی خوب ارزیابی کردند. عابدینی و بهشتی جاوید [۱۱] در پژوهشی وضعیت سیل‌گیری حوضه ليقوان چای را با استفاده از مدل ترکیبی فرایند تحلیل شبکه و منطق فازی بررسی کردند. بر اساس مدل تحلیل شبکه معیار شیب و سنگ‌شناسی بیشترین ضریب تأثیر را داشتند. کنعانی سادات و همکاران [۱۲] به ارزیابی حساسیت سیل با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS برای تعدادی حوضه در کردستان پرداختند. طبق ارزیابی نقاط سیل، مدل ANP ارزش زیادی در مقایسه با AHP نشان داد. در مطالعه یادشده معیار TWI و تراکم آبراهه بیشترین وزن را داشتند. بوی و همکاران [۱۳] پهنه‌بندی سیل را با استفاده از الگوریتم تکاملی BuiNovel و روش‌های رگرسیون لجستیک و نروفازی در مازندران انجام دادند. آزاد طلب و همکاران [۱۴] در مطالعه‌ای سیل‌خیزی شهر سنندج را با استفاده از روش‌های WOE و EBF بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در منطقه مطالعه‌شده، مدل EBF عملکرد بهتری دارد. تهرانی و همکاران [۱۵] خطر سیل را با در نظر گرفتن متغیرهایی از جمله شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان آبراهه، شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، خاک و انحنا حوضه با استفاده از روش‌های یادگیری درخت تصمیم ماشین بردار پشتیبان ارزیابی کردند. نتیجه ارزیابی صحت مدل‌های یادشده با استفاده از AUC به ترتیب با مقدار ۰/۸۸ و ۰/۸۵ دقت مناسب آنها را نشان داد. فرامرزی و همکاران [۱۶] به پهنه‌بندی وقوع مخاطره سیلاب در پارک ملی گلستان با مدل‌های جنگل تصادفی، آنتروپی بیشینه و درخت رگرسیون تقویت‌شده پرداختند. پژوهشگران یادشده دقت این مدل‌ها را با استفاده از روش منحنی ROC بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها اهمیت زیاد ارتفاع از سطح دریا، فاصله از آبراهه، بارش و فاصله از جاده را در وقوع مخاطره سیل نشان دادند. مختاری و همکاران [۱۷] به تهیه نقشه خطر وقوع سیلاب در حوضه با استفاده از ANP و GIS پرداختند. در پژوهش یادشده پارامترهای مختلف مؤثر بر سیل از جمله شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، شاخص قدرت آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی، ضریب گراویلیوس و تراکم زهکشی در نظر گرفته شدند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد معیارهای بارش،

همواره مهم و ضروری است. هدف از مطالعه حاضر، ارائه نقشه پهنه‌بندی سیلاب به‌منظور کاهش مخاطرات سیل این حوضه بسیار سیل‌خیز با استفاده از مدل‌های SI, FR و Shannon و نرم‌افزار ArcGIS برای بهبود تصمیم‌گیری و مدیریت سیل در منطقه است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه‌شده

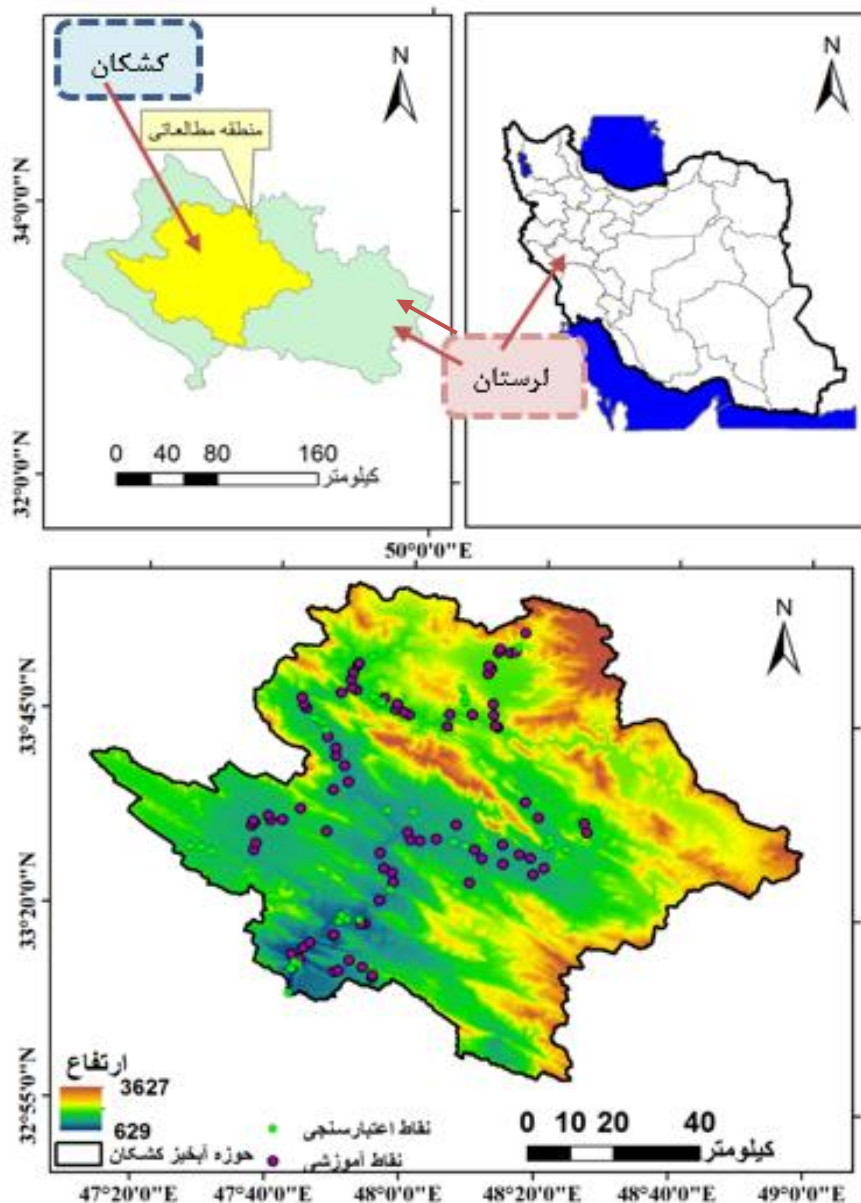
رودخانه کشکان با طول ۲۹۰ کیلومتر، سیل‌خیزترین زیرحوضه کرخه است. از نظر توزیع سازندهای زمین‌ساختی، حدود ۵۰ درصد سطح این حوضه از سازندهای آبرفتی جدید، امیران و مشترک آسماری-شهبازان که پتانسیل بسیار زیاد تولید رواناب دارند، تشکیل شده است. وضعیت فیزیوگرافی این حوضه بیان می‌کند که فاکتورهای مساحت، زمان تمرکز، ضریب فشردگی حوضه، پتانسیل بسیار زیادی در تولید رواناب در مدت‌زمان کوتاه و افزایش توان سیل‌خیزی آن دارند. بر اساس پژوهش‌هایی که به برآورد و پیش‌بینی احتمال وقوع سیل و دوره‌های بازگشت آن در این حوضه صورت گرفته، بیانگر احتمال وقوع ۹۹/۹۹ درصد هر سال سیلی به میزان دبی ۶۰۶/۳۲ مترمکعب و هر ۲۵ سال یک‌بار سیلی با دبی ۱۰۹۲/۹ مترمکعب (بدون محاسبه دبی پایه) در نقطه خروجی این حوضه، یعنی شهر پلدختر است. سیل فروردین ۱۳۹۸ رودخانه کشکان با آبدهی پیک ۶۵۰۰ مترمکعب در ثانیه و از خسارت‌بارترین سیل‌ها بوده است [۳]. نمایی از سیل فروردین ۱۳۹۸ رودخانه کشکان در شکل ۱ و موقعیت مکانی ۱۲۳ نقطه سیل‌خیز با توجه به اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان در شکل ۲ آورده شده است.

لیتولوژی، کاربری اراضی و شیب، بیشترین وزن را دارند. نقشه پهنه‌بندی در ArcGIS تهیه شد و ۵۰ درصد منطقه در معرض خطر وقوع سیلاب قرار داشت. آزادی و همکاران [۳] به پهنه‌بندی حساسیت خطر سیل در حوضه رودخانه کشکان با استفاده از دو مدل WOE و EBF پرداختند و برای هر دو مدل فاکتورهای مختلف مؤثر بر سیلاب را در نظر گرفتند و برای اعتبارسنجی از منحنی ROC استفاده کردند. بر اساس مدل EBF، ۴۷ درصد از سطح منطقه و بر اساس مدل WOE، ۵۲ درصد از منطقه در کلاس خطر متوسط تا خیلی زیاد قرار داشت. بیشترین صحت به مدل EBF اختصاص پیدا کرد و در نتیجه، این مدل برای منطقه یادشده مناسب‌تر اعلام شد. حسین‌زاده و همکاران [۱۸] در مطالعه‌ای به پهنه‌بندی حساسیت سیل با استفاده از نوعی تحلیل ترکیبی از معیارهای هیدروژئومورفیک و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی در حوضه سنقر استان کرمانشاه پرداختند. به این منظور، از معیارهای ارتفاع، شیب، فاصله از آبراهه، ژئومورفولوژی، بارش، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، قدرت جریان و شاخص رطوبت توپوگرافی استفاده شده است. در این منطقه ۲۶ درصد در معرض حساسیت سیل زیاد و ۵۹ درصد در معرض حساسیت سیل کم قرار دارد. سه عامل ارتفاع، شیب و تراکم شبکه زهکشی و بارش تأثیر عمده‌ای بر حساسیت سیلاب این حوضه داشتند.

مناطق از کشور در سال‌های اخیر همواره درگیر سیلاب با خسارت‌های زیاد بودند و باید این مناطق در اولویت‌های مطالعات و مدیریت قرار گیرند. حوضه کشکان جزء مناطقی است که درگیر خسارت‌ها بسیار و پرتکرار ناشی از سیل شده و در سال ۱۳۹۸ شدیدترین سیلاب را تجربه کرده است. بررسی‌های مختلف برای مدیریت سیلاب در این منطقه،



شکل ۱. نمایی از سیل فروردین ۱۳۹۸ رودخانه کشکان



شکل ۲. موقعیت منطقه مطالعه شده و نقاط آموزشی و اعتبارسنجی مدل‌ها

نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور تهیه شد. مطابق نقشه سنگ‌شناسی ۲۳ نوع ساختار سنگ‌شناسی مختلف در حوضه مطالعه شده وجود دارد. نقشه خاک منطقه نشان‌دهنده وجود چهار رده مختلف خاک شامل بدلند، انتی سول، اینسپتی سول و ورتی سول در منطقه است. نقشه کاربری اراضی از نقشه اداره کل منابع طبیعی استان لرستان استخراج شد که به‌طور کلی، شش کاربری مختلف را در بر می‌گیرد و بیشترین کاربری موجود در این حوضه مربوط به کشاورزی است. لایه رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر به‌عنوان نقشه پایه مدل

## روش کار

### عوامل محیطی مؤثر بر سیل

طبق بررسی‌های به‌عمل‌آمده و ویژگی‌های طبیعی منطقه مطالعه شده، ۱۱ پارامتر مهم شامل لایه‌های ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۱</sup> (TWI)، کاربری اراضی، خاک، سنگ‌شناسی و بارش به‌عنوان لایه‌های مؤثر در ایجاد سیل انتخاب شدند. نقشه سنگ‌شناسی منطقه از

1. Topographic Wetness Index

$$Si = \ln \left[ \frac{\left( \frac{Npix (fi)}{Npix (Ni)} \right)}{\frac{\sum Npix (fi)}{\sum npix (Ni)}} \right] \quad (2)$$

که در آن Fi فراوانی نقاط سیل در هر کلاس و Ni فراوانی پیکسل هر کلاس،  $\sum Npix (Fi)$  مجموع نقاط سیل گرفته در هر کلاس و  $\sum Npix (Ni)$  مجموع پیکسل‌ها در هر کلاس است. در این روش وزن کم هر طبقه بیانگر کم بودن تعداد وقوع سیل در آن طبقه است و به عکس. طبقات با ارزش وزنی صفر بیانگر نبود نقطه سیل در آن طبقه است. در نهایت، وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس در نرم‌افزار ArcGIS10.5، در تمامی لایه‌ها اعمال و سپس، با به‌کارگیری توابع روی‌هم‌گذاری و ماشین حساب رستری، نقشه پتانسیل سیل تهیه شد.

#### آنتروپی شانون

آنتروپی معیار سنجش بی‌نظمی در یک سیستم است و در تئوری اطلاعات معیاری است برای مقدار عدم اطمینان ارائه‌شده توسط یک توزیع احتمال گسسته (Pi) به گونه‌ای که این عدم اطمینان در صورت پخش بودن توزیع، بیشتر از مواردی است که توزیع فراوانی تیزتر باشد [۲۱]. از مهم‌ترین مزیت‌های این روش می‌توان به در نظر گرفتن تعداد زیادی شاخص کمی و کیفی به‌طور هم‌زمان در ارزیابی پتانسیل سیل، سهولت و سادگی کاربرد، امکان تغییر اطلاعات ورودی و ارائه پهنه‌بندی جدید بر اساس این اطلاعات، نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت ضریب اولویت بیان می‌شود که این مقادیر وزن نهایی راهبردها در اولویت‌بندی است، در نظر گرفتن هم‌زمان ارزش هر شاخص در هر واحد کاری و اولویت شاخص‌ها نسبت به هم که سبب دستیابی به نتایج با ضریب اطمینان بیشتر می‌شود. در آنتروپی، متغیرهایی با بیشترین تأثیر در وقوع یک رخداد تعیین و مشخص می‌شود. روابط ۳-۷ موجب دستیابی به میزان اثرگذاری عوامل مؤثر در تعیین نقشه پهنه‌بندی پتانسیل سیل می‌شود:

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{sj} P_{ij}} \quad (3)$$

$$(H_j) = \sum_{j=1}^{sj} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}), \quad j=1, \dots, n \quad (4)$$

رقومی ارتفاع<sup>۱</sup> (DEM) استفاده شد. برای تهیه نقشه بارش از داده‌های بارندگی ماهانه ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی طی دوره ۱۳۸۷-۱۳۹۷ استفاده شد. پس از بررسی دقت روش‌های مختلف درون‌یابی در نرم‌افزار ArcGIS10.5 نقشه توزیع میانگین بارندگی حوضه آبخیز کشکان بر اساس روش کریجینگ تهیه شد. لایه‌های شیب و جهت شیب و انحناى سطح از نقشه پایه مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک ۳۰ متری به دست آورده شد و در ۵ طبقه مختلف کلاسه‌بندی شد. پس از تهیه نقشه آبراهه‌ها با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.5 و انجام اصلاحات لازم، نقشه فاصله از آبراهه به ۵ کلاس و نقشه تراکم آبراهه به ۴ کلاس تقسیم شد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) که از نقشه‌های مفید برای تعیین مناطق حساس به سیل محسوب می‌شود، از رابطه ۱ به‌دست آمد [۱۹]:

$$TWI = \ln \left( \frac{As}{S} \right) \quad (1)$$

که در آن As و S به ترتیب بیانگر سطح ویژه منطقه و درصد شیب زمین است. این نقشه در نهایت به چهار طبقه کلاسه‌بندی شد.

#### ثبت موقعیت مکانی نقاط سیل

موقعیت مکانی ۱۲۳ نقطه سیل خیز با توجه به اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان تهیه شد و در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS10.5 به‌صورت نقشه موقعیت نقاط سیل تهیه شد. از میان نقاط ثبت‌شده ۸۲ نقطه سیل به‌عنوان نقاط گروه آموزش به‌طور تصادفی انتخاب شده و ۴۱ نقطه سیل باقی‌مانده به‌عنوان گروه اعتبارسنجی انتخاب شدند.

#### مدل شاخص آماری

مدل شاخص آماری<sup>۲</sup> از مدل‌های داده‌کاوی است که در مطالعات مختلف پیش‌بینی مکانی به کار رفته است [۲۰]. این مدل در مدل‌سازی و پتانسیل‌یابی سیل بر اساس توزیع مکانی وقایع سیلاب به تجزیه و تحلیل روابط بین عوامل محیطی و وقایع سیلاب می‌پردازد. وزن هر یک از کلاس‌های عوامل محیطی بر اساس رابطه ۲ تعیین می‌شود:

1. Digital Elevation Model  
2. Statistical Index

پیکسل‌های مربوط به فاکتور مربوطه مثلاً شیب در منطقه مطالعه شده است. برای به دست آوردن شاخص حساسیت سیل نتایج فاکتورها در محیط نرم‌افزار ArcGIS با هم جمع می‌شوند (رابطه ۹)

$$FSI = \sum_{R=1}^{R=n} FR \quad (9)$$

اعتبارسنجی نقشه پتانسیل سیل (ارزیابی مدل‌ها) برای اعتبارسنجی نقشه نهایی مناطق مستعد سیل حوضه کشکان از ۳۰ درصد از داده‌هایی که در مدل به کار نرفته‌اند، استفاده شد. به این منظور، نقشه ۴۱ نقطه سیل که در پتانسیل‌سنجی استفاده نشده‌اند، با نقشه پتانسیل‌سنجی مناطق مستعد سیل در منطقه یادشده روی هم‌گذاری شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس، برای اعتبارسنجی دقت نقشه نهایی از روش منحنی ROC<sup>۱</sup> استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار SPSS، منحنی ROC مربوط به نقشه پتانسیل‌سنجی مناطق حساس سیل در حوضه آبخیز کشکان تهیه شد. مساحت زیر این منحنی<sup>۲</sup> (AUC) بیانگر میزان دقت نقشه نهایی به صورت کمی است [۲۳]. سطح زیر پوشش هر نمودار بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی درست است. در بهترین شرایط و یک حالت ایده‌آل مقدار زیرنمودار برابر یک خواهد بود. این شاخص برای ارزیابی صحت مدل مناسب است. مراحل انجام کار در شکل ۳ آمده است.

### نتایج

نقشه عوامل ورودی برای اجرای مدل‌های نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی شانون شامل ۱۱ لایه مؤثر بر سیل برای منطقه مطالعه شده در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه شد و در شکل ۴ آمده است.

### نقشه پتانسیل سیل حاصل از مدل‌ها

در شکل ۵ نقشه نهایی پتانسیل سیل با استفاده از مدل‌های شاخص آماری (الف)، نسبت فراوانی (ب) و آنتروپی قانون (ج) آورده شده است.

$$H_{j \max} = \log_2 S_j, \quad (5)$$

$S_j$  – Number of Class

$$I_j = \frac{H_{j \max} - H_j}{H_{j \max}}, \quad I = (0,1), \quad j=1, \dots, n \quad (6)$$

$$W_j = I_j P_{ij} \quad (7)$$

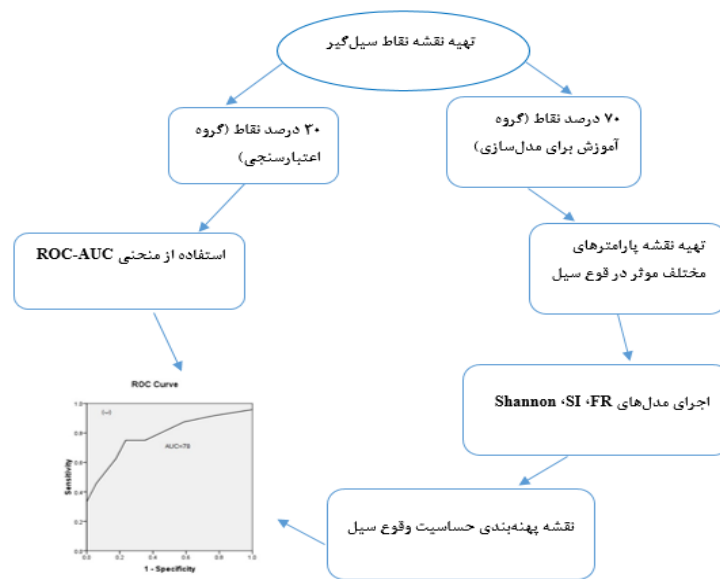
که در آن  $P_{ij}$  تراکم نقاط سیل ( $P_{ij}$ ) احتمال وجود نقاط سیل در هر عامل و کلاس مربوط به آن، در هر طبقه  $H_j$  و  $H_{j \max}$  مقادیر آنتروپی و ماکزیمم آنتروپی،  $I_j$  ضریب اطلاعات و  $W_{ij}$  وزن نهایی هر عامل را مشخص می‌کند. پس از تعیین وزن نهایی با ضرب وزن آن در کلاس همان عامل یعنی مقدار  $P_{ij}$  مربوط به هر عامل و کلاس آن عامل بر اساس تقسیم تعداد نقاط سیل بر تعداد پیکسل‌های کلاس‌های عوامل نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی پتانسیل سیل تهیه شد.

### مدل نسبت فراوانی (FR)

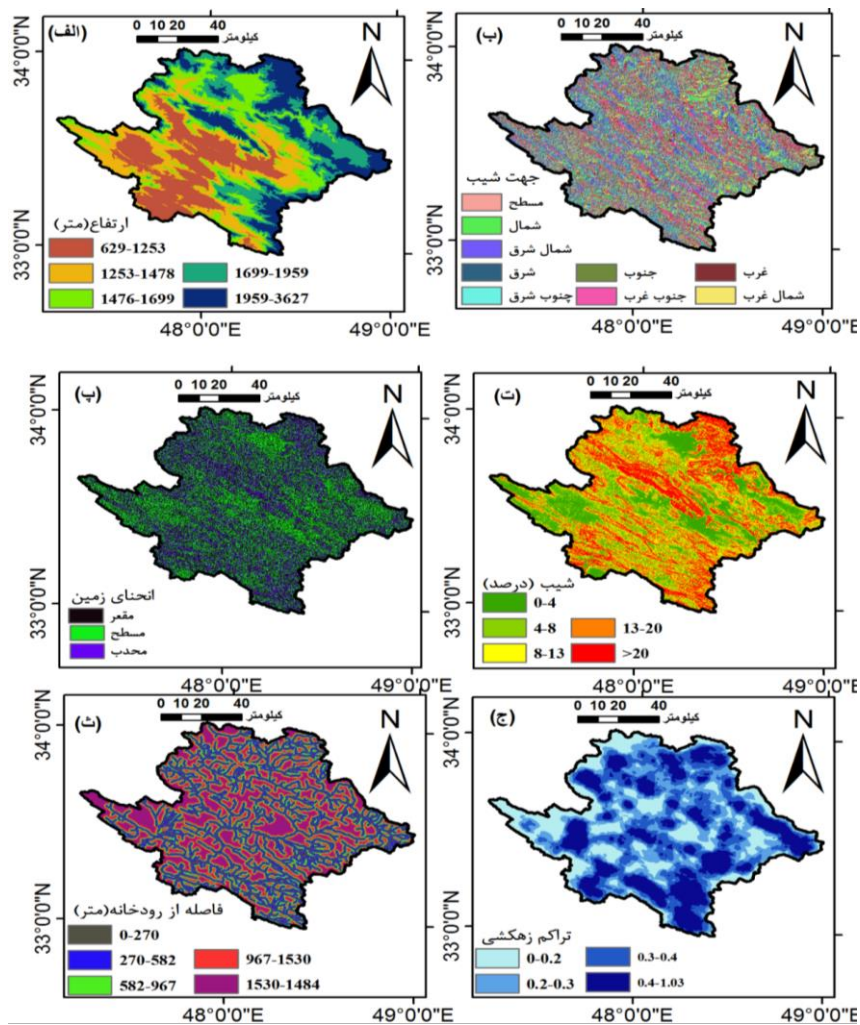
این مدل، ابزاری ساده و مناسب برای ارزیابی مکانی برای درک رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته از جمله نقشه‌های طبقه‌بندی شده است. این فن نشان‌دهنده احتمال حضور یک پدیده با مشخصاتی ویژه است. این روش برای مطالعات سیلاب می‌تواند سطح همبستگی بین موقعیت‌های سیلاب را مشخص کند. به هر میزان که مقدار این نسبت در هر طبقه یا هر کلاس مربوط به یک عامل مشخص، بزرگ‌تر باشد بیانگر اهمیت یا نقش بیشتر آن کلاس در عامل مربوطه در وقوع سیل است. به‌طور کلی، عدد یک برای FR نشان‌دهنده همبستگی متوسط نقاط سیل خیز و عوامل مؤثر بر آن است و اگر بزرگ‌تر از یک باشد، همبستگی بالایی وجود دارد، ارتباط کمتر برابر با ارزش کمتر از یک است [۲۲]. نسبت فراوانی برای یک طبقه یا کلاس مشخص از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$FR = \frac{\frac{E}{F}}{\frac{M}{L}} \quad (8)$$

که در آن E تعداد نقاط سیل در کلاس مورد نظر است. F تعداد کل رخدادهای سیل در منطقه مطالعه شده است. M تعداد پیکسل‌های کلاس مورد نظر و L تعداد کل

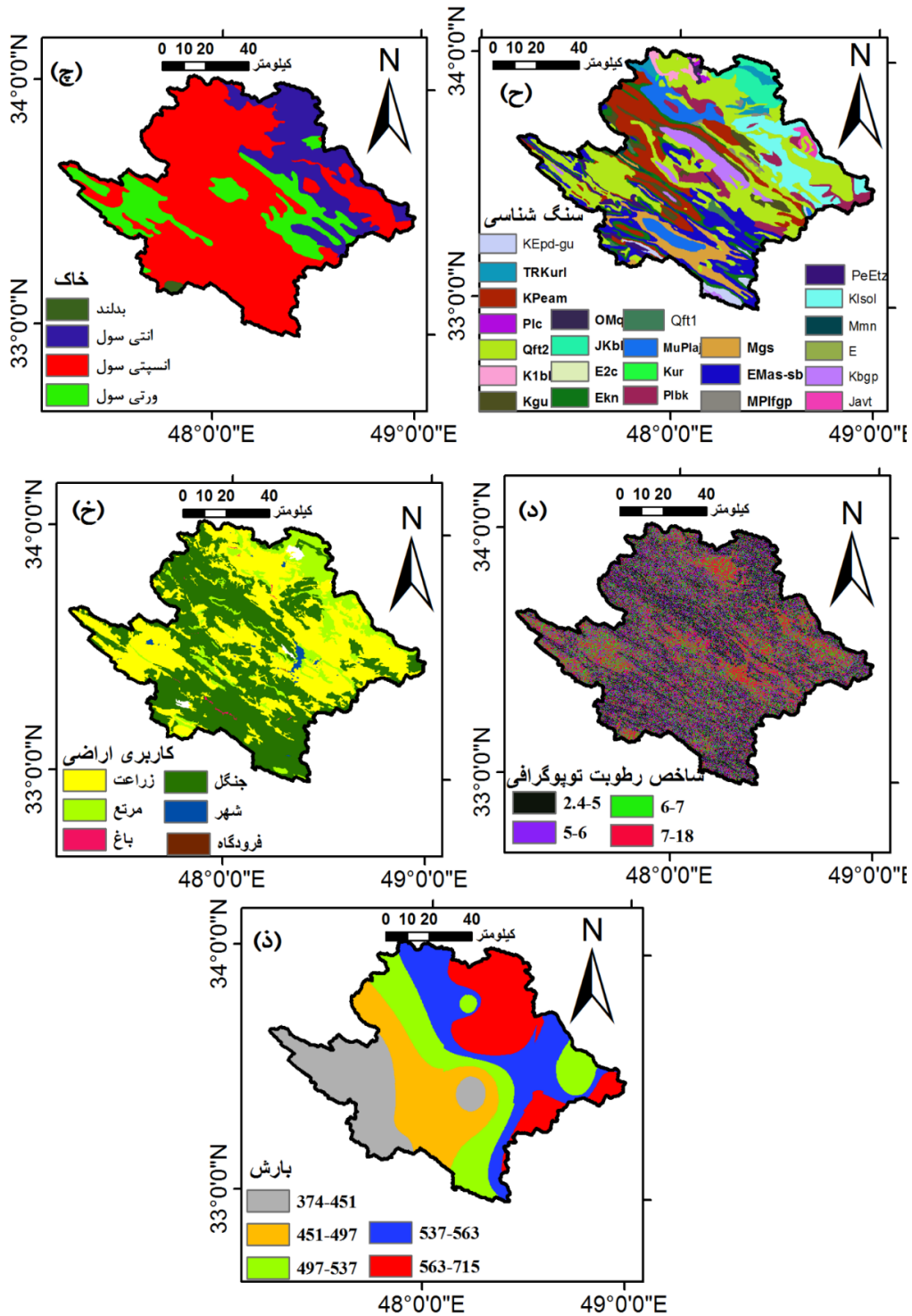


شکل ۳. نمودار جریان‌ی روند پردازش داده‌ها در تهیه نقشه نهایی پهنه‌بندی سیل



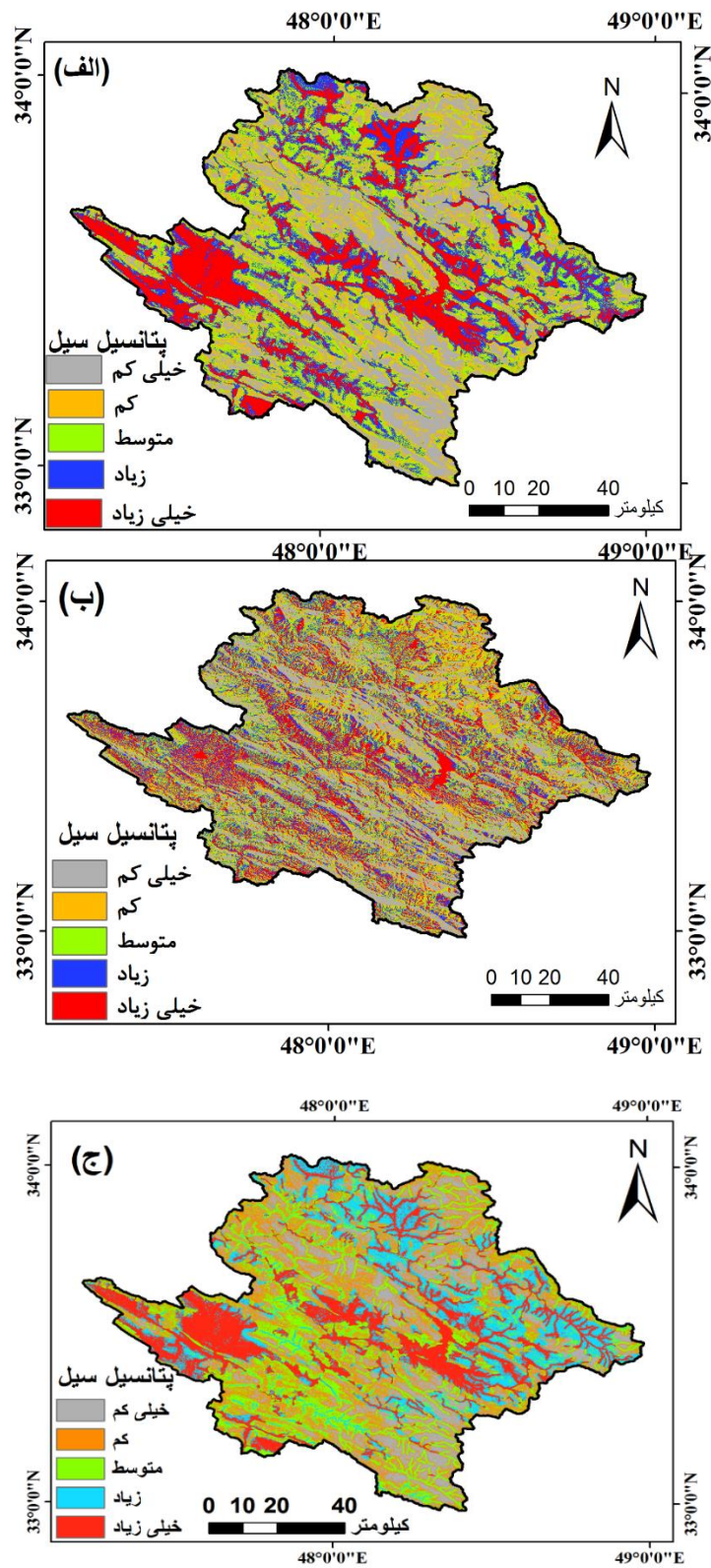
شکل ۴. نقشه عوامل مؤثر بر وقوع سیل حوضه آبخیز کشکان: (الف) ارتفاع (ب) جهت (پ) انحنا (ت) شیب (ث) فاصله از آبراهه (ج)

تراکم آبراهه



ادامه شکل ۴. نقشه عوامل مؤثر بر وقوع سیل حوضه آبخیز کشکان: (چ) خاک (ح) سنگ (خ) کاربری اراضی (د) شاخص رطوبت توپوگرافی (ذ) بارش



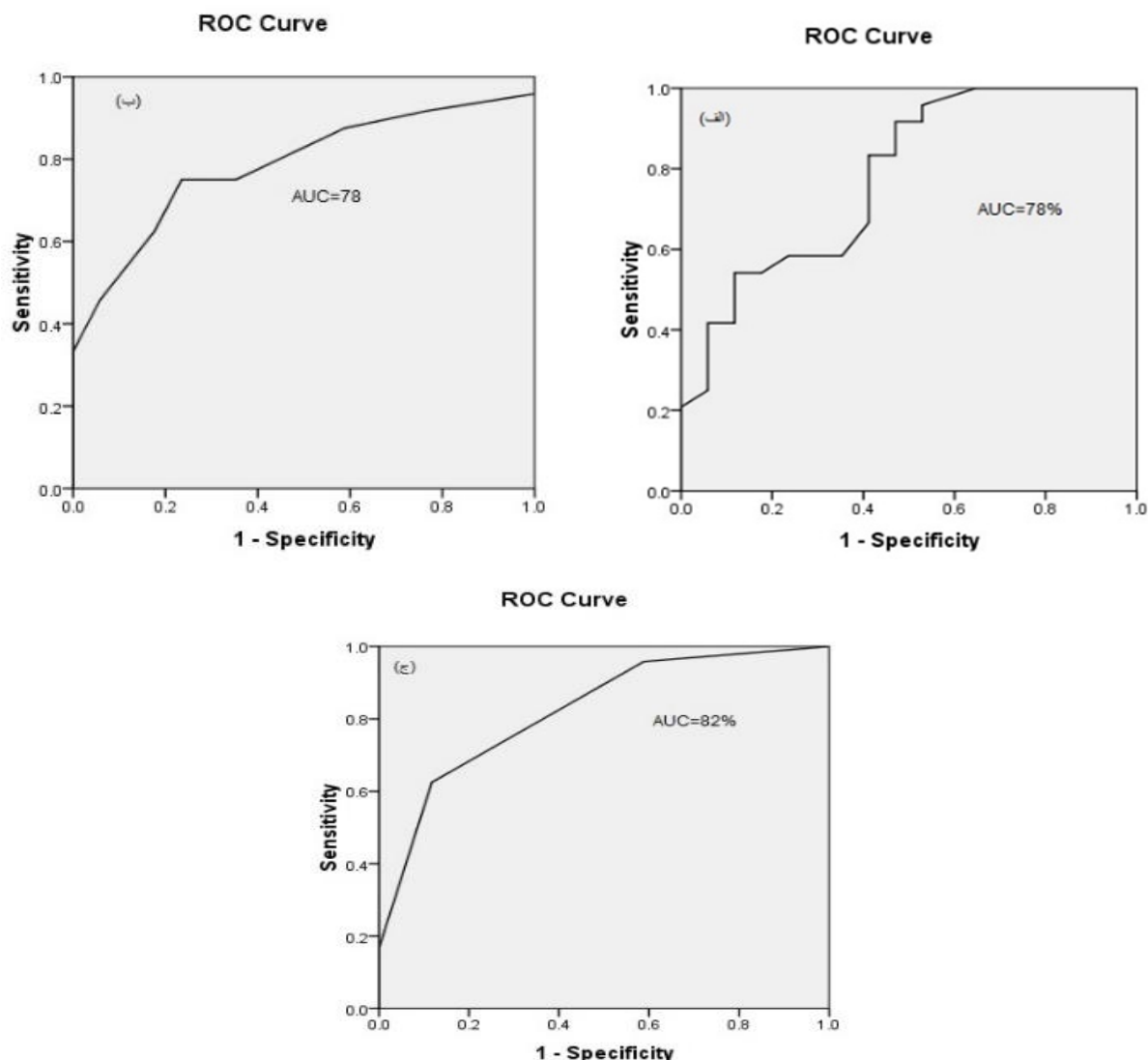


شکل ۵. نقشه پتانسیل سیل با استفاده از مدل شاخص آماری (الف)، نسبت فراوانی (ب) و آنتروپی شانون (ج)

## ارزیابی مدل‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها از سطح زیرمنوآر AUC در منحنی ROC استفاده شد که این سطح، نوعی شاخص کمی برای قدرت پیش‌بینی مدل‌هاست. این روش توسط

سیاه‌کمری و زینی‌وند [۱۰] و تهرانی و همکاران [۲۴] و [۲۵] و نیز پژوهش‌های مشابه در سال‌های اخیر به دلیل کارایی بهتر استفاده شده است.



شکل ۶. منحنی ROC مربوط به نقشه پتانسیل سیل با استفاده از مدل نسبت فراوانی (الف) مدل شاخص آماری (ب) و مدل آنتروپی شانون (ج)

پارامترهای شیب، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر محسوب می‌شوند. درصد مساحت هر طبقه از پتانسیل سیل در نتیجه اجرای هر سه مدل نسبت فراوانی، شاخص آماری و آنتروپی شانون در حوضه کشکان در جدول ۱ ارائه شده است. بیشترین مساحت طبقات خیلی زیاد و زیاد حساسیت سیل مربوط به مناطق غربی و مرکزی حوضه کشکان در هر سه مدل است.

پس از اجرای مدل‌ها و اعتبارسنجی نقشه نهایی حاصل از ۱۱ پارامتر مؤثر بر سیل، حساسیت‌سنجی پارامترهای مؤثر در تهیه نقشه نهایی سیل نیز برای هر سه مدل انجام شد. نتایج نشان داد برای مدل FR پارامترهای ارتفاع و جهت شیب حوضه و فاصله از رودخانه، پارامترهایی هستند که بیشترین تأثیر را در نتیجه نهایی دارند. برای مدل SI نیز پارامترهای کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی بیشترین تأثیر را دارند و برای مدل Shannon

جدول ۱. درصد مساحت هر طبقه پتانسیل سیل در مدل ها

مدل آنتروپی شانون		مدل نسبت فراوانی		شاخص آماری		مدل
درصد	مساحت طبقات (هکتار)	درصد	مساحت طبقات (هکتار)	درصد	مساحت طبقات (هکتار)	طبقه حساسیت سیل
۱۸/۰۳	۱۹۱۴۶۵۸	۲۱/۵۶	۲۲۹۵۵۹۰	۲۱/۰۴	۲۲۳۹۴۲۵	خیلی کم
۲۱/۲۰	۲۲۵۱۷۰۴	۲۰/۵۸	۲۱۹۱۱۴۳	۲۰/۱۶	۲۱۴۵۷۱۶	کم
۲۱/۵۰	۲۲۸۲۹۳۵	۲۹/۴۹	۲۱۸۱۳۸۲	۲۲/۳۲	۱۳۷۶۳۱۵	متوسط
۱۸/۷۵	۱۹۹۱۲۶۸	۱۹/۷۴	۲۱۰۱۴۶۳	۱۸/۴۷	۱۹۶۶۴۸۸	زیاد
۲۰/۵۲	۲۱۷۸۶۸۷	۱۷/۶۲	۱۸۷۵۹۶۵	۱۸/۰۱	۱۹۱۷۵۹۹	خیلی زیاد

### بحث و نتیجه گیری

در بین روش های مختلف برای تهیه نقشه های پهنه بندی و حساسیت سیل، روش های آماری به علت سادگی در عمل و نیز دقت قابل قبول، بیشتر مورد توجه قرار می گیرند. در پژوهش حاضر از سه مدل نسبت فراوانی (FR)، شاخص آماری (SI) و آنتروپی شانون و نیز بهره گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تعیین نقشه پتانسیل خطر سیل در حوضه آبخیز کشکان استفاده شد. نقشه های نهایی حاصل از اجرای این سه مدل در منطقه به پنج طبقه پتانسیل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شدند. آنچه در اینجا اهمیت دارد، مناطقی با پتانسیل خیلی زیاد است. محاسبه مساحت هر یک از طبقات حساسیت سیل حاصل از مدل ها، نشان داد مدل آنتروپی شانون، مساحت بیشتری از حوضه را تحت شرایط پتانسیل زیاد خطر سیل گیری نشان می دهد که اغلب مناطق غربی و همچنین، مناطق مرکزی حوضه را شامل می شوند. در پژوهش آزادی و همکاران [۳] نیز که با اجرای مدل های WOE و EBF برای حوضه کشکان انجام شد، بیشترین مساحت پتانسیل زیاد سیل که در مدل WOE ارائه شده بود، اغلب مربوط به همین مناطق معرفی شد که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد. این مناطق در اولویت اول برنامه ریزی و مدیریت ریسک سیل در این حوضه قرار دارند. در پژوهش حاضر علاوه بر استفاده از ابزارهای نرم افزار ArcGIS 10.5 در اجرای مدل ها از نرم افزار SPSS نیز برای اعتبارسنجی نتایج مدل ها بهره گرفته شد. منحنی ROC میزان اعتبار مدل نسبت فراوانی و شاخص آماری را ۰/۷۸ (خوب) و اعتبار مدل آنتروپی شانون را ۰/۸۲ (خیلی خوب) برآورد کرد. در نهایت، از بین مدل های بررسی شده، مدل آنتروپی شانون دارای درصد اعتبار و صحت بیشتری نسبت

به دو مدل نسبت فراوانی و شاخص آماری برای این منطقه است و نتایج و نقشه نهایی مناطق مستعد سیل حاصل از این مدل برای حوضه کشکان قابل اعتمادتر است. با توجه به طبقه بندی کاربری های موجود در حوضه آبخیز کشکان، ابتدا مناطق شهری توان زیادی در تولید رواناب و سیلاب دارند که ناشی از بالا بودن درصد مساحت نفوذناپذیر در این مناطق است و با توجه به وجود مناطق مسکونی در شهر، پتانسیل خطر تلفات انسانی و مالی زیادی دارد. در مقابل، مناطق جنگلی و مرتعی به علت زیاد بودن نفوذپذیری و وجود پوشش گیاهی، توان کمتری در تولید سیلاب دارند. تغییر کاربری اراضی از مراتع به زراعت و مسکونی سبب افزایش خطر سیل خیزی خواهد شد. در اجرای مدل ها این حقایق مشهود بود و مناطق شهری و زراعی در طبقات حساسیت بیشتر خطر سیل قرار گرفتند. شبکه زهکشی مسئولیت تخلیه آب های جاری شده را دارد. نتایج مدل ها نشان می دهد با افزایش زهکشی، پتانسیل سیل گیری منطقه کاهش می یابد که با حقیقت آن در طبیعت سازگار است. بررسی شاخص رطوبت توپوگرافی که از عوامل مؤثر در پتانسیل یابی سیل و بیانگر میزان نگهداشت آب است، نشان می دهد با افزایش مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی، میزان ماندگاری آب در سطح، بالاتر می رود و این امر در نتایج مدل ها نیز مشهود است. کاهش شیب سبب افزایش ماندگاری آب و کاهش تحرک جریان در مسیر و به بیانی آب گرفتگی و افزایش پتانسیل سیل در منطقه می شود که در نتایج مدل ها نیز مشهود است و با نتایج پژوهش های سیاه کمری و زینی وند [۱۰] و آزادی و همکاران [۳] مطابقت دارد. افزایش ارتفاع در حوضه آبخیز کشکان نشان دهنده کاهش سیل گیری است و در واقع مناطق پست تر، پتانسیل بیشتری در سیل گیری دارند. واحد سنگی

روش‌های کاهش خسارت‌های سیل و شیوه برخورد با رخداد سیلاب مشاهده می‌شود، تغییر نگرش از مهار سیلاب به مدیریت سیلاب است و در این نوع نگاه روش‌هایی مانند سیستم‌های هشدار سیل، پهنه‌بندی سیلاب، بیمه سیل مواردی از این نوع نیز به‌عنوان اجزای مهم مدیریت سیلاب مطرح هستند. بنابراین، استفاده از روش‌های ارائه‌شده در پژوهش حاضر برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل در مناطق مختلف، می‌تواند کمک شایانی به برنامه‌ریزی، تصمیم‌گیری و مدیریت سیلاب بکند.

### منابع

- [1]. Alizadeh A. Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University Press. Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University Press, 2009; 26th edition (In Persian).
- [2]. Barkhordari J, Tireh Shabankareh K, Mehrjerdi MZ, Khalkhali M. Study of water spreading effects on quantitative and qualitative changes of pastural cover: A case study in station of Sarchahan water spreading (Hormozgan province). Watershed Researches in Pajouhesh & Sazandegi. 2009; 82: 65-72 (In Persian).
- [3]. Azadi F, Sadough H, Qahrdavi M, Shahabi H. Zoning of flood risk sensitivity in Kashkan river basin using two models EBE and WOE. Journal of Geography and Environmental Hazards, 2020, 33: 45-60. [Persian].
- [4]. Ismaili Alavicheh A, Karimi S, Alavipour F. Vulnerable assessment of urban areas against floods with fuzzy logic, Quarterly Journal of Environmental Science and Technology, 2017. 5: 12-1. [Persian].
- [5]. Arianpour, M. and Jamali, A. A. Flood Hazard Zonation using Spatial Multi-Criteria Evaluation (SMCE) in GIS (Case Study: Omidieh-Khuzestan). European Online Journal of Natural and Social Sciences. 2015, 4(1): 39 – 49.
- [6]. Khosravi, K., Pourghasemi, H. R., Chapi, K., & Bahri, M. Flash flood susceptibility analysis and its mapping using different bivariate models in Iran: a comparison between Shannon's entropy, statistical index, and weighting factor models. Environmental monitoring and assessment. 2016, 188(12), 656.
- [7]. Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. Environmental Modelling & Software, 2017, 95, 229-245.

که شامل ماسه‌سنگ، سنگ گچ، مارن قرمز و سیلت سنگ است، پتانسیل زیادی در ایجاد سیل دارند و نیز با پژوهش آزادی و همکاران [۳] مطابقت دارد. نتایج این پژوهش با مطالعات [۲۵] و [۲۶] نیز تطابق دارد. سیل‌خیزی یک منطقه برآیندی از عوامل مختلف مؤثر بر ایجاد سیلاب است، بنابراین نمی‌توان فقط یک یا دو عامل مثل بارش را در نظر گرفت. از مزایای پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش آزادی و همکاران [۳]، حساسیت‌سنجی پارامترهای مؤثر در تهیه نقشه نهایی سیل است که برای هر سه مدل اجراشده در این پژوهش، انجام شد. نتایج نشان داد برای مدل FR پارامترهای ارتفاع و جهت شیب حوضه و فاصله از رودخانه، پارامترهایی هستند که بیشترین تأثیر را در نتیجه نهایی دارند. برای مدل SI نیز پارامترهای کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی بیشترین تأثیر را دارند و برای مدل Shannon پارامترهای شیب، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر محسوب می‌شوند. نکته حائز اهمیت آن است که در دوره‌های کم‌آبی و خشکسالی نیز رخداد سیل متوقف نشده و حتی گاهی با شدت بزرگ‌تر و حجم خسارت‌های بیشتر رخ می‌دهد. مدل‌های اجراشده در این مطالعه، توانایی برآیندگیری از چندین عامل مؤثر در یک پدیده را دارند، همان‌طور که در این پژوهش از ۱۱ پارامتر مؤثر برای رسیدن به نقشه نهایی هر مدل بهره گرفته شد؛ در نهایت، نتیجه مهم اینکه مدل آنتروپی شانون، مساحت بیشتری از حوضه را تحت شرایط پتانسیل بالای خطر سیل‌گیری نشان می‌دهد (حدود ۴۰ درصد از مساحت منطقه در طبقه خطر سیل زیاد و خیلی زیاد) که اغلب مناطق غربی و همچنین، مناطق مرکزی حوضه را شامل می‌شوند که این مناطق در کوه‌دشت، خرم‌آباد و پلدختر قرار دارند. با توجه به اینکه این مناطق برای حوضه کشکان در پژوهش‌های اخیر با روش‌های دیگر نیز، مستعدتر معرفی شدند، در اولویت اول برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک سیل در این حوضه قرار دارند. می‌توان گفت که دیگر نباید سیلاب را به‌عنوان یک حادثه غیرمترقبه در کشور دانست بلکه می‌توان با بررسی‌های ضروری از جمله نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل ضمن ایجاد آمادگی لازم و تدوین راه‌های پیشگیری و مدیریت بهینه سیلاب، بروز خسارت‌های ناشی از سیلاب را در کشور تا حد زیادی کاهش داد. آنچه در سال‌های اخیر در سطح جهان در زمینه

- [8]. Abedini M, Fathi M. Flood Risk Mapping and Evaluation by using the Analytic Network Process Case Study: Khiav Chai Catchment. *Hydrogeomorphology*. 2015; Volume 1, Issue 3, Page 81-97. [Persian].
- [9]. Hosseini M, Jafar Biglou M, Ground F. Determination of flood catchment areas of Kashkan river using hydraulic model to reduce flood risks. *Journal of Risk Knowledge*, 2015. 2 (3): 355-369. [Persian].
- [10]. Siahkamari S, Zinivand H. Potential finding of flood prone areas using statistical index model and weight of evidence (Maderso watershed, Golestan). *Journal of Remote Sensing and GIS in Natural Resources*. 2016, 7 (4): 116-133. [Persian].
- [11]. Abedini M, Beheshti Javid E. Flood Hazard Mapping of Lighvan Chai Watershed Using Network Analysis Process Model (ANP) and GIS. *Geographic Space, Islamic Azad University of Ahar Branch*. 2016; 55: 293-312. [Persian].
- [12]. Kanani-Sadat Y, Arabsheibani R, Karimipour F, Nasser M. A New Approach to Flood Susceptibility Assessment in Data-Scarce and Ungauged Regions Based on GIS-based Hybrid Multi Criteria Decision-Making Method, *Journal of Hydrology* 2019; Volume 572, pp 17-31.
- [13]. Bui, D. T., Panahi, M., Shahabi, H., Singh, V. P., Shirzadi, A., Chapi, K., Ahmad, B. B. (2018). Novel hybrid evolutionary algorithms for spatial prediction of floods. *Scientific reports*, 8(1), 15364.
- [14]. Azad Talab M, Shahabi H, Chapi K, Shirzadi A. Prediction of flood risk in Sanandaj city using hybrid models. Master Thesis in Environmental Risk, 2019, University of Kurdistan. [Persian].
- [15]. Tehrany MS, Jones S, Shabani F. Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. *Catena*. 2019; 1(175):174-92.
- [16]. Faramarzi H, Hosseini M, Pourghasemi H, Farnaghi M. Flood risk assessment and zoning in Golestan National Park. *Journal of Echo Hydrology*, 2019. 6 (4): 1055-1068. [Persian].
- [17]. Mokhtari D, Rezaei Moghadam, Rahimpour T, Moezz S. Preparation of flood risk map in Gomnab Chay catchment using model ANP and techniques GIS. *Journal of Echo Hydrology*. 2020, 7 (2): 502-497. [Persian].
- [18]. Hosseinzadeh M, Panahi R, Tarband T. Flood sensitivity zoning in Songhor catchment in Kermanshah province. *Journal of Echo Hydrology*. 2020, 7 (4): 873-889. [Persian].
- [19]. Moore ID, Grayson RB, Ladson AR. Digital terrain modelling. A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. 1991, *Hydrol Process* 5, 3–30.
- [20]. Bui D, Lofman O, Revhaug I, Dick O. Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. *Natural Hazards*. 2011, 59(3), 1413–44.
- [21]. Bednarik M, Magulova B, Matys M, Marschalko M. Landslide Susceptibility Assessment of the Kral ovany–Liptovsky Mikulas Railway Case Study. *J. Physics and Chemistry of the Earth*. 2010, 35(3-5): 162-171.
- [22]. Entezari M, Jalilian T, Darvish Khatouni J. Zoning of flood susceptibility map using performance evaluation of frequency ratio and weight of evidence methods (Kermanshah province). *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*. 2019, 6 (4): 143-160.
- [23]. Tahmasebipour N, Rahmati O, Ghorbaninejad S. Predicting the sensitivity of geyser erosion in Seymareh region based on the Hamel model of certainty and determining the importance of factors affecting it, *Echo Hydrology*. 2016, 3 (1): 83-93. [Persian].
- [24]. Tehrany M. S, Pradhan B, Jebur M. N. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of hydrology*. 2014, 512, 332-343.
- [25]. Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2015, 29(4): 1149-1165.