

## پهنه‌بندی حساسیت سیل‌گیری با استفاده از روش ترکیبی نوین تئوری بیزین- فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز نکا - استان مازندران)

علیرضا عرب عامری<sup>۱</sup>، حمیدرضا پورقاسمی<sup>۲\*</sup>، کورش شیرانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. استادیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

۳. استادیار، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۰۷؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۲/۰۳)

### چکیده

تهیه نقشه حساسیت‌پذیری سیلاب، نخستین گام در برنامه‌های مدیریت سیلاب است. هدف از این پژوهش، شناسایی مناطق حساس به سیل‌گیری با استفاده از روش ترکیبی نوین تئوری بیزین فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی (Bayes-AHP) در حوضه آبخیز نکا- شهرستان ساری است. به‌منظور تهیه نقشه حساسیت‌پذیری سیل‌گیری در منطقه مطالعاتی، نقشه پراکنش سیلاب‌ها به‌منظور تحلیل‌های آماری تهیه شد. از تعداد کل ۳۴۲ موقعیت سیل، ۷۰ درصد (۲۴۰ موقعیت سیل) به‌منظور اجرای مدل و ۳۰ درصد (۱۰۲ موقعیت سیل) به‌منظور اعتبارسنجی استفاده شد. با استفاده از مطالعه گذشته و پیمایش‌های گسترده میدانی، ۱۱ عامل مؤثر شامل درصد شیب، طبقات ارتفاعی، فاصله از آبراهه، تراکم زهکشی، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI)، سنگ‌شناسی، کاربری اراضی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWD)، شاخص توان آبراهه (SPI)، بارندگی سالانه و انحنای سطح به‌منظور پهنه‌بندی سیل‌گیری بررسی شد. با استفاده از روش AHP، وزن هر یک از عوامل و بر اساس تئوری بیزین وزن هر یک از طبقات عوامل مؤثر بر وقوع سیلاب‌های منطقه مطالعه‌شده محاسبه شد. درنهایت، نقشه پهنه‌بندی حساسیت‌پذیری سیل‌گیری در پنج طبقه و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.1 تهیه شد. به‌منظور ارزیابی مدل منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. نتایج ارزیابی نشان داد مدل ترکیبی دقت مناسبی (۰/۷۶۱) در شناسایی پهنه‌های حساس به سیلاب دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، عوامل درصد شیب، ارتفاع و کاربری اراضی به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۱۹۵، ۰/۱۴۶ و ۰/۱۴۶ بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب‌های منطقه مطالعاتی داشته‌اند. همچنین طبق نتایج، ۱۷/۲۴ و ۱۵/۳۷ درصد از حوضه آبخیز نکا در رده‌های حساسیت زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. مدل ترکیبی ارائه‌شده می‌تواند برای تحقیقات بیشتر در زمینه تهیه نقشه خطر سیل‌گیری و مدیریت بحران استفاده شود.

**کلیدواژگان:** اعتبارسنجی، پهنه‌بندی، تئوری بیزین، حوضه آبخیز نکا، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی.

## مقدمه

هر ساله مخاطرات طبیعی مانند زمین‌لغزش، زلزله، سیل و غیره سبب خسارت‌های مالی و جانی گسترده‌ای در سراسر جهان می‌شوند [۱]. سیل‌گیری از مهم‌ترین پدیده‌های هیدرواکولوژیک طبیعت است که در هر دوره سبب وارد شدن خسارت‌هایی به دستاوردهای بشری می‌شود [۲]. سیل‌گیری یکی از رخداد‌های هیدرواقليمی و از جدی‌ترین پدیده‌های طبیعی است که جوامع بشری را همواره تهدید می‌کند [۳]. سیل‌گیری عبارت است از سرریز شدن آب که سبب غرق شدن زمین‌های اطراف و حاشیه می‌شود و ممکن است موجب خسارت‌رساندن به زمین‌های کشاورزی، مناطق شهری و نیز خسارت‌های جانی شود [۴ و ۵]. همچنین سیل‌گیری سبب ایجاد خسارت‌های جدی برای حمل‌ونقل، میراث فرهنگی، اکوسیستم‌های طبیعی، اقتصاد و زندگی انسان می‌شود [۶]. در ایران به‌علت آب و هوای متنوع، دما و بارندگی‌های متغیر در بیشتر حوزه‌ها به‌خصوص در مناطق شمالی کشور، هر ساله شاهد سیل‌گیری‌های متعددی هستیم. در طول دهه گذشته خسارت‌های اقتصادی ایجاد شده به‌وسیله سیل‌گیری در ایران به ۱۷۰۵ هزار دلار افزایش یافته است [۷]. متأسفانه در ایران به موضوع سیل و مدیریت و کاهش خسارت‌های آن توجه جدی نشده است و فقط زمانی که سیلاب مخربی جاری می‌شود و فاجعه‌ای به‌وجود می‌آورد توجه مسئولان به آن جلب می‌شود [۸]. اگرچه نمی‌توان از وقوع سیلاب جلوگیری کرد، از طریق تحلیل‌های مناسب و روش‌های پیش‌بینی می‌توان خسارت‌های ناشی از آن را کاهش داد [۹ و ۱۰]. یکی از راه‌های جلوگیری و کاهش خسارت‌های ناشی از سیل‌گیری، قراردادن اطلاعات معتبر در اختیار مردم از طریق تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب است [۱۱]. از موارد کاربردی نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب می‌توان به تعیین بستر و حریم رودخانه‌ها، مطالعه و توجیه اقتصادی طرح‌های عمرانی، پیش‌بینی و هشدار سیل، عملیات امداد و نجات و بیمه سیل اشاره کرد [۱۲]. با تطبیق نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیل‌گیری با نقشه‌های کاربری اراضی می‌توان مناطق تحت خطر شامل شهرها، روستاها، پل‌ها، کارخانه‌ها و غیره را شناسایی کرد تا اقدامات لازم برای حفاظت از این سرمایه‌ها انجام پذیرد [۱۳]. همچنین از نقشه پهنه‌بندی خطر سیلاب می‌توان به‌منظور مقاوم‌سازی سازه‌ها در برابر

خطر، اجتناب از مناطق تحت خطر و نیز برنامه‌ریزی به‌منظور مقابله با خطر استفاده کرد [۱۳]. در سال‌های اخیر به‌علت رشد شهرنشینی و پراکنش زمین‌ها در اطراف حریم رودخانه‌ها، ارزیابی سیلاب‌های منطقه‌ای به‌طور شایان توجهی گسترش یافته است، در نتیجه روش‌های پیش‌بینی جدید نیز توسعه پیدا کرده است [۷]. در تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل‌گیری و آنالیز حساسیت آن به معیارهای مختلفی نیاز است که باید ارتباط آنها با وقوع سیلاب بررسی شود [۱۴]. پیشرفت تکنولوژی سبب شده است بشر در جست‌وجوی ابزار جدید و پیشرفته باشد [۱۵]. بر این اساس سامانه اطلاعات مکانی (GIS) مشارکت گسترده‌ای در آنالیز خطرهای طبیعی پیدا کرده است [۱۶]. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی<sup>۱</sup> نیز به‌عنوان یکی از فنون معروف تصمیم‌گیری چندمعیاره<sup>۲</sup> برای وضعیت‌های پیچیده که سنجه‌های چندگانه و متضادی دارند، ابزار تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیر و در عین حال قوی به‌شمار می‌رود. از طرف دیگر، تئوری وزن واقعه روشی داده‌محور است که به‌عنوان یکی از مدل‌های نظریه بیزین در قالب لگاریتم خطی شناخته شده و از احتمال قبلی (غیرشرطی) و خلفی (شرطی) بهره می‌گیرد [۱۷]. یکی از مزایای استفاده از تئوری بیزین امکان استفاده از داده‌های کمی و کیفی متغیر و نظرهای کارشناسی در سیستم‌های پیچیده است که این امر به‌صورت بالقوه در مدیریت منابع طبیعی باارزش است، به‌خصوص در شرایطی که دسترسی به داده‌های قابل اعتماد در منابع طبیعی محدودیت دارد [۱۸].

## پیشینه تحقیق

از جمله مطالعات انجام‌گرفته در زمینه پهنه‌بندی خطر سیل‌گیری در سطح ایران و جهان، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: محمدی و همکارانش [۱۹] به پهنه‌بندی خطر سیل‌گیری در مناطق شهری با استفاده از مدل‌های WMS و HEC-RAS در اشنویه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که رودخانه گلار در محدوده شهر اشنویه به‌دلیل مدیریت غلط و غیراصولی، مقطع اصلی خود را از دست داده و به یک کانال تبدیل شده است و مقطع رودخانه قابلیت عبور سیلاب‌هایی با دوره بازگشت ۲۵ ساله را ندارد. ابراهیمی و همکارانش

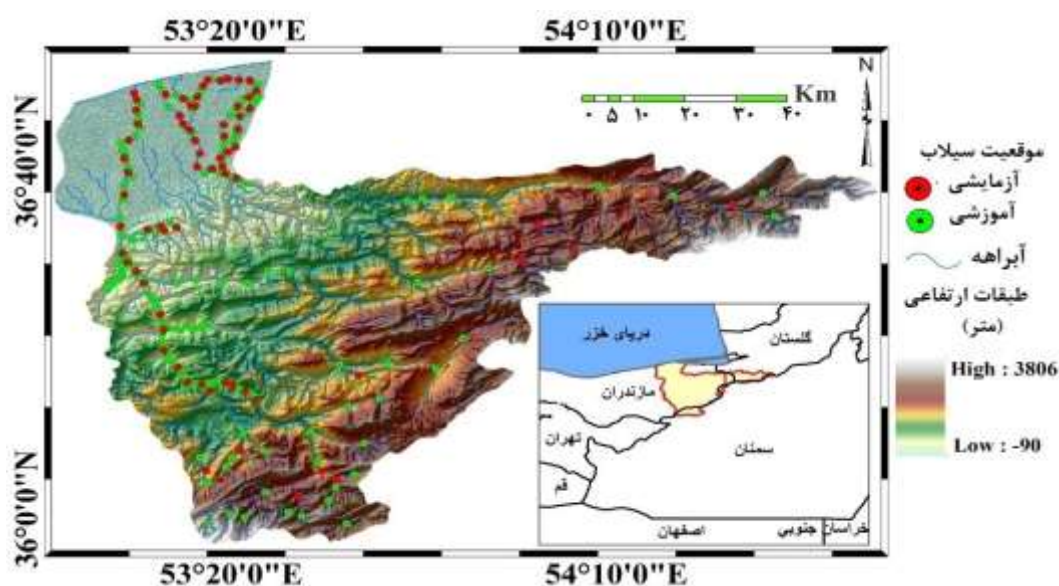
1. Analytical Hierarchy process (AHP)  
2. Multipal Attribution Decision Making (MADM)

لجستیک دارد. زهرا و افسر [۲۶] نقشه حساسیت سیل‌گیری در حوضه آندوس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را تهیه کردند و به این نتیجه رسیدند که فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی توانایی زیادی در شناسایی مناطق حساس به سیل‌گیری دارد. خسروی و همکارانش [۲۷] مدل‌های آماری دومتغیره وزن واقعه و نسبت فراوانی با تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره را در ارزیابی حساسیت سیل‌گیری و تهیه نقشه آن بر پایه سیستم اطلاعات جغرافیایی مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های استفاده‌شده دقت قابل قبولی در تهیه نقشه حساسیت سیل‌گیری دارند. بنابراین، هدف از پژوهش حاضر تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت سیل‌گیری با استفاده از روش ترکیبی نوین وزن واقعه- فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی است. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های صورت‌گرفته استفاده از مدل ترکیبی AHP و تئوری بی‌زین به‌منظور پهنه‌بندی سیلاب‌گیری است.

#### منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده در سه استان مازندران، گلستان و سمنان واقع شده است. مساحت آن ۶۹۲۴ کیلومتر مربع است و از لحاظ جغرافیایی بین مختصات ۴۵ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۱۷ دقیقه طول‌های شرقی و ۳۵ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه عرض‌های شمالی واقع شده است که در طبقه‌بندی حوضه‌های آبخیز موسوم به حوضه آبخیز نکا- ساری است (شکل ۱). کمینه و بیشینه ارتفاع منطقه مطالعه‌شده از ۹۰- تا ۳۸۰۶ متر تغییر می‌کند و متوسط بارندگی منطقه ۶۰۰ میلی‌متر است. از مهم‌ترین مراکز جمعیتی منطقه مطالعه‌شده می‌توان به ساری، نکا، کلمردی، سورک، بیشه‌بند، کیاسر و محمدآباد اشاره کرد. قسمت‌های مرکزی منطقه شامل جنگل‌های انبوه و متراکم است. شیب منطقه از جنوب شرق به سمت شمال غرب است، به‌طوری که قسمت شمال غرب منطقه جلگه ساحلی است و توپوگرافی نسبتاً همواری دارد، در حالی که بقیه قسمت‌های حوزه توپوگرافی کوهستانی و تپه‌ماهوری دارد.

[۲۰] نقشه برنامه‌ریزی استراتژیک محیطی بر پایه تغییرات کاربری اراضی و پهنه‌بندی سیل‌گیری در حوضه نکارود را تدوین کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های HEC-RAS و HEC-GeoRAS در ترکیب با ArcGIS می‌توانند مقادیر عددی و گرافیکی مناسب را برای مطالعه خصوصیات هیدرولیکی جریان در رودخانه‌ها و نیز کارایی تلفیق مدل‌های یادشده به‌منظور پهنه‌بندی سیل‌گیری با دقت زیاد ارائه دهند. دهقانی و همکارانش [۱۳] خطر سیل‌گیری و پهنه‌بندی آن در دشت بافت در جنوب شرق ایران را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که بخش شرقی شهر بافت در معرض خطر زیاد سیل‌گیری رودخانه‌ای قرار دارد. در خارج از کشور نیز چن و همکارانش [۲۱] کاربرد ترکیبی سیستم اطلاعات جغرافیایی و AHP به‌منظور ارزیابی ریسک سیلاب و مدیریت دشت‌های سیلابی در تایوان را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ادغام سیستم اطلاعات جغرافیایی با AHP می‌تواند اطلاعات با جزئیات مفید در زمینه مدیریت ریسک سیلاب ارائه کند. رحمتی و همکارانش [۲۲] خطر سیل‌گیری در منطقه یاسوج با استفاده از GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را پهنه‌بندی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش AHP می‌تواند تأثیر مهمی در تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل‌گیری داشته باشد، بنابراین تلفیق روش AHP و تکنیک سیستم اطلاعات جغرافیایی را به‌منظور ارزیابی حساسیت سیل‌گیری پیشنهاد دادند. تهرانی و همکارانش [۲۳] نقشه حساسیت سیل‌گیری با استفاده از مدل ترکیبی وزن واقعه و ماشین‌های بردار پشتیبان در محیط نرم‌افزار GIS را تهیه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل ترکیبی دقت پیش‌بینی زیادی (۹۵/۶۷ درصد) دارد. تهرانی و همکارانش [۲۴] حساسیت سیل‌گیری و اعتبارسنجی آن را با استفاده از روش ترکیبی نوین ماشین‌های بردار پشتیبان و نسبت فراوانی ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش ترکیبی سبب افزایش دقت پیش‌بینی شده است. یوسف و همکارانش [۲۵] پهنه‌بندی حساسیت سیل‌گیری در شهر جده را با استفاده از مدل نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک و ترکیب آنها انجام دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل ترکیبی دقت بیشتری نسبت به روش‌های نسبت فراوانی و رگرسیون



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

## روش کار

توپوگرافی مقدار تجمع جریان را در هر نقطه از حوضه آبخیز نشان می‌دهد [۱۵]. این پارامتر با وضعیت رطوبت خاک رابطه دارد. انحنای سطح بیان‌کننده تغییرات جهت در طول یک منحنی است، بنابراین همگرایی و واگرایی توپوگرافیک را نشان می‌دهد، به طوری که مقادیر منفی و مثبت انحنای سطح، به ترتیب واگرایی و همگرایی جریان را نشان می‌دهند [۳۲]. شاخص‌های  $SPI$ ،  $TWI$  و انحنای سطح در محیط نرم‌افزار SAGA.GIS 2.1.1 و با استفاده از رابطه‌های ۱ تا ۸ محاسبه شدند [۳۲]. عوامل درصد شیب و طبقات ارتفاعی نیز در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.1 محاسبه شد. شاخص  $NDVI$  با استفاده از تصاویر لندست در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.1 و با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد. نقشه کاربری اراضی از اداره کل منابع طبیعی استان مازندران تهیه شد. با استفاده از نقشه رقومی زمین‌شناسی کشور، لایه سنگ‌شناسی تهیه شد. لایه آبراهه از نقشه توپوگرافی منطقه استخراج شد. نقشه بارندگی نیز با استفاده از آمار بارندگی ایستگاه‌های بندر امیرآباد، گلوگاه، گرگان، هاشم‌آباد، کیاسر، پل سفید و ساری و با اعمال رابطه گرادیان بارندگی منطقه بر مدل رقومی ارتفاعی تهیه شد.

$$Plan\ Curvature = -\frac{q^x \times r - 2 \times p \times q \times s + p^x \times t}{(\sqrt{1 + P^2} + q^2)^2} \quad (1)$$

$$SPI = As \times \tan \sigma \quad (2)$$

سیلاب‌ها دلایل متنوعی دارند که با عنوان عوامل مؤثر در سیلاب شناخته می‌شوند [۲۸]. به منظور انجام آنالیز حساسیت و تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل‌گیری، اهمیت و ارتباط هر یک از عوامل مؤثر با سیل‌گیری باید ارزیابی شود [۲۹]. در این پژوهش با توجه به سابقه پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه [۷، ۲۷، ۳۰] و بررسی‌های میدانی گسترده از ۱۱ عامل مؤثر در سیل‌گیری شامل طبقات ارتفاعی، درصد شیب، فاصله از آبراه، تراکم زهکشی، انحنای سطح، شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده ( $NDVI$ )، بارندگی، کاربری اراضی، شاخص توان آبراهه ( $SPI$ )، شاخص رطوبت توپوگرافی ( $TWI$ ) و سنگ‌شناسی استفاده شد (شکل ۲). نقشه‌های پایه استفاده شده برای تهیه عوامل مؤثر در سیل‌گیری در این تحقیق عبارت است از نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ از مدل رقومی ارتفاعی منطقه با توان تفکیک مکانی  $30 \times 30$  متر به منظور استخراج پارامترهای توپوگرافیک شامل درصد شیب، طبقات ارتفاعی، انحنای سطح،  $SPI$  و  $TWI$  استفاده شد. مدل رقومی ارتفاعی و مشتقات آن تأثیر عمده‌ای در شناسایی مناطق مستعد رخداد سیل‌گیری دارند [۲۹]. شاخص توان آبراهه بیان‌کننده قدرت جریان آب به لحاظ فرسایش است [۳۱]. شاخص رطوبت

$$s = \frac{-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9}{4 \times \Delta_s^2} \quad (7)$$

$$t = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9 - 2 \times (z_4 + z_5 + z_6)}{3 \times \Delta_s^2} \quad (8)$$

پارامترهای Z1 تا Z9 مقادیر ارتفاع در شبکه سلولی 3x3 است.

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{IR + R} \quad (9)$$

که در آن R و IR به ترتیب بیان‌کننده مقادیر انعکاس طیفی در مناطق مرئی (قرمز) و مادون قرمز است.

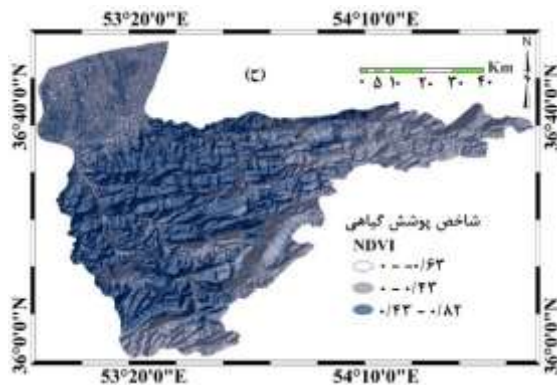
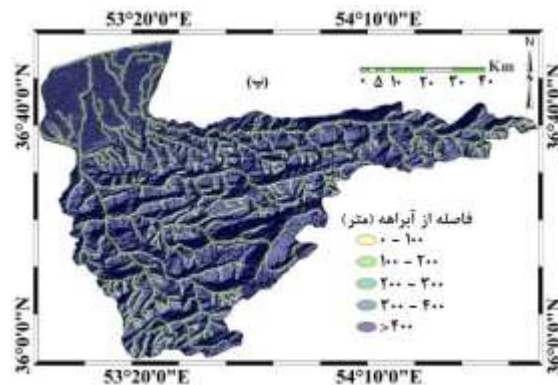
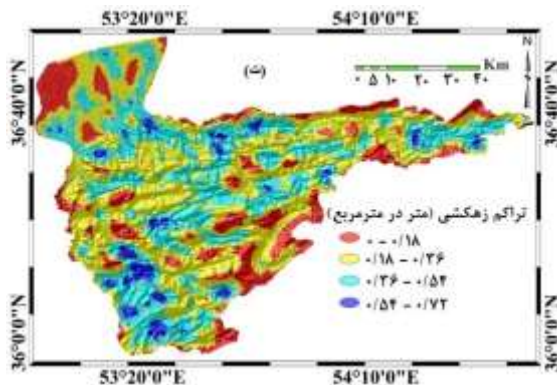
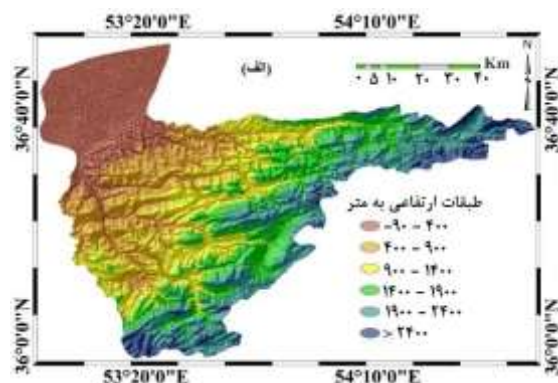
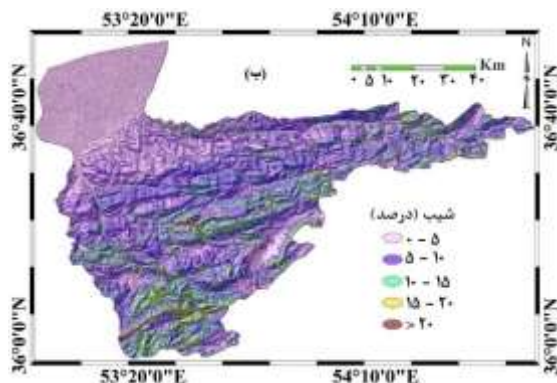
$$TWI = \ln(A_s / \tan \beta) \quad (3)$$

که در آن p, q, r, s, t ضرایبی هستند که در نرم‌افزار استفاده می‌شوند. چگونگی محاسبه آنها در قالب روابط ۴ تا ۸ نشان داده شده است. AS: مساحت حوضه آبخیز و β: گرادیان شیب بر حسب درجه است.

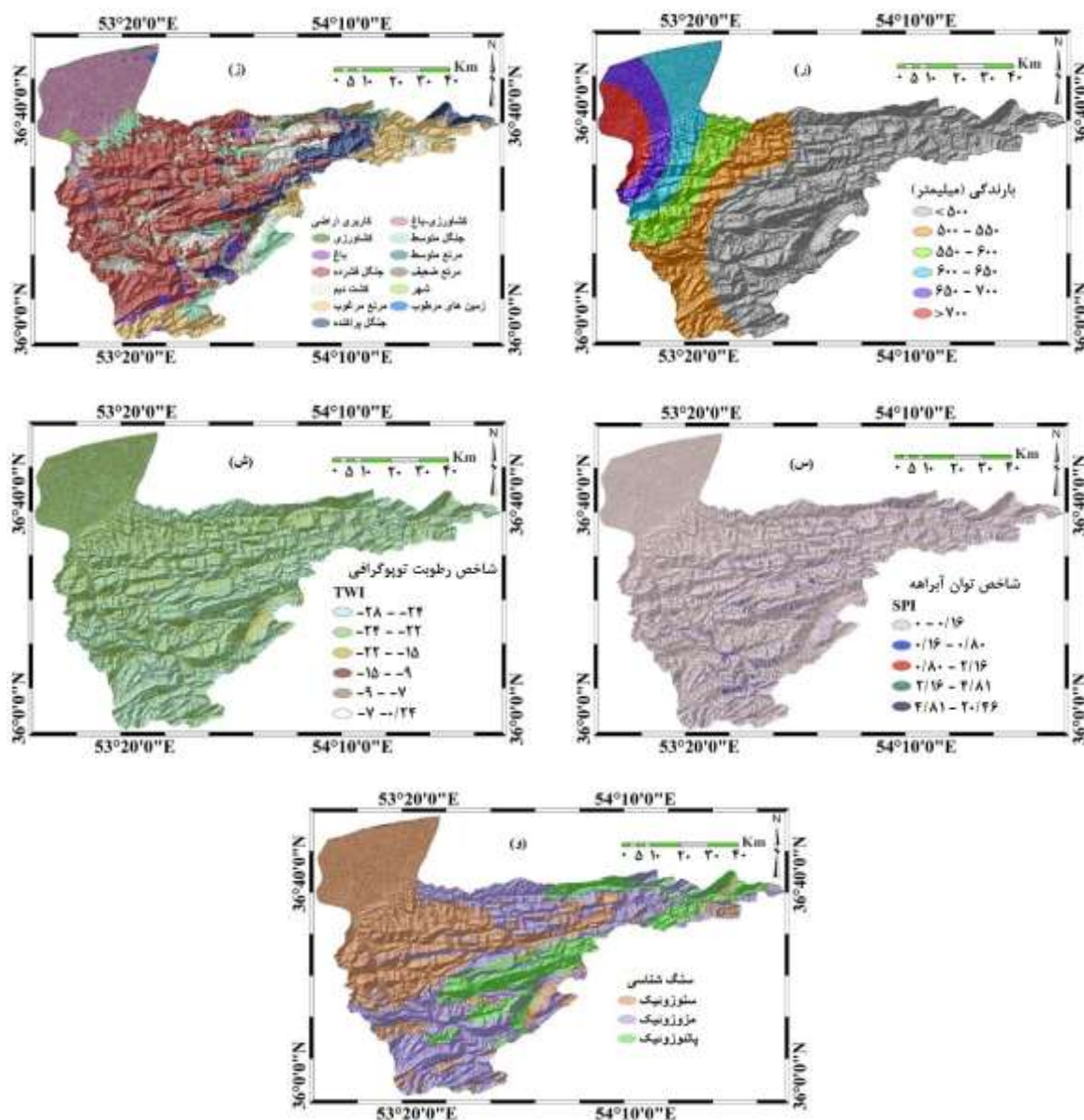
$$p = \frac{Z_3 + Z_6 + Z_9 - Z_1 - Z_4 - Z_7}{6 \times \Delta_s} \quad (4)$$

$$q = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_7 - Z_8 - Z_9}{6 \times \Delta_s} \quad (5)$$

$$r = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_7 + Z_9 - 2 \times (Z_2 + Z_5 + Z_8)}{3 \times \Delta_s^2} \quad (6)$$







شکل ۲. پارامترهای مؤثر در سیلاب

نقشه پراکنش سیل گیری

به منظور پیش بینی پتانسیل رخداد سیلاب در آینده، به بررسی سیلاب هایی نیاز است که در گذشته اتفاق افتاده اند [۳۳ و ۳۴]. نقشه پراکنش سیل گیری می تواند با استفاده از یک روش یا ترکیبی از چند روش آماده شود [۳۵ و ۳۶]. انتخاب روش به هدف پژوهش، شرایط منطقه مطالعه شده و دسترسی به داده های GIS و RS بستگی دارد [۳۷]. در این پژوهش با استفاده از باز دیده های میدانی گسترده و بررسی گزارش های ثبت شده در مدیریت بحران استان مازندران، تعداد ۳۴۲ سیلاب در کل منطقه

شناسایی شد. در زمان اجرای مدل، داده ها معمولاً به دو گروه آموزش و ارزیابی تقسیم می شوند [۳۰]. داده های آموزشی برای اجرای مدل به منظور محاسبه وزن های هر یک از عوامل [۱۸] و داده های ارزیابی به منظور بررسی کارایی مدل اجرا شده [۳] استفاده می شود. بر اساس مرور منابع ۷۰ درصد از داده ها به منظور آموزش و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل استفاده شده است [۳۸-۴۰]. شکل ۳ نمونه ای از سیل گیری رخ داده در منطقه مطالعه شده را نشان می دهد.

احتمال اولیه‌نبودن کلاس  $B_i$  در محدوده مطالعه‌شده است.

در روش وزن واقعه، وزن طبقه‌های هر عامل به‌وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت ( $w+$ ) (رابطه ۱۲) و منفی ( $w-$ ) (رابطه ۱۳) از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل آنها (رابطه ۱۴) محاسبه می‌شود و در نهایت با استفاده از رابطه ۱۵ وزن نهایی طبقه‌های هر عامل به‌دست می‌آید.

$$W^+ = LN \left( \frac{P(B_i|S)}{p(B_i)} \right) \quad (12)$$

$$W^- = LN \frac{P(\hat{B}_i|S)}{P(\hat{B}_i)} \quad (13)$$

$$C = W^+ - W^- \quad (14)$$

$$W_{final} = C / S_C \quad (15)$$

که در آن: LN لگاریتم بر مبنای عدد نپر، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی،  $W_{final}$  وزن نهایی استانداردشده و  $S_C$  انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است [۳۵].

#### فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی

فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که استفاده‌کننده را برای رسیدن به یک مقیاس ترجیحی از مجموعه‌ای از متغیرها توانا می‌سازد. این روش کاربرد زیادی در انتخاب سایت، ساده‌سازی تحلیل‌ها و بررسی حساسیت و خطر بلایای طبیعی دارد [۴۲ و ۴۳]. مراحل فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی به شرح زیر است: گام نخست تشکیل ساختار سلسله‌مراتبی از مسئله، گام دوم تشکیل ماتریس‌های مقایسات زوجی در اندازه  $(n \times n)$  برای مسئله به کمک مقیاس‌های سنجش نسبی (جدول ۱)، گام سوم محاسبه وزن نسبی هر یک از پارامترها با استفاده از روش میانگین هندسی و گام چهارم تعیین سازگاری ماتریس‌هاست. به‌منظور تعیین سازگاری، ابتدا  $\lambda_{max}$  طبق رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود [۴۴]:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a} \times W_{(i,j)}}{W_{(i,j)}} \quad (16)$$

که در آن:  $\lambda_{max}$  میانگین بردار سازگاری؛  $\bar{a}$  میانگین هندسی ماتریس  $i, j$  و  $N$  تعداد جایگزین‌های مقایسه‌شده



شکل ۳. نمونه‌ای از تأثیرات سیل‌گیری رخ داده در منطقه مطالعه‌شده

#### مدل وزن واقعه

مدل وزن واقعه نوعی روش آماری مبتنی بر تئوری احتمالات بیز است. این مدل وابستگی موجود بین یک واقعه (سیلاب‌های رخ داده) و عوامل سببی (عوامل مؤثر در وقوع سیلاب) را تخمین می‌زند. اگر عوامل مؤثر در وقوع سیلاب را  $B_i$ ، کلاس‌های هر عامل را  $B_i$  و سیلاب‌های رخ داده را  $S$  در نظر بگیریم، در این صورت تئوری احتمالاتی بیز را برای محاسبه احتمال شرطی رخداد سیلاب ( $S$ ) در کلاس معین ( $B_i$ ) می‌توان به‌صورت رابطه ۱۰ به کار برد:

$$P(S|B_i) = \frac{P(B_i|S) \times P(S)}{P(B_i)} \quad (10)$$

که در آن:  $P(S)$  احتمال اولیه وقوع پیشامد  $S$  در محدوده مطالعه‌شده،  $P(B_i)$  احتمال وقوع کلاس  $B_i$  در محدوده مطالعه‌شده،  $P(B_i|S)$  احتمال وقوع پیشامد  $B_i$  به شرطی که پیشامد  $S$  اتفاق افتاده باشد و  $P(S|B_i)$  احتمال وقوع پیشامد  $S$  به شرطی که پیشامد  $B_i$  اتفاق افتاده باشد [۴۱]. احتمال شرطی وقوع سیلاب زمانی که کلاس  $B_i$  اتفاق نیفتاده باشد نیز به‌صورت رابطه ۱۱ تعریف می‌شود:

$$P(S|\bar{B}_i) = \frac{P(\bar{B}_i|S) \times P(S)}{P(\bar{B}_i)} \quad (11)$$

در رابطه یادشده،  $P(S)$  احتمال اولیه وقوع پیشامد  $S$  در محدوده مطالعه‌شده،  $P(\bar{B}_i|S)$  احتمال شرطی نبودن کلاس  $B_i$  به شرطی که  $S$  اتفاق افتاده باشد و

تعیین شده توصیف می‌کند [۴۵]. منحنی ROC نشان‌دهنده حساسیت (Sensitivity) مدل نسبت به درصد سلول‌ها یا واحدهای ناپایدار که به‌درستی توسط مدل پیش‌بینی شده‌اند، در مقابل درصد سلول‌های ناپایدار پیش‌بینی شده نسبت به کل است. این مقادیر توانایی مدل را نسبت به تمایز صحیح بین مشاهدات مثبت و منفی در نمونه اعتبارسنجی بیان می‌کند. حساسیت زیاد بیان‌کننده تعداد زیاد پیش‌بینی‌های درست (مثبت‌های حقیقی) است، در حالی که ویژگی بالا (اختلاف 1-specificity کم) نشان‌دهنده عدد کم مثبت‌های کاذب است. در مساحت زیرمنحنی، نرخ مثبت کاذب (1-specificity) در محور X (رابطه ۱۹) و نرخ مثبت حقیقی (sensitivity) در محور Y (رابطه ۲۰) نمایش داده می‌شود.

$$X = 1 - \text{specifity} = 1 - \left[ \frac{TN}{(TN + FP)} \right] \quad (19)$$

$$Y = \text{sensitivity} = \left[ \frac{TN}{TP - FN} \right] \quad (20)$$

چگونگی محاسبه منحنی ROC در جدول ۲ ارائه شده است [۴۶].

جدول ۱. مقادیر شاخص ناسازگاری

اندازه ماتریس	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
RI	۰/۵۸	۰/۹۰	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۹	۱/۵۲	۱/۵۴

جدول ۲. چگونگی محاسبه نرخ ROC [۴۶].

مناطق عاری از سیل‌گیری	سیل‌گیری‌ها
مثبت کاذب (FP)	مثبت حقیقی (TP)
منفی حقیقی (TN)	منفی کاذب (FN)

رخ داد سیل‌گیری بر اساس تابع محاسبه  
مناطق امن بر اساس تابع محاسبه

طبقات هر یک از عوامل در وقوع سیل‌گیری با استفاده از تئوری بیزین (مدل وزن واقعه) در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج اولویت‌بندی عوامل با استفاده از مدل AHP (شکل ۴) بیان می‌کند که عوامل درصد شیب، فاصله از آبراهه و کاربری اراضی به‌ترتیب با وزن‌های ۰/۲۶۰، ۰/۱۹۵ و ۰/۱۴۶ به‌ترتیب بیشترین تأثیر را در وقوع سیلاب در منطقه مطالعاتی داشته‌اند که با نتایج [۲۵] مطابقت دارد. عوامل طبقات ارتفاعی، سنگ‌شناسی، بارندگی، تراکم زهکشی، شاخص NDVI، انحنای سطح، شاخص توان آبراهه و شاخص رطوبت توپوگرافی به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار

است. سپس به‌کمک عنصر ویژه  $\lambda_{max}$ ، شاخص سازگاری (CI) به‌صورت رابطه ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} \quad (17)$$

که منظور از n در آن، اندازه ماتریس است. برای محاسبه نرخ ناسازگاری نیز از رابطه ۱۸ می‌توان استفاده کرد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (18)$$

که در آن: CI شاخص ناسازگاری، RI شاخص ناسازگاری ماتریس تصادفی که با استفاده از جدول ۱ تعیین می‌شود. در صورتی که مقدار CR از ۰/۱ کمتر باشد، قضاوت‌ها قابل قبول و در صورت بیشتر بودن مقدار آن، ماتریس قضاوت ناسازگار خواهد بود [۴۴].

#### ارزیابی مدل

منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) روش مفیدی برای نمایش کیفیت شناسایی قطعی و احتمالی و نیز پیش‌بینی سیستم‌هاست. مساحت زیرمنحنی (AUC) کیفیت پیش‌بینی سیستم را به‌وسیله توصیف توانایی سیستم برای پیش‌بینی دقیق اتفاق افتادن یا نیفتادن وقایع از پیش

رابطه کمی- کیفی بین AUC و دقت پیش‌بینی که دامنه بین صفر تا یک را شامل می‌شود به‌شرح زیر است: ۰/۹-۱ دقت عالی، ۰/۸-۰/۹ خیلی خوب، ۰/۷-۰/۸ خوب، ۰/۶-۰/۷ متوسط و ۰/۵-۰/۶ دقت ضعیف [۳۰].

#### نتایج

نتایج اولویت‌بندی عوامل مؤثر در سیل‌گیری با استفاده از روش AHP و نیز نتایج ارتباط بین عوامل مؤثر در وقوع سیلاب و سیل‌گیری‌های رخ داده در منطقه و میزان تأثیر

1. Area Under the Curve (AUC)



آب در شیب‌های کم اشاره کرد. نتایج عامل کاربری اراضی نشان داد کاربری باغ‌های بیشترین تعداد سیل‌گیری و امتیاز را کسب کرده است و نیز بیشترین تأثیر را در وقوع سیل‌گیری داشته است. براساس نتایج در مناطقی که انسان سبب تغییر کاربری و غیرقابل نفوذکردن زمین‌ها با ساخت مناطق مسکونی و جاده شده است، حساسیت منطقه به وقوع سیل‌گیری افزایش یافته است که با نتایج [۴۲] مطابقت دارد. نتایج پارامتر شاخص توان آبراهه نشان داد بین توان آبراهه و وقوع سیل‌گیری رابطه منفی وجود دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش توان آبراهه، وقوع سیل‌گیری کاهش پیدا می‌کند که از دلایل آن می‌توان به ارتباط بین توان آبراهه و شیب اشاره کرد. توان آبراهه در شیب‌های تند افزایش پیدا می‌کند، در مقابل وقوع سیل‌گیری بیشتر در شیب‌های ملایم و سطوح هموار رخ می‌دهد، در نتیجه با کاهش توان آبراهه، وقوع سیل‌گیری افزایش پیدا می‌کند. در شاخص رطوبت توپوگرافی، طبقه ۰/۱۵ تا ۰/۲۲ بیشترین تأثیر را در وقوع سیل‌گیری داشته است. نتایج پارامتر سنگ‌شناسی نشان داد سازندهای مربوط به دوران سنوزوئیک که شامل دشتهای سیلابی رسی، آبرفت‌ها و مخروط‌افکنه‌های جوان کواترنری است، با کسب بیشترین امتیاز (۶/۰۷) بیشترین حساسیت را نسبت به سیلاب از خود نشان داده است.

پس از تعیین وزن عوامل مؤثر در وقوع سیلاب با استفاده از روش AHP و ضرب آن در وزن طبقه‌های عوامل یادشده که با استفاده از تئوری بیزین به‌دست آمده است، طبق رابطه ۲۱ نقشه‌های وزنی با هم جمع شده و نقشه نهایی پهنه‌بندی حساسیت سیل‌گیری منطقه مطالعه‌شده تهیه شد، سپس نقشه یادشده بر اساس شکستگی‌های طبیعی [۴۸-۵۱] به پنج کلاس حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شد (شکل ۵).

درنهایت، دقت پیش‌بینی مدل (ارزیابی) با استفاده از ۳۰ درصد از داده‌های سیل‌گیری انجام گرفت که در اجرای مدل استفاده نشده است. مساحت زیرمنحنی (AUC) در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج اعتبارسنجی نشان داد مدل ترکیبی دقت قابل قبولی (۰/۷۶۱) در شناسایی مناطق حساس به سیل‌گیری دارد. مساحت هر یک از طبقات حساسیت سیل‌گیری به همراه نسبت فراوانی (FR) نیز در جدول ۴ نشان داده شده است.

گرفته‌اند. ضریب ناسازگاری ماتریس مقایسات زوجی نیز در این تحقیق، ۰/۳۴ محاسبه شد. بر اساس نتایج تئوری بیزین، طبقه ارتفاعی ۹۰- تا ۴۰۰ متر بیشترین تعداد سیل‌گیری را شامل شده است و از لحاظ وزن نیز با تفاوت فاحش نسبت به طبقات دیگر بیشترین وزن (۱۳/۴۶) را به‌خود اختصاص داده است که با نتایج [۲۲] مطابقت دارد. نتایج بیان می‌کنند که با افزایش ارتفاع، حساسیت طبقات نسبت به سیل‌گیری کاهش می‌یابد. بررسی طبقات عامل انحنای سطح نشان داد سطوح هموار با ۱۲۱ سیل‌گیری، بیشترین وزن (۱/۳۲) را کسب کرده است که این نتایج بیان‌کننده تأثیر سطوح هموار در وقوع سیل‌گیری است. در پارامتر فاصله از آبراهه، کلاس صفر تا ۱۰۰ متر بیشترین تعداد سیل‌گیری را در خود جای داده است که با نتایج [۴۷] مطابقت دارد که بیان داشتند حساس‌ترین مناطق هنگام وقوع سیل‌گیری، مناطق نزدیک به آبراهه‌ها است. نتایج پارامتر تراکم زهکشی نشان داد مناطقی که تراکم زهکشی بیشتری دارند نسبت به وقوع سیل‌گیری حساس‌ترند، به‌گونه‌ای که طبقه ۰/۵۴ تا ۰/۷۲ با بیشترین تراکم زهکشی، بیشترین وزن (۸/۵۵) را به‌خود اختصاص داده است. بین بارندگی و وقوع سیل‌گیری در منطقه مطالعاتی رابطه مستقیمی وجود دارد به‌گونه‌ای که با افزایش بارندگی، تعداد سیل‌گیری و وزن طبقات نیز افزایش پیدا کرده است، تنها طبقه ۶۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر از این قاعده پیروی نمی‌کند که احتمالاً دخالت پارامترهای دیگر در آن مؤثر بوده و سبب کاهش امتیاز آن شده است. نتایج شاخص پوشش گیاهی (NDVI) بیان می‌کنند که بین پوشش گیاهی و وقوع سیل‌گیری در منطقه مطالعاتی رابطه منفی وجود دارد، به‌گونه‌ای که با افزایش تراکم پوشش گیاهی، حساسیت مناطق نسبت به وقوع سیل‌گیری کاهش پیدا می‌کند، در حالی که با کاهش تراکم پوشش گیاهی این حساسیت افزایش پیدا کرده و در مناطق عریان و بدون پوشش گیاهی به بیشترین حد خود می‌رسد، به‌دلیل اینکه پوشش گیاهی از برخورد مستقیم قطرات باران با زمین جلوگیری می‌کند و امکان نفوذ بیشتر آب در زمین را فراهم می‌آورد که با نتایج [۲۴] مطابقت دارد. نتایج بررسی درصد شیب نشان داد طبقه شیب صفر تا پنج درصد بیشترین تعداد سیل‌گیری (۱۷۹ عدد) را در خود جای داده است که از مهم‌ترین دلایل آن می‌توان به امکان تمرکز بیشتر جریان

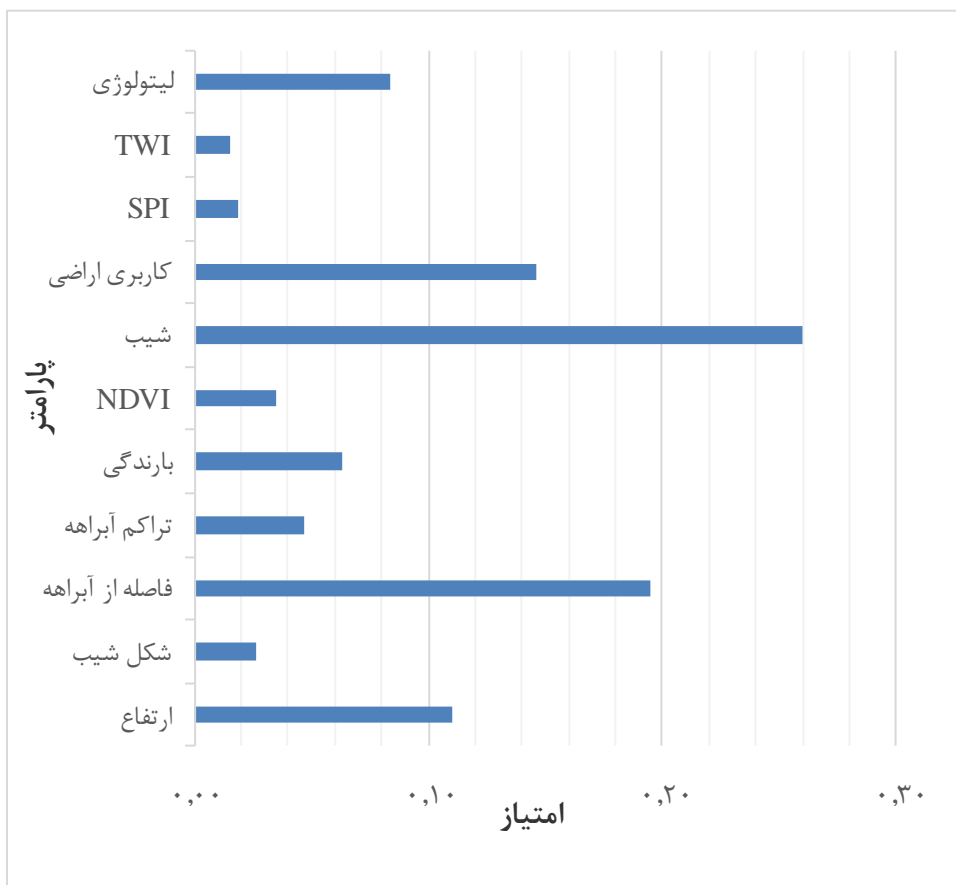
$$\begin{aligned}
 FSM = & \left( (WOE_{Altitude} \times 0.195) + (WOE_{Curvature} \times 0.26) + (WOE_{Dis-River} \times 0.110) + (WOE_{Den-River} \times 0.47) \right) \\
 & + (WOE_{Rain} \times 0.63) + (WOE_{NDVI} \times 0.35) + (WOE_{Slope} \times 0.260) + (WOE_{Landuse} \times 0.146) + (WOE_{SPI} \times 0.19) \\
 & + (WOE_{TWI} \times 0.15) + (WOE_{Lithology} \times 0.84)
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

جدول ۳. رابطه عوامل مؤثر در سیل گیری و طبقات آنها با سیل گیری های رخ داده

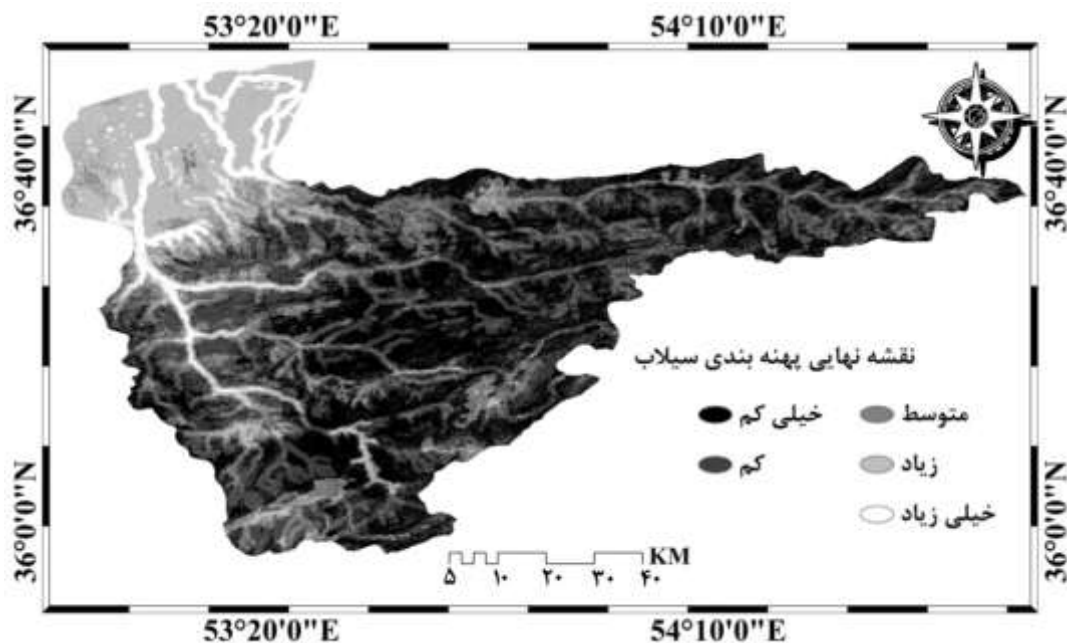
عامل	کلاس	تعداد پیکسل	تعداد سیلاب	W+	W-	C	S0	C/S0	AHP
ارتفاع	۹۰ - ۴۰۰	۱۵۳۷۸۵۰	۱۳۴	۱/۱۴	-۰/۷۶	۱/۹۰	۰/۱۴۱	۱۳/۴۶	۰/۱۱۰
	۴۰۰ - ۹۰۰	۱۳۶۹۶۲۹	۴۰	۰/۰۴۸	-۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۱۷۵	۰/۳۴	
	۹۰۰ - ۱۴۰۰	۱۴۶۳۹۰۰	۱۷	-۰/۸۷	۰/۱۲	-۱/۰۰	۰/۲۵۳	-۳/۹۷	
	۱۴۰۰ - ۱۹۰۰	۱۴۱۱۱۶۹	۱۲	-۱/۱۸	۰/۱۴	-۱/۳۳	۰/۲۹۷	-۴/۴۸	
	۱۹۰۰ - ۲۴۰۰	۱۳۶۳۹۹۱	۱۰	-۱/۳۳	۰/۱۴	-۱/۴۸	۰/۳۲۴	-۴/۵۷	
	>۲۴۰۰	۵۴۳۹۱۵	۱	-۲/۷۱	۰/۰۶	-۲/۷۸	۱	-۲/۷۸	
شکل شیب	مقعر	۹۸۵۲۱۲	۳۳	۰/۱۸۵	-۰/۰۳۰	۰/۲۱۶	۰/۱۸۹	۱/۱۴	۰/۰۲۶
	هموار	۴۰۰۱۵۸۱	۱۲۱	۰/۰۸۳	-۰/۰۹۹	۰/۱۸۲	۰/۱۳۸	۱/۳۲	
	محدب	۲۷۰۳۶۶۰	۶۰	-۰/۲۲۶	۰/۱۰۴	۰/۳۳۰	۰/۱۵۲	-۲/۱۷	
فاصله از آبراهه	۰ - ۱۰۰	۲۷۰۶۵۵۰	۲۰۹	۱/۰۲	-۳/۳۲	۴/۳۴	۰/۴۵	۹/۶	۰/۱۹۵
	۱۰۰ - ۲۰۰	۲۵۱۱۴۲۴	۵	-۲/۶۳	۰/۳۷	-۳	۰/۴۵	-۶/۶	
	۲۰۰ - ۳۰۰	۱۵۸۱۴۴۶	۰	۰	۰/۲۳	-۰/۲۳	۰/۰۶	-۳/۳	
	۳۰۰ - ۴۰۰	۷۲۲۶۳۳	۰	۰	۰/۰۹	-۰/۰۹	۰/۰۶	-۱/۴۴	
	>۴۰۰	۱۶۷۰۸۸	۰	۰	۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۰۶	-۰/۳۲	
تراکم آبراهه	۰ - ۰/۱۸	۱۷۹۱۴۰۶	۰	۰/۰۰	۰/۲۶	-۰/۲۶	۰/۰۶	-۳/۸۸	۰/۰۴۷
	۰/۱۸ - ۰/۳۴	۲۵۶۲۱۰۱	۲۵	-۱/۰۴	۰/۲۸	-۱/۳۲	۰/۲۱	-۶/۲۴	
	۰/۳۴ - ۰/۵۴	۲۳۰۷۵۱۴	۱۱۵	۰/۵۸	-۰/۴۱	۰/۹۹	-۰/۱۳	-۷/۲۷	
	۰/۵۴ - ۰/۷۲	۱۰۳۰۲۴۸	۷۴	۰/۹۴	-۰/۲۸	۱/۲۲	۰/۱۴	۸/۵۵	
بارندگی	<۵۰۰	۴۱۶۵۷۶۴	۴۲	-۱/۰۱	۰/۵۶۲	-۱/۵۷	۰/۱۷۲	-۹/۱۶	۰/۰۶۳
	۵۰۰ - ۵۵۰	۱۲۳۴۰۵۰	۳۳	-۰/۰۴	۰/۰۰۷	-۰/۰۴۷	۰/۱۸۹	-۰/۲۵	
	۵۵۰ - ۶۰۰	۷۰۶۴۵۷	۳۹	۰/۶۸۵	-۰/۱۰۵	۰/۷۹۰	۰/۱۷۷	۴/۴۶	
	۶۰۰ - ۶۵۰	۷۰۲۳۳۹	۴۶	۰/۸۵۶	-۰/۱۴۶	۱/۰۰۲	۰/۱۶۶	۶/۰۲	
	۶۵۰ - ۷۰۰	۵۰۲۸۱۵	۲۴	۰/۵۳۹	-۰/۰۵۱	۰/۵۹۱	۰/۲۱۷	۲/۷۳	
	>۷۰۰	۳۷۷۷۱۸	۳۰	۱/۰۴	-۰/۱۰۱	۱/۱۴	۰/۱۹۷	۵/۸۴	
NDVI	-۰/۶۳ - ۰	۲۸۵۸۶۱۵	۸۲	۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۰۳۵
	-۰/۴۳ - ۰/۶۳	۱۷۳۰۵۵۳	۱۰۵	-۰/۷۷	-۰/۴۱	۱/۱۹	-۰/۱۳	۸/۷۳	
	۰/۴۳ - ۰/۸۲	۳۰۷۰۲۳۸	۲۷	-۱/۱۵	۰/۳۷	-۱/۵۳	۰/۲۰	-۷/۴۵	
شیب	۰ - ۵	۲۲۷۲۳۴۱	۱۷۹	۱/۰۴	-۱/۴۶	۲/۵	-۰/۱۸	۱۳/۵۳	۰/۲۶۰
	۵ - ۱۰	۲۶۵۱۰۶۰	۲۴	-۱/۱۲	۰/۳۰	-۱/۴۲	۰/۲۱	-۶/۵۹	
	۱۰ - ۱۵	۱۸۳۱۴۵۶	۱۰	-۱/۶۲	۰/۲۲	-۱/۸۵	-۰/۳۲	-۵/۷۲	
	۱۵ - ۲۰	۷۶۰۰۲۲	۰	۰/۰۰	۰/۱۰	-۰/۱	۰/۰۰	۰/۰۰	
	>۲۰	۱۷۵۵۷۵	۱	-۱/۵۸	۰/۰۱	-۱/۶	۱/۰۰	-۱/۶	

ادامه جدول ۳

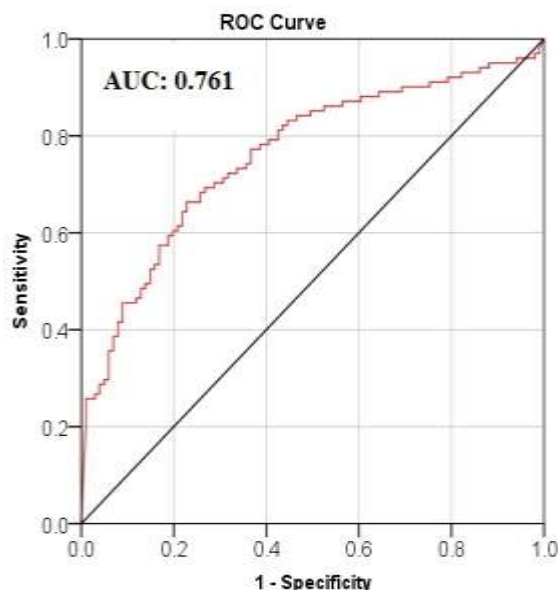
عامل	کلاس	تعداد پیکسل	تعداد سیلاب	W+	W-	C	S <sup>o</sup>	C/S <sup>o</sup>	AHP
کاربری اراضی	باغ	۲۶۲۹۹۶	۱۶۹	۳/۱۳	-۱/۵۲	۴/۶۶	۰/۱۶۸	۲۷/۸	۰/۱۴۶
	مرتع خوب	۸۴۲۶۹۵	۰	۰	۰/۱۱	-۰/۱۱	۰/۰۶۸	-۱/۷	
	جنگل پراکنده	۵۵۴۷۵۸	۰	۰	۰/۰۷	-۰/۰۷	۰/۰۶۸	-۱/۱	
	جنگل نیمه‌انبوه	۴۶۵۱۰۵	۱	-۲/۵۶	۰/۰۵	-۲/۶۲	۱/۰۰	-۲/۶	
	جنگل متراکم	۳۱۸۸۵۸۸	۴۴	-۰/۷	۰/۳	-۱	۰/۱۶۹	-۵/۹	
	کشت دیم	۱۰۴۸۷۳۱	۰	۰	۰/۱۴	-۰/۱۴	۰/۰۶۸	-۲/۱	
	آب	۱۰۵۶۹	۰	۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	۰/۰۶۸	-۰/۰۲	
	کشاورزی	۲۴۰۰۲	۰	۰	۰/۰۰۳	-۰/۰۰۳	۰/۰۶۸	-۰/۰۵	
	مرتع فقیر	۵۲۱۹۶	۰	۰	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	۰/۰۶۸	-۰/۱	
	کشاورزی-باغ	۱۱۱۲۳۵۱	۰	۰	۰/۱۵	-۰/۱۵	۰/۰۶۸	-۲/۲	
	مرتع متوسط	۵۰۱۳۸	۰	۰	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷	۰/۰۶۸	-۰/۱	
	شهری	۶۱۷۰۹	۰	۰	۰/۰۰۸	-۰/۰۰۸	۰/۰۶۸	-۰/۱۲	
زمین مرطوب	۵۶۹۰	۰	۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	۰/۰۶۸	-۰/۰۱		
SPI	۰ - ۰/۱۶	۷۱۸۵۷۲۱	۲۰۳	۰/۰۱	-۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۰۱۰	۲۵/۷۲	۰/۰۱۹
	۰/۱۶ - ۰/۸۰	۳۶۴۴۲۴	۸	-۰/۲۴	۰/۰۱	-۰/۲۵	۰/۰۱۲	-۲۱/۰۸	
	۰/۸۰ - ۲/۱۶	۱۱۰۵۸۳	۳	-۰/۰۲	۰	-۰/۰۲	۰/۰۱۹	-۱/۳۶	
	۲/۱۶ - ۴/۸۱	۱۸۵۷۹	۰	۰	۰/۰۰۲	-۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	-۱/۰۹	
۴/۸۱ - ۲۰/۴۶	۱۱۱۴۸	۰	۰	۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	-۰/۶۵		
TWI	-۰/۲۴ - ۰/۲۸	۳۲۰۳۹۰۰	۳۰	-۱/۰۸	-۰/۳۸	-۱/۴۷	۰/۱۹۷	-۷/۵	۰/۰۱۵
	-۰/۲۴ - ۰/۲۲	۳۴۳۴۱۵۸	۱۱۵	۰/۱۸	-۰/۱۷	۰/۳۶۴	۰/۱۳۷	۲/۶۶	
	-۰/۲۲ - ۰/۱۵	۹۳۰۶۲۴	۵۹	۰/۸۲	-۰/۱۹	۱/۰۱۷	۰/۱۵۳	۶/۶۵	
	-۰/۱۵ - ۰/۹	۱۰۵۶۷۹	۶	۰/۷۱	-۰/۰۱۵	۰/۷۲۸	۰/۴۱۴	۱/۷۶	
	-۰/۹ - ۰/۷	۱۳۷۰۱	۲	۱/۶۵	-۰/۰۰۸	۱/۶۶۵	۰/۷۱	۲/۳۴	
-۰/۷ - ۰/۲۴	۲۳۹۲	۲	۳/۴	-۰/۰۰۹	۳/۴۱۳	۰/۷۱	۴/۸		
لیتولوژی	سنوزوئیک	۳۳۳۳۶۱۶	۱۴۰	-۰/۳۹۳	-۰/۴۷۹	۰/۸۷۲	۰/۱۴۴	۶/۰۷	۰/۰۸۴
	مزوزوئیک	۲۸۰۹۳۵۳	۵۹	-۰/۳۰۰	۰/۱۴۳	-۰/۴۴۳	۰/۱۵۳	-۲/۹	
	پالئوزوئیک	۱۴۰۵۷۳۳	۱۵	-۰/۹۷۷	۰/۱۳۳	-۱/۱۱	۰/۲۶۸	-۴/۱۵	



شکل ۴. اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر در سیلاب با روش AHP



شکل ۵. نقشه پهنه‌بندی حساسیت سیل‌گیری با روش ترکیبی



شکل ۶. سطح زیرمنحنی مدل ترکیبی

جدول ۴. مساحت پهنه‌های خطر سیل‌گیری به همراه نسبت فراوانی (FR)

نسبت فراوانی (FR)	درصد مساحت رده	مساحت هر رده خطر	درصد مساحت سیل‌گیر	مساحت سیل‌گیر	مساحت فاقد سیلاب	پهنه‌های خطر سیلاب
۰/۰۰	۳۰/۱	۲۰۶۹/۱	۰	۰	۲۰۶۹/۱	خیلی کم
۰/۰۰	۳۲/۸۵	۲۲۵۷/۸	۵/۳۱	۰/۰۰۹۹	۲۲۴۸/۹	کم
۰/۰۱	۱۷/۲۴	۱۱۸۵/۱	۸/۷	۰/۰۱۶	۱۱۷۰/۵	متوسط
۰/۰۳	۱۵/۳۷	۱۰۵۶/۳	۲۰/۷۷	۰/۰۳۸	۱۰۲۱/۵	زیاد
۰/۳۶	۴/۴۴	۳۰۴/۸	۶۵/۲۲	۰/۱۲۱	۱۹۵/۴	خیلی زیاد

\*مساحت‌ها به کیلومترمربع است.

حساس به سیل‌گیری بیشتر در بخش‌های شمال و شمال غرب حوضه و در مناطقی قرار گرفته است که تمرکز سکونتگاه‌های انسانی بیشتر است، در حالی که مناطق مرکزی حوضه که دارای پوشش گیاهی متراکم است، حساسیت کمی نسبت به سیل‌گیری دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزان و محققان برای انجام اقدامات مناسب به‌منظور جلوگیری و کاهش خطر سیل‌گیری در آینده کمک کند. همچنین می‌توان از آن به‌منظور شناسایی مناطق مناسب و امن برای توسعه‌های عمرانی استفاده کرد. با توجه به نتایج قابل قبول مدل ترکیبی ارائه‌شده، پیشنهاد می‌شود محققان از این روش به‌منظور تهیه نقشه‌های حساسیت و خطر سیل‌گیری در مناطق دیگر نیز استفاده و نتایج را مقایسه کنند.

### نتیجه‌گیری

سیل‌گیری یکی از پدیده‌های مهم مصیبت‌بار و فاجعه‌انگیز در نواحی شمالی ایران محسوب می‌شود. از طریق آنالیز منطقه‌ای سیل‌گیری‌ها می‌توان مناطق حساس به سیل‌گیری را شناسایی و بنابراین از این طریق خسارت ناشی از آن را کاهش داد. هدف از این پژوهش، شناسایی مناطق حساس به سیل‌گیری در حوضه آبخیز نکا در استان مازندران است. بر اساس نتایج، ۳۰/۱ درصد (۲۰۶۹/۱ کیلومترمربع) از منطقه مطالعاتی در رده حساسیت خیلی کم، ۳۲/۸۵ درصد (۲۲۵۷/۸ کیلومترمربع) حساسیت کم، ۱۷/۲۴ درصد (۱۱۸۵/۱ کیلومترمربع) حساسیت متوسط، ۱۵/۳۷ درصد (۱۰۵۶/۳ کیلومترمربع) حساسیت زیاد و ۴/۴۴ درصد (۳۰۴/۸ کیلومترمربع) حساسیت خیلی زیاد قرار گرفته است. طبق نتایج مناطق



## منابع

- [1]. Du J, Fang J, Xu W, Shi P. Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province China. *Stoch Env Res Risk Assess.* 2013; 27(2): 377-387.
- [2]. Jahangir MH, Sadeghi S, Soleymani H. Numerical Evaluation of Maximum Flood Discharge Using SCS Method for Land Management on Watersheds of Kan Area. *Ecohydrology.* 2014; 1: 47-57. [Persian]
- [3]. Yang YCE, Ray PA, Brown CM, Khalil AF, Yu WH. Estimation of flood damage functions for river basin planning: a case study in Bangladesh. *Nat Hazards.* 2015; 75: 2773-2791.
- [4]. Hudson P, Botzen WJW, Kreibich H, Bubeck P, Aerts JCJH. Evaluating the effectiveness of flood damage mitigation measures by the application of propensity score matching. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 2014; 14:1731-1747.
- [5]. Perera EDP, Hiroe A, Shrestha D, Fukami K, Basnyat DB, Gautam S, et al. Community-based flood damage assessment approach for lower West Rapti River basin in Nepal under the impact of climate change. *Nat Hazards.* 2015; 75: 669-699.
- [6]. Foudi S, Os\_es-Eraso N, Tamayo I. Integrated spatial flood risk assessment: the case of Zaragoza. *Land Use Policy.* 2015; 42: 278-292.
- [7]. Tehrany MS, Lee MJ, Pradhan B, Jebur MN, Lee S. Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environ Earth Sci.* 2014; 71 (10): 4001-4015.
- [8]. Yousefi H, Noorollahi Y, Soltani K, Javadzadeh, Z. The Management Strategies to Reduce the Vulnerability of Flood in Tehran (Case Study: District 1 and 3). *Ecohydrology.* 2015; 3: 181-193. [Persian]
- [9]. Esmaili F, Rahmani S. Flood Zoning Using GIS and Mathematical Models Emphasizing Flood Management: A Case Study of Gavi River, Ilam Province, Western Iran. *International Bulletin of Water Resources & Development.* 2015; 5 (8): 63-73. [Persian]
- [10]. Heidari A. Flood vulnerability of the Karun river system and short-term mitigation measures. *Flood Risk Manag.* 2014; 7: 65-80.
- [11]. Cook A, Merwad V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology.* 2009; 377: 131-142.
- [12]. Khalilizadeh M, Mosaedi A, Najafinejad A. Flood hazard zonation in a part of Ziarat river in Gorgan urban watershed. *J.Agric.Sci. Natur. Resour.* 2005; 12 (4): 138-146. [Persian]
- [13]. Dehghani M, Abbasnejad A, Negaresh H. Assessment of Flood Hazard and its Zoning in Baft Plain (South East Part of Iran), Geography and Territorial Spatial Arrangement. 2016; 6: 141-152. [Persian]
- [14]. Poussin JK, Botzen WJW, Aerts JCJH. Factors of influence on flood damage mitigation behavior by households. *Environ Sci Policy.* 2014; 40: 69-77.
- [15]. Farzin S, Karami H, Doostmohammadi M, Ghanbari A, Zamiri, E. The performance of Artificial Neural Network in prediction and analysis of hydrological processes (Case study: Water shortage in Nazloo-chai watershed, West Azerbaijan province). *Ecohydrology.* 2017; 4: 631-644. [Persian]
- [16]. Jaafari A, Najafi A, Pourghasemi HR, Rezaeian J, Sattarian A. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *Int J Environ Sci Technol.* 2014; 11: 909-926.
- [17]. Regmi N, Giardino JR, Vitek JD. Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology.* 2010; 115: 172-187.
- [18]. Pourghasemi HR, Moradi HR, Mohammadi M, Mostafazadeh R, Goli Jirandeh A. Landslide Hazard Zoning Using Bayesian Theory. *JWSS - Isfahan University of Technology.* 2013b; 16 (62):109-120. [Persian]
- [19]. Mohamadi E, Montaseri M, Sokooti Oskoei R. Zonation of flood dangers in urban regions, using WMS and HEC-RAS, case study: Oshnavieh, Western Azerbaijan province. *Watershed Engineering and Management.* 2005; 1 (1): 61-69.
- [20]. Ebrahimi P, soleymani K, shahedi, K. Developing Strategic Environmental Planning map Based on Land use Changes and Flood Zones Case study: Neka River. *Geography and Territorial Spatial Arrangement.* 2016; 20: 57-74. [Persian]
- [21]. Chen YR, Yeh CH, Yu B. Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. *Nat Hazards.* 2011; 59(3): 1261-1276.

- [22]. Rahmati O, Zeinivand H, Besharat M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics. Natural Hazards and Risk*. 2015; 7(3): 1000-1017.
- [23]. Tehrany MS, Pradhan B, Mansor S, Ahmad N. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*. 2015; 125: 91-101.
- [24]. Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *J Hydrol*. 2014; 512: 332-343.
- [25]. Youssef AM, Pradhan B, Sefry SA. Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models. *Environ Earth Sci*. 2016; 75:12.
- [26]. Zehra S, Afsar S. Flood Hazard Mapping of Lower Indus Basin Using Multi-Criteria Analysis. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2016; 4: 54- 62.
- [27]. Khosravi K, Nohani E, Maroufinia E, Pourghasemi HR. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Nat Hazards*. 2016; DOI 10.1007/s11069-016-2357-2.
- [28]. Fernandez DS, Lutz MA. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol*. 2010; 111: 90-98.
- [29]. Pradhan B. Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Cent Eur J Geosci*. 2009; 1(1): 120 -129.
- [30]. Yesilnacar E, Topal T. Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Eng Geol*. 2005; 79: 251-266.
- [31]. Jebur MN, Pradhan B, Tehrany MS. Optimization of landslide conditioning factors using very high-resolution airborne laser scanning (LiDAR) data at catchment scale. *Remote Sens Environ*. 2014b; 152: 150-165.
- [32]. Pike RJ. Geomorphology - Diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography*. 2000; 24:1-20.
- [33]. Pradhan B, Lee S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environ Model Softw*. 2010; 25(6): 747-759.
- [34]. Pourghasemi HR, Pradhan B, Gokceoglu C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed. Iran. *Nat Hazards*. 2012; 63(2): 965-996.
- [35]. Pradhan B. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Comput Geosci*. 2013; 51: 350-365.
- [36]. Pourghasemi HR, Pradhan B, Gokceoglu C, Mohammadi M, Moradi HR. Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arab. J. Geosci*. 2013a; 6 (7): 2351-2365.
- [37]. Jebur MN, Pradhan B, Tehrany MS. Detection of vertical slope movement in highly vegetated tropical area of Gunung pass landslide, Malaysia, using L-band InSAR technique. *Geosci J*. 2014a; 18(1): 61-68.
- [38]. Pourghasemi HR, Jirandeh AG, Pradhan B, Xu C, Gokceoglu C. Landslide susceptibility mapping using support vector machine and GIS at the Golestan Province, Iran. *J Earth Syst Sci*. 2013c; 2: 349-369.
- [39]. Pourghasemi HR, Pradhan B, Gokceoglu C, Mohammadi M, Moradi HR. Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian J Geosci*. 2013d; 6: 2351-2365.
- [40]. Pourghasemi HR, Kerle N. Random forest-evidential belief function based landslide susceptibility assessment in western Mazandaran Province, Iran. *Environ. Earth Sci*. 2016; 75:185.
- [41]. Piacentini D, Troiani F, Soldati M, Notarnicola C, Savelli D, Schneiderbauer S, et al. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (southeastern Alps, Italy). *Geomorphology*. 2012; 151: 196-206.
- [42]. Arabameri AR, Halabian AH. Landslide Hazard Zonation Using Statistical Model of AHP (Case Study: Zarand Saveh Basin). *Physical Geomorphology*. 2015; 28: 65-86. [Persian]
- [43]. Ayalew L, Yamagishi H, Marui H, Kanno T. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-

- based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Eng. Geology*. 2005; 81: 432–445.
- [44]. Saaty TL. *The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw Hill. 1980; 287 p.
- [45]. Nefeslioglu H, Gokceoglu C, Sonmez H. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Eng Geol*. 2008; 97(3): 171–191.
- [46]. Swets JA, Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*. 1988; 240: 1285–1293.
- [47]. Fernandez DS, Lutz MA. Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol*. 2010; 111: 90-98.
- [48]. Arabameri AR, Klorajan A, Karami J, Alimoradi M, Shirani K. Zonation of Landslide Hazard Using Artificial Neural Network the Case Study: Marbor Basin. *Geodynamics Research International Bulletin*. 2014; 03: 44-59. [Persian]
- [49]. Arabameri AR, Shirani K. identification of effective factors on Landslide occurrence and its hazard zonation using Dempster-Shafer theory (Case study: Vanak Basin, Isfahan Province). *Watershed Engineering and Management*. 2016; 8 (1): 93-106. [Persian]
- [50]. Arabameri AR, Shirani K, Karami J, Kolorajan A. Application of neural network of Multi Layers Perceptron (MLP) in site selection of waste disposal (Case study: Fereydoonshahr city). *Environmental Studies*. 2016; 42 (2): 329-341. [Persian]
- [51]. Gokceoglu C, Sonmez H, Nefeslioglu HA, Duman TY, Can T. The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity. *Eng Geol*, 2005; 81(1): 65–83.