

ارزیابی عوامل مؤثر بر مخاطرات سیلاب و تهیه نقشه حساسیت و احتمال وقوع آن با استفاده از مدل آنتروپی شانون (مطالعه موردی: حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد)

محمدابراهیم عفیفی*

استادیار گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی) دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۲/۲ - تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۶/۲۵)

چکیده

در بین مخاطرات طبیعی، سیلاب اهمیت زیادی دارد. یکی از راه‌های اصلی کاهش خطرات ناشی از سیل، تهیه نقشه‌های حساسیت به وقوع سیل است. در این تحقیق از مدل آنتروپی شانون برای تهیه نقشه‌های حساسیت به وقوع سیل استفاده شد. ابتدا ۳۴ نقطه سیلابی حوضه آبخیز فیروزآباد انتخاب شد و سپس این ۳۴ نقطه به دو گروه طبقه‌بندی شدند که ۲۲ نقطه، ۶۵ درصد از موقعیت نقاط برای آموزش و مدلسازی و ۱۲ نقطه، ۳۵ درصد از موقعیت نقاط که در مدلسازی به کار گرفته نشده‌اند برای اعتبارسنجی استفاده شده‌اند که ابتدا به تهیه نقشه موقعیت سیل‌ها پرداخته شد و سپس ۱۰ عامل شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، NDVI، SPI، TWI، طبقات ارتفاعی، بارندگی و فاصله از رودخانه به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد انتخاب شدند. اولویت‌بندی عوامل مؤثر در وقوع سیل توسط شاخص آنتروپی شانون نشان داد که لایه‌های NDVI (۲/۰۳)، بارندگی (۲/۰۰)، فاصله از رودخانه (۱/۸۹)، SPI (۱/۳۸۵)، طبقات ارتفاعی (۰/۹۹۹)، شیب با وزن (۰/۹۳۲)، لیتولوژی (۰/۴۷۸)، TWI (۰/۳۷۹) و کاربری اراضی (۰/۲۸۰) و جهت شیب (۰/۱۸۴) به ترتیب بیشترین تا کمترین تأثیر بر وقوع سیل را دارند. براساس نتایج منحنی ROC برای میزان پیش‌بینی مقدار سطح زیر منحنی با ۳۵ درصد داده‌های اعتبارسنجی برابر ۹۱/۴۲ درصد و برای میزان موفقیت با ۶۵ درصد داده‌های آموزش برابر ۹۲/۵۳ درصد است. پس مدل آنتروپی شانون دارای صحت قابل قبولی در تهیه نقشه حساسیت به وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد است.

واژه‌های کلیدی: حساسیت، حوضه رودخانه فیروزآباد، مخاطرات سیلاب، مدل آنتروپی شانون.

* Email: afifi.ebrahim6353@gmail.com

مقدمه

سیل از پدیده‌های پیچیده و مخرب طبیعی است که هر ساله خسارات فراوانی را به جای می‌گذارد [۱۳]. به‌منظور برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه و کنترل پدیده‌های طبیعی سیل که از مسائل موجود در کره زمین و از جمله کشور ماست، مطالعات و تحقیقات زیادی لازم است [۵]. آمارها حاکی از آن است که سیلاب چه از نظر تلفات جانی و چه از نظر تلفات مالی، مقام اول را در میان حوادث دیگر داراست. این امر ایران را به لحاظ سیل‌خیزی در رتبه هفتم جهان قرار داده است [۴].

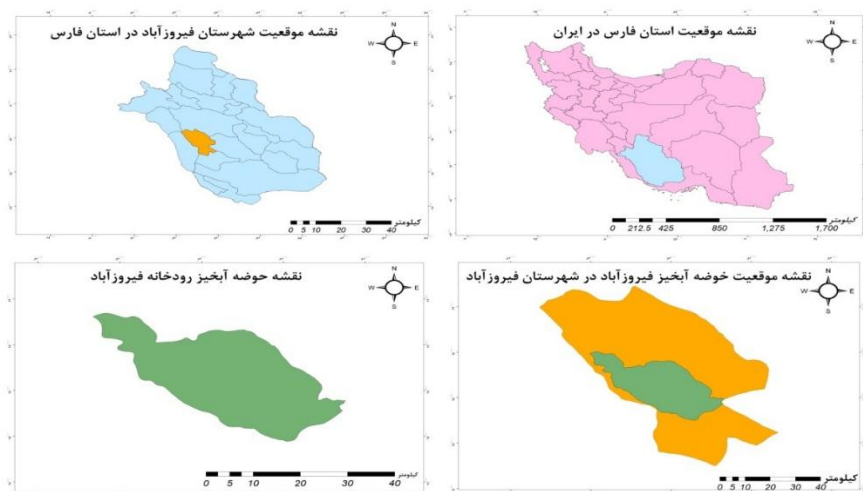
از سال ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۷ حدود ۳۹۰۰۰۰ نفر در اثر بلایای طبیعی در جهان کشته شدند که ۵۸ درصد آنها در اثر سیلاب، ۲۶ درصد در اثر زلزله و ۱۶ درصد در اثر توفان و بلایای دیگر بوده است [۲]. کل خسارات در این ۱۰ سال در حدود ۷۰۰ میلیارد دلار بوده که به ترتیب ۳۳، ۲۹ و ۲۸ درصد آنها در اثر سیلاب توفان و زلزله بوده است [۱۲]. نکته نگران‌کننده در این زمینه، روند افزایشی تلفات و خسارات سیلاب در جهان در دهه‌های اخیر بوده است. افزایش جمعیت و دارایی‌ها در سیلاب‌دشت‌ها تغییرات هیدروسیستم‌ها و آثار مخرب فعالیت‌های انسانی از دلایل اصلی این افزایش بوده است. شریفی و همکاران به ارزیابی و تحلیل فضایی سیل‌گیری رودخانه قره‌سو با استفاده از منطق فازی در GIS پرداختند که براساس نتایج خروجی مدل فازی و همپوشانی شکل سیل‌گیری، مؤثرترین سطوح در ایجاد پهنه‌های سیل‌گیر اغلب شیب بین ۰ تا ۵۰ درجه، سطوح ارتفاعی ۱۲۴۰ تا ۱۲۵۰ متر، تراکم زهکشی ۰/۴ تا ۱، بارش ۶۵۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر، انحنای پروفیل ۰/۴، انحنای پلانیمتری ۰/۶، کاربری اراضی شهری و فاصله ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری از آبراهه است [۳]. مصطفی‌زاده و همکاران به بررسی تحلیل الگو و شرایط وقوع بارش‌های منجر به سیل در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ در شهرستان گرمی استان اردبیل پرداختند و نتیجه گرفتند که عامل مؤثر در ایجاد بارش‌های سنگین در زمان و مکان تحقیق، وجود مرکز کم‌فشار حرارتی بر فراز منطقه و همچنین شکل‌گیری دو موج همراه با هسته بلوکینک‌شده بر فراز دریای مدیترانه و وجود دو منطقه کم‌فشار است [۷]. دیدگاه مقایسه‌ای این مقاله برابر با یافته‌های تحقیق ابراهیم نوحانی و همکاران با استفاده از مدل آنروپی شانون در تهیه نقشه حساسیت در حوضه آبخیز هراز است که نتایج قابل قبولی مطابق با همین مقاله ارائه شده و دارای صحت قابل قبولی است.

موسوی و همکاران به ارزیابی و پهنه‌بندی سیل‌خیزی با استفاده از منطق فازی TOPSIS در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر باغملک) پرداختند. نتایج نشان داد که

۱۷/۸۶ درصد از محدوده در منطقه با خطر بسیار زیاد و ۲۴/۱۵ درصد در پهنه با خطر زیاد قرار دارد. نوحانی و همکاران به ارزیابی مدل آنتروپی شانون در تهیه شکل حساسیت و احتمال وقوع سیل در حوضه آبریز هراز پرداختند که نتایج نشان داد سطح زیرمنحنی با موقعیت‌های نقاط آموزش برای مدل آنتروپی شانون برابر با ۹۲/۵۳ درصد با صحت پیش‌بینی ۹۱/۴۲ درصد است؛ پس صحت زیاد این مدل حاکی از قابل اعتماد بودن برای تهیه شکل حساسیت به وقوع سیل است [۸]. خسروی و همکاران به بررسی سه مدل آماری دومتغیره، شامل آنتروپی شانون، شاخص آماری و فاکتور وزن‌دهی برای تهیه شکل‌های حساسیت به وقوع سیل در استان مازندران پرداختند و بیان کردند که روش شاخص آماری با مساحت زیرمنحنی ۹۸/۷ درصد دارای بیشترین صحت برای پهنه‌بندی مناطق حساس به وقوع سیل بوده و پس از آن روش‌های فاکتور وزن‌دهی و آنتروپی شانون با مساحت زیرمنحنی ۹۷/۶ و ۹۲/۴ درصد جای دارند [۱۶]. پژوهشگران در تحقیقی با استفاده از روش svm چهار تابع، *LinerRadial Basis Function*، *Sigmoid* و *Polynomial* به بررسی پهنه‌بندی مناطق حساس به وقوع سیل در مالزی پرداختند [۱۷]. آنها بیان کردند که مساحت سطح زیرمنحنی به ترتیب برای توابع یادشده برابر با ۸۴/۶۳، ۸۳/۹۲، ۸۴/۹۶ و ۸۱/۸۸ است. همچنین در تحقیقی با عنوان شکل حساسیت به وقوع سیل توسط ترکیب مدل‌های آماری دومتغیره و چندمتغیره در کره پرداختند. نتایج نرخ موفقیت و نرخ پیش‌بینی برابر با ۹۲/۷ و ۸۲/۳ درصد بود [۱۸]. هدف این تحقیق عبارت است از: ۱. ارزیابی عوامل مؤثر بر مخاطرات محیطی سیلاب؛ ۲. تهیه نقشه حساسیت و احتمال وقوع سیل با استفاده از مدل آنتروپی شانون در حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد.

موقعیت جغرافیایی منطقه تحقیق

شهرستان فیروزآباد یکی از شهرستان‌های استان فارس بوده که با مساحت ۱۱۹۱۷ کیلومتر مربع در غرب استان واقع شده و مرکز آن شهر فیروزآباد است. شهر فیروزآباد در محدوده جنوب غربی استان فارس در عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و طول ۵۲ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی، در ارتفاع ۱۳۲۵ متری از سطح آب‌های آزاد واقع شده است. حوضه آبخیز فیروزآباد یکی از زیرحوضه‌های آبخیز مند با مساحت ۴ میلیون و ۷۸۵ هزار و ۴۰۰ هکتار است و در سه استان فارس، بوشهر و هرمزگان گسترده شده است. حدود این حوضه از بلندای ۳۱۶۵ متری خرمنکوه در زاگرس جنوبی تا سواحل خلیج فارس ادامه دارد [۱۱].



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز فیروزآباد

جدول ۱. مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه مند

| ردیف | عامل فیزیوگرافی | کل حوضه |
|------|-----------------------------|---------|
| ۱ | مساحت کیلومتر مربع | ۴۸۷۵۴۰۰ |
| ۲ | محیط کیلومتر | ۸۹۴۵۴۲ |
| ۳ | طول | ۱۳۸۱ |
| ۴ | ضریب گراویلیوس | ۱/۹۹ |
| ۵ | ضریب شکل هورتون | ۰/۶۳ |
| ۶ | نسبت طولی روش شیوم | ۰/۸۹ |
| ۷ | نسبت گردی روش میلر | ۰/۴۲ |
| ۸ | طول مستطیل معادل به کیلومتر | ۱۲۸۱/۹ |
| ۹ | عرض مستطیل معادل به کیلومتر | ۳۲۰/۲۵ |
| ۱۰ | تراکم آبراهه | ۲/۷ |
| ۱۱ | کمترین ارتفاع حوضه به متر | ۱۱۳۴ |
| ۱۲ | متوسط ارتفاع حوضه به متر | ۱۷۱۰ |
| ۱۳ | بیشترین ارتفاع حوضه به متر | ۲۸۱۸ |
| ۱۴ | شیب متوسط حوضه | ۴۴/۱۵ |
| ۱۵ | زمان تمرکز | ۲۰ |

روش تحقیق

به منظور بررسی و ارزیابی پتانسیل سیل در حوضه آبریز رودخانه فیروزآباد، ابتدا به بررسی و تجزیه و تحلیل سیل‌های ثبت شده براساس آمار و اندازه‌گیری‌های معتبر وزارت نیرو و تحقیقات منابع آب ایران در این حوضه پرداخته شد، زیرا صحت وقایع سیلابی گذشته تأثیر بسیار زیادی بر صحت شکل حساسیت به وقوع سیل دارد. حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد در دهه‌های ۵۰ تا ۷۰ به شدت تحت تأثیر سیل‌های خطرناک بوده است. شکل ۲ موقعیت ۳۴ نقطه سیلابی در حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد را نشان می‌دهد. این ۳۴ نقطه به دو گروه طبقه‌بندی شده‌اند. ۲۲ نقطه (۶۵ درصد از موقعیت نقاط) برای آموزش و مدلسازی و ۱۲ نقطه (۳۵ درصد از موقعیت نقاط) که در مدلسازی به کار گرفته نشده‌اند برای اعتبارسنجی به کار گرفته شدند [۱۵].

مهم‌ترین عوامل مؤثر بر وقوع سیل حوضه آبخیز فیروزآباد عبارت‌اند از شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، طبقات ارتفاعی، بارندگی، رطوبت توپوگرافی (TWI)، کاربری اراضی، پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص توان رودخانه (SPI) که انتخاب شدند و سپس به تهیه شکل این عامل‌ها اقدام شد. یکی از عوامل مهمی که تأثیر مستقیم بر وقوع سیل‌های حوضه‌های مختلف دارد، شیب زمین است. هرچه شیب زمین بیشتر باشد، قدرت نفوذ رواناب کمتر و رواناب تشکیل شده دارای سرعت و قدرت بیشتری است. دومین عامل در نظر گرفته شده در این تحقیق که بر وقوع سیل و سیل‌گیری مؤثر است، جهت شیب است که شکل مزبور با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزار ArcGIS تهیه شده که در ده طبقه است. برای تهیه شکل فاصله از رودخانه از دستور *multiring buffer* در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شده و پنج طبقه در نظر گرفته شد. برای تهیه عامل مؤثر طبقات ارتفاعی از مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد که به پنج طبقه تقسیم شدند. دو عامل مهم SPI و TWI به عوامل مهم مرتبط با آب مشهورند. TWI مقدار تجمع جریان در هر مکان در حوضه آبخیز است و روند جریان به سمت پایین دست توسط نیروی ثقل تعریف می‌شود. برای تعیین شاخص رطوبت توپوگرافی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

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

سپس شکل TWI تهیه و طبقه‌بندی شد. شاخص SPI نیز توسط رابطه زیر تهیه و طبقه‌بندی شد.

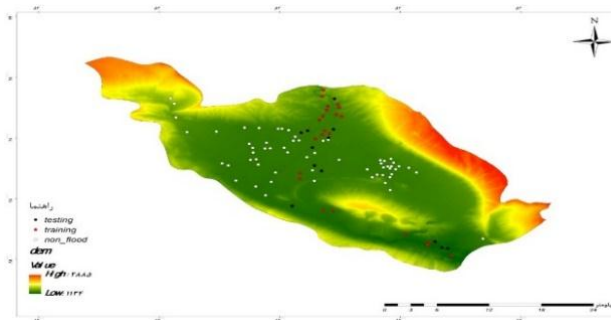
$$SPI = (AS/\tan \beta) \quad (2)$$

بارندگی از دیگر عامل‌های مهم در وقوع سیل است که در ارزیابی پتانسیل سیل حوضه‌های

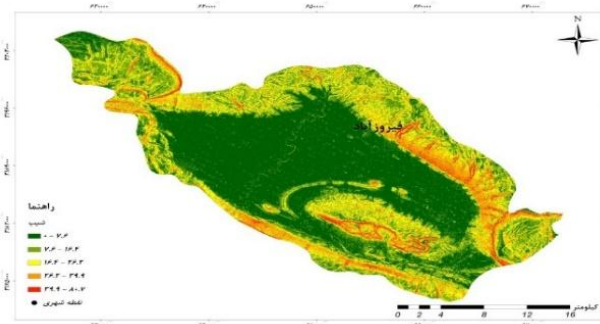
آبخیز اهمیت فراوانی دارد (آمار بارندگی ۳۰ ساله از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک فیروزآباد جمع‌آوری و میانگین آن ارائه شده است که به علت محدودیت تعداد صفحات مقاله از ارائه جدول‌های آن خودداری شده است). زمین‌شناسی به‌طور کلی به‌علت داشتن سازندهای مختلف، اهمیت زیادی در وقوع سیل دارد. این لایه با فرمت shp از اداره آب شهرستان فیروزآباد تهیه و طبقه‌بندی شد. شکل کاربری اراضی و NDVI با استفاده از تصویر سنجنده مربوط به ماهواره لندست تهیه شد. این شکل که نشان‌دهنده پوشش سطحی گیاهان و تراکم آنها در تصاویر است تهیه و طبقه‌بندی شد. این شاخص بین ۱- تا ۱+ است که با افزایش پوشش گیاهی، ارزش حاصل از این نسبت‌گیری نیز افزایش می‌یابد که از طریق معادله زیر محاسبه می‌شود [۱۹].

$$NDVI = (NIR - VIS) \ / \ (NIR + VIS)$$

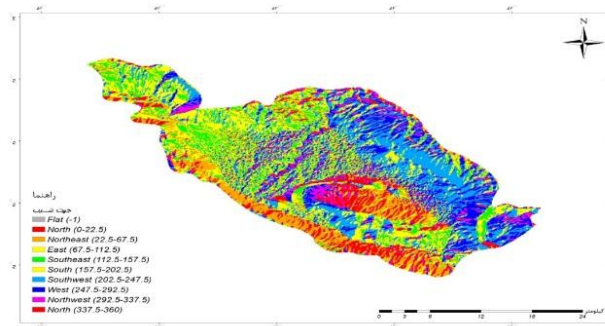
که VIS و NIR به ترتیب اندازه‌گیری بازگشت طیف نور مرئی و مادون قرمز نزدیک است.



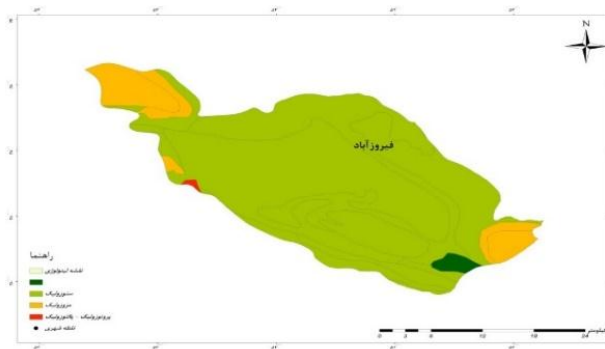
شکل ۲. موقعیت نقاط سیلابی در حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد



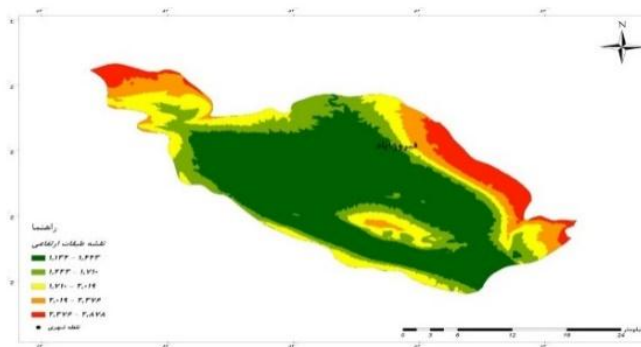
شکل ۳. شیب حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد



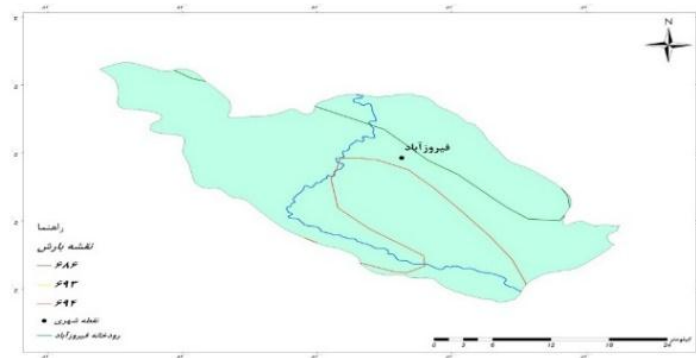
شکل ۴. جهت شیب حوضه آبخیز فیروزآباد



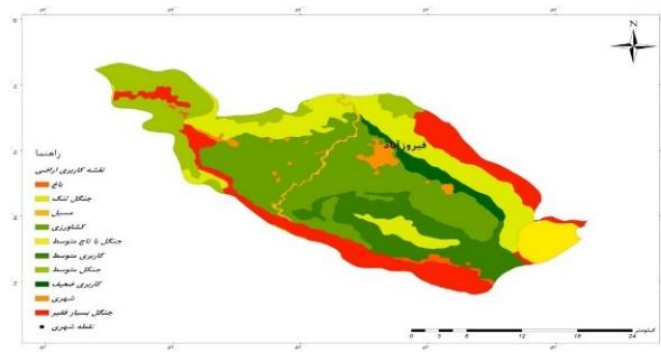
شکل ۵. لیتولوژی حوضه آبخیز فیروزآباد (منبع: نگارنده)



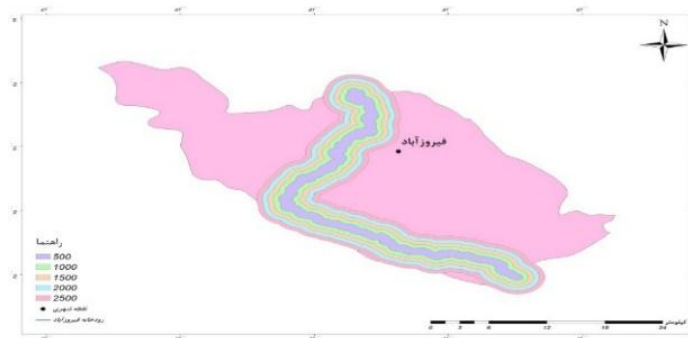
شکل ۶. ارتفاع حوضه آبخیز فیروزآباد



شکل ۷. بارش حوضه آبخیز فیروزآباد



شکل ۸. کاربری اراضی حوضه آبخیز فیروزآباد



شکل ۹. فاصله از رودخانه حوضه آبخیز فیروزآباد

شاخص آنتروپی مقیاسی از مقدار برابری است که در آن گروه‌ها به‌طور مساوی و یکنواخت در بین واحدهای سازمانی توزیع شده‌اند [۱۹]. شاخص آنتروپی، اندازه‌گیری اختلاف متوسط بین سهم گروه‌های واحد از سیستم‌ها به‌عنوان یک کل است. آنتروپی یکی از رویکردهای مدیریتی است که به‌منظور برخورد با بی‌نظمی، بی‌ثباتی، اغتشاش و تردیدهای موجود در یک سیستم استفاده می‌شود [۲۰].

داده‌ها و بحث

تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای بین موقعیت وقوع سیل‌های گذشته و پارامترهای محیطی مؤثر بر وقوع سیل توسط روش نسبت فراوانی (FR) و آنتروپی شانون انجام گرفت و براساس آن، وزن هر یک از پارامترها به‌دست آمد. وزن‌های مؤثر هر یک از پارامترها برای مدل آنتروپی شانون برای تهیه شکل حساسیت به وقوع سیل در جدول‌های ۱ تا ۱۰ مشاهده می‌شود. عامل شیب همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد به پنج طبقه تقسیم شده که طبقه‌های ۷/۶- و ۱۶/۴- ۷/۶ بیشترین تأثیر را بر وقوع سیل دارند، زیرا Eij بیشتر می‌دارند.

جدول ۲. ارتباط بین سیلاب، شیب و تعیین شدت آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| تأثیر | طبقه | بیکم | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Hj | Vi |
|-------|-------------|-------|----------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| | ۰ - ۷/۶ | ۷/۷۴ | ۴۱/۱۸ | ۶/۸۹ | ۰/۶۵۴ | | | | |
| | ۷/۶ - ۱۶/۴ | ۱۹/۵۲ | ۳۱/۵۹ | ۲/۴۲ | ۰/۲۴۰ | | | | |
| شیب | ۱۶/۴ - ۲۶/۲ | ۳۰/۲۹ | ۱۷/۳۸ | ۱/۲۰ | ۰/۱۸۴ | ۱/۵۳۰ | ۲/۶۸۹ | ۰/۵۸ | ۰/۹۳۲ |
| | ۲۶/۲ - ۳۹/۹ | ۲۶/۰۶ | ۱۴/۶۳ | ۰/۹۳ | ۰/۰۷۳ | | | | |
| | ۳۹/۹ - ۸۰/۷ | ۱۶/۶۴ | ۷/۷۴ | ۰/۴۸ | ۰/۰۵۶ | | | | |

دسته‌بندی طبقات شیب با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزار arc gis تهیه شده و از پارامترهای لازم در این نرم‌افزار طبقه‌بندی شیب است.

جدول ۳ نشان‌دهنده ارتباط بین سیلاب حوضه آبخیز فیروزآباد و جهت شیب آن است که به چهار طبقه تقسیم شده است. همچنان که ملاحظه می‌شود جهت شمال دارای بیشترین تأثیر بر وقوع سیل‌هاست، زیرا دارای Eij بیشتری است. وزن لایه تحت مطالعه در مدل آنتروپی حوضه فیروزآباد ۰/۱۸۴ است.

جدول ۳. ارتباط بین سیلاب، جهت شیب و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|---------|------|-------|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| جهت شیب | شمال | ۱۷/۶۵ | ۴۲/۶۰ | ۱/۶۵ | ۰/۵۲۱ | | | | |
| | جنوب | ۲۱/۴۷ | ۱۵/۸۷ | ۱/۰۹ | ۰/۱۶۵ | ۱/۸۳۹ | ۱/۹۸۸ | ۰/۱۶۸ | ۰/۱۸۴ |
| | شرق | ۱۸/۲۶ | ۱۹/۲۸ | ۰/۴۷ | ۰/۰۵۹ | | | | |
| | غرب | ۴۲/۶۲ | ۲۲/۲۵ | ۱/۳۲ | ۰/۲۷۸ | | | | |

جدول ۴ نشان‌دهنده ارتباط بین سیلاب حوضه آبخیز فیروزآباد و فاصله از رودخانه است که به پنج طبقه تقسیم شده است. همچنان که ملاحظه می‌شود، طبقه ۰-۵۰۰ دارای بیشترین سیل‌های اتفاق افتاده و طبقه ۲۵۰۰ دارای کمترین تعداد سیل است؛ بنابراین تأثیر طبقه ۰-۵۰۰ در وقوع سیل بیشتر از بقیه طبقه‌ها بوده است، زیرا دارای Eij بیشتری است. و وزن لایه فاصله از رودخانه نیز ۱/۸۹ است.

جدول ۴. ارتباط بین سیلاب، فاصله از رودخانه و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|------------------|-----------|-------|----------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| فاصله از رودخانه | ۰-۵۰۰ | ۷/۹۴ | ۹۰/۵۹ | ۹/۰۲ | ۰/۸۲۰ | | | | |
| | ۵۰۰-۱۰۰۰ | ۷/۵۲ | ۴/۶۷ | ۰/۶۳ | ۰/۰۸۶ | | | | |
| | ۱۰۰۰-۱۵۰۰ | ۷/۳۲ | ۲/۳۱ | ۰/۲۸ | ۰/۰۴۲ | ۰/۸۴۳ | ۲/۹۷۳ | ۰/۷۱۲ | ۱/۸۹ |
| | ۱۵۰۰-۲۰۰۰ | ۷/۰۰ | ۱/۵۷ | ۰/۰۵ | ۰/۰۰۸ | | | | |
| | ۲۰۰۰-۲۵۰۰ | ۷/۰۶۷ | ۰/۸۶ | ۰/۰۲ | ۰/۰۰۴ | | | | |

برای تهیه نقشه فاصله از رودخانه از دستور multering buffer در نرم‌افزار arc gis استفاده شد. طبقات ارتفاعی از دیگر عوامل مهم و مؤثر بر وقوع سیل است که تأثیر بسیار زیادی بر وقوع سیل دارد. به‌طور معمول سیل در طبقات پایین رخ می‌دهد. با توجه به جدول ۴، در حدود ۹۱/۴۸ سیل‌ها در حوضه آبخیز فیروزآباد در طبقه اول یعنی در ارتفاع ۱۴۴۳-۱۱۳۴ متری اتفاق افتاده است. وزن لایه طبقات ارتفاعی براساس مدل آنتروپی شانون ۰/۹۹۹ است. برای تهیه عامل مؤثر بر طبقات ارتفاعی از مدل رقومی ارتفاع در نرم‌افزار arc gis استفاده شده است.

ارزیابی عوامل مؤثر بر مخاطرات سیلاب و تهیه نقشه حساسیت و احتمال وقوع آن با استفاده ... ۱۵۹

جدول ۶ نشان‌دهنده شاخص طبقات توپوگرافی حوضه آبخیز فیروزآباد است. با افزایش این عامل، تأثیر آن در وقوع سیل بیشتر می‌شود. با توجه به جدول طبقه ۶/۷۴-۷/۶۹ کمترین تأثیر و طبقه ۱۱/۴۱-۱۲/۵۸ بیشترین تأثیر را در وقوع سیل دارند و وزن لایه TWI در وقوع سیل ۰/۳۹ است.

جدول ۵. ارتباط بین سیلاب، طبقات ارتفاعی و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|---------------|-----------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| طبقات ارتفاعی | ۱۱۳۴-۱۴۴۳ | ۵۱/۲۶ | ۹۱/۴۸ | ۱۳/۶۹ | ۰/۹۶۸ | | | | |
| | ۱۴۴۳-۱۷۱۰ | ۱۰/۴۳ | ۷/۲۸ | ۲/۲۶ | ۰/۴۰۱ | | | | |
| | ۱۷۱۰-۲۰۱۹ | ۱۵/۳۹ | ۱/۲۴ | ۰/۰۸ | ۰/۱۹۳ | ۱/۸۰۳ | ۳/۸۶۲ | ۰/۷۴۹ | ۰/۹۹۹ |
| | ۲۰۱۹-۲۳۷۶ | ۱۳/۶۹ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | | | | |
| | ۲۳۷۶-۲۸۱۸ | ۹/۲۳ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | | | | |

جدول ۶. ارتباط بین سیلاب، TWI و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|---------|-------------|-------|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TWI | ۳/۳۸-۶/۷۴ | ۱۷/۱۸ | ۱/۶۸ | ۰/۳۷ | ۰/۰۰۶ | | | | |
| | ۶/۷۴-۷/۶۹ | ۲۰/۱۲ | ۱/۲۶ | ۰/۱۲ | ۰/۰۰۲ | | | | |
| | ۷/۶۹-۸/۵۷ | ۲۱/۷۱ | ۱/۴۲ | ۰/۲۶ | ۰/۰۰۴ | | | | |
| | ۸/۵۷-۹/۴۴ | ۱۶/۵۹ | ۳/۱۲ | ۱/۴۲ | ۰/۰۱۸ | ۲/۹۳۱ | ۳/۷۵۳ | ۰/۲۳۹ | ۰/۳۷۹ |
| | ۹/۴۴-۱۰/۳۹ | ۱۴/۱۰ | ۱۵/۵۸ | ۵/۸۵ | ۰/۱۶۴ | | | | |
| | ۱۰/۳۹-۱۱/۴۱ | ۵/۹۲ | ۱۵/۴۲ | ۵/۴۳ | ۰/۱۶۳ | | | | |
| | ۱۱/۴۱-۱۲/۵۸ | ۲/۳۷ | ۱۶/۲۲ | ۶/۵۱ | ۰/۱۹۶ | | | | |

برای محاسبه TWI از فرمول زیر استفاده شده و سپس نقشه TWI تهیه و طبقه‌بندی شد.

$$TWI = 1n (AS / \tan \beta)$$

جدول ۶ نشان‌دهنده ارتباط بین سیلاب و SPI در حوضه آبخیز فیروزآباد است. طبق

جدول هرچه مقدار این عامل کمتر باشد، تأثیر آن در وقوع سیل بیشتر است. با توجه به جدول

طبقه ۶۰۰۰۰۰-۴۰۰۰۰۰ دارای بیشترین تأثیر در وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد است، زیرا دارای Eij بیشتری است. وزن لایه هم ۱/۳ است.

جدول ۷. ارتباط بین سیلاب، SPI و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|---------------|---------------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SPI | ۲۹-۵۰۰۰ | ۷۸/۳۹ | ۶۲/۸۴ | ۰/۵۸ | ۰/۰۳۸ | | | | |
| | ۳۰۰۰-۵۰۰۰ | ۹/۴۸ | ۱۸/۲۰ | ۲/۴۹ | ۰/۰۷۲ | | | | |
| | ۳۰۰۰-۱۰۰۰۰۰ | ۵/۷۵ | ۹/۶۱ | ۷/۷۲ | ۰/۱۶۳ | ۲/۲۱۰ | ۳/۲۴۶ | ۰/۴۲۸ | ۱/۳۸۵ |
| | ۱۰۰۰۰۰-۲۰۰۰۰۰ | ۳/۰۷ | ۵/۴۷ | ۵/۶۱ | ۰/۱۵۰ | | | | |
| | ۲۰۰۰۰۰-۴۰۰۰۰۰ | ۱/۷۸ | ۱/۳۲ | ۳/۱۸ | ۰/۰۸۲ | | | | |
| ۴۰۰۰۰۰-۶۰۰۰۰۰ | ۰/۹۵ | ۲/۸۶ | ۱۴/۹۸ | ۰/۳۹۲ | | | | | |

جدول ۸. ارتباط بین سیلاب، کاربری اراضی و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیل | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|--------------|---------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| کاربری اراضی | کشاورزی | ۸۲/۵۸ | ۸۳/۳۲ | ۱/۷۶ | ۰/۱۶۴ | | | | |
| | خاک لخت | ۰/۸۱ | ۸/۶۹ | ۷/۸۵ | ۰/۲۸۵ | | | | |
| | جنگل | ۱۰/۵۴ | ۶/۰۴ | ۰/۷۴ | ۰/۰۳۵ | ۱/۶۹۵ | ۲/۵۹۳ | ۰/۷۳ | ۰/۲۸۰ |
| | باغ | ۵/۵۲ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | | | | |
| | مسکونی | ۰/۴۵ | ۰/۴۵ | ۳/۰۷ | ۰/۰۸۷ | | | | |
| | مسیل‌ها | ۰/۲۴ | ۱/۲۳ | ۴۲/۶۴ | ۰/۷۲۲ | | | | |

جدول ۸ نشان‌دهنده ارتباط بین سیلاب و کاربری اراضی حوضه آبخیز فیروزآباد است. برای عامل کاربری اراضی خاک‌های لخت، مناطق مسکونی و مسیل‌ها، تأثیر بیشتری در وقوع سیل دارند. مناطق مسکونی به دلیل اینکه در نزدیک رودخانه و مناطق کم‌شیب احداث می‌شوند و همچنین دارای سطح نفوذناپذیرند، پتانسیل چشمگیری برای وقوع سیل دارند. وزن لایه هم ۰/۲۸۰ است.

با توجه به جدول ۹ پارامتر سنگ‌شناسی به سه گروه تقسیم شده است که فقط سنوزوئیک در وقوع سیلاب‌های حوضه آبخیز فیروزآباد تأثیرگذار است؛ وزن لایه هم ۰/۴۷ است. شاخص NDVI یا شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال‌شده از دیگر عامل‌های مؤثر در وقوع

ارزیابی عوامل مؤثر بر مخاطرات سیلاب و تهیه نقشه حساسیت و احتمال وقوع آن با استفاده ... ۱۶۱

سیلاب است. جدول ۱۰ نشان‌دهنده این شاخص در حوضه آبخیز فیروزآباد است که همچنان که ملاحظه می‌شود این شاخص به ۱۰ طبقه تقسیم شده و وزن لایه هم ۰/۰۳۷ است.

جدول ۱۱ نمایانگر ارتباط بین سیلاب و بارندگی در حوضه آبخیز تحت مطالعه است که این شاخص به سه طبقه تقسیم شده و تعداد پیکسل‌ها در هر طبقه و تأثیر هر یک از طبقه‌ها در وقوع سیلاب محاسبه شد. وزن لایه هم ۲/۰۰ است

جدول ۹. ارتباط بین سیلاب، لیتولوژی و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیلاب | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|----------|------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| لیتولوژی | سنوزوئیک | ۹۰/۵۲ | ۱۰۰ | ۱۰/۰۰ | ۰/۹۸۹ | ۱/۶۹۰ | ۲/۷۶۱ | ۰/۴۰۲ | ۰/۴۷۸ |
| | مزرزوئیک | ۷/۷۳ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | | | | |
| | پالئوزوئیک | ۱/۷۵ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | ۰/۰۰ | | | | |

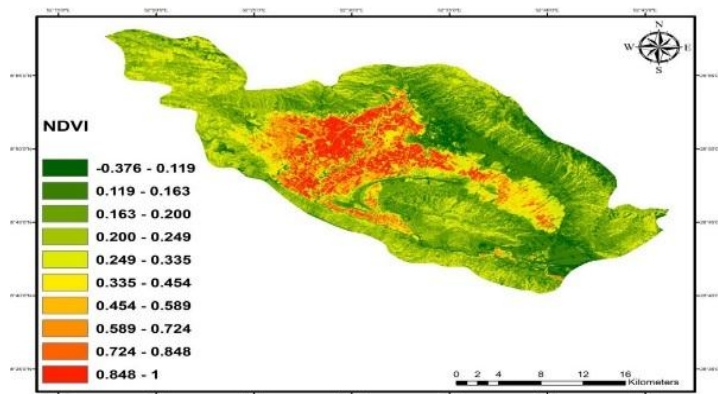
جدول ۱۰. ارتباط بین سیلاب، NDVI و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیلاب | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|-----------|----------------|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NDVI | -۰/۳۷۶ - ۰/۱۱۹ | ۰/۱۱ | ۳/۳۱ | ۲۹/۳۵ | ۰/۶۱۷ | ۱/۹۰۰ | ۳/۳۲۲ | ۰/۴۲۸ | ۲/۰۳۷ |
| | ۰/۱۱۹ - ۰/۱۶۳ | ۲/۴۷ | ۴/۶۴ | ۱/۸۸ | ۰/۰۴۰ | | | | |
| | ۰/۱۶۳ - ۰/۲۰۰ | ۱۵/۱۸ | ۱۱/۲۶ | ۰/۷۴ | ۰/۰۱۶ | | | | |
| | ۰/۲۰۰ - ۰/۲۴۹ | ۳۱/۸۰ | ۹/۹۳ | ۰/۳۱ | ۰/۰۰۷ | | | | |
| | ۰/۲۴۹ - ۰/۳۳۵ | ۲۸/۳۰ | ۲۱/۱۹ | ۰/۷۵ | ۰/۰۱۶ | | | | |
| | ۰/۳۳۵ - ۰/۴۵۴ | ۱۰/۶۳ | ۱۴/۵۷ | ۱/۳۷ | ۰/۰۲۹ | | | | |
| | ۰/۴۵۴ - ۰/۵۸۹ | ۳/۳۲ | ۹/۹۳ | ۳/۰۰ | ۰/۰۶۳ | | | | |
| | ۰/۵۸۹ - ۰/۷۲۴ | ۲/۳۹ | ۱۳/۲۵ | ۵/۵۵ | ۰/۱۷۷ | | | | |
| | ۰/۷۲۴ - ۰/۸۴۸ | ۱/۵۱ | ۱۰/۶۰ | ۴/۲۲ | ۰/۰۸۹ | | | | |
| ۰/۸۴۸ - ۱ | ۳/۲۹ | ۱/۳۲ | ۰/۴۰ | ۰/۰۰۸ | | | | | |

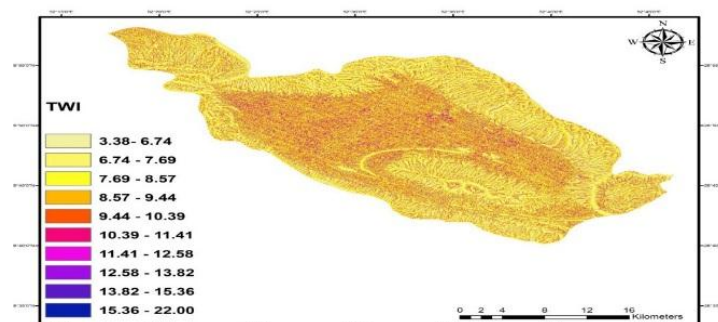
جدول ۱۱. ارتباط بین سیلاب، بارندگی و تعیین مقدار آنها با استفاده از مدل آنتروپی شانون

| پارامتر | طبقه | پیکسل | وقوع سیلاب | FR | Eij | Hj | Hjmax | Ij | Vj |
|---------|-------|-------|------------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| بارندگی | > ۶۸۶ | ۱۷/۵۸ | ۲۵/۸۵ | ۶/۷۰ | ۰/۵۰۲ | ۲/۳۱۹ | ۳/۸۱ | ۰/۳۰۵ | ۲/۰۰ |
| | ۶۹۳ | ۱۸/۱۳ | ۳۸/۳۱ | ۳/۳۹ | ۰/۴۱۷ | | | | |
| | ۶۹۴ < | ۶۴/۲۹ | ۳۵/۸۴ | ۰/۹۵ | ۰/۰۷۹ | | | | |

بعد از بررسی ارتباط هر یک از پارامترها با سیلاب حوضه تحت مطالعه و وزن آنها مشخص شد که شاخص NDVI دارای بیشترین وزن (۲/۰۳۷) و شاخص جهت شیب دارای کمترین وزن (۰/۱۸۴) بودند. پس NDVI از دیدگاه آنتروپی شانون مهم‌ترین عامل در وقوع سیل است. به منظور تهیه شکل حساسیت به وقوع سیل ۱۰ عامل یادشده تهیه شدند پس از وزن نهایی هر عامل توسط مدل آنتروپی شانون و ضرب آن در طبقه‌های عامل مذکور، شکل‌های وزنی با هم جمع شدند و شکل نهایی حساسیت به وقوع سیل تهیه شد. سپس شکل نهایی به پنج طبقه حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تقسیم شد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل قسمت‌های مرکزی حوضه آبخیز بیشتر در معرض حساسیت به وقوع سیل قرار دارند.

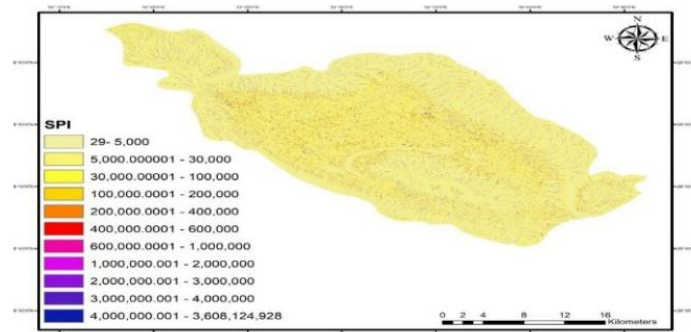


شکل ۱۰. شاخص NDVI در حوضه آبخیز فیروزآباد

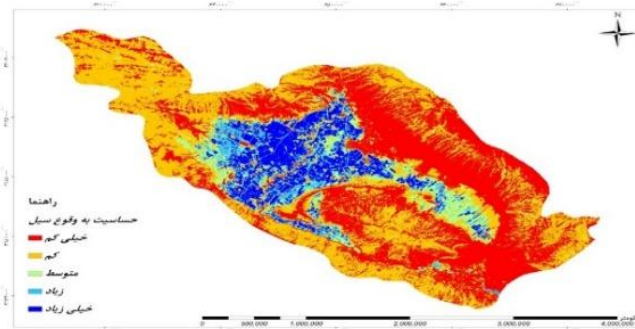


شکل ۱۱. رطوبت توپوگرافی (TWI) در حوضه آبخیز فیروزآباد

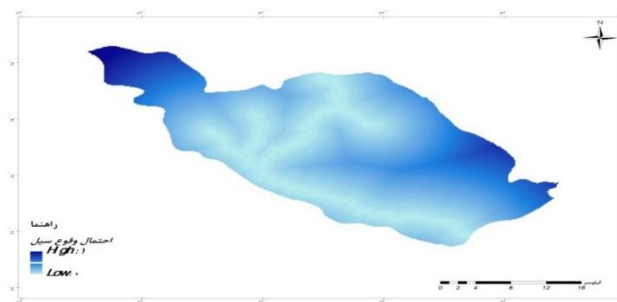
ارزیابی عوامل مؤثر بر مخاطرات سیلاب و تهیه نقشه حساسیت و احتمال وقوع آن با استفاده ... ۱۶۳



شکل ۱۲. SPI حوضه آبخیز فیروزآباد

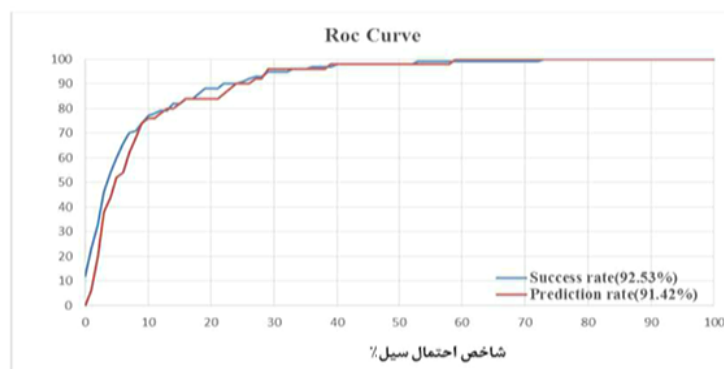


شکل ۱۳. حساسیت به وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد براساس مدل آنتروپی شانون



شکل ۱۴. احتمال وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد براساس مدل آنتروپی شانون

برای اطمینان از صحت و اعتبارسنجی شکل‌های تهیه‌شده در این مطالعه پس از بازدید میدانی از منطقه از محاسبه شاخص ویژگی‌های نسبی یا منحنی ROC استفاده می‌شود [۱۰]. در این روش مساحت مقادیر بین ۰/۵ تا ۱ تغییر می‌کند و از آن برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود. بهترین مدل سطح زیرمنحنی نزدیک به ۱ دارد، در حالی که مقادیر نزدیک به ۰/۵ نشان‌دهنده نبود صحت مدل است. برای ترسیم نمودار ROC باید محورهای افقی و عمودی تعریف شوند. محور X در این نمودار عبارت است از شاخص احتمال وقوع سیل و محور Y درصد تجمع سیل است. اساس نتایج منحنی ROC برای حوضه آبخیز فیروزآباد، برای میزان پیش‌بینی مقدار سیل زیرمنحنی با ۳۵ درصد داده‌های اعتبارسنجی برابر با ۹۲/۴۲ درصد و برای میزان موفقیت با ۶۵ درصد داده‌های آموزش برابر با ۹۲/۵۳ درصد است (نمودار ۱). پس مدل آنتروپی شانون دارای صحت قابل قبولی در تهیه شکل حساسیت به وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد است.



نمودار ۱. منحنی ROC حوضه آبخیز فیروزآباد

نتیجه‌گیری

راهکار اساسی برای کاهش خسارت مالی ناشی از سیل، تهیه نقشه حساسیت به وقوع سیل است؛ از این رو در این تحقیق به ارزیابی مدل آنتروپی شانون و فازی در تهیه نقشه حساسیت و احتمال وقوع سیلاب در حوضه آبخیز رودخانه فیروزآباد پرداخته می‌شود که ابتدا به تهیه شکل موقعیت سیل‌ها در حوضه آبخیز تحت بررسی پرداخته شد و سپس ۱۰ عامل، شیب، جهت شیب، لیتولوژی، کاربری اراضی، NDVI، SPI، TWI، طبقات ارتفاعی، بارندگی و فاصله از رودخانه به‌عنوان عوامل مؤثر در وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد انتخاب شدند. اولویت‌بندی عوامل مؤثر در وقوع سیل توسط شاخص آنتروپی شانون نشان داد که لایه‌های NDVI (۲/۰۳)، بارندگی (۲/۰۰)، فاصله از رودخانه

(۱/۸۹)، SPI (۱/۳۸۵)، طبقات ارتفاعی (۰/۹۹۹)، شیب با وزن (۰/۹۳۲)، لیتولوژی (۰/۴۷۸)، TWI (۰/۳۷۹) و کاربری اراضی (۰/۲۸۰) و جهت شیب (۰/۱۸۴) به ترتیب بیشترین تا کمترین تأثیر بر وقوع سیل را دارند. براساس نتایج منحنی ROC برای میزان پیش‌بینی مقدار سطح زیرمنحنی با ۳۵ درصد داده‌های اعتبارسنجی برابر (۹۱/۴۲ درصد) و برای میزان موفقیت با ۶۵ درصد داده‌های آموزش برابر (۹۲/۵۳ درصد) است. پس مدل آنتروپی شانون دارای صحت قابل قبولی در تهیه شکل حساسیت به وقوع سیل در حوضه آبخیز فیروزآباد است. براساس شکل نهایی حساسیت به وقوع سیل اطراف رودخانه فیروزآباد دارای حساسیت به وقوع سیل زیادی است، پس باید از ساخت اراضی مسکونی و باغ و اراضی کشاورزی در اطراف رودخانه خودداری شود. با توجه به نتایج تحقیق تهیه شکل حساسیت به وقوع بلایای طبیعی نظیر سیل و ... برای مدیریت و برنامه‌ریزی‌های آتی لازم و واجب است که از وارد آمدن خسارات جانی و مالی به این بخش‌ها جلوگیری شود.

منابع

- [۱]. پورخسروانی، محمود؛ پرپار، زهرا؛ و مغتنی رحیمی، بهرام (۱۳۹۶). «ارزیابی مکان‌های بهینه جهت دفن زباله‌های شهری»، فصلنامه پژوهش‌های برنامه‌ریزی شهری، ش ۲، ص ۳۳۷-۳۵۶.
- [۲]. پورقاسمی، حمید؛ مرادی، حسن؛ و فاطمی عقدا، مریم (۱۳۹۲). «اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر وقوع زمین‌لغزش و پهنه‌بندی حساسیت آن»، مجله علوم آب و خاک، دوره ۱۸، ش ۷۰، ص ۱۹۲-۱۸۱.
- [۳]. شریفی پیچون، محمد؛ و پرنون، پرهام (۱۳۹۷). «ارزیابی و تحلیل فضایی سیل‌گیری رودخانه قره‌سو با استفاده از منطق فازی در GIS، مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره هفتم، ش ۱۵، ص ۱۷-۳۰.
- [۴]. قهرودی، منیژه (۱۳۹۱). «ارزیابی آسیب‌پذیری ناشی از سیلاب در شهر تهران»، فصلنامه علمی امداد و نجات، سال چهارم، ش ۳.
- [۵]. قنوازی، علی (۱۳۹۲). «پهنه‌بندی سیلاب شهر کرج با استفاده از منطق فازی»، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ش ۸، ص ۱۳۱-۱۱۳.
- [۶]. طاهری بهبهانی، مریم؛ و بزرگ‌زاده، محسن (۱۳۷۵). سیلاب‌های شهری، تهران: انتشارات مرکز تحقیقات مسکن و معماری.

- [۷]. مصطفی زاده، میثم؛ صفریان زنگور، رضا؛ و حاجی، خلیل (۱۳۹۷). «تحلیل الگو و شرایط وقوع بارش های منجر به سیل در سال های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ در شهرستان گرمی استان اردبیل»، *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، دوره هفتم، ش ۱۵، ص ۱۰۶-۸۹.
- [۸]. موسوی، مجتبی؛ نگهبان، سعید؛ رخشانی مقدم، حسین؛ و حسین زاده، محمد (۱۳۹۵). «ارزیابی و پهنه بندی سیل خیزی با استفاده از منطق فازی TOPSIS در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز شهر باغملک)»، *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، سال پنجم، ش دهم، ص ۹۸-۷۹.
- [۹]. نوحانی، ابراهیم؛ دارابی، فریبا؛ و معروفی نیا، ادریس (۱۳۹۵). «ارزیابی مدل آنتروپی شانون در تهیه شکل اساسی و احتمال وقوع سیل در حوضه آبخیز هراز»، *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، سال پنجم، ش دهم.
- [۱۰]. عقیفی، محمد ابراهیم (۱۳۹۵). «ارزیابی پتانسیل فروروشست زمین و عوامل مؤثر بر آن، مطالعه موردی: دشت سیدان فاروق مرودشت»، *مجله پژوهش های ژئومورفولوژی کمی*، ش ۳ (پیاپی ۱۹)، ص ۱۳۲-۱۲۱.
- [۱۱]. عقیفی محمد ابراهیم (۱۳۹۱). «هیدروژئومورفولوژی حوضه آبریز دشت گرو استان هرمزگان»، *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*، ش ۳۵، ص ۷۶-۶۱.
- [۱۲]. عقیفی محمد ابراهیم (۱۳۹۲). «مخاطرات ژئومورفولوژیک محور شیراز- کازرون و پهنه بندی خطر با استفاده از GIS»، همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار.
- [۱۳]. عقیفی محمد ابراهیم (۱۳۹۴). *بحران های محیط طبیعی ایران*، پیروز.
- [۱۴]. یمانی، مجتبی؛ و عنایتی، مریم (۱۳۸۴). «ارتباط ویژگی های ژئومورفولوژیک حوضه ها و قابلیت سیل خیزی (تجزیه و تحلیل داده های سیل از طریق مقایسه ژئومورفولوژیک حوضه های فشنند و بهجت آباد)، پژوهش های جغرافیایی، ش ۵۴.
- [15]. Afifi, mohammad Ebrahim (2017). "Application of GIS for Flood Zoning Hazard in Shiraz", *International Journal of Ecology & Development*, 22.
- [16]. Khosravi, Khabat; Pourghasemi, Hamid Reza; Chapi, Kamran; & Bahri, Masoumeh. (2016). "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*, 188: 656. doi:10.1007/s10661-016-5665-9.
- [17]. Shafapour Tehrany, Mahyat; Lee, Moung-Jin; Pradhan, Biswajeet; Neamah Jebur, Mustafa; & Lee, Saro (2014b). "Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models", *Environ. Earth sci.* 72(10), pp: 4001-4015.

- [18]. Tehrany, M.S., Pradhan, B., & Jebur, M.N., (2015b). "Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(4), pp:1149–1165.
- [19]. Massey, Douglas S. & Denton, Nancy A. (1988). "The Dimensions of Residential", *Social Forces*, 67(2), pp:281–315.
- [20]. Naghibi.Seyed Amir; Pourghasemi, Hamid Reza; Pourtaghi, Zohreh; & Rezaei Ashkan (2014). "Groundwater qanat potential mapping using frequencyratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran", *Earth Science Informatics*, DOI 10.1007/s12145-014-0145-7.