

Identification of the Most Important Environmental Variables in Spatial Prediction of Flood Prone Areas using the Maximum Entropy Model in Parts of Golestan Province

EHSAN MORADI¹, AHMAD RAJABI^{*}, SAEID SHABANLOU¹, FARIBORZ YOSEFVAND¹

1- Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran.

(Received: Dec. 27, 2020- Revised: Feb. 12, 2021- Accepted: Feb. 17, 2021)

ABSTRACT

Flood is a destructive natural hazard over the recent years. In the current study, the maximum entropy model as an advanced data mining model was used to model and provide the spatial maps of flood prone areas in Saliantapeh Watershed, Golestan Province, with an area of 4515.47 km². For this purpose, the flood inventory map was prepared based on available reports and field surveys. Then, 13 effective variables including the digital elevation model, slope percent, slope direction, rainfall, distance from drainage network, land use, lithology, soil texture, plan curvature, profile curvature, topographic moisture index, drainage density and flow capacity index were identified and introduced to the model. After that, three different series of flood risk points (i.e. ds1, ds2, and ds3) including 70% for training and 30% for validation of the model were randomly prepared to evaluate the accuracy and robustness of the model based on the ROC Index. The results showed that the maximum entropy model with high accuracy (above 90%) predicted flood prone areas. Moreover, in this study, the degree of importance of the variables was investigated by the model and the results demonstrated that the two factors of the drainage density (about 49% of importance) and distance from the streamflow (about 15% of importance) were detected as the most important environmental factors affecting flood in the studied area.

Keywords: Data Mining Model, Flood Predictors, ROC Index, Robustance, Saliantappeh Catchment.

شناسایی مهم‌ترین متغیرهای محیطی در پیش‌بینی مکانی مناطق مستعد سیل‌گیری با استفاده از مدل پیشینه آنترابی در بخشی از استان گلستان

احسان مرادی^۱، احمد رجبی^{۱*}، سعید شعبانلو^۱، فریبرز یوسفوند^۱

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۲۹)

چکیده

سیل یک بلای طبیعی مخرب طی سال‌های گذشته بوده است. در پژوهش حاضر به منظور مدل‌سازی و تهیه نقشه‌ی مکانی مناطق مستعد سیل‌گیری حوزه آبخیز سالیان‌تپه واقع در استان گلستان با مساحت ۴۵۱۵/۴۷ کیلومتر مربع، از مدل پیشینه آنترابی که یکی از مدل‌های پیشرفته داده‌کاوی است استفاده شده است. بدین منظور در ابتدا براساس گزارش‌های موجود و بررسی‌های میدانی نقشه پراکنش سیل تهیه گردید. در ادامه سیزده متغیر اثرگذار به عنوان عوامل پیش‌بینی کننده شامل طبقات ارتفاعی، درصد شیب، جهت شیب، بارندگی، فاصله از شبکه زهکشی، کاربری اراضی، سنگ شناسی، بافت خاک، انحناى طرح، انحناى پروفیل، شاخص رطوبت توپوگرافی، تراکم زهکشی و شاخص توان جریان، شناسایی و به مدل معرفی شدند. سپس سه سری متفاوت از نقاط وقوع خطر سیل (ds1, ds2, ds3) شامل ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای اعتبار سنجی مدل به صورت تصادفی آماده گردید، تا دقت و صداقت^۱ مدل براساس شاخص ROC مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد که مدل پیشینه آنترابی با دقت عالی (بالای ۹۰ درصد) مناطق مستعد سیل‌گیری را پیش‌بینی نموده است. همچنین در این تحقیق درجه اهمیت متغیرها توسط مدل مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که دو عامل تراکم زهکشی (حدود ۴۹ درصد اهمیت) و فاصله از جریان (حدود ۱۵ درصد اهمیت) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر سیل‌گیری منطقه مورد مطالعه، شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: حوزه آبخیز سالیان‌تپه، روستنس (صداقت مدل)، شاخص ROC، عوامل پیش‌بینی کننده سیلاب، مدل داده‌کاوی.

مقدمه

درجه‌بندی این مناطق از لحاظ میزان خطر سیل‌گیری است تا براساس نتایج حاصله بتوان در رابطه با نحوه استفاده از اراضی و کاربری‌های مختلف از جمله کشاورزی، شهری و صنعتی تصمیم‌گیری نمود و زیان‌های ناشی از سیل را به حداقل ممکن کاهش داد.

در بررسی‌های انجام شده، عدم توجه به ویژگی‌های طبیعی زمین نظیر شیب، توپوگرافی، ساخت و سازهای غیراصولی باعث پاره‌ای از مشکلات شده است (Nematollah *et al.*, 2017). فرایند وقوع خطر سیل بسیار پیچیده بوده و به دلیل مؤثر بودن عوامل مختلف در رخداد آن، پیش‌بینی وقوع آن مشکل است. در سال‌های گذشته، ارزیابی حساسیت^۲ برای جوامع بین‌المللی موضوع مهمی بوده است، از این رو بکارگیری مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی مکانی مناطق مستعد وقوع خطرات طبیعی توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. پیش‌بینی مکانی وقوع خطرات طبیعی از طریق بکارگیری مدل‌هایی که

سیلاب یکی از بلایای طبیعی است که باعث خسارات فراوانی در دهه‌های اخیر شده است. روند افزایش سیل در پنج دهه‌ی گذشته نشان می‌دهد که تعداد وقوع سیل در دهه‌ی ۸۰ نسبت به دهه‌ی ۴۰، کمابیش ۱۰ برابر شده است و به بیان دیگر ۹۰۰ درصد افزایش داشته است (Abdi, 2006). شهرنشینی به‌علت افزایش سطوح غیرقابل نفوذ توسط ساختمان‌ها، خیابان‌ها و پیاده‌روها و انسداد کانال‌ها باعث تشدید جریان سیلاب می‌شود (Konrad and Booth, 2005). سیل ممکن است در اثر بروز یک بارندگی شدید و یا ذوب ناگهانی و سریع برف‌ها در یک حوزه آبخیز و یا در نتیجه شکسته شدن یک سد به وقوع بپیوندد. به‌هرحال بروز سیل باعث تخریب و ایجاد خسارت و تلفات به سازه‌های مسیر و مراکز انسانی می‌گردد (Asqari Moghadm, 2005). تجارب کشورهای مختلف نشان می‌دهد که اولین مرحله جهت کاهش آثار زیانبار سیل، شناخت مناطق سیلگیر و

* نویسنده مسئول: ahmad.rajabi1974@gmail.com

سطح زیر منحنی را برای مدل نسبت فراوانی و مدل بیشینه آنتروپی به ترتیب $۷۴/۳$ و $۹۲/۶$ درصد تخمین زده است که نشان می‌دهد مدل بیشینه آنتروپی منجر به نتایج بهتری برای ارزیابی پتانسیل سیلگیری در منطقه مورد مطالعه شده است. Rahmati *et al.* (2016b) برای تهیه نقشه پتانسیل آب‌های زیرزمینی، دو مدل جنگل تصادفی و بیشینه آنتروپی را در منطقه مهران بکار بردند. آنها با استفاده از حدود ۱۹۱ نقطه آب زیرزمینی و فاکتورهای پیش‌بینی کننده، نقشه پتانسیل آب زیرزمینی را تهیه نمودند. در این مطالعه آنان برای ارزیابی دقت مدل‌ها از منحنی ROC استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل بیشینه آنتروپی با دقت ۹۱ درصد عملکرد بهتری را نسبت به مدل جنگل تصادفی با دقت $۸۷/۷$ درصد از خود نشان داد. (Azareh *et al.*, 2019) به مدل‌سازی فرسایش خندقی در یک منطقه نیمه‌خشک ایران با استفاده از مدل آماری دو متغیره، یعنی فاکتور قطعیت^۴ (CF) و مدل پیشرفته یادگیری ماشینی، یعنی بیشینه آنتروپی^۵ (ME) پرداختند. چندین پارامتر محیطی و زمین‌شناسی که در فرسایش خندقی نقش دارند به عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده در نظر گرفته شدند. نتایج ارزیابی براساس منحنی ROC نشان داد که دقت مدل بیشینه آنتروپی $۸۸/۶$ درصد و مدل فاکتور قطعیت $۸۱/۸$ درصد می‌باشد. همچنین طبق نتایج آزمون تست جک نایف، متغیر جهت شیب، فاصله از رودخانه، لیتولوژی و کاربری اراضی به ترتیب مهم‌ترین متغیرهایی بودن که بیشترین تأثیر را در توزیع مکانی فرسایش خندقی داشتند.

وقوع سیلاب‌ها در دهه‌های اخیر در استان گلستان افزون بر اختلال در روند جاری امور، سبب وارد آمدن خسارت‌های زیادی به زیرساخت‌ها شده است. از بزرگ‌ترین وقایع سیل کشور می‌توان به سیلاب مردادماه ۱۳۸۰ استان گلستان اشاره کرد. در این حادثه بیش از ۳۰۰ نفر کشته و ۲۷۰ نفر مفقود شدند و نیز ۶۰۰ میلیارد ریال خسارت به بار آمد. وسعت تخریبی این سیل که به گفته کارشناسان در اثر تخریب جنگل‌ها و مراتع در بالادست حوزه اتفاق افتاد، حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع را در بر گرفت. در اثر این سیل هزاران تن خاک جابه‌جا و در مخزن سد گلستان ته نشین شد (Moradi and Hosseini, 2006). سیل سال ۱۳۹۱ در اثر بارش ۱۰۳ میلیمتری در رامیان، فاضل آباد و علی‌آباد رخ داد. در بارش ثبت شده در عصر روز $۹۳/۳/۸$ در ایستگاه رامیان، بارشی به میزان ۶۰ میلیمتر اتفاق افتاد که مرکز ثقل آن در میانه حوزه بود و باعث وقوع سیلابی با دبی معادل

بواسطه داده‌های مکانی بوجود آمده و خروجی آنها منجر به تهیه نقشه‌های حساسیت می‌شود، مناسب‌ترین راهکار برای برنامه‌ریزی مدیریت اراضی در حوزه‌های آبخیز جهت پیشگیری از رخداد این وقایع است (Rahi, 2017). البته روش‌های دیگری نیز برای پیش‌بینی خطرات طبیعی وجود دارند که نیازمند داده‌های کمی زیاد و با کیفیت بالا بوده و برای مناطقی با وسعت محدود کاربرد دارند. ولی روش‌های داده‌کاوی مکانی با ترکیب عوامل محیطی و موقعیت موجود خطرات طبیعی، مناطق مستعد خطر را پیش‌بینی می‌کنند (Rahi, 2017).

نظر به اهمیت موضوع، شناخت عوامل مؤثر در پیش‌بینی مکانی مناطق مستعد سیلگیری امری ضروری به نظر می‌رسد. از این رو مطالعات مختلفی با استفاده از مدل‌های مختلف از جمله الگوریتم ماشین‌های بردار پشتیبان، روش برنامه‌ریزی ژنتیک، مدل نسبت فراوانی، وزن واقعه، آنالیز تصمیم‌گیری چند معیاره^۱، تحلیل سلسله مراتبی، جنگل تصادفی، بیشینه آنتروپی، مدل رگرسیون اسپلاین انطباق یافته چند متغیره، مدل خطی تعمیم یافته و رگرسیون لجستیک در نقاط مختلف ایران صورت گرفته است (Khosravi *et al.*, 2016a; Rahmati *et al.*, 2015; 2016a; Moghaddam *et al.*, 2019; Bui *et al.*, 2019). همچنین در دهه‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در سراسر دنیا برای پیش‌بینی و شناسایی مناطق مستعد سیل با استفاده از الگوریتم‌ها و مدل‌ها زیر انجام شده است: مدل درخت تصمیم (DT)، مدل ترکیبی دومتغیره و چندمتغیره، مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) (Tehrany *et al.*, 2013; 2015)؛ آنالیز چند معیار (MCA) (Papaioannou *et al.*, 2015)؛ نسبت فراوانی (FR)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) (Mojaddadi *et al.*, 2017)؛ مدل‌های درخت بایس ساده^۲ (NBTree)، درخت تصمیم‌گیری متناوب^۳ (ADTree) و مدل جنگل تصادفی (RF) (Chen *et al.*, 2020).

مدل بیشینه آنتروپی یکی از مدل‌های پیشرفته داده‌کاوی است که به دلیل مزایا و قابلیت‌های آن، تحقیقات مختلفی برای پیش‌بینی خطرات مختلف طبیعی توسط آن انجام شده است. (Siahkamari *et al.*, 2018) در تحقیقی به بررسی کاربرد نسبت فراوانی و مدل بیشینه آنتروپی برای تهیه نقشه حساسیت سیل در حوزه آبخیز مادرسو در استان گلستان پرداختند. سرانجام، نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیلگیری با استفاده از روش منحنی مشخصه عملکرد گیرنده (ROC) اعتبارسنجی شد. منحنی ROC

4 Certainty Factor
5 Maximum Entropy

1 Multi-criteria Decision-Making Approaches (MCDA)
2 Naïve Bayes tree
3 Alternating decision tree

دوازده زیر حوضه است که تیل آباد و زرینگل به ترتیب با مساحت ۱۰۹۱/۶۸ کیلومتر مربع و ۱۰۷۴/۸۱ کیلومتر مربع بزرگترین زیرحوضه‌های منطقه محسوب می‌شوند. قسمت‌های مرکزی و غربی به‌عنوان نواحی دشت و هموار در نظر گرفته می‌شوند و از نظر توپوگرافیکی میانگین ارتفاع این منطقه بین ۲۰- تا ۳۶۵۲ متر می‌باشد. میانگین میزان بارش سالانه تقریباً بین ۳۴۸-۸۱۰ میلی‌متر است. کاربری اراضی غالب منطقه مطالعاتی، کشاورزی (۴۳/۶۹ درصد) با مساحت ۱۹۷۳/۲۴ کیلومتر مربع است. متوسط حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۱۱ و ۱۸/۵ درجه سانتیگراد است. بر طبق گزارش CONRWMGP, 2009 منطقه مورد مطالعه با برخی از سازندهای سنگ‌شناسی حساس مانند رسوبات کواترنری و رسوبات خاکستری تیره پوشیده شده است. در مورد زیرساخت-ها، منطقه مورد مطالعه شامل ۳۰۰ روستا است که همراه شهرها تا حدی می‌توانند در معرض وقایع سیل قرار بگیرند. شکل (۲) عکس‌های منتخب سیل در قسمت شمالی کشور را نشان می‌دهد.

داده‌ها

نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز منطقه مورد مطالعه که شامل موارد ذیل است از سازمان‌های مربوطه جمع‌آوری گردیدند:

۱- نقشه زمین‌شناسی

به‌منظور شناخت خصوصیات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و تهیه نقشه سنگ‌شناسی از چندین نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ استفاده شد.

۲- نقشه کاربری اراضی

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از اداره آبخیزداری استان گلستان تهیه شد که اساس تهیه این نقشه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست بوده است. برای تجزیه و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای از تصاویر ETM⁺ سال ۲۰۰۸ برگرفته از سایت GLOVIS^۱ استفاده گردید. نقشه مزبور پس از انجام مطالعات صحرایی و تطبیق آن با واقعیات کاربری اراضی منطقه، تصاویر گوگل ارث و تصاویر ماهواره‌ای اصلاح گردید.

۳- مدل رقومی ارتفاعی

مدل رقومی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه از اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان که با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ متر به‌دست آمده بود، تهیه گردید.

۳۶۷ مترمکعب بر ثانیه و حجم ۴ میلیون مترمکعب گردید (Lotfi et al., 2014)؛ بنابراین حوزه آبخیز مورد مطالعه به دلیل نوع کاربری‌ها، وجود اراضی شیب‌دار و تجاوز کاربری‌ها به حریم و بستر رودخانه‌ها و مسیل‌ها، توان تولید سیل را چند برابر کرده است و به همان نسبت میزان خسارات جانی و اقتصادی و زیست-محیطی ناشی از سیلاب نیز افزایش می‌یابد.

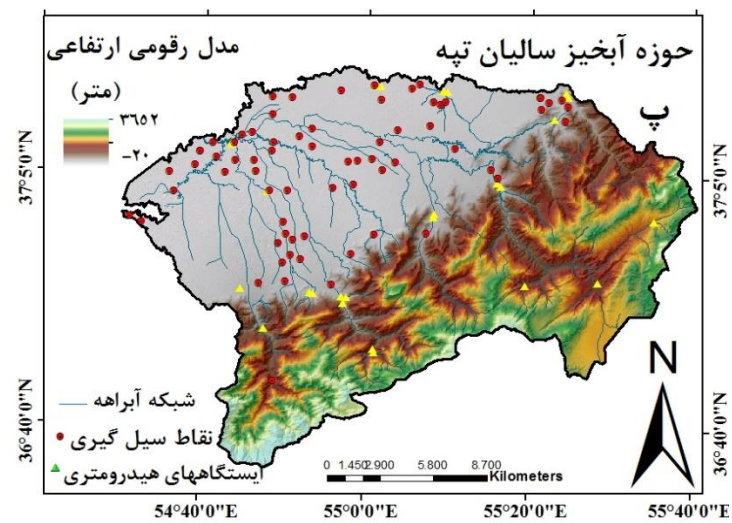
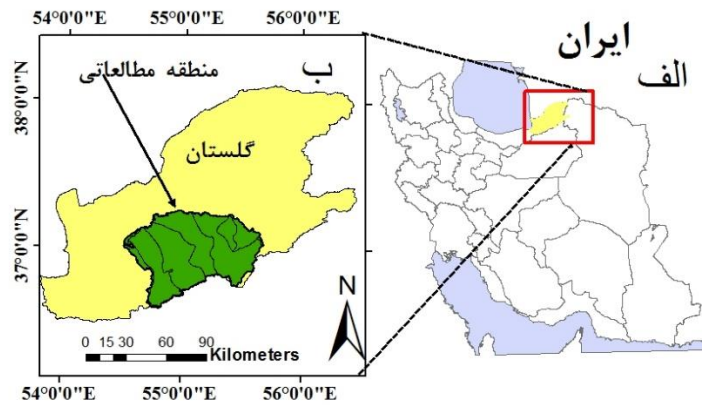
بر این اساس حوزه سالیان‌تپه در استان گلستان، به‌عنوان یکی از استان‌هایی که متحمل بلاهایی همچون سیل بوده است انتخاب گردید. مسئله اساسی مورد توجه این پژوهش این است که با تعیین حساسیت اراضی این منطقه به خطر سیل‌گیری و اتکاء به مدل داده‌کاوی پیشینه آنتروپی، نقشه مکانی پتانسیل خطر سیل تهیه شود. چرا که این نقشه یکی از راهکارهای موثر جهت شناسایی و پیش‌بینی مناطق آسیب‌پذیر است که می‌تواند در مدیریت خطر سیلاب، راهنمای مدیران باشد تا بتوان علاوه بر داشتن نقشه احتمال وقوع این خطر، مهم‌ترین عوامل کنترل-کننده آن را هم تعیین کرد (Shirzadi, 2017). اهداف اصلی این تحقیق شامل موارد زیر است:

بررسی توانایی مدل ME برای پیش‌بینی وقوع مکانی و شناسایی مناطق مستعد خطر سیل‌گیری
درک بهتر روابط بین این فرآیند و عوامل کنترل‌کننده آن
و تعیین مهم‌ترین فاکتورهای پیش‌بینی‌کننده برای وقوع خطر سیل در این منطقه.
آزمون دقت و صداقت (ربوستنس) مدل با تغییر داده‌های ورودی (ds1, ds2, ds3)

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبریز سالیان‌تپه (با مساحت ۴۵۱۵/۴۷ کیلومتر مربع) در استان گلستان در شمال شرقی ایران واقع شده است که در محدوده طول جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه به دلیل تغییرات کاربری اراضی از جمله جنگل زدایی و توسعه بی‌رویه، در سال‌های اخیر به شدت تحت تأثیر وقوع سیل قرار گرفته است. تسریع خطر سیل در اثر فعالیت‌های غیرمستولانه بشر ایجاد شده است. منطقه مورد مطالعه شامل



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز سالیان تپه در استان گلستان و ایران



شکل ۲- عکس‌هایی از سیلاب در منطقه مورد مطالعه

مراحل انجام پژوهش

مراحل انجام این پژوهش عبارتست از:

۱. آماده کردن لایه‌های پیش‌بینی کننده فاکتورهای مؤثر بر سیلگیری
۲. آماده کردن نقاط وقوع خطر سیلاب و تقسیم آن به نسبت ۷۰ به ۳۰ درصد در سه سری دیتاست به منظور ارزیابی صداقت و پایداری مدل
۳. اجرای مدل پیشینه آنروپی برای تهیه نقشه مکانی پتانسیل سیلگیری
۴. ارزیابی مدل با استفاده از منحنی ROC-AUC

تهیه نقشه پراکنش نقاط وقوع سیلاب منطقه مورد مطالعه

آماده کردن نقشه پراکنش نقاط وقوع، یک مرحله کلیدی در تهیه نقشه حساسیت‌پذیری است (Conoscenti *et al.*, 2014). نقشه پراکنش خطرات طبیعی، بسته به هدف و قابلیت دسترسی به داده‌ها شامل دو دسته مقیاس محلی و مقیاس ملی می‌گردد که توسط تکنیک‌های متعددی از جمله تفسیر عکس‌های هوایی، مطالعات ژئومورفولوژی، تصاویر ماهواره‌ای، وقوع رویدادهای گذشته و پیمایش‌های میدانی (صحرائی) تهیه می‌گردد (Guzzetti *et al.*, 2000). در منطقه مورد مطالعه حدود ۷۱ نقطه وقوع سیلاب با استفاده از مطالعات صحرائی، اطلاعات محلی، گزارش‌های موجود در منطقه و اداره آب منطقه‌ای استان گلستان جمع‌آوری گردید. سپس نقشه پراکنش سیل به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی مدل در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی به صورت نقشه نقطه‌ای^۱ آماده شد.

در هنگام اجرای مدل‌های داده‌کاوی باید نقاط وقوع مورد استفاده برای آموزش مدل^۲ از نقاط اعتبارسنجی^۳ متفاوت باشند (Lee and Pradhan, 2007). بنابراین الگوریتم تقسیم‌بندی تصادفی^۴ (Pourtaghi and Rahmati *et al.*, 2016b) برای جدا کردن نقاط آموزشی و نقاط اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت که ۷۰ درصد از این نقاط برای آموزش و ۳۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. همچنین برای ارزیابی صداقت مدل^۵ و حساسیت داده‌ها (Javidan *et al.*, 2020; Conoscenti *et al.*, 2014) سه مجموعه داده آماده گردید.

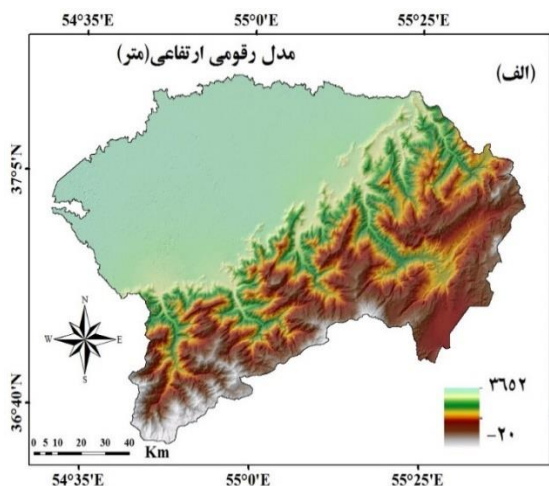
آماده کردن لایه‌های پیش‌بینی کننده (فاکتورهای مؤثر بر سیل-گیری)

در این پژوهش براساس مرور منابع و با بررسی‌های انجام شده در

منطقه مورد مطالعه حدود چهارده عامل شامل کاربری اراضی، فاصله از شبکه آبراهه، سنگ‌شناسی، درصد شیب، جهت شیب، مدل رقمی ارتفاعی^۶، بارش، شاخص رطوبت توپوگرافیکی (TWI)، انحنا طولی دامنه، انحنا عرضی دامنه، تراکم شبکه زهکشی، بافت خاک، شاخص قدرت جریان^۷ (SPI) و شاخص زبری سطح^۸ (TRI) انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 و SAGA^۹ به لایه‌های رستری تبدیل شدند. در این مطالعه آنالیز حساسیت برای ارزیابی عدم قطعیت نقشه‌های پیش‌بینی کننده با استفاده از آزمون جک-نایف انجام شد (Yost *et al.*, 2008). این آزمون قدرت نسبی هر متغیر را برای تهیه نقشه‌ی حساسیت-پذیری در نظر می‌گیرد (Yost *et al.*, 2008; Park, 2015). بر طبق نتایج این آزمون متغیرهای با درجه اهمیت صفر از جمله شاخص زبری سطح حذف شدند و مدل بدون آن متغیرها اجرا گردید.

عامل مدل رقمی ارتفاعی^{۱۰}

مدل رقمی ارتفاعی (DEM) منطقه مورد مطالعه از اداره منابع طبیعی استان گلستان تهیه گردید. در ادامه نقشه شیب و جهت شیب انحنا عرضی و طولی دامنه از روی نقشه مدل رقمی ارتفاعی منطقه مورد مطالعه، با تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ متر در محیط ArcGIS تهیه گردید (شکل ۳).



شکل ۳- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت‌پذیری سیل. الف) مدل رقمی ارتفاعی

عامل شیب^{۱۱}

این عامل یک فاکتور مؤثر بر تراکم زهکشی، رواناب سطحی، نفوذ

7 Stream Power Index

8 Terrain Ruggedness Index

9 system for automated geoscientific analyses

10 Digital Elevation Model (DEM)

11 Slope percent

1 Pont map

2 Training

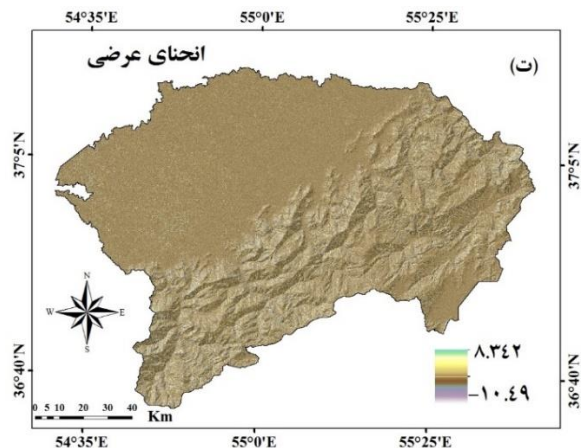
3 validation

4randomly partition algorithm

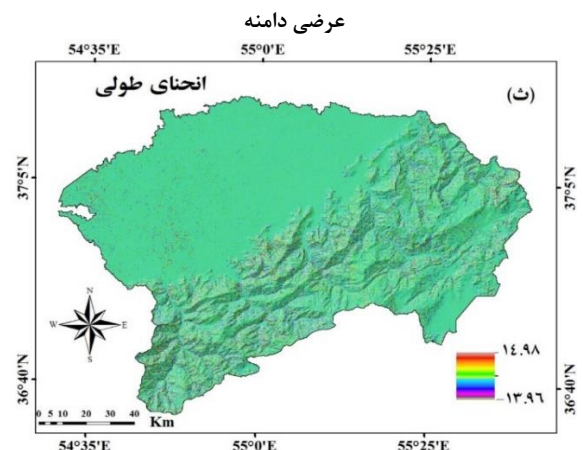
5 robustness

6 Digital Elevation Model

2014b) که این لایه از روی نقشه مدل رقومی ارتفاعی تهیه می‌گردد. انحنای شیب بیانگر شکل توپوگرافی است به‌طوری‌که تفرق مثبت بیانگر سطحی است که پیکسل‌ها در آن به‌صورت محدب^۴، و تفرق منفی بیانگر سطحی است که پیکسل‌ها در آن به‌صورت مقعر^۵ و مقدار صفر آن بیانگر سطحی است که شیب نداشته و به‌صورت مستقیم^۶ می‌باشد (Ohlmacher et al., 2007). این سه نوع شکل شیب بر ناپایداری دامنه از طریق کنترل زمان تمرکز و انتشار آب‌های سطحی و زیرسطحی در دامنه‌ها اثر بسیار زیادی دارند (Sidel and Ochiai., 2006). انحنای عرضی شیب در واقع شکلی از شیب است که به‌عنوان انحنای خط جریان شکل گرفته از تقاطع سطح زمین با یک صفحه عمودی تعریف می‌گردد. (شکل ۶ و ۷).



شکل ۶- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. ت) انحنای

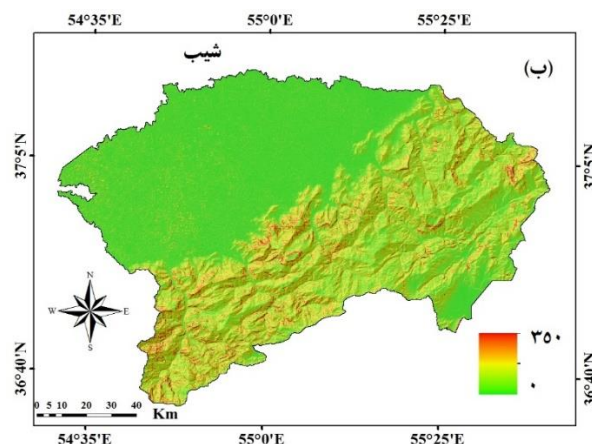


شکل ۷- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. ث) انحنای طولی دامنه

عامل کاربری اراضی^۷

مطالعات زیادی در ارتباط با رابطه میان پوشش گیاهی و پایداری دامنه‌ها انجام شده است (Gomez and Kavzoglu, 2005). تغییر

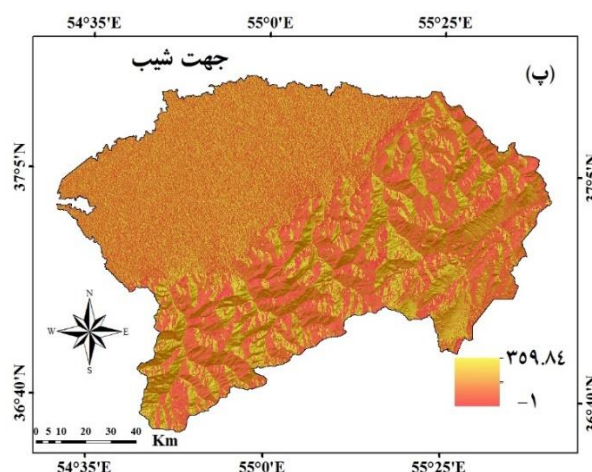
پوشش سطحی، فرسایش خاک، رطوبت خاک و فرایندهای ژئومورفولوژیکی است (Gallardo-Cruz et al., 2009). رفتار هیدرولیکی منطقه‌ای می‌تواند توسط عامل شیب زمین کنترل گردد (Mancini et al., 2010) (شکل ۴).



شکل ۴- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. ب) شیب

عامل جهت شیب^۱

طبق تعریف جهت شیب به مسیر حداکثر شیب اطلاق می‌گردد (Xu et al., 2012). فرایندهای هیدرولیکی دامنه از جمله تبخیر و تعرق، هوازدگی، توسعه ریشه و پوشش گیاهی به شدت تحت تأثیر جهت شیب می‌باشند. این پارامتر می‌تواند روی شرایط هیدرولوژیکی تأثیر بگذارد (Sidel and Ochiai., 2006). (شکل ۵).



شکل ۵- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. پ) جهت شیب

عوامل انحنای عرضی^۲ و انحنای طولی^۳

اطلاعات ژئومورفولوژیکی مناسب را می‌توان از طریق تجزیه و تحلیل انحنای زمین به‌دست آورد (Tehrany et al., 2014a,)

5 Concave/Noses
6 Flat/Straight
7 Landuse

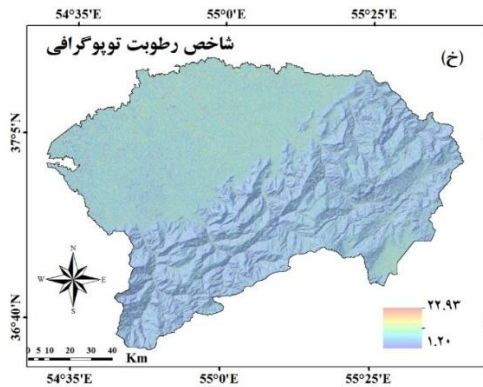
1 Slope aspect
2 Profile curvature
3 Plan curvature
4 Convex/Coves/Hollows

عامل رطوبت توپوگرافیکی^۲

نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بر اساس مدل رقومی ارتفاع زمین (DEM) و در محیط GIS تهیه گردید. شاخص TWI در تعیین میزان اثر توپوگرافی بر محل، اندازه منطقه اشباع شده و تولید رواناب کاربرد زیادی دارد (Wilson and Gallant, 2000). برای محاسبه شاخص TWI از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$TWI = \ln(AS / \tan \beta) \quad (۱)$$

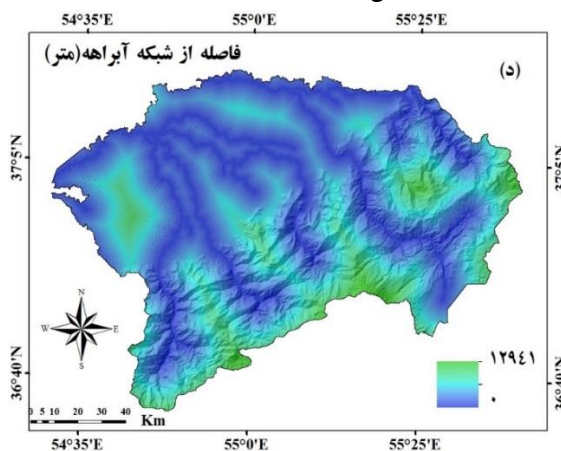
در اینجا AS مساحت منطقه مورد نظر و β گرادیان شیب است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. (خ) شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

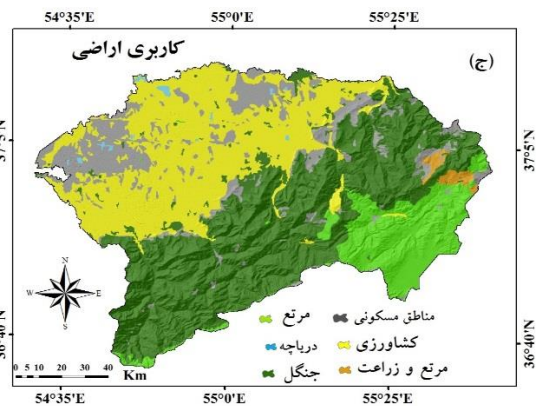
عامل فاصله از شبکه آبراهه^۳

نقشه‌ی فاصله از شبکه آبراهه با استفاده از تابع فاصله اقلیدسی^۴ در نرم‌افزار ArcGIS 10.5 تهیه گردید. فاصله از شبکه آبراهه یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی است که روی بزرگی و سرعت سیل تأثیر می‌گذارد (Glenn et al., 2012). این عامل پایداری یک دامنه را از طریق اشباع مواد بر روی دامنه کنترل می‌نماید (Yalcin, 2008) (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. (د) فاصله از شبکه آبراهه

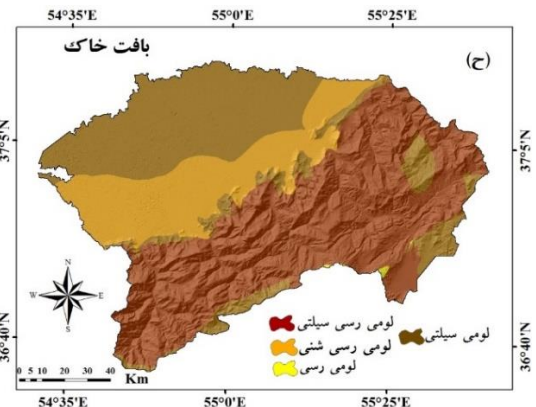
در شرایط کاربری اراضی منجر به برهم خوردن تعادل طبیعی و ناپایداری می‌گردد (Sidel and Ochiai., 2006). کاربری اراضی نقش مهمی در عملکرد فرایندهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی از طریق کنترل جریان‌های سطحی، رواناب و رسوب دارد (Dickie and Parsons, 2012). در واقع مناطقی که دارای پوشش گیاهی هستند منجر به کاهش فعالیت‌های اقلیمی مثل باران و غیره شده و بنابراین سیل را کاهش می‌دهند (Gray and Leiser., 1982). کاربری‌های اراضی این منطقه شامل: دریاچه، مناطق مسکونی، جنگل، مرتع و اراضی کشاورزی می‌باشند (شکل ۸).



شکل ۸- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. (ج) کاربری اراضی

عامل بافت خاک^۱

بافت خاک به‌عنوان یک مکانیسم مهم کنترل کننده نفوذ، تولید رواناب و در نتیجه رخداد خطر طبیعی شناخته شده است (Vandekerckhove et al., 2003). نقشه بافت خاک از اداره منابع طبیعی استان گلستان تهیه شد. بافت‌های لومی رسی، لومی رسی شنی، لومی رسی سیلتی و لومی سیلتی از بافت‌های خاک اراضی این منطقه است (شکل ۹).

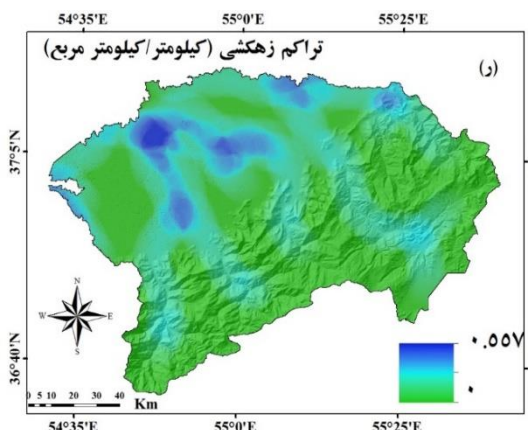


شکل ۹- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. (ح) بافت خاک

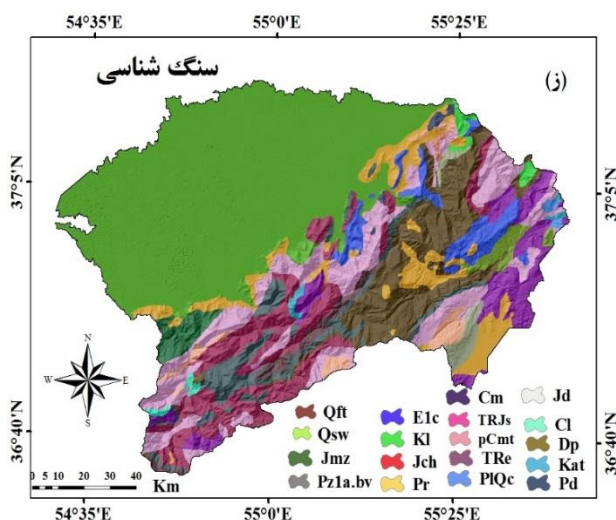
4 Euclidean distance

1 Soil texture
2 Topographic wetness index (TWI)
3 Distance from river/stream

دارد و در ۱۹ گروه طبقه‌بندی شده است (شکل ۱۴).



شکل ۱۳- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. ر. تراکم زهکشی



شکل ۱۴- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. (ز) سنگ‌شناسی

شاخص قدرت حمل جریان^۴

این شاخص بیانگر توان فرسایشی آبراهه بوده و بر روی ناپایداری دامنه‌ها تأثیر می‌گذارد (Wilson and Gallant, 2000). این شاخص بر این فرض استوار است که دبی متناسب است با مساحت ویژه حوضه آبخیز (As) و بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد: (Moore et al., 1991).

$$SPI = A_s \tan \beta \quad (\text{رابطه ۲})$$

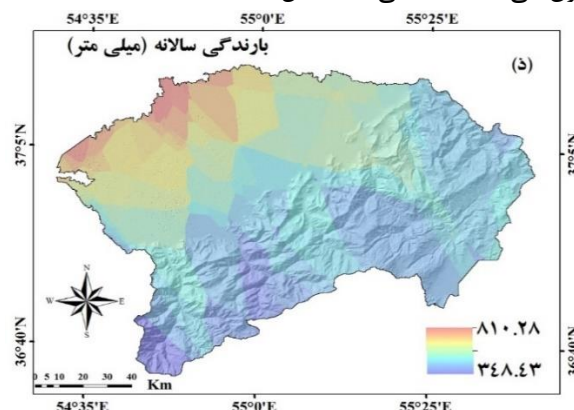
که در آن A_s مساحت ویژه حوضه آبخیز و β زاویه شیب محلی بر حسب درجه است. این شاخص را می‌توان بر حسب جریان تجمعی به صورت زیر هم نوشت:

(رابطه ۳)

$$SPI = \ln((FlowACCUMULATION + 1) \times CellArea \times \tan(Slope))$$

عامل بارندگی^۱

بارندگی به‌عنوان یکی از فاکتورهای محرک سیل به حساب می‌آید (Bordoni et al., 2015). در طول فرایند نفوذ آب به خاک، مکش مواد به تدریج کاهش می‌یابد و از اینرو مقاومت برشی مواد کاهش می‌یابد (Hong et al., 2016). برای تهیه نقشه بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه، پس از دریافت اطلاعات بارش ۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری از اداره آب منطقه‌ای استان گلستان با انجام روش‌های مختلف درون‌یابی؛ روش کریجینگ با بالاترین دقت به‌عنوان روش درون‌یابی انتخاب گردید. این روش یکی از مهم‌ترین روش‌های درون‌یابی، به حساب می‌آید (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت پذیری سیل. (د) بارندگی سالانه

عامل تراکم زهکشی^۲

به‌منظور تبدیل شبکه‌ی آبراه‌های به یک نقشه و کمیت قابل‌اندازه‌گیری، نقشه تراکم زهکشی در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. این شاخص عبارت است از نسبت طول کل رودخانه‌ها در یک حوضه آبخیز مشخص یا یک منطقه معین به کل مساحت حوضه آبخیز یا منطقه دربرگیرنده آن رودخانه‌ها. هرچه تراکم آبراهه‌ای بیشتر باشد، مقدار نفوذپذیری سنگ‌ها کمتر و بنابراین سرعت جریان سطحی کمتر می‌گردد. در نتیجه باعث اشباع شدن لایه‌های سطح‌الارضی و ایجاد خطرات طبیعی از جمله سیل‌های شدید می‌گردد (Demir et al., 2015) (شکل ۱۳).

عامل سنگ‌شناسی^۳

واحدهای سنگ‌شناسی متفاوت، اختلاف‌های چشمگیری در ناپایداری دامنه نشان می‌دهد (Meinhardt et al., 2015). در پژوهش حاضر، نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه با توجه به نقشه‌های زمین‌شناسی موجود در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ از بخش مطالعات زمین‌شناسی ایران، تهیه گردید. حوضه آبخیز مورد مطالعه تحت پوشش انواع مختلف سازندهای سنگ‌شناسی قرار

می‌شود. سپس میزان افت دقت نقشه نهایی (میزان کاهش دقت) به ازای حذف آن متغیر محاسبه می‌گردد.

ارزیابی عملکرد پیش‌بینی

در این مرحله، نتایج حاصل از مدل‌سازی خطر سیلاب، بر اساس نقاط وقوع گروه اعتبارسنجی (۳۰ درصد وقایع سیل گذشته) و در قالب روش منحنی مشخصه عامل گیرنده^۲ (ROC) اعتبارسنجی می‌گردد (Pourghasemi *et al.*, 2012). مساحت زیر این منحنی^۳ (AUC) به‌عنوان معیار کمی برای اعتبارسنجی استفاده می‌شود (Felicísimo *et al.*, 2013). هرگاه مقدار مساحت زیر منحنی بیشتر از ۹۰ درصد باشد، دقت مدل عالی خواهد بود (Yessilnacar, 2005). اگرچه در مدل‌سازی‌های ژئومورفولوژیک بایستی از معیارهای ارزیابی مختلفی برای اعتبارسنجی دقت مدل استفاده کرد، اما با توجه به پیشینه تحقیق در این زمینه، روش منحنی مشخصه عامل گیرنده به‌عنوان جامع‌ترین روش در نظر گرفته می‌شود (Walter, 2002)؛ زیرا این روش به‌طور هم‌زمان دو معیار حساسیت و تشخیص را در نظر می‌گیرد که در این صورت نواقص هریک از معیارهای حساسیت و تشخیص رفع می‌گردد. در حقیقت محورهای منحنی ROC براساس معیارهای حساسیت و تشخیص به‌دست می‌آید. همچنین برای تعیین تأثیر تغییر مجموعه داده‌ها (نقاط وقوع) و آنالیز حساسیت داده‌ها، نقاط وقوع سیلگیری به سه گروه (dS1, dS2, dS3) تقسیم و ارزیابی صداقت (Robustness) مدل براساس معادله زیر انجام گرفت (Angileri *et al.*, 2016):

$$R_{AUC-ROC} = AUC - ROC_{max} - AUC - ROC_{min} \quad (۴)$$

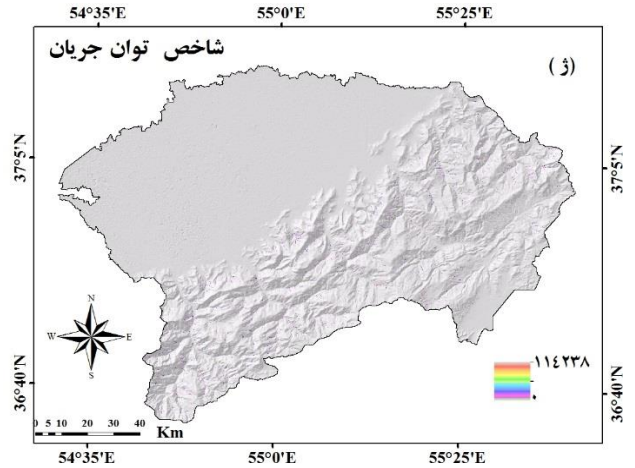
که RAUC-ROC، صداقت و صحت مدل است که حاصل اختلاف بیشترین و کمترین مقدار RAUC-ROC است.

نتایج

اجرای مدل پیش‌بینی آنتروپی

پس از انجام مدل‌سازی مکانی، پیش‌بینی مناطق مستعد سیلگیری با استفاده از متغیرهای پیش‌بینی کننده و هر گروه داده آموزشی (dS1, dS2, dS3) در مدل پیش‌بینی آنتروپی اجرا شد و نقشه حساسیت‌پذیری برای هر گروه تهیه گردید. سپس نقشه نهایی پتانسیل سیلگیری از میانگین این سه نقشه به‌دست آمد. شکل (۱۶) کلاس‌های استعداد خطر سیلگیری را برای نقشه میانگین حاصل از اجرای ۳ گروه داده نشان می‌دهد. از میانگین حساسیت‌پذیری این ۳ گروه به ترتیب حدود ۱۹/۳۵ و ۱۱/۳۵ درصد در طبقه خطر بالا و طبقه خطر خیلی بالا قرار گرفت.

این شاخص بر اساس نقشه رقومی ارتفاعی در محیط نرم‌افزار SAGA تهیه و پس از خروجی گرفتن و ارسال به محیط ArcGIS به‌عنوان یکی از ورودی‌ها برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- لایه‌های پیش‌بینی کننده حساسیت‌پذیری سیل. (ز شاخص توان جریان)

مدل پیش‌بینی آنتروپی^۱ (ME)

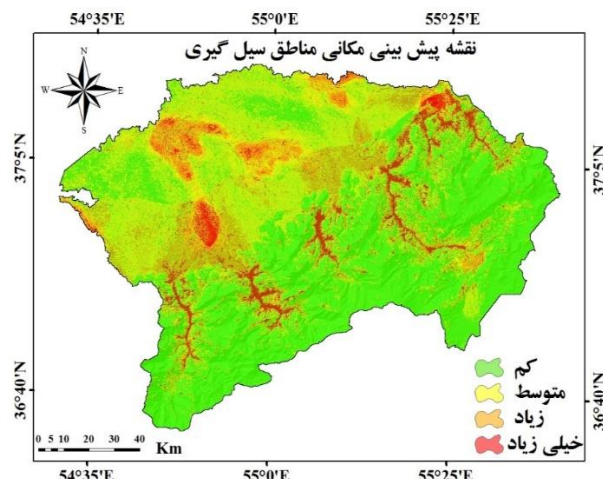
مدل پیش‌بینی آنتروپی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین مدل‌های پیش‌بینی کننده در زمینه‌های مختلف علوم طبیعی و محیط-زیست شناخته شده است (Park, 2015). یکی از مزیت‌های اصلی این الگوریتم عدم نیاز به نقاط عدم وقوع خطر سیلگیری در مدل‌سازی است (Felicísimo *et al.*, 2013)؛ بنابراین فقط نقاط وقوع خطر به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته می‌شود. از دیگر قابلیت‌های مهم مدل پیش‌بینی آنتروپی، عدم حساسیت آن به تعداد وقایع است (Kornejady *et al.*, 2017)؛ بنابراین در مناطقی که تعداد وقایع سیل زیاد نیست می‌تواند پیش‌بینی‌های قابل قبولی ارائه دهد. برای توصیف کمی عدم قطعیت و اطلاعات محتوای یک رویداد تصادفی می‌توان از اصل آنتروپی استفاده نمود (Vorpahl *et al.*, 2012). به‌منظور اجرای مدل پیش‌بینی آنتروپی از نرم‌افزار MaxEnt استفاده می‌شود.

تمامی لایه‌های تولید شده در نرم‌افزار GIS و SAGA به فرمت ASCII تبدیل شده و به‌عنوان ورودی مدل، همراه با فایل نقطه‌ای سیل‌های ثبت شده استفاده می‌شوند. این مدل قادر است که اثر تغییرات هر یک از متغیرهای مستقل را در وقوع و گسترش سیلاب نشان دهد؛ همچنین مدل مذکور قابلیت انجام آنالیز حساسیت را در قالب آزمون جک نایف دارد. در این آزمون با استفاده از روش حذفی، در هر مرحله یکی از متغیرهای مستقل حذف‌شده و مدل‌سازی خطر سیلگیری بدون آن متغیر انجام

منحنی‌ها (AUC) برای مدل بیشینه آنتروپی محاسبه شد که نتایج آن برای هر سه مجموعه داده در جدول (۲) نشان داده شده است. شکل (۱۸) نتایج ارزیابی را برای مجموعه ds3 نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، دقت مدل بالای ۹۰ درصد محاسبه شد. بر اساس منابع علمی (Hosmer, 2000) در زمینه تحلیل روش منحنی ROC و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی، می‌توان بیان کرد که مدل‌های با دقت بیش از ۹۰ درصد دارای کارایی عالی در پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب دارد. همچنین شکل (۱۹) نتایج آنالیز حساسیت داده‌ها (صداقت مدل) را نشان می‌دهد. در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد که این معیار حاصل اختلاف بیشترین و کمترین مقدار RAUC-ROC است و هرچه قدر این اختلاف کمتر باشد نشان دهنده‌ی این است که مدل پایداری بیشتری داشته و با تغییر مجموعه داده‌ها دقت مدل تغییر زیادی نکرده است. همانطوری که مشاهده می‌شود مقدار برای مرحله آموزش مدل ۰/۰۰۴ و برای اعتبارسنجی ۰/۰۰۳ بدست آمد، که نشان دهنده پایداری مدل با تغییر مجموعه داده‌ها می‌باشد (Marmion et al., 2008).

جدول ۱- میزان مشارکت لایه‌های پیش‌بینی کننده در مدل بیشینه آنتروپی

متغیرها	درصد مشارکت
تراکم زهکشی	۴۹/۴
فاصله از شبکه آبراهه	۱۵/۲
سنگ شناسی	۱۰/۸
بارندگی سالانه	۵/۷
مدل رقومی ارتفاعی	۴/۶
درصد شیب	۴/۵
کاربری اراضی	۳/۴
جهت شیب	۲/۸
انحنای طولی	۱/۹
بافت خاک	۰/۷
شاخص قدرت جریان	۰/۶
انحنای عرضی	۰/۳
شاخص رطوبت توپوگرافی	۰/۱
شاخص زبری سطح	۰



شکل ۱۶- نقشه پیش‌بینی مکانی مناطق سیل‌گیری منطقه مورد مطالعه بر اساس مدل بیشینه آنتروپی

میزان مشارکت عوامل مؤثر (لایه‌های پیش‌بینی کننده) در مدل بیشینه آنتروپی

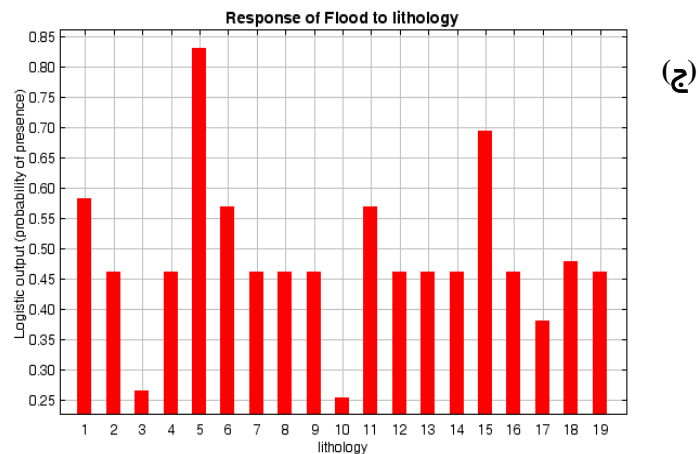
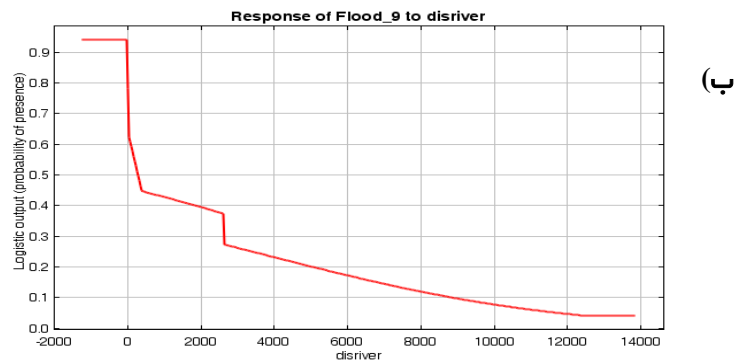
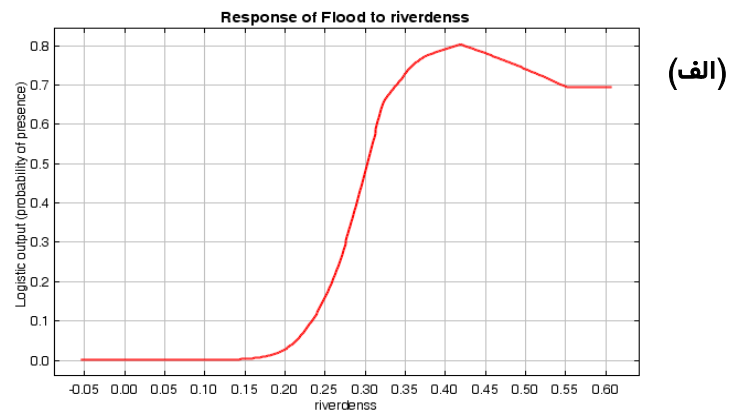
بر اساس آنچه که در روش تحقیق بیان گردید، با تجزیه و تحلیل‌های آزمون جک نایف در مدل بیشینه آنتروپی، میزان اهمیت و مشارکت متغیرهای ورودی در پیش‌بینی مکانی مناطق مستعد سیل مشخص گردید. همان‌گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌گردد، عوامل تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه و سنگ‌شناسی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر بر پیش‌بینی مکانی مناطق سیلگیر منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. همچنین متغیرهای بارندگی سالانه، طبقات ارتفاعی و شیب دارای اهمیت متوسط بودند. متغیر شاخص زبری سطح (میزان مشارکت کمتر از یک درصد) اهمیت کمتری را در وقوع پیش‌بینی سیل نسبت به دیگر عوامل محیطی به خود اختصاص داد. بنابراین برای تهیه نقشه پتانسیل سیل‌گیری، مدل با حذف این متغیر مجدداً اجرا شد. شکل (۱۷) منحنی‌های پاسخ مربوط به سه عامل مؤثر پیش‌بینی کننده را نشان می‌دهد.

ارزیابی نقشه‌ی پیش‌بینی مناطق مستعد زمین لغزش

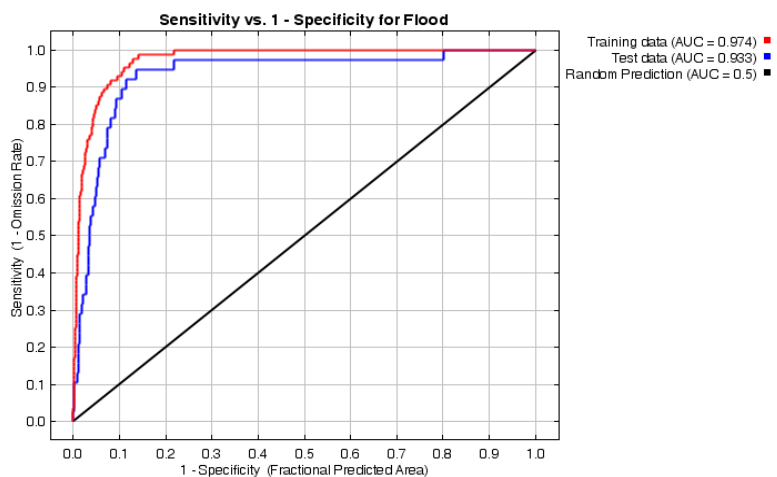
نقشه پیش‌بینی مناطق سیل‌گیری بر اساس منحنی مشخصه عامل گیرنده (ROC) اعتبارسنجی گردید. همچنین مساحت زیر این

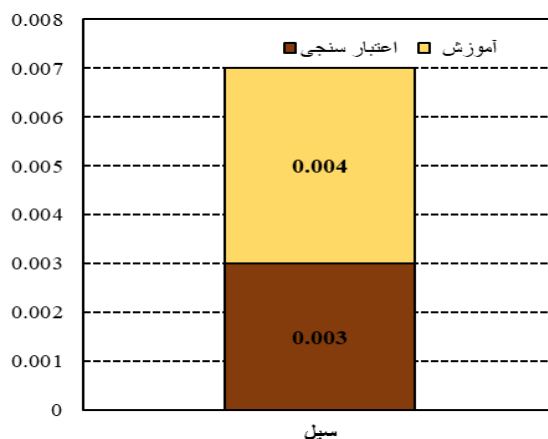
جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل بیشینه آنتروپی براساس معیار (AUC)

معیار ارزیابی (AUC)	مجموعه داده‌ها	مدل بیشینه آنتروپی سیل
آموزشی	S1	۰/۹۷۰
	S2	۰/۹۷۱
	S3	۰/۹۷۴
اعتبارسنجی	میانگین	۰/۹۷۱
	S1	۰/۹۳۶
	S2	۰/۹۵۵
	S3	۰/۹۳۳
	میانگین	۰/۹۴۱



شکل ۱۷- منحنی‌های پاسخ برای فاکتورهای پیش‌بینی کننده اصلی الف. تراکم زهکشی؛ ب. فاصله از آبراهه؛ ج سنگ‌شناسی





شکل ۱۹- ارزیابی صداقت (Robustness) مدل بیشینه آنتروپی در مراحل آموزش و اعتبارسنجی مدل براساس AUC

نتیجه‌گیری

شناخت مکان‌هایی که پتانسیل بالایی به وقوع سیلاب دارند، به مدیران و برنامه‌ریزان در برنامه‌های آمایش سرزمین و توسعه اراضی کمک شایانی می‌نماید. شناخت این مکان‌ها در موضوع مدل‌سازی به عبارت "پیش‌بینی مکانی یا پیش‌بینی حساسیت" اطلاق می‌گردد. همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، مدل‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای این منظور بسط و توسعه یافته‌اند. با این حال روزبه‌روز این روش‌ها در حال توسعه و استفاده می‌باشند. در این تحقیق برای تهیه نقشه پیش‌بینی مناطق سیلگیری در حوزه آبخیز سالیان‌تپه از مدل بیشینه آنتروپی استفاده شد. همچنین مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی کننده در حساسیت‌پذیری سیل شناسایی شد.

در تحقیقات هیدرولوژیکی علاوه بر گستردگی محیط، عوامل و متغیرهای زیادی در پدید آمدن سیل دارای نقش مؤثر هستند. Yalcin (2008) اظهار داشته است که متغیرهای محیطی بسیاری هستند که به‌آسانی قابل تشخیص و جمع‌آوری نیستند و یا به عبارت دیگر قابلیت تبدیل به نقشه را ندارند. به این دلیل مدل‌های توسعه یافته از نظر مفهومی (Conceptual) ممکن است کامل نبوده و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی با قطعیت مواجه نشوند. با این حال، بر اساس قابلیت دسترسی به داده‌ها در مناطق مختلف پژوهشگران اقدام به تهیه و جمع‌آوری عوامل در ارتباط با وقوع خطرات طبیعی نموده‌اند. شرط موفقیت و عملکرد (Goodness of fit) یک الگوریتم یادگیری ماشین در مرحله آموزش، بستگی به انتخاب دقیق و صحیح عوامل مؤثر دارد. بر اساس مرور منابع داخل و خارج از کشور، عوامل پیش‌بینی کننده که برای خطر سیل مورد استفاده قرار گرفت عبارت‌اند از: مدل رقمی ارتفاعی (متر)، جهت شیب، درصد شیب، انحنای طولی شیب، انحنای عرضی شیب، کاربری اراضی، بافت خاک، شاخص

رطوبت توپوگرافی (TWI)، فاصله از شبکه آبراهه (متر)، تراکم زهکشی، بارندگی سالانه (میلی‌متر)، شاخص قدرت جریان (SPI) و سازندهای سنگ‌شناسی که با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 و SAGA به لایه‌های رستری با اندازه‌های سلولی $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ تبدیل شدند (شکل ۳-۱۵). نتایج آزمون جک نایف نشان داد که عوامل تراکم زهکشی، فاصله از شبکه آبراهه و سنگ‌شناسی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محیطی مؤثر پیش‌بینی خطر سیلگیری در منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. تراکم زهکشی عبارت است از نسبت طول کل رودخانه‌ها در یک حوزه آبخیز مشخص یا یک منطقه معین به کل مساحت حوضه آبخیز یا منطقه دربرگیرنده آن رودخانه‌ها. هرچه تراکم آبراهه‌ای بیشتر باشد، مقدار نفوذپذیری سنگ‌ها کمتر و بنابراین سرعت جریان سطحی کمتر می‌گردد. در نتیجه باعث اشباع شدن لایه‌های سطح‌الارضی و ایجاد خطرات طبیعی از جمله سیل می‌گردد (Rahmati et al., 2015). همانگونه که در شکل (۱۷-الف) مشاهده می‌شود، با افزایش تراکم زهکشی مقدار سیلگیری افزایش می‌یابد. فاصله از شبکه آبراهه‌ای یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی است که روی بزرگی و سرعت سیل تأثیر می‌گذارد. این عامل پایداری یک دامنه را از طریق اشباع مواد بر روی دامنه کنترل می‌کند. در منطقه مورد مطالعه در فاصله‌های نزدیک به رودخانه بیشترین احتمال وقوع سیل وجود دارد (شکل ۱۷-ب). دلیل این امر احتمالاً تمرکز جریان‌های سطحی و زیرسطحی منطقه به سمت آبراهه‌ها و رودخانه‌هاست (Fernández and Lutz, 2010). سنگ‌شناسی نقش بسیار مهمی در تعیین حساسیت‌پذیری دارد و واحدهای سنگ‌شناسی متفاوت تفاوت‌های چشمگیری در ناپایداری دامنه نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل کلاس‌های سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که گروه Qsw دارای سازند پادگان آبرفتی است، و بیشترین استعداد وقوع سیل را دارد. دلیل این امر این است که بخش‌های آبرفتی

گرفت. بنابراین نقشه نهایی، میانگین سه نقشه استعداد وقوع سیلاب می‌باشد که با اجرای هر مجموعه نقاط وقوع بدست آمده است؛ چرا که با تقسیم نقاط وقوع، فقط به یک گروه از داده‌ها با نسبت ۷۰ به ۳۰ درصد، نتایج مدل نمی‌تواند قابل اعتماد باشد و باید با مجموعه‌های بیشتری از این نقاط و میانگین‌گیری از آنها نقشه نهایی تهیه شود (Angileri et al., 2016؛ Conoscenti et al., 2014؛ Rahmati et al., 2018). نقشه پیش‌بینی مناطق مستعد سیلاب بر اساس منحنی مشخصه عامل گیرنده (ROC) ارزیابی گردید. همچنین مساحت زیر این منحنی‌ها (AUC) برای مدل پیشینه آنتروپی محاسبه شد که نتایج آن برای هر سه مجموعه داده در جدول (۲) نشان داده شده است. براساس این معیار، دقت مدل بالای ۹۰ درصد برای هر سه گروه داده محاسبه گردید. بر اساس منابع علمی در زمینه تحلیل روش منحنی ROC و اعتبارسنجی مدل‌های پیش‌بینی مکانی می‌توان بیان کرد که مدل‌های با دقت بیش از ۹۰ درصد دارای کارایی عالی در پیش-بینی مناطق مستعد خطر دارند. این موضوع توسط Rahmati et al. (2016) که به تهیه نقشه پتانسیل آبهای زیرزمینی با استفاده از دو مدل جنگل تصادفی و پیشینه آنتروپی در منطقه مهران ایران اقدام کردند، و از منحنی ROC برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده نمودند، قابل تأیید است. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل پیشینه آنتروپی با دقت ۹۱ درصد عملکرد بهتری را نسبت به مدل جنگل تصادفی با دقت ۸۷/۷ درصد از خود نشان داد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abdi, P. (2006). Study of flooding potential of Zanjan Roud using SCS method and GIS, national committee of irrigation and drainage. Coexistence with flood technical workshop (in Persian).
- Angileri, S.E., Conoscenti, C., Hochschild, V., Märker, M., Rotigliano, E., and Agnesi, V. (2016). Water erosion susceptibility mapping by applying Stochastic Gradient Treeboost to the Imera Meridionale River basin (Sicily, Italy). *Geomorphology*, 262, 61-76.
- Asqari Moghadm, M.R. (2005). Water and urban habitat, Sara Publication, P. 135 (in Persian).
- Avni, Y. (2005). Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. *Catena*, 63, 185-220.
- Azareh, A., Rahmati, O., Rafiei-Sardoobi, E., Sankey, J.B., Lee, S., Shahabi, H., and Ahmad, B.B. (2019). Modelling gully-erosion susceptibility in a semi-arid region, Iran: Investigation of applicability of certainty factor and maximum entropy models. *Science of the Total Environment*, 655, 684-696.
- Bui, D.T., Pradhan, B., Nampak, H., Bui, Q.T., Tran, Q.A., and Nguyen, Q.P. (2016). Hybrid artificial intelligence approach based on neural fuzzy inference model and metaheuristic optimization for flood susceptibility modeling in a high-frequency tropical cyclone area using GIS. *Journal of Hydrology*, 540, 317-330.
- Bui, D.T., Khosravi, K., Shahabi, H., Daggupati, P., Adamowski, J.F., Melesse, A., Pham, B.T., Pourghasemi, H.R., Mahmoodi, M., Bahrami, S., Pradhan, B., Shirzadi, A., Chapi, K., and Lee, S. (2019). Flood Spatial Modeling in Northern Iran Using Remote Sensing and GIS: A Comparison between Evidential Belief Functions and Its Ensemble with a Multivariate Logistic Regression Model. *Remote Sensing*, 11(13), 1-27.
- Bordoni, M., Meisina, C., Valentino R., Bittelli M., and Chersich, S. (2015). Site-specific to local-scale shallow landslides triggering zones assessment using TRIGRS. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 15(5):1025-1050
- Chen, W., Li, Y., Xue, W., Shahabi, H., Li, S., Hong,

کوآترنری هنوز پیوستگی و استحکام کافی را ندارند تا در مقابل جریان‌های سطحی و زیرسطحی مقاومت کنند (Avni, 2005). بر اساس مطالعه Bui et al (2016) متغیرهای تراکم زهکشی، فاصله از جریان و مدل رقومی ارتفاعی به‌عنوان مؤثرترین متغیرهای محیطی در وقوع خطر سیل از بین سایر عوامل محیطی انتخاب شد. در مطالعه‌ی Tehrani et al. (2015) مدل رقومی ارتفاعی و شیب زمین به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر وقوع سیل شناسایی شدند. در مطالعه Lee et al. (2017) فاصله از رودخانه، سنگ‌شناسی و مدل رقومی ارتفاع از اهمیت زیادی برای پیش-بینی مکانی نقشه حساسیت به سیلاب برخوردار بودند که تا حدودی با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. طبق مطالعه Khosravi et al. (2016)، مدل رقومی ارتفاعی و فاصله از شبکه جریان به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای محیطی مؤثر بر وقوع سیل در حوزه آبخیز هراز انتخاب شدند. بنابراین همان طوری که ملاحظه می‌شود متغیرهای مؤثر بر وقوع خطرات طبیعی در یک منطقه ممکن است با منطقه دیگر به دلیل متفاوت بودن شرایط توپوگرافی، اقلیمی، هیدرولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، خاک‌شناسی و عوامل انسانی، متفاوت باشند.

پس از انجام مدل‌سازی مکانی، پیش‌بینی مناطق دارای پتانسیل خطر سیلگیری، با استفاده از متغیرهای پیش‌بینی کننده و هر گروه از نقاط وقوع، به صورت جداگانه اجرا شد. در مطالعه حاضر برای تعیین تأثیر تغییر مجموعه داده‌ها (نقاط وقوع) و آنالیز حساسیت داده‌ها، نقاط سیلگیری ثبت شده به سه گروه (ds1, ds2, ds3) تقسیم و ارزیابی صداقت (Robustness) مدل انجام

- H., and Ahmad, B.B. (2020). Modeling flood susceptibility using data-driven approaches of naïve bayes tree, alternating decision tree, and random forest methods. *Science of The Total Environment*, 701, 134-979.
- Conoscenti, C., Angileri, S., Cappadonia, C., Rotigliano, E., Agnesi, V., and Märker, M. (2014). Gully erosion susceptibility assessment by means of GIS-based logistic regression: a case of Sicily (Italy). *Geomorphology*, 204, 399-411.
- [CONRWMGP] Central Office of Natural Resources and Watershed Management in Golestan Province. (2009). Detailed action plan. Iran. pages. 230.
- Dickie, J.A., and Parsons, A.J. (2012). Eco-geomorphological processes within grasslands, shrublands and badlands in the semi-arid Karoo, South Africa. *Land Degradation Dev*, 23(6), 534-547.
- Demir, G., Aytakin, M., & Akgun, A. (2015). Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods: an example from Niksar-Resadiye (Tokat, Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 8(3), 1801-1812.
- Feliciísimo, Á., Cuartero, A., Remondo, J., and Quirós, E. (2013). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides*, 10, 175-189.
- Fernández, D.S., and Lutz, M.A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111, 90-98.
- Glenn, E., Morino, K., Nagler, P., Murray, R., Pearlstein, S. and Hultine, K. (2012). Roles of saltcedar (*Tamarix* spp.) and capillary rise in salinizing a non-flooding terrace on a flow-regulated desert river. *Journal of Arid environment*, 79, 56-65.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., and Carrara, A. (2000). Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental management*, 25(3), 247-263.
- Gomez, H. and Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78(1): 11-27.
- Gray, D.H. and Leiser, A.T. (1982). *Biotechnical slope protection and erosion control*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Gallardo-Cruz, J.A., Pérez-García, E.A. and Meave, J.A. (2009). β -Diversity and vegetation structure as influenced by slope aspect and altitude in a seasonally dry tropical landscape. *Landsc Ecol*, 24:473-482.
- Hosmer, D.W. (2000). *Wiley series in probability and statistics*, Chap. 2. Multiple logistic regression. *Applied logistic regression*, 31-46.
- Hong, H., Pourghasemi, H.R. and Piurtaggi, Z.S. (2016). Landslide susceptibility assessment in Lianhua County (China): a comparison between arandom forest data mining technique and bivariate and multivariate statistical models. *Geomorphologie*, 259:105-118.
- Javidan, N., Kavian, A., Pourghasemi, H.R., Conoscenti, C. and Jafarian, Z. (2020). Gully Erosion Susceptibility Mapping Using Multivariate Adaptive Regression Splines—Replications and Sample Size Scenarios. *Water*, 11(11), 231-9.
- Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E. and Pourghasemi, H.R. (2016). 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. *Natural Hazards*, 83(2), 947-987.
- Konrad, C.P. and Booth, D.B. (2005). Hydrologic Changes in Urban Streams and Their Ecological Significance, American Fisheries Society Symposium, Alaska, 11-15 September, 47, 157-177.
- Kornejady, A., Ownegh, M. and Bahremand, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena*. 152, 144-162.
- Lee, S., Kim, J.C., Jung, H.S., Lee, M.J. and Lee, S. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random-forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1185-1203.
- Lee, S. and Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33-41.
- Lotfi, E., Asadollahi Shahr, M. and Abbasi, M. (2014). Frequency analysis of occurrence and damage caused by flood in time and spatial scales in Golestan Province. 10th national conference of watershed engineering sciences, Azad University of Maraqe Branch, 175-186 (in Persian).
- Marmion, M., Hjort, J., Thuiller, W. and Luoto, M. (2008). A comparison of predictive methods in modelling the distribution of periglacial landforms in Finnish Lapland. *Earth surface processes and landforms*, 33(14), 2241-2254.
- Moghaddam, D.D., Pourghasemi, H.R. and Rahmati, O. (2019). Assessment of the Contribution of Geo-environmental Factors to Flood Inundation in a Semi-arid Region of SW Iran: Comparison of Different Advanced Modeling Approaches. In *Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*. Springer, Cham, 59-78.
- Mojaddadi, H., Pradhan, B., Nampak, H., Ahmad, N. and Ghazali, A.H.B. (2017). Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 1080-1102.
- Moradi, H. and Hosseini, S.M. (2006). Study of

- effective factors in flood production of Golestan, natural resources conference and sustainable development in Southern region of Caspian Sea, Nour, Islamic Azad University of Nour branch, 165-176 (in Persian).
- Mancini, F., Ceppi, C. and Ritrovato, G. (2010). GIS and statistical analysis for landslide susceptibility mapping in the Daunia area, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(9): 1851.
- Meinhardt, M., Fink, M. and Tunschel, H. (2015). Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology*, 234: 80-97.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. and Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrol Process*, 5:3-30.
- Nematollah, H., Vafakhah, M. and Najafi, A. (2017). Development of Urban Flood Hazard Map for Nour City Using Analytical Hierarchy Process and Fuzzy Logic. *Journal of Watershed Management Research*. 7(14), 19-11 (in Persian).
- Ohlmacher, G.C. (2007). Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology*, 91(2):117-134.
- Papaioannou, G., Vasiliades, L. and Loukas, A. (2015). Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water Resources Management*, 29(2), 399-418.
- Park, N.W. (2015). Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 937-949.
- Pourghasemi, H.R., Moradi, H. and Fatemioghadas, M. (2012). Landslide susceptibility mapping using adaptive neuro-fuzzy inference system in north of Tehran. *Earth science Research*, 3(10), 63-78 (in Persian).
- Pourtaghi, Z.S. and Pourghasemi, H.R. (2014). GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeology Journal*, 22(3), 643-662.
- Rahi, G. (2017). Prediction of ditch erosion sensitivity using data mining-spatial methods, PhD thesis, natural resources engineering faculty, Sari agricultural sciences and natural resources university, P. 225 (in Persian).
- Rahmati, O., Naghibi, S.A., Shahabi, H., Bui, D.T., Pradhan, B., Azareh, A., Rafiei-Sardooi, E., Samani, A.N. and Melesse, A.M. (2018). Groundwater spring potential modelling: comprising the capability and robustness of three different modeling approaches. *Journal of Hydrology*, 565, 248-261
- Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. and Melesse, A.M. (2016b). Application of GIS-based data driven random forest and maximum entropy models for groundwater potential mapping: a case study at Mehran Region, Iran. *Catena*, 137, 360-372.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H.R. and Zeinivand, H. (2015). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Rahmati, O., Zeinivand, H. and Besharat, M. (2016a). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000-1017.
- Shirzadi, E. (2017). Prediction of ground surfaces movements around Bijar City using data-mining advanced approaches, Ph.D. thesis, natural resources engineering faculty, Sari agricultural sciences and natural resources University, P. 236 (in Persian).
- Siahkamari, S., Haghizadeh, A., Zeinivand, H., Tahmasebipour, N. and Rahmati, O. (2018). Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models. *Geocarto international*, 33(9), 927-941.
- Sidel, R.C. and Ochiai, H. (2006). Landslides: Processes, Prediction, and Land use, Water Resource Monograph: 18, AGU books, ISSN: 0170-9600.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B. and Jebur, M.N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 504, 69-79.
- Tehrany, M., Lee, M.J., Pradhan, B., Jebur, M.N. and Lee, S. (2014a). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environ Earth Sci*, 72: 4001-4015.
- Tehrany, M., Pradhan, B. and Jebur, M.N. (2014b). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *J Hydrol*, 512:332-343.
- Tehrany, M.S., Pradhan, B., Mansor, S. and Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91-101.
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M. and Schröder, B. (2012). How can statistical models help to determine driving factors of landslides? *Ecological Modelling*, 239, 27-39.
- Vandekerckhove, L., Poesen, J. and Govers, G. (2003). Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena*, 50: 329-352.
- Wilson, J.P. and Gallant, J.C. (2000). *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley and Sons.
- Walter, S.D. (2002). Properties of the summary receiver operating characteristic (SROC) curve for diagnostic test data. *Stat Med*. 21, 1237-1256.
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility

- mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena*, 72, 1-12.
- Yessilnacar, E.K. (2005). The application of computational intelligence of landslide susceptibility mapping in Turkey. Ph. D Thesis Department of Geomatics the University of Melbourne. 423 pages.
- Yost, A.C., Petersen, S.L., Gregg, M. and Miller, R. (2008). Predictive modeling and mapping sage grouse (*Centrocercus urophasianus*) nesting habitat using Maximum Entropy and a long-term dataset from Southern Oregon. *Ecological Informatics*, 3(6), 375-386.
- Xu, C., Dai F., Xu, X. and Lee, Y.H. (2012). GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the jianjiang River watershed, China. *Geomorphology*, 145:70-80.