



نخستین آردور و سامان اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (سال، هجرت، شماره چهارم) زمستان ۱۳۹۵

نمایه شده در سایت: پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، جهاد دانشگاهی، مگ ایران، نورمگز

آدرس وب سایت: <http://girs.iaubushehr.ac.ir>



پتانسیل یابی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل شاخص آماری و وزن شواهد (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مادرسو، گلستان)

صفورا سیاه‌کمری^۱، حسین زینی‌وند^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشگاه لرستان

۲. دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان

مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۱۶ آذر ۱۳۹۵

پذیرش: ۹ بهمن ۱۳۹۵

دسترسی اینترنتی: ۲۳ بهمن ۱۳۹۵

واژه‌های کلیدی:

استعدادیابی سیل

شاخص آماری

وزن شواهد

مادرسو

چکیده

هدف این پژوهش تهیه نقشه مناطق مستعد وقوع سیل در حوزه آبخیز مادرسو استان گلستان است. برای انجام تحقیق از مدل‌های شاخص آماری و وزن شواهد، لایه‌های مختلف اطلاعاتی و سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده شد. نتایج ارزیابی دو مدل نشان داد که از بین عوامل مؤثر در وقوع سیل و آب‌گرفتگی، ارتفاعات کمتر از ۵۰۰ متر، جهت شیب مسطح، تراکم زهکشی بیش از ۰/۳۳ (کیلومتر بر کیلومتر مربع)، فاصله ۵۰۰-۲۰۰۰ متری رودخانه، تپ خاک مالی‌سول، سنگ‌های دوران کواترنری و همچنین اراضی کشاورزی با بیشترین وزن‌ها، مهم‌ترین عوامل علتی وقوع رخداد سیل و آب‌گرفتگی حوزه آبخیز مادرسو می‌باشند. نتایج همچنین نشان داد ۴۹/۹ درصد مساحت حوزه آبخیز مادرسو در مناطقی با استعداد وقوع سیل خیلی زیاد و زیاد و حدود ۵۰/۱ درصد مساحت حوزه در مناطقی با استعداد وقوع سیل متوسط و کم واقع است. صحت و دقت دو مدل بکار گرفته‌شده با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد. دقت مدل شاخص آماری ۸۳٪ و دقت مدل وزن شواهد ۸۰/۷٪ تخمین زده شد. این وضعیت نشان‌دهنده دقت خیلی خوب دو مدل در استعدادیابی وقوع سیل در حوزه آبخیز مادرسو استان گلستان می‌باشد.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: hzeinivand@gmail.com

مقدمه

هزاران سال است که بشر با حوادث گوناگونی چون سیل، زلزله و طوفان مواجه است و هر روز که می‌گذرد، گامی برای شناخت و کنترل آن‌ها برمی‌دارد، اما هنوز دانش بشری به مهار و کنترل کامل این پدیده‌ها دسترسی پیدا نکرده است (۳۰). پدیده‌ی سیل یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین رویدادهای طبیعی است که بیش از هر بلای طبیعی دیگری، جان و مال انسان و شرایط اقتصادی و اجتماعی جامعه را به خطر می‌اندازد (۴ و ۱۳). وقوع سیل در بخش‌هایی از استان گلستان که در سال‌های اخیر متأسفانه با تلفات سنگین انسانی و خسارت‌های زیاد مادی همراه بود، نیازمند مطالعه است (۸). پیش‌بینی وقوع سیل در حوزه‌های آبخیز و تعیین مناطق مستعد آب‌گرفتگی به دلیل کافی نبودن آمار و اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری دشوار بوده و این مشکل در بسیاری از مناطق مشاهده می‌گردد. بنابراین تهیه نقشه مناطق مستعد سیل و آب‌گرفتگی می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مهار و کنترل سیل مؤثر باشد. مدل‌های شاخص آماری (Statistical Index, SI) و وزن شواهد (Weight of Evidence, WoE) مدل‌هایی هستند که برای پهنه‌بندی خطرات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پتانسیل یابی استعداد سیل از جمله مطالعاتی است که در دنیا سابقه طولانی نداشته و جزو جدیدترین مطالعات در حیطه سیلاب است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

رگمی و همکاران (۲۲) با استفاده از سه مدل شاخص آماری، وزن شواهد و نسبت فراوانی (Frequency Ratio) اقدام به تهیه نقشه حساسیت به لغزش در هیمالیا نمودند که در نهایت تجزیه و تحلیل نشان داد از بین سه مدل فوق، مدل نسبت فراوانی با نرخ موفقیت $76/8$ و دقت پیش‌بینی $75/4$ بهتر از دو مدل دیگر ظاهر شده ولی دو مدل وزن شواهد و شاخص‌های آماری نیز به ترتیب با نرخ موفقیت $75/6$ و $75/5$ و دقت پیش‌بینی $74/9$ و $74/6$ در تعیین مناطق حساس به لغزش خوب عمل کرده‌اند.

اوه و لی (۱۷) در منطقه یوهانگ کره با هدف ارزیابی کمی و تهیه نقشه پتانسیل بهره‌وری آب‌های زیرزمینی، برای

مدیریت و بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در آینده از مدل وزن شواهد استفاده کردند. دقت مدل با استفاده از سطح زیر منحنی، برابر $72/2$ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد اطلاعات و نقشه تولیدشده از آن می‌تواند برای مدیریت آب‌های زیرزمینی منطقه و نیز پروژه‌های مربوط به اکتشاف منابع آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

لی و همکاران (۱۵) مدل نسبت فراوانی را برای پیش‌بینی نقشه حساسیت پهنه آب‌گرفتگی با استفاده از GIS بکار بردند. نتایج بیانگر دقت بالای مدل مذکور ($91/5$ درصد) در پیش‌بینی بود. پرادان (۱۹) نقشه پهنه‌بندی حساسیت سیل را در کلانتان مالزی با استفاده از رگرسیون لجستیک تهیه نمودند، نتایج نشان داد هر دو روش احتمال دو متغیره و رگرسیون لجستیک روش‌هایی مناسب برای تحلیل آماری پهنه‌بندی حساسیت سیل هستند. شفاپورتهرانی و همکاران (۲۵) نیز مطالعه‌ای در مالزی، برای پتانسیل‌یابی استعداد سیل از ترکیب روش‌های نسبت فراوانی، رگرسیون لجستیک و درخت تصمیم‌گیری (Decision tree) بهره بردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که استفاده از روش‌های ماشین یادگیری از جمله درخت تصمیم‌گیری موجب افزایش دقت روش‌های مزبور در تهیه نقشه استعداد سیل می‌گردد. کائو و همکاران (۱۲) در تحقیقی به تهیه نقشه مناطق حساس به خطرات سیل برق‌آسا با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و شاخص آماری اقدام نمودند. آن‌ها از ۸۵ موقعیت مربوط به سیل‌های اتفاق افتاده برای آموزش و اعتبارسنجی این مدل‌ها استفاده نمودند. در این تحقیق از ۱۰ عامل تأثیرگذار بر وقوع این‌گونه سیل‌ها، بهره گرفته شد. در نهایت به این نتیجه رسیدند که مدل نسبت فراوانی با استفاده از یک روش طبقه‌بندی طبیعی، بهتر از روش شاخص آماری قادر است که مناطق مستعد سیل‌های ناگهانی را مشخص نماید.

شفاپورتهرانی و همکاران (۲۸) ارزیابی حساسیت سیل با استفاده از دو مدل نسبت وزن شواهد و ماشین بردار پشتیبان برای منطقه ترنگانو مالزی انجام دادند، آن‌ها نتیجه گرفتند که ترکیب نتایج دو مدل دارای دقت بالاتری نسبت به نتایج

پژوهش نشان داد که دو مدل نامبرده دارای نتایج تقریباً مشابه و قابل قبول هستند و برای استراتژی‌های کاهش خطر سیل مفید و کاربردی می‌باشند.

زینی وند و قربانی نژاد (۳۲) برای تهیه نقشه پتانسیل آب زیرزمینی در منطقه کوهدشت لرستان، چهار مدل شاخص آماری، نسبت فراوانی، وزن شواهد و تابع شواهد قطعی را بر روی ۱۷۱ چاه اجرا نمودند. پس از بررسی ۱۲ فاکتور مؤثر نظیر ارتفاع، شیب، جهت شیب، شاخص رطوبت توپوگرافی، لیتولوژی، کاربری اراضی، فاصله از رودخانه و غیره در نهایت برای همه ۴ مدل ذکرشده، دقت سطح زیر منحنی بالای ۰/۹۰ محاسبه گردید.

هدف از این تحقیق تهیه نقشه مناطق مستعد وقوع سیل با استفاده از مدل شاخص آماری و وزن شواهد در حوزه آبخیز مادرسو در استان گلستان است.

مواد و روش‌ها

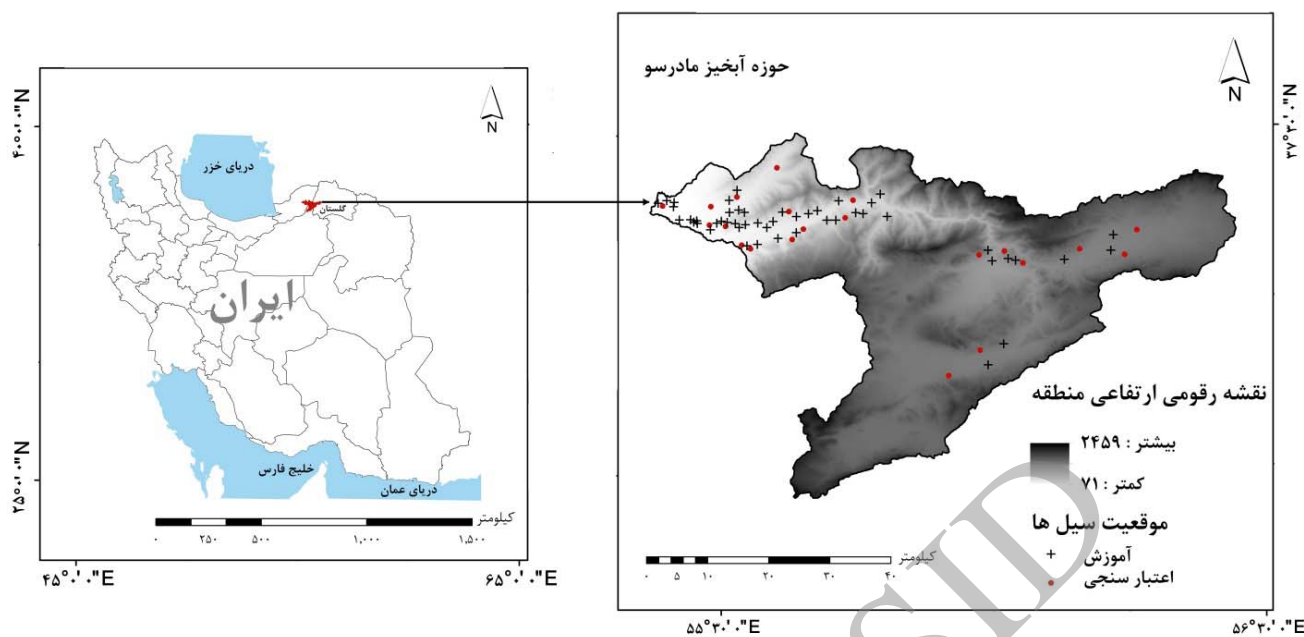
منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز مادرسو از زیر حوزه‌های شرقی حوزه آبخیز گرگان رود است که در طول‌های جغرافیایی $55^{\circ}21'$ تا $56^{\circ}28'$ شمالی و عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ}58'$ تا $37^{\circ}30'$ طول شرقی واقع است (شکل ۱). این حوزه آبخیز که از نظر تقسیمات سیاسی در سه استان سمنان، گلستان و خراسان قرار دارد و با مساحت حدود ۲۴۰۰ کیلومترمربع، یکی از معروف‌ترین حوزه‌های آبخیز استان گلستان می‌باشد که به جهت سیل‌های مرگبار در سال‌های ۱۳۸۰ و ۱۳۸۱ شهرت دارد (۱۰).

مدل‌ها به صورت منفرد است. شفاپورتهرانی و همکاران (۲۶) در تحقیقی به منظور پتانسیل‌یابی استعداد سیل از مدل رگرسیون لجستیک استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نه تنها دقت مدل رگرسیون لجستیک در تهیه نقشه استعداد سیل بالا می‌باشد بلکه در این روش نیازی به کلاس‌بندی پارامترها نیست، بنابراین میزان تأثیر کاربر، برخلاف روش‌های دیگر آماری (نرخ فراوانی، وزن - واقعه و ...) در مدل‌سازی بسیار کاهش می‌یابد. شفاپورتهرانی و همکاران (۲۹) ارزیابی حساسیت سیل با استفاده از روش‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و نسبت فراوانی مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی را در مالزی انجام دادند. نتایج بیانگر دقت قابل قبول روش ماشین بردار پشتیبان بود و پارامترهای ارتفاع از سطح دریا و شیب به عنوان مؤثرترین عوامل شناخته شدند. در نتیجه روش ماشین بردار پشتیبان به عنوان یک ابزار کارآمد و قابل اعتماد در ارزیابی حساسیت سیل معرفی گردید.

روسر و همکاران (۲۳) با استفاده از سنجش از دور و داده‌های توپوگرافی اقدام به تهیه سریع نقشه مناطق سیل گیر در شهر آکسفورد و مناطق مجاور آن در انگلستان نمودند. روش به کار برده شده آن‌ها با استفاده از رویدادهای واقعت زمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. آن‌ها برای تعیین مناطق سیل گیر با استفاده از صحت کمی فرآیند تهیه نقشه از منبع چندگانه استفاده نمودند و میزان سطح زیر منحنی برابر ۰/۹۵ و ۰/۹۳ به ترتیب برای آموزش و آزمون به دست آمد.

رحمتی و همکاران (۲۰) پهنه‌بندی سیل با استفاده از روش‌های نسبت فراوانی و وزن شاهد در استان گلستان انجام دادند، تأثیر ده پارامتر مؤثر در وقوع سیل و موقعیت مکانی ۱۴۴ نقطه سیل در منطقه را مورد بررسی قرار دادند، نتایج این

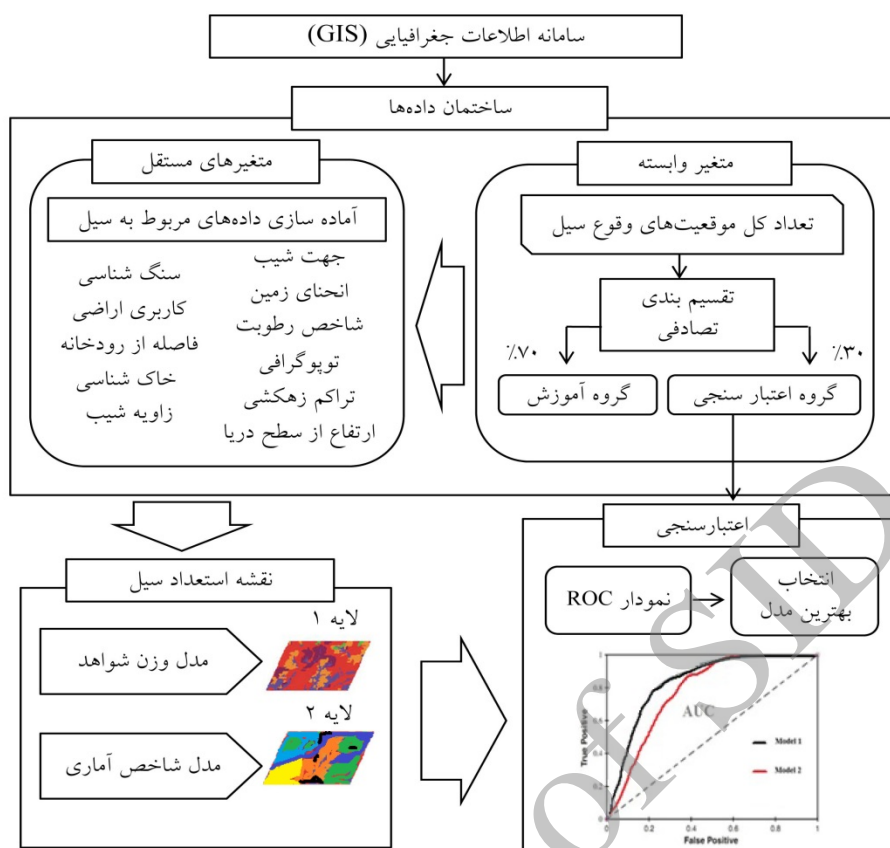


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوزه مورد مطالعه در ایران و موقعیت نقاط وقوع سیل ثبت شده

روش تحقیق

خاک‌شناسی، تراکم زهکشی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index: TWI)، ارتفاع از سطح دریا، زاویه شیب، جهت شیب، انحنای زمین (Curvature) که توسط کیا و همکاران (۱۴)، اسکیلودیمو و همکاران (۲۵)، لی و همکاران (۱۵)، لیو و دسمیت (۱۶)، شفاپورتهرانی و همکاران (۲۷) و شفاپورتهرانی و همکاران (۲۶) که به مطالعات ارزیابی سیل پرداخته‌اند، بکار گرفته شده است (شکل ۳). در این تحقیق نیز از این لایه‌های اطلاعاتی استفاده گردید. سپس نقشه‌های طبقه‌بندی شده با نقشه موقعیت وقوع سیل در منطقه مورد مطالعه، تلفیق گردیدند. مراحل انجام تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است.

جمع‌آوری داده‌ها و ساخت پایگاه داده، بخش مهمی از تحقیقات مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی را شامل می‌شود. داده‌های مختلف به‌عنوان متغیرهای مستقل در مراحل مختلف استعدادیابی مورد نیاز هستند، این متغیرها در وقوع سیل در یک منطقه خاص تأثیر زیادی دارند. از طرف دیگر، اگر تمام این پارامترها در فرآیند مدل‌سازی بکار روند، حجم زیاد اطلاعات مانع انجام تجزیه و تحلیل‌های سریع و دقیق خواهد شد، بنابراین از بین آن‌ها باید مؤثرترین انتخاب گردد (۱۱ و ۲۴). برخی از متغیرها جهت ارزیابی استعداد سیل عبارت‌اند از کاربری اراضی، زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی،



شکل ۲. مراحل انجام تحقیق

(Quantile) تقسیم گردید (شکل ۳ ب).

جهت شیب فاکتور مهمی در تجزیه و تحلیل پایداری ژئومورفولوژیکی می‌باشد چراکه بر برخی از پارامترهای اقلیمی همچون میزان دریافت تابش، باد (خشک، مرطوب) شدت بارش و رطوبت خاک تأثیر دارد. یکی از کاربردهای نقشه جهت شیب تعیین جهت جریان حرکت آب است. نقشه جهت شیب در نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.2 با استفاده از نقشه رقومی ارتفاعی سطح زمین (DEM) تهیه گردید. این نقشه در ۹ گروه، طبقه‌بندی شد (شکل ۳ ج).

انحنای زمین یکی از عوامل مؤثر بر پتانسیل سیل حوزه‌های آبخیز است. نقشه انحنای زمین بر اساس مدل رقومی ارتفاع و نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.2 تهیه شد. این نقشه در سه کلاس انحنای مقعر، انحنای محدب و تخت (بدون انحنای) طبقه‌بندی گردید (شکل ۳ د).

تراکم زهکشی نسبت طول کل کانال‌های حوزه آبریز به

تهیه نقشه پارامترهای مؤثر در ایجاد سیل و آب‌گرفتگی

ارتفاع از سطح دریا ارتفاعات مختلف سبب تغییر در ویژگی‌های آب و هوایی شده در نتیجه باعث تفاوت در پوشش گیاهی، خاک و سایر پارامترهای محیطی می‌شود. ارتفاع همیشه نقش مهمی در نقشه حساسیت سیل دارد (۱۸ و ۲۷). نقشه ارتفاع منطقه مورد مطالعه از نقشه‌های رقومی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ تهیه و در پنج کلاس طبقه‌بندی گردید (شکل ۳ الف).

شیب زمین به دلیل تأثیر مستقیم بر رواناب سطحی و فرصت نفوذ، یکی از عوامل مهم در وقوع سیل حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود. به منظور تهیه نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاع (با قدرت تفکیک ۳۰ متر) و نرم‌افزار ArcGIS[®] 10.2 استفاده شد. نقشه به دست آمده به پنج کلاس ۰-۱۳/۹۳، ۱۳/۹۳-۲۷/۸۵، ۲۷/۸۵-۴۱/۷۸، ۴۱/۷۸-۵۵/۷۲ و ۵۵/۷۲-۶۹/۷ (برحسب درجه) با استفاده از روش طبقه‌بندی چارک

پرکامبرین، کوآترنری و سیلورین تهیه گردید (شکل ۴ ط). کاربری اراضی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در تشکیل رواناب سطحی و پتانسیل سیل حوزه‌های آبخیز است. نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز مادرسو بر اساس رقوم‌سازی نقشه کاربری اراضی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور تهیه شد. نقشه کاربری اراضی به کلاس‌های جنگل، مراتع، کشاورزی و اراضی مسکونی تقسیم گردید (شکل ۴ ی).

مدل شاخص آماری و وزن شواهد

روش شاخص آماری، تحلیل آماری دومتغیره‌ای است که توسط وان وستن (۳۱) برای پهنه زمین‌لغزش بکار گرفته شد. در این مدل، ارزش وزن هر طبقه به‌عنوان لگاریتم طبیعی از تراکم وقوع پدیده (زمین‌لغزش، سیل و...) در هر طبقه در کل نقشه تقسیم بر چگالی وقوع پدیده (زمین‌لغزش، سیل و...) تعریف شده است (۲۱ و ۳۱). در این تحقیق روش شاخص آماری بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$W_{SI} = \ln\left(\frac{E_{ij}}{E}\right) = \ln\left(\frac{\frac{L_{ij}/L_T}{P_{ij}/P_L}}{\frac{L_T}{P_L}}\right) \quad [2]$$

در این رابطه؛ W_{SI} وزن داده شده به کلاس i از پارامتر j ، E_{ij} تراکم وقوع پدیده در کلاس i از پارامتر j ، E تراکم وقوع پدیده در کل نقشه، L_{ij} تعداد وقوع پدیده‌های کلاس i از پارامتر j ، P_{ij} تعداد پیکسل‌های کلاس i از پارامتر j ، P_L تعداد پیکسل‌های کل نقشه، L_T تعداد کل وقوع پدیده در کل نقشه. روش وزن شواهد یک روش داده محور مورد استفاده برای ترکیب مجموعه داده‌ها است و بر استفاده از فرم خطی از مدل احتمال بیزین (Bayesian) برای برآورد اهمیت نسبی شواهد با استفاده از آمار استوار است (۳). N_{pix1} تعداد پیکسل‌های وقوع سیل در هر کلاس، N_{pix2} (تعداد کل پیکسل‌های سیل در هر نقشه - تعداد پیکسل‌های وقوع سیل در هر کلاس)، N_{pix3} (تعداد پیکسل‌های هر کلاس - تعداد پیکسل‌های وقوع سیل در

مساحت حوزه است. که چگونگی جریان آب، توسط شبکه آبراهه‌های حوزه را نشان می‌دهد. نقشه تراکم زهکشی با استفاده از سلول‌های 30×30 متر در چهار گروه طبقه‌بندی گردید (شکل ۴ ح).

فاصله از رودخانه یکی از مهم‌ترین عوامل در سیل‌گرفتنی اراضی مجاور است. نقشه فاصله از رودخانه‌های مجاور بر اساس لایه رقوم‌ی شبکه جریان حوزه آبخیز مادرسو در نرم‌افزار ArcGIS® 10.2 تهیه گردید. نقشه حاصل به پنج کلاس کمتر از ۵۰۰ متر، ۵۰۰-۱۰۰۰، ۱۰۰۰-۲۰۰۰، ۲۰۰۰-۳۰۰۰، ۳۰۰۰ و بیشتر از ۳۰۰۰ متر، طبقه‌بندی گردید (شکل ۴ و).

شاخص رطوبت توپوگرافی (Topographic Wetness Index: TWI) تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع جهت تولید رواناب است و یکی از شاخص‌های مفید در بررسی پتانسیل سیل حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود. شاخص رطوبت توپوگرافی بر اساس رابطه ۱ مشخص گردید (شکل ۴ ز). در این رابطه، AS سطح ویژه حوزه آبخیز و β شیب زمین (برحسب درجه) می‌باشند (۲۲).

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right) \quad [1]$$

خاک‌شناسی این عامل نقش مهمی را در توزیع رواناب سطحی و زیرسطحی ایفا می‌کند. ویژگی‌های سنگ‌شناسی و خاک‌شناسی در میزان نفوذپذیری آب در درون زمین و یا آبدوی مستقیم و در نتیجه تعادل جریان رودخانه و یا سیل‌خیزی حوزه تأثیر بسزایی دارند. لایه خاک‌شناسی از نقشه بافت خاک حوزه مادرسو (با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط وزارت کشاورزی) استخراج گردید (شکل ۴ ه).

زمین‌شناسی به دلیل تأثیر مستقیم بر توان نفوذپذیری و رواناب سطحی، یکی از عوامل مهم در پدیده سیل حوزه‌های آبخیز است. نقشه زمین‌شناسی حوزه آبخیز مادرسو با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی تهیه و رقوم‌ی گردید. نقشه زمین‌شناسی منطقه در کلاس‌های سنی کرتاسه، دوونین، ائوسن، ژوراسیک، میوسن، پروتروزوئیک،

(WF)، بزرگی ارتباط مکانی عامل علتی و وقوع سیل را نشان می‌دهد که از رابطه ۵ محاسبه گردید (V).

$$W_f = W_i^+ - W_i^- \quad [5]$$

برای به دست آوردن وزن نهایی هر عامل، وزن‌های مثبت و منفی کلاس‌های متعدد هر عامل باهم جمع می‌شوند (رابطه‌های ۶ و ۷). اگر وزن عاملی مثبت باشد، در وقوع سیل و آب‌گرفتگی نقش دارد و در صورتی که وزن عامل منفی باشد، بیانگر عدم اثر عامل در بروز وقوع سیل و آب‌گرفتگی است. برخی عوامل هم تأثیر ناچیزی در وقوع سیل دارند و وزن آنها صفر یا نزدیک به صفر است. با وارد کردن وزن‌ها در محیط ArcGIS[®] 10.2 بر روی نقشه‌های موضوعی، نقشه موضوعی وزنی به دست می‌آیند. از مجموع این نقشه‌ها، نقشه پیش‌بینی استعداد وقوع سیل و آب‌گرفتگی محاسبه گردید.

هر کلاس، N_{pix4} (تعداد کل پیکسل‌های هر نقشه - تعداد کل پیکسل‌های وقوع سیل هر نقشه - تعداد پیکسل‌های هر کلاس + تعداد پیکسل‌های وقوع سیل در هر کلاس است که از رابطه‌های ۳ و ۴ تعیین گردید (V).

$$W_i^+ = \log_e \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \quad [3]$$

$$W_i^- = \log_e \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \quad [4]$$

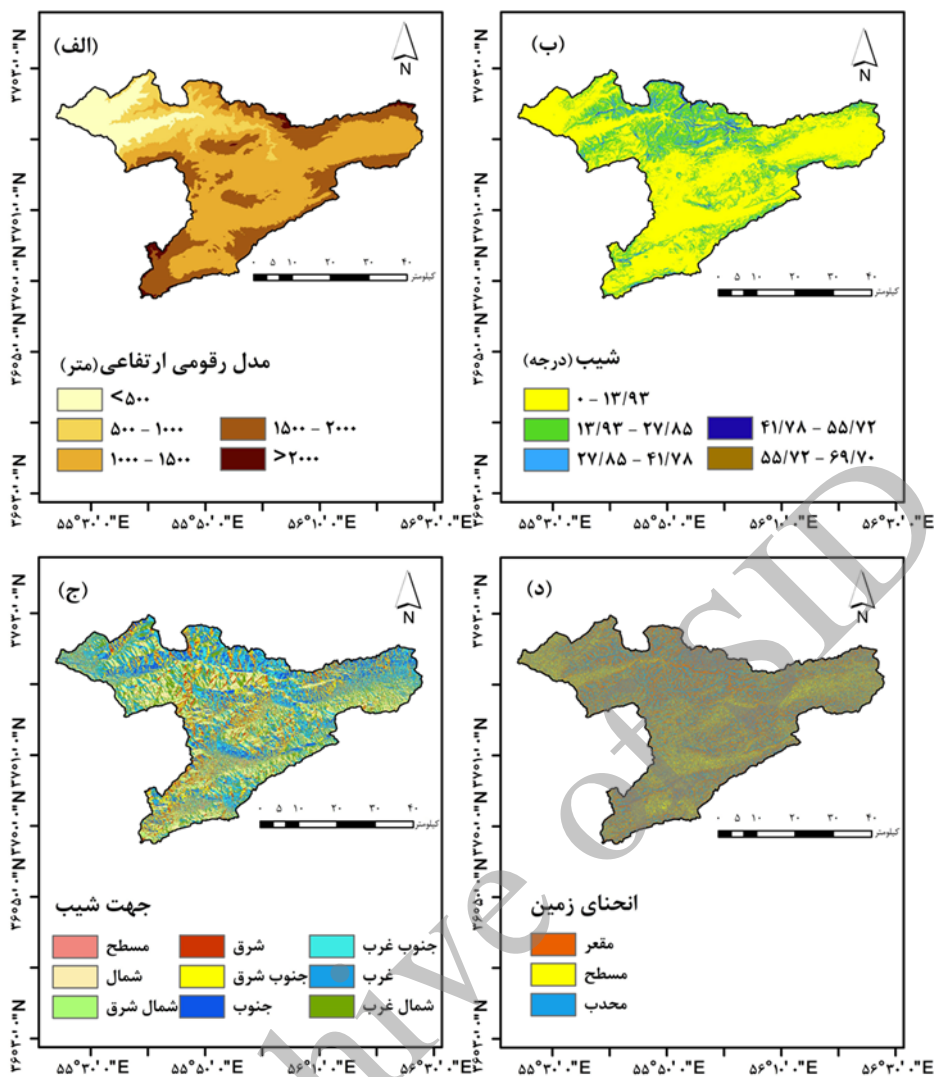
وزن مثبت (W^+) نشان می‌دهد که عامل علتی در محل وقوع سیل وجود دارد و بزرگی این وزن، همبستگی بین آن عامل و وقوع سیل را بیان می‌کند. اما وزن منفی (W^-) بیانگر عدم عامل مورد نظر در محل بروز سیل بوده، سطح منفی همبستگی را نشان می‌دهد. اختلاف بین دو وزن مثبت و منفی

[۶]

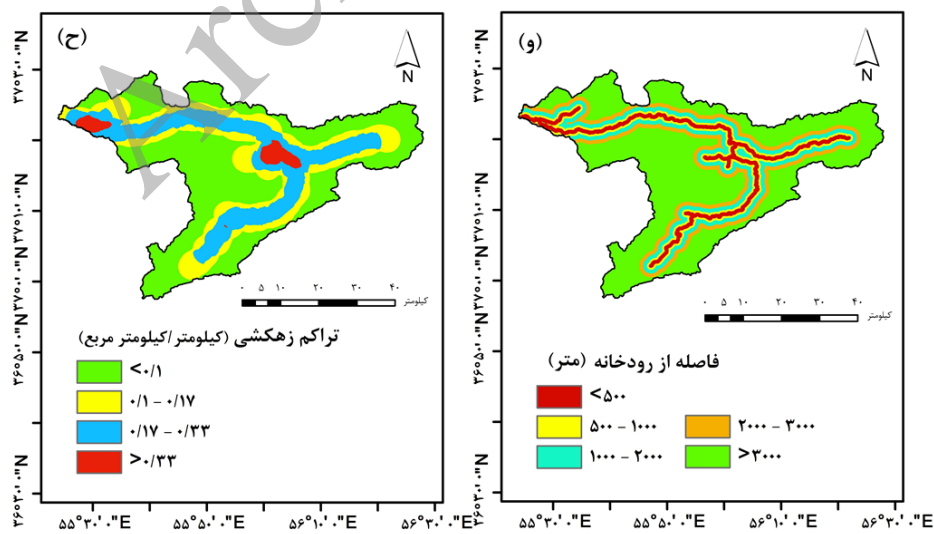
$$FSI_{Wf} = \left(\begin{array}{l} (Altitude_{Wf}) + (Slope\ angle_{Wf}) + (Slope\ aspect_{Wf}) + (Plan\ curvature_{Wf}) + (Distance\ from\ river_{Wf}) \\ + (Soil\ type_{Wf}) + (Drainage\ density_{Wf}) + (TWI_{Wf}) + (Lithology_{Wf}) + (Landuse_{Wf}) \end{array} \right)$$

[۷]

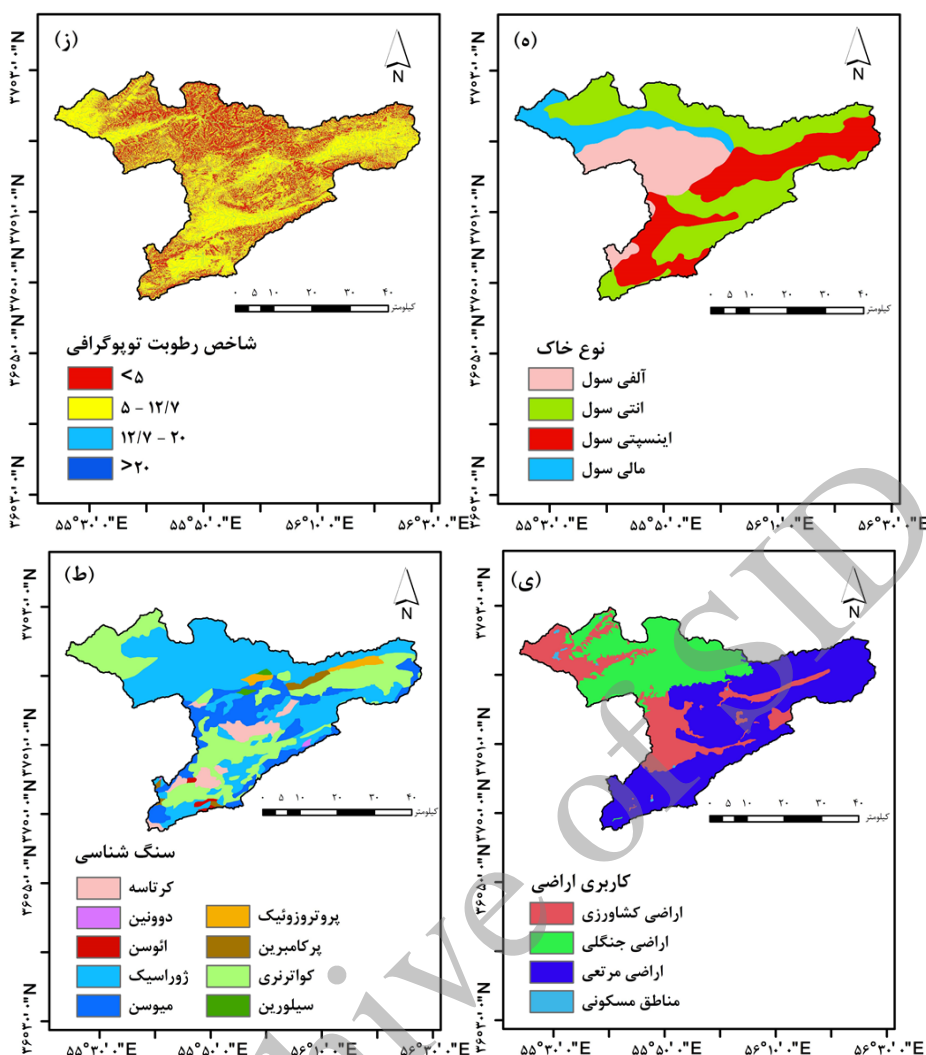
$$FSI_{SI} = \left(\begin{array}{l} (Altitude_{SI}) + (Slope\ angle_{SI}) + (Slope\ aspect_{SI}) + (Plan\ curvature_{SI}) + (Distance\ from\ river_{SI}) \\ + (Soil\ type_{SI}) + (Drainage\ density_{SI}) + (TWI_{SI}) + (Lithology_{SI}) + (Landuse_{SI}) \end{array} \right)$$



شکل ۳. نقشه ارتفاع از سطح دریا (الف)، درجه شیب (ب)، جهت شیب (ج) و انحناى زمین (د) حوزه آبخیز مادرسو



شکل ۴. نقشه تراکم زهکشی (ح) و فاصله از رودخانه (و)



ادامه شکل ۴. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (ز) و نوع خاک (ه) و سنگ‌شناسی (ط) و کاربری اراضی (ی) حوزه آبخیز مادرسو

ارزیابی مدل‌ها

در روش وزن شواهد و شاخص آماری برای وزندهی به لایه‌های مختلف اطلاعاتی از نقشه موقعیت وقوع سیل‌های منطقه استفاده شد. بعد از تهیه نقشه‌های وزنی بر اساس روابط مدل، نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع سیل تهیه شد و برای طبقه‌بندی متغیرهای مستقل، روش چارک (Quantile) استفاده شد. این روش توسط شفاپورتهرانی و همکاران (۲۷، ۲۸) و (۲۹) به دلیل کارایی بهتر آن، در طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل از سطح زیر نمودار AUC به دست آمده از منحنی ROC استفاده گردید. منحنی ROC یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای

منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از پیش‌بینی‌هاست (۳). مقدار سطح زیر منحنی (AUC)، یک شاخص کمی برای نمایش کارایی و قدرت پیش‌بینی مدل است (۲). دامنه مقادیر مختلف سطح زیر منحنی بین ۰/۵ (پیش‌بینی تصادفی) تا حداکثر ۱ (پیش‌بینی کاملاً صحیح) است (۲۰). همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی و ارزیابی تخمین به صورت (۱) - ۰/۹، عالی؛ ۰/۸ - ۰/۹، خیلی خوب؛ ۰/۷ - ۰/۸، خوب؛ ۰/۷ - ۰/۷، متوسط و ۰/۵ - ۰/۶، ضعیف است (۱۹) (جدول ۱). یک نقشه از موقعیت جغرافیایی ۷۰ واقعه سیل رخ داده در سال ۱۳۸۰ در حوزه آبخیز مادرسو گلستان بر اساس اطلاعات شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه گردید. این مجموعه

شده است. درجه شیب در نفوذ رواناب سطحی و سرعت جریان آب نقش دارد. در مناطق با شیب ملایم، جریان رواناب کند بوده و آب زمان بیشتری برای نفوذ پیدا می‌کنند. بر اساس نتایج این پژوهش احتمال وقوع سیل با کاهش زاویه شیب افزایش چشمگیری داشته است. زمانی که در اراضی پایین دست شیب کم شده و اراضی وسیع تر می‌شود در این محدوده زمین‌های آبرفتی وسیعی ظاهر می‌شوند. از این اراضی برای کشاورزی استفاده می‌شود. در موقع سیلاب رودخانه ممکن است این اراضی تخریب شوند. درجه شیب نفوذ رواناب سطحی و سرعت جریان آب را کنترل می‌کند. در مناطق با شیب ملایم، جریان رواناب کند بوده و آب زمان بیشتری برای نفوذ پیدا می‌کنند. هرچه درجه شیب کمتر باشد، احتمال آب‌گرفتگی و وقوع سیل بیشتر است (۲۸). جهت کلی شیب یک حوزه آن است که بتواند مقدار حرارتی را که آن حوزه از خورشید کسب می‌کند، کنترل نماید و در نتیجه میزان تبخیر و تعرق را در آن حوزه تغییر دهد. بررسی عامل جهت شیب با دو مدل SI و WoE نشان می‌دهد شیب جهت شرق دارای کمترین ارزش و اراضی مسطح (بدون جهت) میزان SI و WoE بالاترین ارزش را دار است (جدول ۲). جهت شیب بر روی تأخیر در ذوب شدن ناشی از تفاوت درجه حرارت، رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و در نتیجه پوشش گیاهی تأثیر دارد (۲۷). فاکتور انحنای زمین در هر دو مدل SI و WoE نشان می‌دهد اراضی مقعر دارای بیشترین ارزش و شکل محدب کمترین ارزش بود. تجلد و تقعر شیب با کنترل حرکت آب و رواناب و تأثیر بر زهکشی و نگهداری آب در خاک اراضی شیب‌دار نقش دارند. اطلاعات ژئومورفولوژی مفید می‌تواند از طریق تجزیه و تحلیل انحنای زمین استخراج گردد (۱۴، ۲۴ و ۲۸). تراکم زهکشی یکی از مهم‌ترین پارامترهای ژئومورفولوژیک حوزه‌های آبخیز است که اغلب از آن به‌عنوان شاخصی برای بیان وضعیت آبراهه‌های حوزه، بارندگی و ظرفیت نفوذپذیری، تکامل توپوگرافی و فرسایش حوزه استفاده می‌شود. این شاخص به‌وسیله عوامل مختلفی مثل اقلیم، پوشش گیاهی، زمین‌شناسی سنگ‌بستر تحت تأثیر

به‌صورت تصادفی به یک گروه متشکل از ۴۹ واقعه سیل (۷۰٪) برای آموزش و اسننجی (Training) و یک گروه متشکل از ۲۱ واقعه سیل (۳۰٪) برای اعتبارسنجی (Validation) تقسیم گردید. موقعیت واقعه‌های سیل گروه آموزش و گروه اعتبارسنجی در شکل ۱ مشاهده می‌گردد.

جدول ۱. همبستگی کیفی - کمی سطح زیر منحنی

مقادیر سطح زیر منحنی (AUC)	دقت پیش‌بینی
۰/۹ - ۱	عالی
۰/۸ - ۰/۹	خیلی خوب
۰/۷ - ۰/۸	خوب
۰/۶ - ۰/۷	متوسط
۰/۵ - ۰/۶	ضعیف

نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارتباط بین هریک از عوامل مؤثر و نقاط وقوع سیل با استفاده از مدل‌های SI و WoE در جدول ۲ ارائه شده است. رابطه بین SI و فاکتور ارتفاع از سطح دریا نشان می‌دهد در ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر میزان SI (۱/۸۰۲) و ارتفاعات بیشتر از ۱۵۰۰ متر میزان SI (صفر و منفی) است و رابطه بین WoE و فاکتور ارتفاع از سطح دریا بیانگر این است که در ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر ارزش WoE (۲/۷۴۷) و ارتفاعات بیشتر از ۱۵۰۰ متر ارزش WoE مقداری منفی است. ارتفاع از سطح دریا عوامل بسیار مهم در پدیده‌های هیدرولوژیکی است، اهمیت این عامل به دلیل تأثیری است که بر روی تغییرات دما و بارش دارد. در این مطالعه عامل ارتفاع از سطح دریا با احتمال آب‌گرفتگی و وقوع سیل رابطه معکوس دارد. طبق جدول ۲ بیشتر زمین‌های اطراف رودخانه‌های اصلی، دشت‌ها و نواحی کم ارتفاع در معرض خطر وقوع سیل قرار دارند. عامل درجه شیب نشان می‌دهد، شیب‌های ۰-۲۷/۸۵ ارزش SI بالاترین مقدار و در شیب‌های بیشتر از ۴۱/۷۸ ارزش SI کمترین مقدار است. ارزش WoE نیز همانند مدل SI در شیب‌های کمتر از ۲۷/۸۵ بیشترین مقدار و در شیب‌های بالاتر از ۲۷/۸۵ مقداری منفی یا صفر برآورد

نموده است. از خصوصیات خاک مالی سول می توان به نفوذپذیری، مواد تشکیل دهنده، میزان تکامل یافتگی و ساختار آن اشاره کرد (۱). بنابراین نفوذپذیری بالا و عمق کم آن سبب می گردد به سرعت از آب اشباع و در نتیجه احتمال وقوع آب گرفتگی در آن افزایش می یابد. در خاک های نفوذپذیر، بیشتر بارش در زمین نفوذ کرده و جریان های زیر قشری و زیرزمینی را تقویت می کند درحالی که در خاک های با بافت ریز، بخش زیادی از آن را به صورت رواناب سطحی درمی آید. بنابراین باید تأثیر لیتولوژی، ژئومورفولوژی و خاک منطقه را روی جریان آب ها در نظر داشت. نقش لیتولوژی و خاک در هیدرولوژی مربوط به تبدیل بارش به جریان آب می باشد. بررسی فاکتور سنگ شناسی نشان می دهد بیشترین ارزش SI و WoE در کلاس کوآترنری می باشد (جدول ۲). سازندهای دوره کوآترنری به علت وجود واحدهای مارنی و کنگلومرایی جریان های سیلابی بیشتری را دارند، خاک های مارنی دارای کمترین نفوذ، بیشترین رواناب و بالاترین فرسایش می باشد. همچنین بخش عمده سنگ های ژوراسیک در این گستره را مارن، سنگ آهک، شیل های آهکی و دولومیت تشکیل می دهد. پارامتر کاربری اراضی نشان می دهد اراضی کشاورزی در مدل های SI و WoE بیشترین احتمال وقوع سیل و اراضی جنگلی و مرتعی به علت اینکه کمترین مساحت را در حوزه آبخیز مادر سو اشغال نموده اند، کمترین احتمال وقوع سیل را دارا می باشند (جدول ۲). کاربری اراضی یکی از مهم ترین عوامل مؤثر در تشکیل رواناب سطحی و پتانسیل وقوع سیل حوزه های آبخیز محسوب می شود. در هنگام ریزش آب باران های سنگینی که باعث بروز سیلاب ها می شوند، ذرات آب با شاخ و برگ درختان جنگل برخورد می کنند و تا حد زیادی از سرعت آنها کاسته می شود. همچنین خاک جنگل هم پوشیده از شاخ و برگ گیاهان و درختان است که باعث جذب آب می شود و جویبارهایی با آب زلال را به وجود می آورد.

قرار می گیرد (۵). مقدار تراکم زهکشی، یک شاخص مهم در تعیین شدت سیلاب ها، میزان بار رسوبی، بیلان آب در کل حوزه و به طور کلی در چگونگی فعالیت فرآیندهای رواناب های سطحی است (۶). در تراکم زهکشی بیشتر از ۰/۳۳ بیشترین میزان SI و WoE برآورد شده است که نشان می دهد این کلاس قوی ترین رابطه با وقوع سیل دارد (جدول ۲). آبراهه ها در حوزه، عمل تخلیه جریان های سطحی را انجام می دهند و با فاصله گرفتن از آبراهه، خطر وقوع سیل کاهش می یابد (۹). عامل فاصله از رودخانه نشان می دهد فواصل ۲۰۰۰-۵۰۰ متری ارزش SI و WoE بالاترین و فواصل بیش از ۳۰۰۰ متر ارزش SI و WoE کمترین مقدار است، که نشان دهنده عدم وقوع سیل در این فاصله از رودخانه است. پارامتر TWI اثر توپوگرافی را در تولید رواناب با فرض پایداری و یکنواختی شرایط خاک بیان می کند، ارزیابی این شاخص نشان می دهد که طبقه ۵-۱۲/۷ ارزش SI و WoE بیشترین مقدار است (جدول ۲). شاخص رطوبت توپوگرافی بیانگر مقدار انباشت جریان در هر مکان در یک حوزه آبخیز و روند قدرت جریان آب به پایین دست بر اثر نیروی گرانش می باشد. همچنین این پارامتر با وضعیت رطوبت خاک ارتباط دارد (۲۵ و ۲۶). بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل شاخص آماری، خاک های تیپ مالی سول میزان SI برابر ۱/۷۱۹ و ارزش WoE برابر ۲/۵۵ همچنین خاک های تیپ آلفی سول میزان SI و WoE به ترتیب برابر ۱/۵۹۵- و ۱/۷۷۸- است. جنس مواد تشکیل دهنده سطح زمین تعیین کننده قابلیت نفوذ آب در حوزه است. به طوری که خاک های با قابلیت نفوذپذیری بالا می توانند مقدار زیادی از بارش را جذب کرده و مقدار رواناب را در سطح زمین کاهش دهد. طبیعی است حوزه های با جنس سنگ نفوذپذیر استعداد آب گرفتگی کمتری داشته و حوزه های با جنس غیرقابل نفوذ مستعد ایجاد سیلاب، به دنبال بارندگی های کمتر خواهند. اراضی با نوع خاک مالی سول بیشترین تعداد سیل را تجربه

جدول ۲. نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای مؤثر بر وقوع سیل در مدل شاخص آماری (SI) و مدل وزن شواهد (WoE)

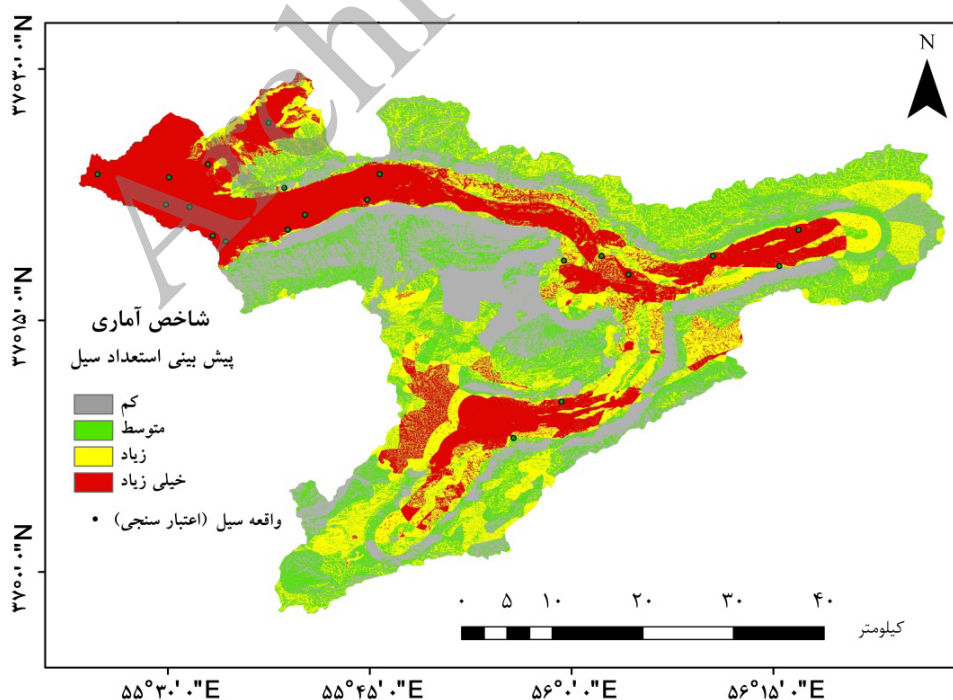
متغیرهای مستقل	کلاس	تعداد پیکسل‌ها در	درصد پیکسل‌ها در	تعداد	درصد	SI	Wi+	Wi-	Wf
ارتفاع از سطح دریا (متر)	<۵۰۰	۲۷۶۴۶۰	۱۰/۷۷	۳۲	۶۵/۳۱	۱/۸۰۲	۱/۸۰۲	-۰/۹۴۵	۲/۷۴۷
	۵۰۰-۱۰۰۰	۲۷۲۰۴۶	۱۰/۶۰	۴	۸/۱۶	-۰/۲۶۱	-۰/۲۶۱	۰/۰۲۷	-۰/۳۸۸
	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۳۰۵۶۱۰	۵۰/۸۶	۱۳	۲۶/۵۳	-۰/۶۵۱	-۰/۶۵۱	۰/۴۰۲	-۱/۰۵۳
	۱۵۰۰-۲۰۰۰	۶۶۶۳۰۶	۲۵/۹۶	۰	۰	۰	۰	۰/۳۰۱	-۰/۳۰۱
	>۲۰۰۰	۴۶۵۴۴	۱/۸۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱۸	-۰/۰۱۸
تراکم زهکشی (کیلومتر/کیلومتر مربع)	<۰/۰۱	۱۳۳۸۹۸۴	۵۲/۱۶	۰	۰	۰	۰	۰/۳۳۷	-۰/۳۳۷
	۰/۰۱-۰/۱۷	۵۴۹۳۶۳	۲۱/۴۰	۵	۱۰/۲۰	-۰/۷۴۱	-۰/۷۴۱	۰/۱۳۳	-۰/۸۷۴
	۰/۱۷-۰/۳۳	۵۹۸۴۳۳	۲۳/۳۱	۳۱	۶۳/۲۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	-۰/۷۳۶	۱/۷۳۴
	>۰/۳۳	۸۰۱۸۶	۳/۱۲	۱۳	۲۶/۵۳	۲/۱۳۹	۲/۱۳۹	-۰/۲۷۷	۲/۴۱۶
فاصله از رودخانه (متر)	۵۰۰<	۲۱۶۱۹۰	۸/۴۲	۴	۸/۱۶	-۰/۲۶۱	-۰/۲۶۱	۰	-۰/۳۳۱
	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۹۷۱۳۸	۷/۶۸	۱۴	۲۸/۵۷	۱/۳۱۴	۱/۳۱۴	-۰/۲۶	۱/۵۷
	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۳۵۳۶۳	۱۳/۸۴	۲۷	۵۵/۱۰	۱/۳۸۱	۱/۳۸۱	-۰/۶۵	۲/۰۳
	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۳۲۹۸۵۷	۱۲/۸۵	۴	۸/۱۶	-۰/۴۵۴	-۰/۴۵۴	۰/۰۵	-۰/۵۱
	>۳۰۰۰	۱۴۶۸۴۱۸	۵۷/۲۰	۰	۰	۰	۰	۰/۸۵	-۰/۸۵
شاخص رطوبت توپوگرافی	<۵	۸۶۱۲۵۶	۳۳/۵۵	۱۲	۲۴/۴۹	-۰/۳۱۵	-۰/۳۱۵	۰/۱۲۸	-۰/۴۴۳
	۵-۱۲/۷	۱۶۶۲۱۹۰	۶۴/۷۵	۳۷	۷۵/۵۱	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴	-۰/۳۶۴	۰/۵۱۸
	۱۲/۷-۲۰	۴۱۷۶۳	۱/۶۳	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲	-۰/۰۲
	>۲۰	۱۷۵۷	۰/۰۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نوع خاک	آلفی سول	۵۱۶۲۶۷	۲۰/۱۱	۲	۴/۰۸	-۱/۵۹۵	-۱/۵۹۵	۰/۱۸۳	-۱/۷۷۸
	انتو، سول	۱۰۸۰۶۲۴	۴۲/۱۰	۱۰	۲۰/۴۱	-۰/۷۲۴	-۰/۷۲۴	۰/۳۱۸	-۱/۰۴۲
	اینسیتو، سول	۶۸۸۴۰۴	۲۶/۸۲	۷	۱۴/۲۹	-۰/۶۳۰	-۰/۶۳۰	۰/۱۵۸	-۰/۷۸۸
	مالی سول	۲۸۱۶۷۱	۱۰/۹۷	۳۰	۶۱/۲۲	۱/۷۱۹	۱/۷۱۹	-۰/۸۳۱	۲/۵۵۰
سنگ شناسی	کرتاسه	۱۳۰۶۳۴	۵/۱۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵۲	-۰/۰۵۲
	دوونین	۴۱۶۲	۰/۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ائوسن	۱۳۳۷۷	۰/۵۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	ژوراسیک	۱۱۸۵۴۹۸	۴۶/۱۸	۱۵	۳۰/۶۱	-۰/۴۱۱	-۰/۴۱۱	۰/۲۵۴	-۰/۶۶۵
	میوسن	۳۸۴۹۱۶	۱۴/۹۹	۳	۶/۱۲	-۰/۸۹۶	-۰/۸۹۶	۰/۰۹۹	-۰/۹۹۵
	پروتروزوئیک	۴۴۲۲۱	۱/۷۲	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱۷	-۰/۰۱۷
	یرکامبرین	۳۳۶۱۲	۱/۳۱	۰	۰	۰	۰	۰/۰۱۳	-۰/۰۱۳
	کواترنری	۷۵۹۵۸۵	۲۹/۵۹	۳۱	۶۳/۲۷	۰/۷۶۰	۰/۷۶۰	-۰/۶۵۱	۱/۴۱۱
سیلورین	۱۰۹۶۱	۰/۴۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	
کاربری اراضی	زمین کشاورزی	۵۶۹۰۱۹	۲۲/۱۷	۲۸	۵۷/۱۴	۰/۹۴۷	۰/۹۴۷	-۰/۵۹۷	۱/۵۴۴
	اراضی جنگلی	۷۰۷۳۹۷	۲۷/۵۶	۱۰	۲۰/۴۱	-۰/۳۰۰	-۰/۳۰۰	۰/۰۹۴	-۰/۳۹۴
	اراضی مرتعی، مناطق شهری	۱۲۸۲۲۱۰	۴۹/۹۵	۱۱	۲۲/۴۵	-۰/۸۰۰	-۰/۸۰۰	۰/۴۳۸	-۱/۲۳۸
		۸۳۴۰	۰/۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
درجه شیب	۰-۱۳/۹۳	۱۷۶۳۶۹۲	۶۸/۷۱	۳۵	۷۱/۴۳	۰/۳۹	۰/۳۹	-۰/۰۹۱	۰/۱۳۰
	۱۳/۹۳-۲۷/۸۵	۶۴۶۴۴۹	۲۵/۱۸	۱۳	۲۶/۵۳	۰/۵۲	۰/۵۲	-۰/۰۱۸	۰/۰۷۰
	۲۷/۸۵-۴۱/۷۸	۱۳۸۸۰۷	۵/۴۱	۱	۲/۰۴	-۰/۹۷۴	-۰/۹۷۴	۰/۰۳۵	-۱/۰۰۹
	۴۱/۷۸-۵۵/۷۲	۱۷۰۹۷	۰/۶۷	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۷	-۰/۰۰۷
	۵۵/۷۲-۶۹/۷	۹۲۱	۰/۰۴	۰	۰	۰	۰	۰	
جهت شیب	مسطح	۱۷۱۷۹	۰/۶۷	۱	۲/۰۴	۱/۱۱۵	۱/۱۱۵	-۰/۰۱۴	۱/۱۲۹
	شمال	۴۱۸۵۵۸	۱۶/۳۱	۸	۱۶/۳۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰	۰/۰۰۱
	شمال شرق	۲۶۵۹۴۹	۱۰/۳۶	۳	۶/۱۲	-۰/۵۲۶	-۰/۵۲۶	۰/۰۴۶	-۰/۵۷۲
	شرق	۲۳۵۵۶۵	۹/۱۸	۰	۰	۰	۰	۰/۰۹۶	-۰/۰۹۶
	جنوب شرق	۳۰۰۱۲۴	۱۱/۶۹	۴	۸/۱۶	-۰/۳۵۹	-۰/۳۵۹	۰/۰۳۹	-۰/۳۹۸
	جنوب	۳۹۷۱۱۶	۱۵/۴۷	۱۲	۲۴/۴۹	۰/۴۵۹	۰/۴۵۹	-۰/۱۱۳	۰/۵۷۲
	جنوب غرب	۲۸۱۱۷۰	۱۰/۹۵	۶	۱۲/۲۴	۰/۱۱۱	۰/۱۱۱	-۰/۰۱۵	۰/۱۲۶
	غرب	۲۸۴۵۷۵	۱۱/۰۹	۱۰	۲۰/۴۱	۰/۶۱۰	۰/۶۱۰	-۰/۱۱۱	۰/۷۲۱
	شمال غرب	۳۶۶۷۳۰	۱۴/۲۹	۵	۱۰/۲۰	-۰/۳۳۷	-۰/۳۳۷	۰/۰۴۷	-۰/۳۸۳
انحنای زمین	مقعر	۱۱۱۶۲۲۴	۴۳/۴۸	۲۷	۵۵/۱۰	۰/۲۳۷	۰/۲۳۷	-۰/۲۳۰	۰/۴۶۷
	مسطح	۳۶۳۳۰۰	۱۴/۱۵	۸	۱۶/۳۳	۰/۱۴۳	۰/۱۴۳	-۰/۰۲۶	۰/۱۶۹
	محدب	۱۰۸۷۴۴۲	۴۲/۳۶	۱۴	۲۸/۵۷	-۰/۳۹۴	-۰/۳۹۴	۰/۲۱۵	-۰/۶۰۸

مخازن تأخیری و تعدیلی موجب کاهش بده سیلابی می‌شود. در نهایت، نقشه وزنی نهایی از جمع جبری نقشه‌های موضوعی وزنی در محیط ArcGIS®10.2 به دست آمد و با توجه به دامنه تغییرات وزن پیکسل‌ها در چهار طبقه تقسیم و بر مبنای آن نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع سیل در حوزه آبخیز مادرسو استان گلستان در پهنه‌های با حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم ترسیم شد (شکل ۵ و شکل ۶). نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع سیل نشان می‌دهد که در مدل SI حدود ۲۴/۹۸ درصد و در مدل WoE حدود ۲۴/۹۴ درصد از مساحت حوزه در طبقه با حساسیت خیلی زیاد قرار دارد (جدول ۳).

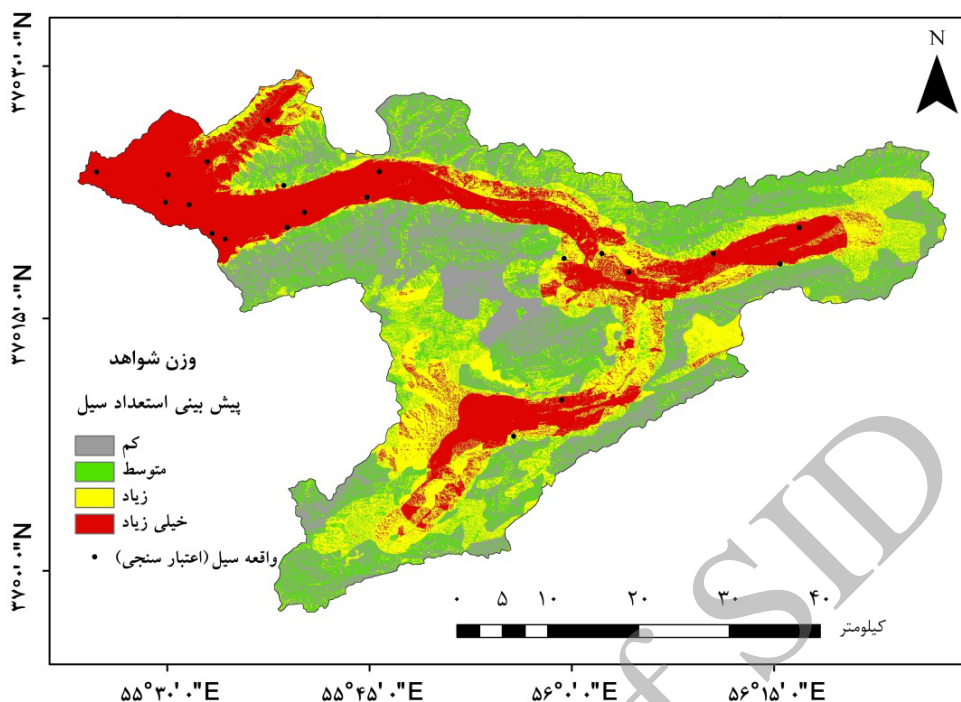
اراضی کشاورزی موجود در حوزه آبخیز مادرسو در ایجاد سیل نقش بیشتری داشته‌اند که دلیل آن را می‌توان به نقش انسان در اکوسیستم‌های منطقه و تخریب‌هایی که به واسطه تغییر این کاربری‌ها اعمال کرده، نسبت داد. کاربری اراضی روی جریان رودخانه و وقوع سیلاب به روش‌های مختلفی تأثیر می‌گذارد. مثلاً از بین بردن پوشش گیاهی و یا تغییر در نوع و نحوه کشت و کار گیاهانی که تلفات برگ آبی زیادی ندارند سبب افزایش حجم جریان و فزونی بده سیلاب می‌گردد. هرگونه عملیاتی در حوزه که سبب کاهش ذخیره رطوبت خاک و یا کاهش نفوذپذیری گردد موجب افزایش بده سیلابی می‌گردد. چرای مفرط دام سبب فشردگی خاک و از بین رفتن پوشش گیاهی می‌گردد و از سوی دیگر احداث

جدول ۳. مساحت هر منطقه به تفکیک میزان استعداد سیل و آب گرفتگی

کلاس	شاخص آماری (کیلومتر مربع)	مساحت به درصد	وزن شواهد (کیلومتر مربع)	مساحت به درصد
کم	۵۷۸/۰۴۵	۲۵/۰۲	۵۸۰/۳۲۹	۲۵/۱۲
متوسط	۵۷۷/۴۳۲	۲۵	۵۷۷/۲۵۶	۲۴/۹۹
زیاد	۵۷۷/۵۰۶	۲۵	۵۷۶/۳۰۵	۲۴/۹۵
خیلی زیاد	۵۷۷/۲۰۴	۲۴/۹۸	۵۷۶/۲۹۷	۲۴/۹۴



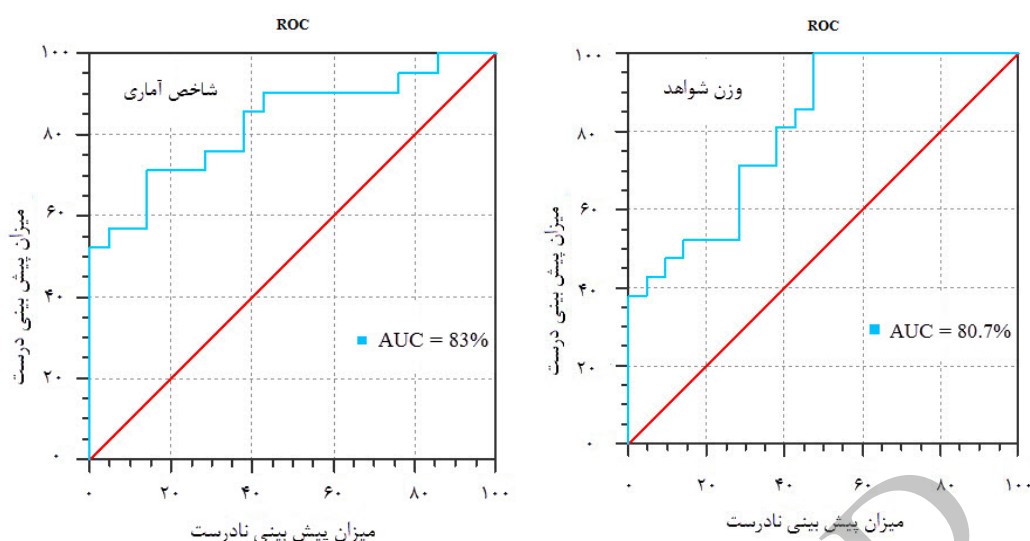
شکل ۵. نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل حوزه آبخیز مادرسو با استفاده از مدل شاخص آماری



شکل ۶. نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل حوزه آبخیز مادرسو با استفاده از مدل وزن شواهد

سیل با نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل، به طبقات حضور نقاط وقوع، کد یک و به سایر نقاط کد صفر تعلق گرفت. سپس بر اساس منابع مختلف از روش منحنی ROC برای ارزیابی و اعتبارسنجی دقت نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل حوزه آبخیز مادرسو استفاده شد. بدین منظور منحنی ROC مربوط به نقشه مزبور با استفاده از نرم‌افزار SPSS جهت تعیین دقت مدل پیش‌بینی تهیه گردید. مساحت زیر این منحنی (AUC) میزان دقت نقشه پیش‌بینی سیل را به صورت کمی نشان می‌دهد (شکل ۷).

به منظور اعتبارسنجی نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل حوزه آبخیز مادرسو، مجموعه‌ای متمایز از داده‌های موقعیت سیل که در مدل احتمالاتی استفاده نشده‌اند، به کاررفته شد. در این مرحله ۲۱ واقعه سیل (۲۱ نقطه) در سیستم اطلاعات جغرافیایی با نقشه پیش‌بینی پتانسیل سیل روی هم‌گذاری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به این صورت که علاوه بر ۲۱ نقطه واقعه سیل شناسایی شده در منطقه، ۲۱ پیکسل و یا نقطه رستری دیگر به طور تصادفی در سراسر حوزه انتخاب شده تا به عنوان نقاط بدون وقوع سیل در تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گیرد. پس از همپوشانی ۴۲ نقطه وقوع سیل و عدم وقوع



شکل ۷. منحنی ROC نقشه پیش‌بینی استعداد سیل و آب‌گرفتگی بر اساس دو مدل شاخص آماری و وزن شواهد در حوزه آبخیز مادرسو

نتیجه‌گیری

رحمتی و همکاران (۲۰)، شفاپورتهرانی و همکاران (۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸ و ۲۹) تطابق دارد. به این ترتیب با شناسایی و ارزیابی در حوزه آبخیز مادرسو، توجه به محیط طبیعی و نواحی حساس به وقوع سیل و آب‌گرفتگی در اجرای برنامه‌های عمرانی و فعالیت‌های انسانی و غیره امری ضروری است.

از میان روش‌های موجود برای پتانسیل‌یابی استعداد وقوع سیل روش‌های آماری به دلیل سادگی و دقت قابل قبول بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مطالعه با استفاده از روش شاخص آماری و مدل وزن شواهد و همچنین بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی، به ارزیابی حساسیت وقوع سیل پرداخته است. بر اساس این ارزیابی ۴۹/۹ درصد مساحت حوزه آبخیز مادرسو در مناطقی با استعداد وقوع سیل خیلی زیاد و زیاد و حدود ۵۰/۱ درصد مساحت حوزه در مناطقی با استعداد وقوع سیل متوسط و کم واقع است. در این زمینه صحت و دقت دو مدل بکار گرفته شده با استفاده از منحنی ROC ارزیابی شد، به طوری که دقت مدل شاخص آماری ۸۳٪ و دقت مدل وزن شواهد ۸۰/۷٪ تخمین زده شد. این وضعیت نشان‌دهنده دقت خیلی خوب دو مدل در استعدادیابی وقوع سیل در حوزه آبخیز مادرسو استان گلستان است. دو مدل مزبور ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر، جهت شیب مسطح، تراکم زهکشی بیش از ۰/۳۳ (کیلومتر بر کیلومتر مربع)، فواصل ۲۰۰۰-۵۰۰ متری رودخانه، تپ خاک مالی سول، سنگ‌های دوران کواترنری و همچنین اراضی کشاورزی را با بیشترین وزن‌ها، مهم‌ترین عوامل علتی وقوع رخداد سیل و آب‌گرفتگی حوزه آبخیز مادرسو معرفی می‌کند که با یافته‌های

منابع مورد استفاده

۱. امینی‌جهرمی، ح.، م. ی. ناصری، ف. خرمالی و س. ع. موحدی نائینی. ۱۳۸۸. تغییر در خواص و مشخصات خاک ناشی از موقعیت‌های مختلف اجزا زمین‌نما در خاک‌های با مواد مادری لسی در دو اقلیم متفاوت در استان گلستان. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۶(۱): ۱-۱۷.
۲. بهداروند، ن.، م. کابلی، ب. جباریان امیری، ر. ابراهیم پور، م. اسدی آقبلاغی و ج. ایمانی هرسینی. ۱۳۹۳. شناسایی مناطق پرخطر و عوامل محیطی مؤثر بر حملات گرگ به دام در استان همدان با به‌کارگیری روش مدل‌سازی MAXENT. محیط‌زیست طبیعی، ۳(۳): ۲۴۵-۲۵۲.
۳. پورقاسمی، ح.، ر. ح. ر. مرادی و م. محمدی. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالاتی وزن واقعه. نشریه مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۱(۲): ۶۹-۸۰.
۴. تلوری، ع. ۱۳۷۶. مدیریت مهار سیلاب (کاهش خسارت سیل)، کارگاه آموزشی - تخصصی مهار سیلاب رودخانه‌ها. مرکز

- predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International, 2012. IEEE, pp 895-898.
16. Liu Y, Smedt Fd. 2005. Flood modeling for complex terrain using GIS and remote sensed information. *Water Resources Management*, 19(5): 605-624.
 17. Oh H-J, Lee S. 2010. Assessment of ground subsidence using GIS and the weights-of-evidence model. *Engineering Geology*, 115(1): 36-48.
 18. Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3): 231-259.
 19. Pradhan B. 2010. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2): 1-18.
 20. Rahmati O, Pourghasemi HR, Zeinivand H. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1): 42-70.
 21. Rautela P, Lakhera RC. 2000. Landslide risk analysis between Giri and Tons rivers in Himachal Himalaya (India). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(3-4): 153-160.
 22. Regmi AD, Devkota KC, Yoshida K, Pradhan B, Pourghasemi HR, Kumamoto T, Akgun A. 2014. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2): 725-742.
 23. Rosser JF, Leibovici D, Jackson M. 2017. Rapid flood inundation mapping using social media, remote sensing and topographic data. *Natural Hazards*, 1(1): 1-18
 24. Sanyal J, Lu X. 2004. Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: a review. *Natural Hazards*, 33(2): 283-301.
 25. Skilodimou H, Livaditis G, Bathrellos G, Verikiou-Papaspiridakou E. 2003. Investigating the flooding events of the urban regions of Glyfada and Voula, Attica, Greece: a contribution to Urban Geomorphology. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 85 (2): 197-204.
 26. Tehrany MS, Lee M-J, Pradhan B, Jebur MN, اطلاعات علمی (مجازی)، (۱)۱: ۹۶-۱۰۳.
 ۵. چپی، ک.، ب. بهرام‌نژاد و ح. قادرمزی. ۱۳۸۰. بررسی تأثیر فاکتورهای مورفومتریک مؤثر بر تراکم زهکشی حوزه های آبخیز در اقالیم مختلف استان کردستان. طرح پژوهشی خاتمه یافته. دانشگاه کردستان. ۱۵۰ صفحه.
 ۶. زاهدی، م. و م. بیاتی خطیبی. ۱۳۸۷. هیدرولوژی. چاپ اول، انتشارات سمت، ۱۲۶ صفحه.
 ۷. کریمی، ف. ۱۳۹۱. ارزیابی حساسیت زمین لغزش در حوضه‌های کوهستانی نیمه‌خشک، با استفاده از روش‌های آماری و مدل وزنی شاهد (مطالعه موردی: حوضه زهکشی سعید آباد چای-شمال غرب ایران). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۷(۱۰۶): ۲۱-۴۴.
 ۸. لشکری، ح.، م. اصغری‌پور و ع. ا. متکان. ۱۳۸۵. تحلیل سینوپتیکی عوامل ایجاد بارش‌های سیل‌زا در استان گلستان. پژوهشی مدرس علوم انسانی، ۱۲(۲): ۱۸۱-۲۱۱.
 ۹. ملکیان، آ. ا. افتادگان‌خوزانی و غ. عشورنژاد. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوزه آبخیز اخترآباد با استفاده از روش تحلیل سلسه مراتبی فازی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴(۴): ۱۳۱-۱۵۲.
 ۱۰. هادیانی، م. ا. ۱۳۸۵. نقش تغییر کاربری اراضی بر دبی سیلاب‌های منطقه‌ای (مطالعه موردی در حوزه آبخیز مادرسو). محیط‌شناسی، ۳۳(۴۲): ۹-۱۶.
 11. Campolo M, Soldati A, Andreussi P. 2003. Artificial neural network approach to flood forecasting in the River Arno. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3): 381-398.
 12. Cao C, Xu P, Wang Y, Chen J, Zheng L, Niu C. 2016. Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Methods in Coalmine Subsidence Areas. *Sustainability*, 8(9): 948-960.
 13. Cevik E, Topal T. 2003. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology*, 44(8): 949-962.
 14. Kia MB, Pirasteh S, Pradhan B, Mahmud AR, Sulaiman WNA, Moradi A. 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(1): 251-264.
 15. Lee M-J, Kang J-e, Jeon S. 2012. Application of frequency ratio model and validation for

- Lee S. 2014a. Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environmental earth sciences*, 72(10): 4001-4015.
27. Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 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.
28. Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2014b. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512: 332-343.
29. Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2015a. 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): 1149-1165.
30. Tehrany MS, Pradhan B, Mansor S, Ahmad N. 2015b. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125: 91-101.
31. Van Westen C. 1997. *Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide*. ITC Publication, Enschede, 73-84.
32. Zeinivand H, Ghorbani Nejad S. 2017. Application of GIS based data driven models for groundwater potential mapping in Kuhdasht region of Iran. *Geocarto International* (just-accepted):1-23.



Flood prone areas mapping by using statistical index and weights of evidence models (Case study: Madar Soo watershed, Golestan)

S. Siahkamari¹, H. Zeinivand^{2*}

1. MSc. Student of Watershed Management Engineering, Lorestan University

2. Assoc. Prof. College of Agriculture, Lorestan University

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 December 2016

Accepted 28 January 2017

Available online 11 February 2017

Keywords:

Flood prone areas

Statistical index

Weights of evidence

Madar Soo

ABSTRACT

The aim of this study is preparation of potential flooding maps in Madar Soo watershed in Golestan province. For this end, the statistical index and weights of evidence models, various data layers and geographic information systems were used. The results of the applied models indicated that, among the effective factors for flooding, the elevation lower than 500m, flat slope, drainage density more than 0.33 (km/km²), distance from river of 500-2000m, malicious soil type, quaternary rocks and agricultural land with the greatest weight, were the most important factors in the Madar Soo watershed. The results also showed that 49.9% of the area of the Madar Soo watershed had high and very high potential for flooding, and 50.1% of the study area, had medium and low potential flooding. Validation of the results using Receiver operating characteristic (ROC) curve showed that the statistical index with AUC equal to 83% performed slightly better than the weights of evidence model with AUC equal to 80.7%. These results represent very good accuracy for both models for identification of flood prone areas in the Madar Soo watershed in the Golestan province.

* Corresponding author e-mail address: hzeinivand@gmail.com