مقاله پژوهشی

هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۳۳، سال دهم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۱۴۷-۱۲۷

Hydrogeomorphology, Vol. 10, No. 33, Winter 2023, pp (127-147)

پهنه‌بندی تطبیقی سیلاب در حوضه آبریز چشمه‌کیله تنکابن، شمال ایران

سارا محمدی [۱]، امیر صفاری *[۲]، علی احمدآبادی [۳]، سحر دارابی [۴]

۱- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

۲- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

۳- استادیار گروه جغرافیا دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

۴- دانش‌آموخته‌ی دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه خوارزمی تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۳

چکیده

سیلاب یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که اغلب با تأثیرات عظیم سالانه میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، تعیین استراتژی‌های بهینه برای مدیریت بهینه سیلاب ضروری است. مدل‌های متنوعی برای شناسایی و پهنه‌بندی سیل‌گیری در جهان وجود دارد. در سال‌های اخیر به دلیل وقوع سیلاب‌های مکرر در حوضه‌ی آبریز رودخانه چشمه‌کیله تنکابن و متعاقب آن ایجاد خسارات ناشی از سیلاب، لزوم توجه به پهنه‌بندی خطر سیل‌گیری به‌ویژه در زمین‌های حاشیه رودخانه‌های اصلی حوضه‌ی مورد بررسی بیش از پیش نمایان می‌شود. در بین روش‌های مختلف برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، روش‌های آماری به علت سادگی در عمل و نیز دقت قابل قبول، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. هدف از این پژوهش مقایسه قابلیت اعتماد مدل‌های آنتروپی شانون، نسبت فراوانی و وزن شاهد در زمینه پهنه‌بندی سیل‌گیری حوضه آبریز چشمه‌کیله است. در این تحقیق از معیارهای شیب، طبقات ارتفاعی، جنس خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم آبراهه، NDVI و بارندگی استفاده شده است. احتمال رخداد سیلاب برای هر کلاس از هر پارامتر محاسبه شده است. وزن‌های محاسبه شده برای هر کلاس در نرم‌افزار ARC GIS در لایه‌های مربوطه اعمال شده و نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب منطقه به دست آمد. نقشه‌های نهایی حاصل از اجرای این سه مدل در منطقه به ۳ طبقه کم خطر، متوسط و پرخطر تقسیم شدند و نهایتاً قابلیت اعتماد هر یک از مدل‌ها با استفاده از منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) ارزیابی شدند. نتایج نشان داده است که تکنیک نسبت فراوانی (FR)، وزن شاهد (WOE) و آنتروپی شانون (SE) به ترتیب اولویت، دارای بیشترین دقت در پیش‌بینی وقوع سیلاب هستند.

کلمات کلیدی: سیلاب، نسبت فراوانی (FR)، وزن شاهد (WOE)، آنتروپی شانون (SE)، چشمه‌کیله، شمال ایران.

* نویسنده‌ی مسئول

E-mail:std_MohamadiSara@khu.ac.ir

۱- مقدمه

سیلاب از جمله بلایای طبیعی شناخته شده است که بر اساس گزارش پایگاه داده بین‌المللی مخاطرات در زمینه بلایای طبیعی، در کنار خشکسالی و زلزله بالاترین رتبه را از لحاظ خسارات مالی و جانی به همراه دارد (پایگاه داده بین‌المللی مخاطرات[1]، ۲۰۱۶: ۴). سیلاب یکی از مهمترین مخاطرات ژئومورفولوژیکی حوضه‌های آبخیز می‌باشد (مددی و همکاران، ۱۳۹۷: ۸۵) و یکی از گسترده‌ترین و شایع‌ترین بلایای طبیعی است که به طور فراوان در سرتاسر جهان رخ می‌دهد (پاترا و همکاران[2]، ۲۰۱۵: ۹۶). در طی چندین دهه گذشته سیلاب‌ها منجر به خسارت‌های اقتصادی و تلفات انسانی بسیاری در مناطق مختلف جهان شده است (گیو و همکاران[3]، ۲۰۱۴: ۹۵۵). بر اساس آمار جمع‌آوری شده در طی سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۵ در اثر وقوع سیلاب‌ها، مرگ ۷ میلیون انسان و ۶۰۰ میلیارد دلار خسارت را شاهد بودیم. اما هنوز هم وقوع سیلاب‌های با فراوانی و با شدت زیاد در طی سال‌های اخیر را شاهد هستیم (استفنایدیس و استاتیس[4]، ۲۰۱۳: ۵۷۰ ؛ استفان و همکاران[5]، ۲۱۰۳: ۸۰۴). آنچه بر اهمیت وقوع رخداد سیلاب می‌افزاید قرارگرفتن مراکز انسانی در محدوده‌های سیلابی است، وجود چنین مراکزی در محدوده حوضه‌های سیلابی علاوه بر این که موجب افزایش تولید رواناب می‌گردد باعث بروز خطرات فراوانی نیز می‌شود. خسارات سیلاب به عنوان یک معضل طبیعی زمانی می‌تواند به حداقل برسد که قبل از وقوع آن اقدامات اساسی و برنامه‌ریزی شده برای پیشگیری از تشدید وقوع و کنترل آن به عمل آید. بنابراین اولین قدم جهت مدیریت بهینه و تدوین استراتژی‌های مقابله با این خطر طبیعی و کاهش خسارات ناشی از آن تشخیص مناطق حساس و تهیه نقشه خطر سیلاب می‌باشد (یانگ و همکاران[6]، ۲۰۰۶: ۲۳). سیلاب یا رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌ها، فرایندهای چند بعدی را شامل می‌شود، عوامل آب و هوایی، خصوصیات ژئومتریک حوضه، کاربری اراضی، پوشش سطحی، ویژگی‌های خاک و شرایط پیشین هیدرولوژیک حوضه در آن موثر است (رینهارت و همکاران[7]، ۲۰۱۸: ۴۶). اصولاً بزرگی سیل‌ها و تکرار آنها در طول زمان تابع شدت بارندگی، نفوذپذیری زمین و وضعیت توپوگرافی منطقه است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹: ۸۸). در اغلب سال‌های گذشته، حدود ۷۰ درصد اعتبارات سالانه طرح کاهش اثرهای بلایای طبیعی و ستاد حوادث غیرمترقبه صرف جبران خسارات ناشی از سیلاب شده است. رشد ۲۵۰ درصدی خسارات ناشی از سیلاب در پنج دهه گذشته موید این ادعاست (دمیر و کیسی[8]، ۲۰۱۶: ۶). در سال‌های اخیر ترکیب مدل‌های آماری و احتمالاتی با RS و GIS بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. محققان زیادی مدل‌سازی را توسط مدل‌های پرکاربردی همچون رگرسیون

1- The International Disaster Database
2- Patra & et al.
3- Guo & et al.
4- Stefanidis and Stathis
5- Stephane & et al.
6- Yang & et al.
7- Reinhardt & et al.
8- Demir and Kisi

لجستیک (آلتوانه و همکاران[1]، ۲۰۱۴)، آنتروپی شانون (پورقاسمی و همکاران[2]، ۲۰۱۲)، شبکه عصبی مصنوعی (کیا و همکاران[3]، ۲۰۱۲) و ماشین بردارپشتیبان (تهرانی و همکاران[4]، ۲۰۱۵) نسبت فراوانی (لی و همکاران[5]، ۲۰۱۲) نسبت‌فراوانی و وزن شاهد (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۸) تابع شاهد قطعی (ناپک و همکاران[6]، ۲۰۱۴) تابع شواهد قطعی، نسبت فرکانس و مدل‌های عملگر گامای فازی (رامش و سمیرا[7]، ۲۰۲۰) تابع شواهد قطعی و رگرسیون لجستیک دو جمله‌ای (چاونهاری و همکاران[8]، ۲۰۱۹) در بلایای طبیعی انجام داده‌اند. به دلیل توانایی شناخت دقیق و قدرت پیش‌بینی بهتر، پیش‌بینی نواحی مستعد سیلاب با روش‌های ترکیبی جدید برای مطالعات سیلاب اهمیت دارد. اما در کل هیچ روشی در پیش‌بینی دقیق نواحی مستعد سیلاب کامل نیست.

حوضه آبریز چشمه‌کیله یکی از حوضه‌های آبریز بحرانی در غرب مازندران از نظر مسئله سیلاب است (پورنبی درزی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۸؛ کیا و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۴۰). که در سال‌های اخیر تحت تأثیر سیلاب، خسارت‌های فراوانی را متحمل شده است. تخریب اراضی زراعی و باغی، تلفات دام و خسارت مساکن و همچنین زیرساخت های عمومی مانند شبکه راه‌ها و پل‌های ارتباطی، نمونه‌هایی از تخریب ناشی از سیلاب در این آبخیز است (اداره کل منابع طبیعی استان مازندران- نوشهر،۱۳۹۰). از آنجا که طی سال‌های اخیر، سیلاب خسارت‌های درخور توجهی بر ساکنان آبریز چشمه‌کیله وارد ساخته و عوارض اقتصادی و اجتماعی زیادی بر جوامع شهری و روستایی این آبریز تحمیل کرده است (زیاری و همکاران، ۱۳۹۹؛ نصیری خیاوی و همکاران، ۱۳۹۹؛ رجائی، ۱۳۹۸) به طبع، ضرورت انجام پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. همانطور که بیان شد، سیلاب هر ساله در ایران خسارات مالی و جانی را ببار می‌آورد که وجود این خسارت‌ها ناشی از نبود اطلاعات از مناطق سیل‌گیر و عدم اقدامات اساسی جهت پیشگیری از سیلاب می‌باشد. بنابراین با توجه به این موارد در این پژوهش از مدل آنتروپی شانون، نسبت فراوانی و مدل وزن شاهد برای تهیه‌ی نقشه پهنه‌بندی سیلاب در حوضه رودخانه چشمه‌کیله استفاده شده است.

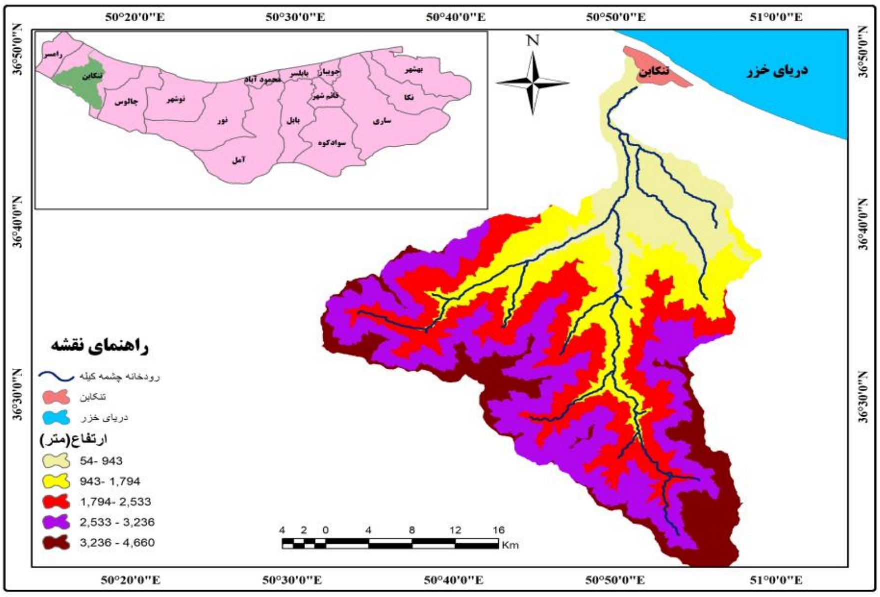
۲-مواد و روش

۲-۱-معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه چشمه‌کیله در غرب استان مازندران واقع در شهرستان تنکابن و در بخش شمالی رشته کوه البرز مرکزی قرار دارد. این محدوده با طول جغرافیایی °۵۰ و"۳۵ دقیقه طول شرقی، به طول تقریبی ۳۰

1- Althuwaynee & et al.
2- Pourghasemi & et al.
3- Kia & et al.
4- Tehrany & et al.
5- Lee & et al.
6- Nampak & et al.
7- Ramesh & Sumaira
8- Chowdhuri & et al.

کیلومتر و عرض جغرافیایی °۳۶ و "۲۱ عرض شمالی به عرض تقریبی ۵۰ کیلومتر گسترده شده است. حوضه رودخانه چشمه‌کیله متشکل از دو زیر حوضه رودخانه دوهزار و سه‌هزار است که در انتهای منطقه چال‌دره به هم پیوسته و رودخانه‌ی چشمه‌کیله را تشکیل می‌دهد، با طی مسافتی حدود ۴ کیلومتر، ولم‌رود در کنار روستای امام زمین به آن پیوسته و سپس با عبور از وسط شهر تنکابن به دریای خزر می‌ریزد. طول رودخانه چشمه‌کیله از مبدأ رودخانه سه‌هزار حدود ۸۰ کیلومتر و از مبدأ رودخانه دوهزار حدود ۵۰ کیلومتر است. مساحت کل حوضه حدود ۹۴۲ کیلومترمربع و بلندترین نقطه ارتفاعی ۴۸۰۰ متر منطبق با علم‌کوه و حداقل ارتفاع ۲۶- متر کنار ساحل دریای کاسپین در شهر تنکابن است. قلمرو مورد مطالعه از بخش شمالی به دریای مازندران، از بخش شرقی به حوضه آبخیر رودخانه نشتارود، از بخش جنوبی به حوضه آبریز رودخانه الموت رود - شاهرود و از بخش غربی به حوضه‌های شیرود و چالکرود محدود می‌گردد (شکل ۱ و ۲).



شکل (۱): موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

Fig (1): The study area

شکل (۲): از راست : تخریب پل ناشی از سیلابی شدن رودخانه. چپ: تخریب خیابان زیرگذر پل چشمه کیله مرکز شهر تنکابن

Figure (2): From the right: The destruction of the bridge caused by the flooding of the river. Left: Demolition of Cheshme Kileh bridge underpass in the center of Tonkabon city

۲-۲-روش تحقیق

روند اجرایی این تحقیق شامل ۴ مرحله اساسی است:

۱. تهیه‌ی نقشه‌ی مرجع سیلاب

۲. استخراج معیارهای مکانی موثر بر سیلاب در منطقه‌ی مورد مطالعه

۳. پهنه‌بندی تطبیقی سیلاب بر اساس مدل‌های WOE, FR و SE

۴. ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های مورد استفاده توسط شاخص‌های آماری مناسب.

نقشه پهنه‌های سیل‌گیر حوضه مورد مطالعه از شرکت آب منطقه‌ای مازندران تهیه شد. از این نقشه به عنوان نقشه مرجع سیلاب در این مطالعه استفاده شد. از ۷۰٪ مساحت پهنه سیلابی منطقه برای مدل‌سازی و از ۳۰٪ مساحت پهنه سیلابی برای سنجش قابلیت اعتماد مدل‌ها استفاده شده است (شکل ۳).

مجموع فاکتورهای موثر بر سیلاب عبارت‌اند از: طبقات ارتفاعی، شیب، خاک، شاخص رطوبت توپوگرافی[1] (TWI)، فاصله از رودخانه، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، تراکم آبراهه، شاخص تراکم پوشش‌گیاهی (NDVI) و بارندگی (تهرانی و همکاران، ۲۰۱۵: ۹۸). هر کدام از این معیارها در قالب نقشه رستری با استفاده از یکسان‌سازی پیکسل‌ها (پیکسل ۱۰ متر) تهیه شدند. لازم به ذکر است که طبقه‌بندی لایه‌ها با توجه به شرایط منطقه مورد

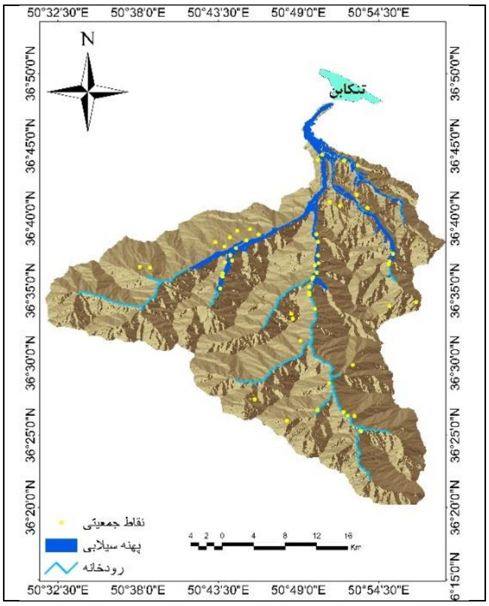
[1]- Topographic wetness index

مطالعه، مطالعه پیشینه تحقیقاتی (بادانگ و همکاران[1]، ۲۰۲۱: وانگ و همکاران[2]، ۲۰۲۲) و سنجش نظرات کارشناسی انجام شد. جدول ۱ منابع داده‌های مورد استفاده در تحقیق را نشان می‌دهد.

جدول (۱): منابع داده‌های مورد استفاده در تحقیق

Table (1): Data sources used in the research

داده	مرجع	مقیاس
نقشه توپوگرافی	سازمان نقشه‌برداری کشور	۱/۲۵۰۰۰
نقشه زمین‌شناسی	سازمان زمین‌شناسی	۱/۱۰۰۰۰۰
تصویر ماهواره‌ای لندست۸ (۲۰۱۸)	Earthexplorer.usgs.gov	۳۰×۳۰



شکل (۳): نقشه پهنه سیلابی منطقه مورد مطالعه

Fig (3): Flood zone map of the studied area

مدل وزن شاهد WOE

روش وزن شاهد یک روش داده محور مورد استفاده برای ترکیب مجموعه داده‌ها است و بر استفاده از فرم خطی از مدل احتمال بیزین برای برآورد اهمیت نسبی شواهد با استفاده از آمار استوار است (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۷۰).

[1]- Nguyen Ba Dung

[2]-Jhih-Huang Wang

Npix1 تعداد پیکسل‌های وقوع سیلاب در هر کلاس، Npix2 (تعداد کل پیکسل‌های سیلاب در هر نقشه-تعداد پیکسل‌های وقوع سیلاب در هر کلاس)، Noix3 (تعداد پیکسل‌های هر کلاس-تعداد پیکسل‌های وقوع سیلاب در هر کلاس) ، Noix4 (تعداد کل پیکسل‌های هر نقشه-تعداد کل پیکسل‌های وقوع سیلاب هر نقشه- تعداد پیکسل‌های هر کلاس+تعداد پیکسل‌های وقوع سیلاب در هر کلاس است (ایلماز و همکاران[1]، ۲۰۱۲: ۲۱۷۰).

$$W_i^{+} = \mathrm{Log}_e \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1}+N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3}+N_{pix4}}} \qquad (۱)$$

$$W_i^{-} = \mathrm{Log}_e \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1}+N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3}+N_{pix4}}} \qquad (۲)$$

وزن مثبت (W^+) نشان می‌دهد که عامل علتی در محل وقوع سیلاب وجود دارد و بزرگی این وزن، همبستگی بین آن عامل و وقوع سیلاب را بیان می‌کند. اما وزن منفی (W^-) بیانگر عدم عامل مورد نظر در محل بروز سیلاب بوده، سطح منفی همبستگی را نشان می‌دهد. اختلاف بین دو وزن مثبت و منفی (Wf) بزرگی ارتباط مکانی عامل علتی و وقوع سیلاب را نشان می‌دهد (سونگ[2] و همکاران، ۲۰۱۲: ۹۸۵).

$$Wf = W_i^{+} - W_i^{-} \qquad (۳)$$

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

مدل آنتروپی شانون (SE)

از مهم‌ترین مزیت‌های این روش می‌توان به در نظر گرفتن تعداد زیادی شاخص کمی و کیفی به طور همزمان در ارزیابی پتانسیل سیلاب، سهولت کاربرد، امکان تغییر اطلاعات ورودی و ارائه پهنه‌بندی جدید بر اساس این اطلاعات است، نتایج به دست آمده به صورت ضریب اولویت بیان می‌شود که این مقادیر وزن نهایی راهبردها در

1- Yilmaz & et al.
2- Song & et al.

اولویت‌بندی است، در نظر گرفتن همزمان ارزش هر شاخص در هر واحد کاری و اولویت شاخص‌ها نسبت به هم که سبب دستیابی به نتایج با ضریب اطمینان بیشتر می‌شود. در آنتروپی، متغیرهایی با بیشترین تأثیر در وقوع یک رخداد تعیین می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{sj} P_{ij}} \quad (۴)$$

$$H_j = \sum_{j=1}^{sj} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}) \quad (۵)$$

$$J = 1, \ldots, n \quad (۶)$$

$$H_{j\,max} \log_2 Sj \quad (۷)$$

$$Sj\text{-Number of Class} \quad (۸)$$

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{j\,max}} \quad (۹)$$

$$I = (0,1), j\text{-}1, \ldots .n \quad (۱۰)$$

$$W_J = I_J \, P_{ij} \quad (۱۱)$$

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

مدل نسبت فراوانی (FR)

این مدل، ابزاری مناسب برای ارزیابی مکانی برای درک رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته از جمله نقشه‌های طبقه‌بندی شده است. این روش برای مطالعات سیلاب می‌تواند سطح همبستگی بین موقعیت‌های سیلاب را مشخص کند. هر قدر مقدار این نسبت در یک طبقه مشخص بزرگ‌تر باشد، بیانگر اهمیت یا نقش بیشتر آن کلاس در عامل موثر در وقوع سیلاب است. به طور کلی، عدد یک برای FR نشان‌دهنده‌ی همبستگی متوسط نقاط سیل‌گیر و عوامل مؤثر بر آن است و اگر بزرگ‌تر از یک باشد، همبستگی بالایی وجود دارد، ارتباط کمتر برابر با ارزش کمتر از یک است (انتظاری و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۵۱).

$$FR = \frac{E/F}{M/L} \quad (12)$$

که در آن E تعداد نقاط سیلاب در کلاس مورد نظر است. F تعداد کل رخدادهای سیلاب در منطقه مطالعه شده است. M تعداد پیکسل‌های کلاس مورد نظر و L تعداد کل پیکسل‌های مربوط به فاکتور مربوطه مثلا شیب در منطقه مطالعه شده است. نهایتا نتایج فاکتورها در محیط نرم افزار ArcGIS باهم جمع می‌شوند.

$$FSI = \sum_{R=1}^{R=n} FR \quad (13)$$

۳-یافته‌ها و بحث

۳-۱-تشریح عوامل موثر در سیل‌خیزی حوضه‌ی‌آبریز

توپوگرافی و شیب: به عنوان یکی از پارامترهای تشدیدکننده نقش مهمی را در تشدید سیلاب ایفا می‌کند و برای تشخیص نواحی مستعد سیلاب تعیین‌کننده است. پارامتر توپوگرافی تأثیر مستقیمی بر شدت رواناب و اندازه‌ی جریان دارد؛ از طرف دیگر نواحی مستعد سیلاب رودخانه اساساً ارتفاع کمتر و نیز شیب توپوگرافی ناچیزی دارند (کیا و همکاران،۱۳۹۹: ۲۴۵). مدل رقومی ارتفاع منطقه از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ با اندازه پیکسل ۱۰ متری در محیط نرم‌افزاری ArcGIS تهیه و مبنای دو زیرمعیار ارتفاع و شیب قرار گرفت. نهایتاً طبقات ارتفاعی به ۷ کلاس و شیب نیز به ۷ کلاس طبقه‌بندی شدند.

فاکتور هیدرولوژی در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه دارای ۴ معیار بارش، فاصله از رودخانه و تراکم شبکه زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی است.

فاصله از رودخانه: فاصله از رودخانه نقش اساسی را در پخش و گستردگی سیلاب در منطقه دارد. برای تهیه لایه فاصله از رودخانه، از ابزار فاصله اقلیدوسی در نرم افزار ArcGIS10.2 استفاده شد و نهایتاً لایه رستر پیوسته فاصله‌ای به ۶ کلاس فاصله از رودخانه تقسیم‌بندی شد.

بارش: جهت مطالعه‌ی بارش حوضه آبریز از داده‌های بارش ۵ ایستگاه باران‌سنجی شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران استفاده شد. از روش درون‌یابی IDW برای درون‌یابی لایه بارندگی استفاده شد. لایه‌ی بارندگی منطقه پس از درون‌یابی به ۵ کلاس طبقه‌بندی شد.

تراکم شبکه زهکشی: آبراهه‌ها در حوضه، عمل تخلیه جریان‌های سطحی را انجام می‌دهند و با فاصله گرفتن از آن، خطر وقوع سیلاب کاهش می‌یابد. اگر مجموع طول تمام آبراهه‌های حوضه، اندازه‌گیری و بر مساحت حوضه

تقسیم شود، عدد به دست آمده، تراکم شبکه زهکشی است. شاخص جریان تجمعی با استفاده از دستور Flow accumulation در محیط نرم‌افزاری ArcMap اجرا شده است.

شاخص رطوبت توپوگرافی: فاکتورهایی مانند شاخص رطوبت توپوگرافی از DEM منطقه‌ی مورد مطالعه تهیه شدند. TWI به طور گسترده به عنوان تأثیر توپوگرافی بر روی موقعیت و اندازه تولید رواناب به کار گرفته شده است (فرناندز[1] و لوتز، ۲۰۱۲: ۹۵).

$$TWI= \ln(AS/\tan\beta) \quad (۱۴)$$

که در آن As مساحت ویژه حوضه آبریز (m^2/m) و β (radian) زاویه شیب به درجه می‌باشد. لایه TWI تهیه و به ۷ کلاس طبقه‌بندی شد.

زمین‌شناسی: نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی مبنای تهیه معیار زمین‌شناسی است. واحدهای اصلی زمین‌شناسی حوضه شامل آذرین کرتاسه، گابرو، سازند شمشک، روته، الیکا، مبارک، کرج، باروت، دورود، و بازالت‌های آتشفشانی می‌باشد.

ویژگی‌های سنگ‌شناسی در میزان نفوذپذیری آب در درون زمین و یا آبگذری مستقیم و در نتیجه‌ی تعادل جریان رودخانه و یا سیل‌خیزی حوضه تأثیر بسزایی دارند (کیا و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۴۷). به طور کلی، زمین شناسی نقش عمده و اساسی را در مطالعات سیلاب، به علت حساسیت متفاوت واحدهای مختلف لیتولوژی، بازی می‌کند. (میلر[2] و همکاران، ۱۹۹۱: ۵۷۵) بیان کرده‌اند که لیتولوژی نقش اساسی در تغییرات زمانی و مکانی هیدرولوژی حوزه و تولید رسوب دارد. مناطق با سنگ‌های مقاوم و یا با خاک‌های نفوذپذیر، دارای تراکم آبراهه پایین می‌باشد (دی[3] و همکاران، ۲۰۰۱: ۳۸۷). لایه‌ی زمین‌شناسی منطقه به ۱۸ گروه کلاس‌بندی شد. به دلیل عدم پوشش لایه‌های سیل‌گیری در برخی از واحدهای لیتولوژی و کاربری اراضی، امتیاز این واحدها در اجرای مدل‌ها صفر بوده و از شرح این واحدها در جدول خودداری شده است.

کاربری اراضی: کاربری و نوع پوشش زمین یک فاکتور کلیدی وقوع سیلاب است. پوشش اراضی روی جریان رودخانه و وقوع سیلاب به روش‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. کاربری اراضی فاکتوری تأثیرگذار در کند یا تندشدن شدت سیلاب است. اراضی دارای پوشش درخت، خطرپذیری کمتری نسبت به زمین‌های بدون پوشش‌گیاهی داشته و کاربری‌های مسکونی فاقد زهکشی مناسب با افزایش حجم رواناب و آبگرفتگی سطح معابر مطابقت دارد (کیا و همکاران، ۱۳۹۹). نقشه کاربری اراضی حوضه تنکابن در قالب ۱۲ نوع کاربری شامل کشاورزی، اراضی

[1]- Fernandez & Lutz
[2]- Miller
[3]- Dai

بایر، جنگل متراکم، جنگل متوسط، جنگل کم تراکم، کشاورزی/ باغ، مسکونی، مراتع درجه یک، مراتع درجه دو، مراتع ضعیف، باغ، شهری با از اداره منابع طبیعی استان مازندران تهیه شد (شکل ۴: E).

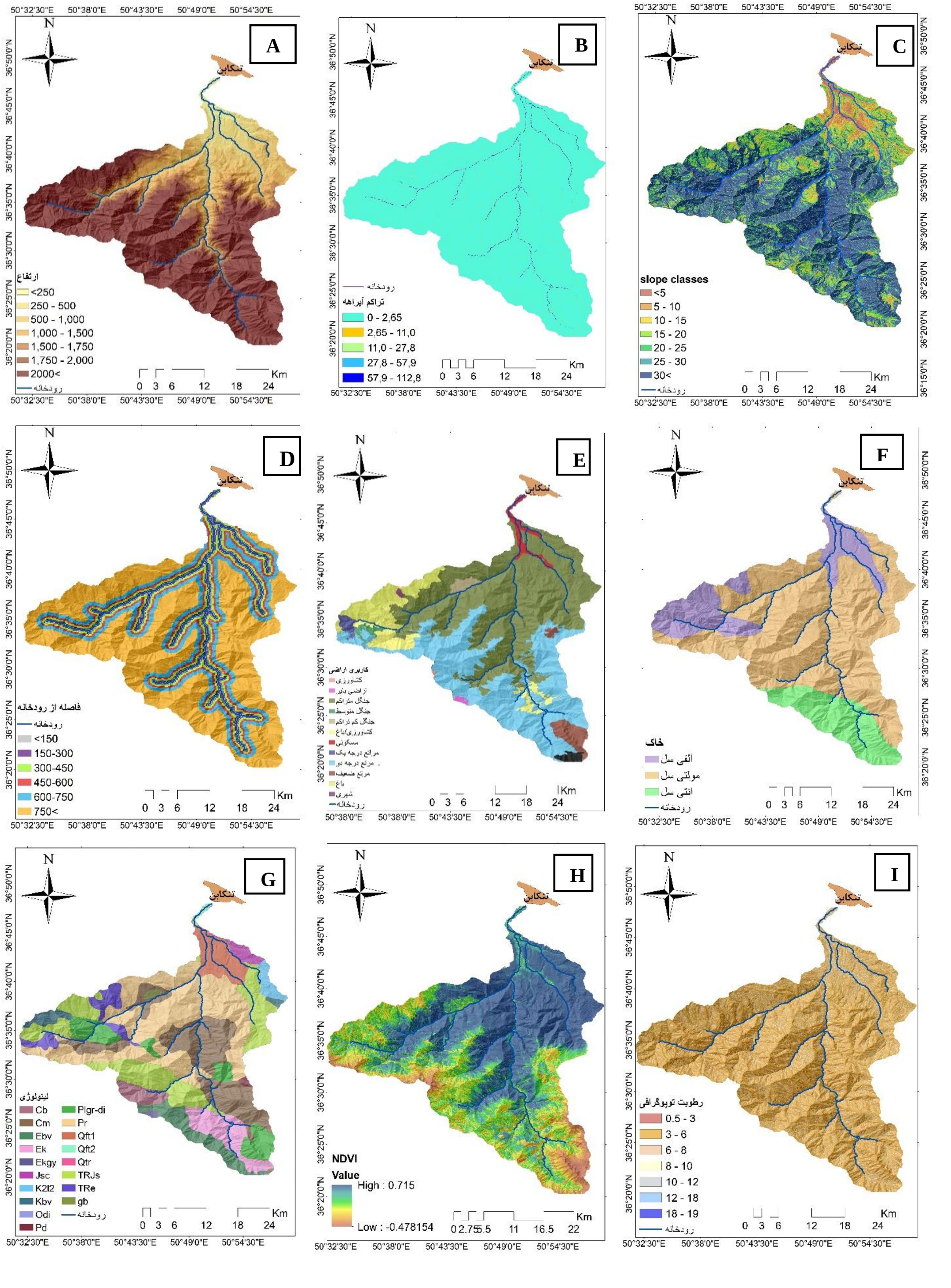
شاخص NDVI: NDVI یک شاخص نرمال شده پوشش‌گیاهی است که نسبت انعکاس امواج مادون قرمز نزدیک (NIR) به باند قرمز (RED) را نشان می‌دهد، که طراحی شده برای استاندارد کردن ارزش شاخص پوشش‌گیاهی که بین ۱+ و ۱- هستند، و عدد صفر به معنی عدم پوشش‌گیاهی و همچنین مقادیر منفی برای نشان دادن سطوحی به غیر از پوشش‌گیاهی مانند آب و برف است (سیلوس و همکاران[1]، ۲۰۰۶) با توجه به نقشی که تراکم پوشش‌گیاهی در میزان نفوذ آب و تعیین ضریب هرزآب دارد، جزء عوامل تعیین‌کننده در پتانسیل سیل‌خیزی یک محدوده است؛ تهیه لایه‌ی NDVI با استفاده از تصویر سنجنده OLI مربوط به ماهواره لندست ۸ تهیه شد (شکل۴: H).

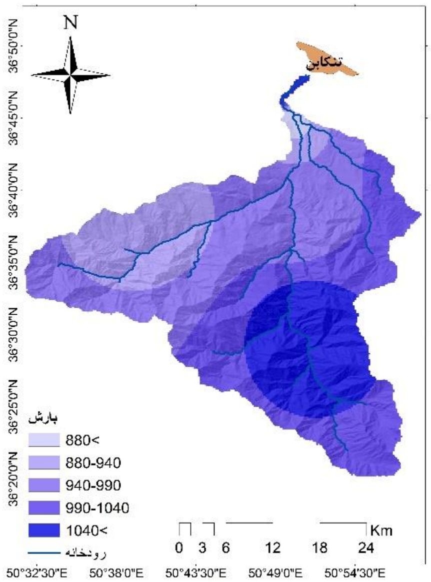
$$NDVI=(IR-R)/(IR+R) \qquad (۱۵)$$

که IR باند مادون قرمز نزدیک (باند ۵)، R باند قرمز (باند۴) و NDVI شاخص تفاضل نرمال شده‌ی پوشش گیاهی است.

خاک: خاک‌ها از نظر نفوذپذیری و تخلخل در تمرکز رواناب و وقوع سیلاب مؤثر هستند. خاک‌های منطقه مورد مطالعه به سه رده آلفی سول، آنتی سول و مونتی‌سول تقسیم‌بندی شده است. شکل‌های ۴ نقشه‌های پارامترهای مورد استفاده در مدل WOE، SE و FR به ترتیب A تا J شامل نقشه ارتفاع، تراکم آبراهه، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، خاک، لیتولوژی، NDVI، رطوبت توپوگرافی و بارش را نشان می‌دهند.

[1]- Silleos

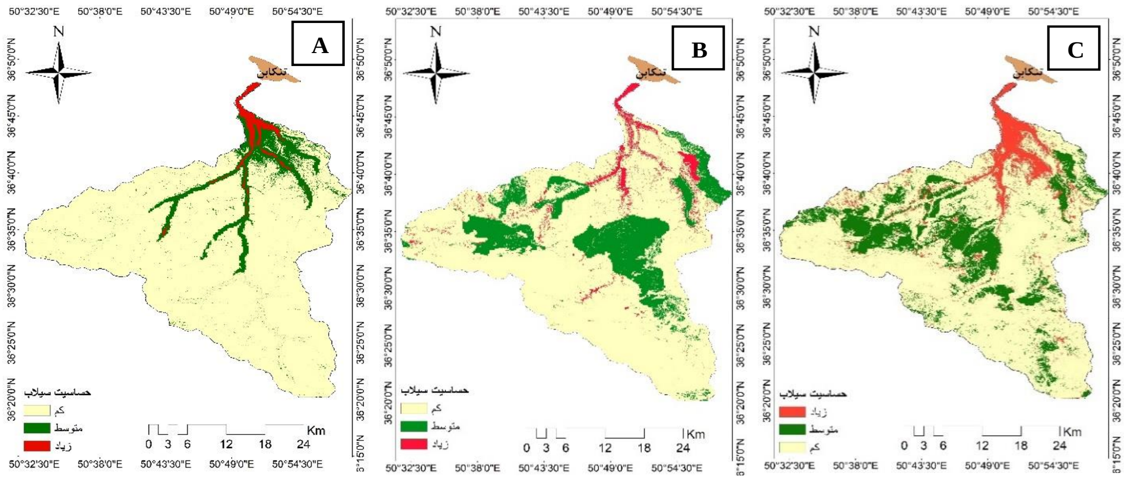

A
ارتفاع
<250
250 - 500
500 - 1,000
1,000 - 1,500
1,500 - 1,750
1,750 - 2,000
2000<
رودخانه
B
رودخانه
تراکم آبراهه
0 - 2,65
2,65 - 11,0
11,0 - 27,8
27,8 - 57,9
57,9 - 112,8
C
slope classes
<5
5 - 10
10 - 15
15 - 20
20 - 25
25 - 30
30<
رودخانه
D
فاصله از رودخانه
رودخانه
<150
150-300
300-450
450-600
600-750
750<
E
کاربری اراضی
F
خاک
آلفی سل
مولتی سل
انتی سل
رودخانه
G
لیتولوژی
Cb
Cm
Ebv
Ek
Ekgy
Jsc
K2l2
Kbv
Odi
Pd
Plgr-di
Pr
Qft1
Qft2
Qtr
TRJs
TRe
gb
رودخانه
H
NDVI
Value
High : 0.715
Low : -0.478154
I
رطوبت توپوگرافی
0.5 - 3
3 - 6
6 - 8
8 - 10
10 - 12
12 - 18
18 - 19
رودخانه
تنکابن
N
Km



شکل (۴): نقشه پارامترهای مورد استفاده در مدلWOE، SE و FR به ترتیب A تا J شامل نقشه ارتفاع، تراکم آبراهه، شیب، فاصله از رودخانه، کاربری اراضی، خاک، لیتولوژی، NDVI ، رطوبت توپوگرافی و بارش

Fig (4): Map of the parameters used in WOE, SE and FR models, in order from A to J, including height map, watercourse density, slope, and distance from the river, land use, soil, lithology, NDVI, topographic humidity and precipitation

در پژوهش حاضر از سه روش آنتروپی شانون، وزن شاهد و نسبت فراوانی و نیز بهره‌گیری از GIS برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل‌گیری منطقه استفاده شده است. نقشه‌های نهایی حاصل از اجرای این سه مدل در منطقه به ۳ طبقه کم خطر، متوسط و پرخطر تقسیم شدند (شکل ۵). در این پژوهش ۷۰٪ مساحت پهنه سیلابی برای مدل‌سازی و ۳۰٪ مساحت پهنه سیلابی برای سنجش قابلیت اعتماد مدل‌ها با استفاده از منحنی (ROC) استفاده شده است. بیشترین مساحت از منطقه‌ی مطالعاتی در سه مدل در طبقه‌ی سیل‌گیری کم قرار دارند؛ این طبقه در مدل شانون، نسبت فراوانی و وزن شاهد به ترتیب ۶۸۷، ۸۰۲ و ۷۸۵ کیلومترمربع گسترش دارد که معادل ۷۳٪ ، ۸۶٪ و ۸۴٪ از کل منطقه است. طبقات با پتانسیل سیل‌گیری زیاد در مدل شانون، نسبت فراوانی و وزن شاهد به ترتیب ۵۹، ۱۸ و ۱۸ کیلومترمربع که معادل ۶٪، ۲٪ و ۲٪ درصد از مساحت منطقهٔ مطالعاتی می‌شود؛ طبقات با پتانسیل سیل‌گیری متوسط در مدل شانون، نسبت فراوانی و وزن شاهد به ترتیب ۱۸۴، ۱۱۰ و۱۲۷ کیلومترمربع که معادل ۱۹٪، ۱۱٪ و ۱۳٪ درصد از مساحت منطقه‌ی مطالعاتی می‌شود.



شکل (۵): نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب (A) مدل نسبت فراوانی، (B) وزن شاهد (C) آنتروپی شانون

Fig (5): Flood sensitivity maps (A) Frequency ratio model, (B) Control weight (c) Shannon's entropy

جدول (۲): رابطه‌ی مکانی بین فاکتورهای موثر بر وقوع سیل

Table (2): Spatial relationship between factors affecting the occurrence of floods

فاکتورهای موثر	فاصله طبقه	پیکسل سیلاب (٪)	پیکسل طبقات(٪)	RF	FR	PR	WOE	SE
	<۲۵۰	۰,۲۶۰	۰/۰۱۵	۰/۶۳۹	۰/۵۴۱		۱/۲۳۵	
	۲۵۰-۵۰۰	۰/۲۵۱	۰/۰۵۴	۰/۱۷۳	۰/۱۴۶		۰/۶۶۷	
	۵۰۰-۱۰۰۰	۰/۳۴۵	۰/۰۹۷	۰/۱۳۱	۰/۱۱۱		۰/۵۴۸	
ارتفاع (متر)	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۰/۱۱۸	۰/۱۰۳	۰/۰۴۲	۰/۰۳۶	۲/۷۹	۰/۰۵۹	۰/۱۰۱
	۱۵۰۰-۱۷۵۰	۰/۰۲۳	۰/۰۶۲	۰/۰۱۳	۰/۰۱۱		-۰/۴۳۶	
	۱۷۵۰-۲۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۷۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰		-۰/۴۳۶	
	۲۰۰۰<	۰	۰/۵۹۶	۰	۰		-۰/۴۳۶	
	آلفی سل	۰/۴۶۹	۰/۶۸۰	۰/۱۵۲	۰/۰۲۱		-۰/۱۶۱	
خاک	مولتی سل	۰/۵۳۰	۰/۱۳۸	۰/۸۴۷	۰/۱۲۰	۲/۰۳	۰/۵۸۳	۰/۰۸۲
	آنتی سل	۰	۰/۱۸۰	۰	۰		۰	
	<۵	۰/۳۰۲	۰/۰۲۹	۰/۵۷۸	۰/۳۲۵		۱/۰۱۴	
	۱۰-۵	۰/۱۶۶	۰/۰۴۷	۰/۱۹۴	۰/۱۰۹		۰/۵۳۹	
	۱۵-۱۰	۰/۱۱۱	۰/۰۶۶	۰/۰۹۴	۰/۰۵۳		۰/۲۲۶	
شیب	۲۰-۱۵	۰/۰۹۱	۰/۰۹۶	۰/۰۵۲	۰/۰۲۹	۲/۴۳	-۰/۲۲۶	۰/۱۰۹
	۲۵-۲۰	۰/۰۷۳	۰/۱۲۰	۰/۰۳۴	۰/۰۱۹		-۰/۲۱۲	
	۳۰-۲۵	۰/۰۷۱	۰/۱۶۵	۰/۰۲۴	۰/۰۱۳		-۰/۳۶۱	
	۳۰<	۰/۱۸۲	۰/۴۷۳	۰/۰۲۱	۰/۰۱۲		-۰/۴۱۵	

ادامه‌ی جدول (۲):

Con. Table (2):

فاکتورهای موثر	فاصله طبقه	پیکسل سیلاب (٪)	پیکسل طبقات(٪)	RF	FR	PR	WOE	SE
TWI	۰/۵ -۳	۰/۰۱۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۰	۰/۰۱۱	۱/۳۳	-۰/۴۴۸	۰/۱۱۷
	۶-۳	۳/۵۶۸	۰/۶۷۷	۰/۰۶۵	۰/۰۲۳		-۵/۲۷ ۰/۱۴۲	
	۸-۶	۰/۳۰۸	۰/۲۲۲	۰/۱۱۹	۰/۰۴۳		۰/۳۳۳	
	۱۰-۸	۰/۱۰۲	۰/۰۴۷	۰/۱۸۶	۰/۰۶۷		۰/۴۷۷	
	۱۲-۱۰	۰/۰۴۲	۰/۰۱۴	۰/۲۵۹	۰/۰۹۴		۰/۴۷۷	
	۱۸-۱۲	۰/۰۲۴	۰/۰۰۶	۰/۳۳۷	۰/۱۲۳		۰/۴۷۷	
فاصله از رودخانه	۱۵۰>	۰/۶۳۴	۰/۰۵۴	۰/۶۵۰	۰/۳۶۴	۲/۸۳	۱/۰۶۲	۰/۰۹۵
	۳۰۰-۱۵۰	۰/۲۵۳	۰/۰۵۰	۰/۲۸۱	۰/۱۵۷		۰/۶۹۹	
	۴۵۰-۳۰۰	۰/۰۹۷	۰/۰۹۳	۰/۰۵۸	۰/۰۳۲		۰/۰۱۵	
	۶۰۰-۴۵۰	۰/۰۱۱	۰/۰۸۶	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴		۰/۰۱۵	
	۷۵۰-۶۰۰	۰/۰۰۳	۰/۱۵۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰		-۰/۸۷۸	
	۷۵۰<	۰	۰/۵۵۵	۰	۰		-۱/۶۲۹	
بارش	۸۸۰<	۰/۰۷۴	۰/۰۰۴	۰/۵۸۷	۰/۵۷۰	۲/۵۲	۱/۲۵۷	۰/۰۹۸
	۹۴۰-۸۸۰	۰/۱۹۹	۰/۰۱۸	۰/۳۴۴	۰/۳۳۴		۱/۰۲۵	
	۹۹۰-۹۴۰	۰/۰۸۳	۰/۱۱۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۲		-۰/۱۳۹	
	۱۰۴۰-۹۹۰	۰/۵۳۰	۰/۵۰۴	۰/۰۳۴	۰/۰۳۳		۰/۰۲۱	
	۱۰۴۰<	۰/۱۱۱	۰/۳۵۷	۰/۰۱۰	۰/۰۰۹		-۰/۵۰۷	
تراکم رودخانه	۰ -۲/۶۵	۰/۹۹۰	۰/۹۹۳	۰/۱۵۱	۰/۰۳۱	۱/۰۴	۰/۰۰۱	۰/۱۱۰
	۲/۶۵- ۰/۱۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۱۹۳	۰/۰۴۰		۰/۱۰۳	
	۰/۱۱- ۲۷/۸	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۲۶۳	۰/۰۵۴		۰/۲۳۸	
	۲۷/۸- ۵۷/۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۹۰	۰/۰۸۰		۰/۴۰۹	
	۵۷/۹- ۱۱۲/۸	۰	۵/۱۸۲	۰	۰		۰	
لیتولوژی	Cb	۰/۱۰۰	۰/۱۶۹	۰/۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۹۷	-۰/۲۲۷	۰/۰۷۳
	Cm	۰/۲۰۸	۰/۲۹۵	۰/۰۰۰	۰/۰۲۲		-۰/۱۵۱	
	Ebv	۰/۰۵۷	۰/۰۰۳	۰/۰۱۰	۰/۵۲۹		۱/۲۲۵	
	Ek	۰/۳۷۴	۰/۰۰۰	۰/۹۷۷	۰/۰۰۴		۳/۱۹۳	
	Ekgy	۰/۰۲۹	۰/۰۵۲	۰/۰۰۰	۰/۰۱۷		-۰/۲۵۶	
	Jsc	۰/۰۱۱	۰/۰۳۷	۰/۰۰۰	۰/۰۰۹		-۰/۵۱۱	
	K212	۰/۲۱۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۰	۰/۵۰۳		۱/۲۰۳	
	Kbv	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۶		-۰/۶۷۳	
کاربری اراضی	کشاورزی	۰/۰۲۸	۰/۰۶۲	۰/۰۰۱	۰/۰۱۴	۱	-۰/۳۴۰	۰/۰۹۰
	اراضی بایر	۰/۰۱۶	۰/۰۲۶	۰/۰۰۱	۰/۰۱۹		-۰/۱۹۹	

ادامه‌ی جدول (۲):
Con. Table (2):

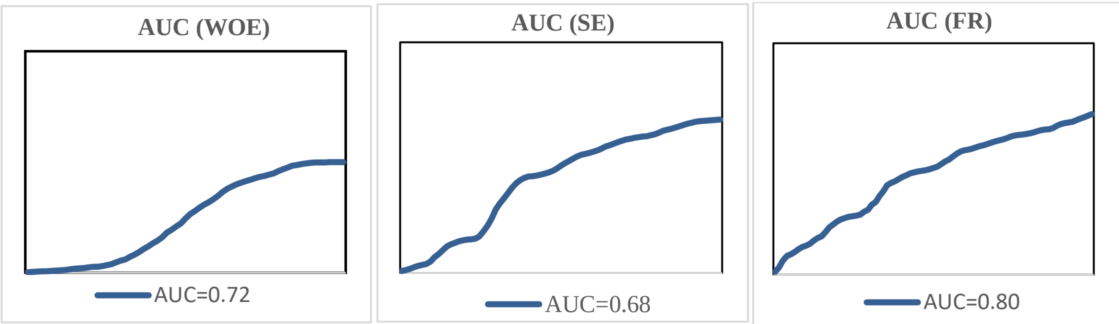
فاکتورهای موثر	فاصله طبقه	پیکسل سیلاب (٪)	پیکسل طبقات(٪)	RF	FR	PR	WOE	SE
کاربری اراضی	جنگل متراکم	۰/۳۰۴	۰/۰۰۱	۰/۳۸۴	۰/۰۰۱۲		۲/۲۴۳	
	جنگل متوسط	۰/۶۵۰	۰/۰۰۲	۰/۶۱۳	۰/۰۰۰۱		۲/۴۴۶	
NDVI	<۰/۰۳۳	۰/۰۰۸	۰/۰۴۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶	۱/۴۹	-۰/۶۷۴	۰/۱۱۹
	۰/۰۳۳- ۰/۹۲	۰/۰۱۷	۰/۰۷۴	۰/۰۴۲	۰/۰۰۷		-۰/۶۲۸	
	۰/۰۹۲- ۰/۲۰	۰/۰۲۶	۰/۱۰۴	۰/۰۴۶	۰/۰۰۸		-۰/۵۹۰	
	۰/۲۰- ۰/۳۱	۰/۰۵۷	۰/۱۲۱	۰/۰۸۵	۰/۰۱۴		-۰/۳۲۳	
	۰/۳۱- ۰/۴۳	۰/۱۱۶	۰/۱۱۷	۰/۱۷۷	۰/۰۳۱		-۰/۰۰۶	
	۰/۴۳- ۰/۵۶	۰/۲۲۲	۰/۱۰۵	۰/۳۸۱	۰/۰۶۶		۰/۳۲۵	
	۰/۵۶- ۰/۷۱	۰/۵۴۹	۰/۴۳۳	۰/۲۲۸	۰/۰۳۹		۰/۱۰۳	

جدول (۳): مساحت کلاس‌های سیل‌گیری در حوضه مورد مطالعه
Table (3): Area of flood susceptibility classes in the studied basin

	مدل WOE		مدل FR		مدل SE	
طبقات	مساحت طبقات (KM^2)	مساحت (٪)	مساحت طبقات (km^2)	مساحت (٪)	مساحت طبقات (km^2)	مساحت (٪)
زیاد	۱۸/۵۴	۱/۹۹	۱۸/۱۸	۱/۹۵	۵۹/۰۰۸	۶/۳۴
متوسط	۱۲۷/۵۶	۱۳/۷۱	۱۱۰/۲۳	۱۱/۸۵	۱۸۴/۳۲	۱۹/۸۱
کم	۷۸۵/۱۹	۸۴/۴۲	۸۰۲/۹۰	۸۶/۳۳	۶۸۷/۱۸	۷۳/۸۹

۲-۳- اعتبارسنجی نقشه پتانسیل سیلاب(ارزیابی مدل‌ها)

روش منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) یکی از پرکاربردترین روش‌ها در زمینه اعتبارسنجی می‌باشد، از مهم‌ترین مزیت‌های این روش این است که کارایی مدل‌ها به صورت کمی بیان می‌شود. مساحت زیر منحنی (AUC) بیانگر میزان دقت نقشه نهایی به صورت کمی است (طهماسبی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵: ۸۷). هرچه سطح زیر منحنی بیشتر باشد، کارایی مدل بیشتر است. در این پژوهش کارایی مدل‌های اجرا شده مقایسه و در نهایت بهترین مدل جهت انجام تحقیقات آتی انتخاب گردید. در بهترین شرایط و یک حالت ایده‌آل مقدار زیرمنحنی برابر یک خواهد بود. بیشترین صحت‌سنجی با منحنی (AUC) برای این منطقه به مدل نسبت فراوانی (۰/۸۰) اختصاص داشت و بعد از آن وزن شاهد (۰/۷۲) و آنتروپی شانون (۰/۶۸)؛ مناسب این منطقه معرفی شدند (شکل۶).



شکل (۶): منحنی‌های AUC
Fig (6): AUC curves

۴-نتیجه‌گیری

وقوع سیل پدیده‌ی بسیار پیچیده‌ای است که همواره محققان را از نقاط مختلف جهان برای درک و بررسی مکانیسم‌های پیشگیری و مدیریت آن جذب می‌کند. امروزه استفاده از علوم جدید به ویژه تکنیک‌های سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) به برنامه‌ریزان کمک می‌نماید تا ارزیابی سریعی از پتانسیل مخاطرات طبیعی از جمله سیل را در حداقل زمان داشته باشند؛ لـذا تصـاویر مـاهواره‌ای و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای شناسایی مناطق سیل‌گیر، تعیین گستره سیل، پهنه‌بندی مناطق سیل‌گیر و برآورد خسارات وارده در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طول چند دهه گذشته، روش‌های متعددی برای بررسی خطرات سیل و ارزیابی ریسک، استفاده شده است. با این حال، هر گونه پیش‌بینی دقیق مناطق مستعد سیل، عمدتاً به دلیل ماهیت پیچیده و پویای سیل، کار دشواری در نظر گرفته می‌شود. پهنه‌بندی سیلاب در منطقه‌ی سیل‌خیز ابزاری پایه‌یی برای برنامه‌ریزان برای دادن الگوهای مناسب فعالیت و زیست با کمترین اندازه‌ی خطر است و یکی از روش‌های مدیریتی مواجهه با سیل است که اطلاعات ارزشمندی از طبیعت سیلاب‌ها و اثر آن بر زمین‌های دشت سیلابی و تعیین حریم رودها می‌دهد. پهنه‌بندی خطر سیل ابزاری پایه‌یی برای کاستن از خطر سیل و وسیله‌یی قانونی در دست مسئولان برای مهارکردن و مدیریت کردن کاربری زمین، و برنامه‌های توسعه‌ی همزمان با کاستن از خطر سیل، و حفاظت محیط زیست است. در سال‌های اخیر به دلیل وقوع سیلاب‌های مکرر در حوضه‌ی آبریز رودخانه چشمه‌کیله و متعاقب آن ایجاد خسارات ناشی از سیل، لزوم توجه به پهنه‌بندی خطر سیل‌خیزی حوضه‌ی مورد بررسی بیش از پیش نمایان می‌شود. در بین روش‌های مختلف برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیل، روش‌های آماری به علت سادگی در عمل و نیز دقت قابل قبول، بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند. در پژوهش حاضر از سه روش آنتروپی شانون، وزن شاهد و نسبت فراوانی و نیز بهره‌گیری از GIS برای تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل‌گیری استفاده شده است. نقشه‌های نهایی حاصل از اجرای این سه مدل در منطقه به ۳

طبقه با خطرپذیری کم، متوسط و زیاد تقسیم شدند. با توجه به این نقشهها مشاهده میشود که خروجی حوضهی آبریز چشمهکیله در طبقه با خطر سیلخیزی زیاد قرار گرفته است که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد و آنچه که به عنوان نقشهی نهایی پهنهبندی پتانسیل سیلخیزی در این مطالعه ارائه شده است با نتایج مطالعات کیا و همکاران (۱۳۹۹) رحمانی و همکاران (۱۳۹۸) همخوانی دارد. پهنههایی که به دلیل تراکم پوششگیاهی بالا، دوری از مسیر آبراهههای اصلی و تراکم کم شبکهزهکشی، پوشش خاک متوسط تا ضخیم و همچنین ارتفاع و شیب کم و قرار گرفتن در دشتها، پتانسیل سیلگیری کمتری دارند. طی سالهای اخیر فعالیتهایی همچون جنگلتراشی، تسطیح اراضی، تغییر کاربری اراضی، حذف پوششگیاهی متراکم، تعرض در حریم رودخانهها و فعالیتهای معدنی مرتبط با شن و ماسه در مسیر رودخانه موجب شده است تا برخی اراضی که پتانسیل کمتری در برابر سیلگیری داشتهاند، جزو اراضی با پتانسیل سیلگیری قرار گیرند؛ بنابراین، این پهنهها از نظر مدیریت آبخیزداری باید مورد توجه ویژه باشند.

۵- منابع

Entezari, M., Jalilian, T., & Darvish Khatouni, J. (2019). Zoning of flood susceptibility map using performance evaluation of frequency ratio and weight of evidence methods (Kermanshah province). *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 6 (4): 143-160. (In Persian)

Kia, A., Khaledi, S., & Janbazghobadi, Gh. (2021). Determination of flood potential effective factors in hydrological homogenous regions, (Case study: Se-Hezar and Do-Hezar watersheds Cheshmehkileh Tonekabon), Vol. 10, Issue 38-Serial Number 38, Pages 235-258. (In Persian)

Mohammadi, M., A., Mohammadi, F., Fakherifard, A., & Bijanvand, S. (2020). Derivation of Rule Curve for Flood Risk Zone A Case Study: Baranduz-Chay River, Volume 7, Issue 22 - Serial Number 22, Pages 87-108, (In Persian)

Madadi, A., Piroozi, E., & Aghayary, L. (2019). Flood Hazard Zonation by Combining SCS-CN and WLC Methods (Case study: Khiyave Chay Meshkinshahr Basin), Volume 5, Issue 17 - Serial Number 17 Pages 85-102. (In Persian)

Nasiri Khiavi, A., Vafakhah, M., & Sadeghi, S., H. (2021). The Impressibility of Flood Regime from Rainfall and Land Use Changes in Cheshmeh Kileh Watershed, Volume 8, Issue 1, Pages 221-234. (In Persian)

Pourghasemi, H., R., Moradi, H., R., & Mohammadi, M. (2014). Landslide Susceptibility Zoning, Using Weight of Evidence Probabilistic Model. *Jgit*.; 1 (2) :69-80 (In Persian)

Pornaby Darzi, S., Vafakhah, M., & Rajabi, M., R. (2021). Flood hazard zoning using HEC-RAS Hydraulic Model and ArcGIS (Case Study: CheshmehKileh River in Tonekabon County) Volume 10, Issue 28 - Serial Number 2 September 2021 Pages 15-28. (In Persian)

Rajaei, M. (2018). Hydrogeomorphological modeling of urban flood (Case study: Tankabon Cheshmekile river) Ph.D thesis, Department of Geomorphology, Khuarazmi University. (In Persian)

Rahmani, Sh., Azizian, A., Samadi, A. (2019). Determining the Flood Hazard Level of Mazandaran Sub-Basins Using a GIS-based Distributed Method, Volume 14, Issue 1 - Serial Number 141 Pages 123-139. (In Persian)

Tahmasebipoor, N., Rahmati, O., & Ghorbani Nejad, S. (2016). Prediction of gully erosion susceptibilityin Seimare region using certainty factor model and importance analysis of conditioning factors, 3(1): 83-93. 10.22059/IJE.2016.59192. (In Persian)

Zayyari, K., Ebrahimipoor, M., Pourjafar, M., R., & salehi, E. (2020). Explaining Strategies for Increasing Physical Resilience against Flood (Case Study: Cheshmeh Kile River, Tonekabon River), 3(1): 89-105. (In Persian)

Althuwaynee, O., F., Pradhan, B., Park, H., J., & Lee, J., H. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena* 114, 21–36.

Chowdhuri, I., Pal Subodh, Ch., & Chakrabortty, R. (2019). Flood susceptibility mapping by ensemble evidential belief function and binomial logistic regression model on river basin of eastern India, *Advances in Space Research*.

Dai, F.C., Lee, CF., Li, J., & Xu, ZW. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ Geol* 40:381–391.

Demir, V., & Kisi, O. (2016). Flood Hazard Mapping by Using Geographic Information System and Hydraulic Model: Mert River, Samsun, Turkey, *Advances in Meteorology.*

Fernandez, D.S., & Lutz, M., A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucuman Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol* 111:90–98

Guo E., L., Zhang Z., Q. & Ren X., H. (2014). Integrated risk assessment of flood disaster based on improved set pair analysis and the variable fuzzy set theory in central Liaoning Province, China. Nat. *Hazards Journal*, 74: 947–965.

Jie Yang, D., Townsend Yilmaz, C., Topal, T., & Suzen M.L. (2012). GIS-based landslide susceptibility mapping using bivariate statistical analysis in Devrek (Zonguldak-Turkey). Environmental Earth Science, 65: 2161- 2178.

Jhih, H., W., Gwo-Fong L., Yun-Ru H., I-Hang H., & Chieh-Lin C. (2022). Application of hybrid machine learning model for flood hazard zoning assessments, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment.

Kia, M.B., 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. *Environ Earth Sci* 67:251– 264.

Lee, M.J., Kang, J.E., & Jeon, S. (2012). Application of frequency ratio model and validation for predictive flooded area susceptibility mapping using GIS. In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), *Munich*. 895–898.

Miller, JR., Ritter, DF., & Kochel RC. (1990). Morphometric assessment of lithologic controls on drainage basin evolution in the Crawford Upland, south-central Indiana. *Am J Sci* 290: 569–599. 19.

Nampak, H., Pradhan, B., & Manap, M.A. (2014). Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of Hydrology*, 513, pp.283-300.

Nguyen, B., D, Nguyen, Q.L., Ropesh, G., Dang, T.A, Dang, T.M. (2021).The Role of Factors Afecting Flood Hazard Zoning Using Analytical Hierarchy Process: A Review Earth Systems and Environment King Abdulaziz University and Springer Nature Switzerland AG.

Pourghasemi, H.R., Mohammadi, M., & Pradhan, B. (2012). Landslide susceptibility mapping using index of entropy and conditional probability models at Safarood Basin, Iran. Catena 97, 71–84.

Patra, J.P., Kumar, R., & Mani, P. (2015). Combined fluvial and pluvial flood inundation modeling for a project site, *Procedia Technology*, 24: 93-100.

Reinhardt- Imjela, Ch., Imjela, R., Beolscher, J., & Schulte, A. (2018). The impact of late medieval deforestation and 20th century forest decline on extreme flood magnitudes in the Ore Mountains (Southeastern Germany, *Quaternary International* 475.

Ramesh, V., & Sumaira S, I. (2020). Urban flood susceptibility zonation mapping using evidential belief function, frequency ratio and fuzzy gamma operator models in GIS: a case study of Greater Mumbai, Maharashtra, India, *Geocarto International*, DOI: 10.1080/10106049.2020.1730448

Stefanidis S., & Stathis D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). Nat. *Hazards Journal*, 68: 569–585.

Stephane H., Colin G., & Robert J., N. (2013). Future flood losses in major coastal cities. Nat. *Climate Change Journal*, 3(9): 802–806.

Song, K., Y, J., Oh, J., Choi, I., Park, C., Lee & S., Lee. (2012). Prediction of landslides using ASTER imagery and data mining models. *Advances in Space Research*, 49: 978-993.

The International Disaster Database (EM-DAT). (2016). http:\\www.emdat.be\about

Tehrany, M.S., Pradhan, B., Mansour, Sh., & Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types.125:91-101.

Yang, J., Ronald, D, T., & Danshfar, B. (2006). Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation, can. *J. Civ. Eng*. No: 33, pp: 19-28.