

پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه (مطالعه موردی: حوضه آب‌خیز خیاو چای)

موسی عابدینی^۱

محمدحسین فتحی^۲

چکیده

سیلاب یکی از رایج‌ترین مخاطرات طبیعی جهان قلمداد می‌شود که سالانه موجب خسارات جانی و مالی فراوانی در سراسر جهان می‌گردد. از این رو توسعه مدل‌های پهنه‌بندی و پیش‌بینی وقوع سیلاب جهت اتخاذ تصمیمات بهینه پیش از وقوع سیلاب و پس از آن و نیز مدیریت آن بسیار مهم و ضروری می‌باشد. هدف از این پژوهش، تعیین پهنه‌های خطر وقوع سیلاب، در حوضه رودخانه خیاو چای با استفاده از مدل تحلیل شبکه می‌باشد. جهت اجرای این مدل در منطقه از داده‌های مختلفی همچون بارش، کاربری زمین، خصوصیات مورفولوژیک دامنه‌ها مثل تحدب و تعقر، همگرایی و واگرایی دامنه‌ها، شیب دامنه‌ها، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، فاصله از رودخانه‌های اصلی و تراکم شبکه زهکشی استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مدل تحلیل شبکه‌ای بیانگر این واقعیت می‌باشد بیش از ۱۵ درصد از حوضه تحت تأثیر خطر وقوع سیلاب با پتانسیل بسیار بالا قرار دارد که به طور عمده در پایین دست حوضه واقع شده است، این سطوح اغلب شیب کمتر از ۳۵ درصد، با درصد پوشش گیاهی کم، سطوح همگرا با پروفیل مقعر، نواحی پست و حاشیه رودخانه‌ها را تشکیل می‌دهند. تحلیل وزن‌های نهایی منتج از مدل ANP، نشان می‌دهد که در رابطه با خطر وقوع سیلاب، عامل شیب با مقدار (۰/۹۹) و عامل سنگ‌شناسی با مقدار (۰/۸۲۲) با توجه به کنترل زیادی که بر میزان و چگونگی نفوذ و تخلیه رواناب از سطح حوضه دارند، از بیشترین میزان اهمیت و تأثیر برخوردار هستند و شاخص SPI با ۰/۲۲۶ و شاخص STI با ۰/۰۶۵ نسبت به عوامل دیگر دارای اهمیت کمتری هستند.

واژگان کلیدی: سیلاب؛ تصمیم‌گیری چندمعیاره؛ خیاو چای؛ هیدروژئومورفولوژی

مقدمه

مخاطرات محیطی از عوامل تأثیرگذار در جوامع بشری بوده و از بلایای عمده و مهم جهانی قلمداد می‌شوند. (آگوند و کینکال^۱، ۲۰۱۰: ۱۲۴۲؛ الیوت و چاودوری، ۱۹۹۹: ۳۲؛ السوین و پرادهان^۲، ۲۰۱۲: ۱۲۶؛ دکوتا و همکاران^۳، رجمی و پورقاسمی، ۲۰۱۳: ۱۳۵؛ موگاگ و همکاران^۴، ۲۰۱۲: ۳۹؛ اوه و پرادهان^۵، ۲۰۱۱: ۱۲۶۴).

طبق گزارش جهانی برنامه عمران سازمان ملل در مورد خطر بلایای طبیعی، سیلاب همراه با زلزله و خشک‌سالی بالاترین رتبه را از لحاظ خسارت مالی و جانی به‌همراه دارند (بهشتی و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۳۲).

برابر آمار بیش از ۴۰ درصد از بلایای طبیعی را در جهان سیلاب‌ها به‌خود اختصاص داده‌اند (فنگ و لو^۶، ۲۰۱۰: ۲۹۷۴). با توجه به رژیم بارشی کشور، همه ساله در فصل بهار و پاییز با بارش‌های رگباری می‌توان مواجه شد و نیز با مسئله ذوب برف‌های حاصل از بارش‌های زمستانه، سیل و پیامدهای ناگوار آن در مقیاس‌های مختلف در مناطق مختلف کشور، مشاهده نمود. لذا از طریق تجزیه و تحلیل دقیق این مناطق سیل‌خیز و مدیریت اصولی، می‌توان میزان وقوع سیلاب و نیز خطرات و آسیب‌های جانی و مالی حاصل از آن در مناطق مستعد سیلاب را کاهش داد؛ با توجه به اهمیت مطالب فوق، مدل‌سازی رفتار سیل و تهیه نقشه‌های پتانسیل سیل‌خیزی یکی از مهم‌ترین اهداف دانشمندان در زمینه بلایای طبیعی می‌باشد (فنیسیا و همکاران^۷، ۲۰۱۳: ۸۱). اخیراً، از مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی به‌منظور مدیریت و کنترل سیلاب استفاده گردیده است، مدل‌هایی که مبتنی بر رفتار فیزیکی رودخانه‌ها و حوضه آبریز بوده و بر مبنای میزان بارش و رواناب محاسبه و برآورد می‌گردیدند که قادر به تجزیه و تحلیل جامع و کافی از وضعیت و رفتار حوضه‌ها نبودند (اسمیت و وارد^۸، ۱۹۹۸: ۳۸۲). زیرا رودخانه‌ها مناطقی پویا و فعال به لحاظ ژئومورفولوژی بوده و استفاده از این روش‌های تک بعدی نیازمند هزینه و زمان بسیار بالایی می‌باشد. با توجه به موارد فوق، دانشمندان جهت دریافت نتایج دقیق‌تر در حداقل زمان و کمترین هزینه ممکنه شروع به استفاده از روش‌های تجربی و داده محور از جمله استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (اوه و پرادهان، ۲۰۱۱: ۱۲۶۴؛ کیا و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۵۶)، الگوریتم ژنتیک (خو و همکاران^۹، ۲۰۰۱: ۴۳۹)، مدل‌های ارزیابی رگرسیونی (الشورباقی و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۰: ۱۹۳۴)، مدل‌های وزن‌دهی تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل شبکه‌ای (کرم و همکاران،

1-Akgund & Kincal

2- Althuwaynee & Pradhan

3- Devkota et al.,

4- Mugagga et al.,

5- Oh & Pradhan

6- Fenk & Lu

7- Fencia et al.,

8- Smith and ward

9- Khu et al.,

10- Elshorbagy et al.,

۱۳۹۱: ۳۷؛ سوری و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۱) نمودند. با استفاده از روش‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، می‌توان تکنیک‌های نوینی، برای پیش‌بینی وقوع سیلاب و ارزیابی پتانسیل خطر سیل‌گیری ایجاد نمود (پرادهان و شفیع، ۲۰۰۹: ۷؛ پرادهان و همکاران، ۲۰۱۴: ۳۴؛ هاگ و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۳۵). تنوع و کیفیت بالای داده‌ها، به روز بودن داده‌ها به صورت شبانه روزی و تجزیه و تحلیل سریع آن‌ها توسط تکنیک‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی باعث کارایی بیشتر مدل‌های هیدروژئومورفولوژیکی در برآورد پتانسیل سیل‌خیزی گردیده است (باتیس^۱، ۲۰۰۴: ۲۵۹۳؛ واند^۲ و همکاران^۳، ۲۰۱۳).

اندازه و تکرار رویداد سیلاب در هر منطقه، بستگی به عوامل متعددی دارد. ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبریز مانند شکل، شیب، شبکه آبراهه‌های و ناهمواری زمین، همراه با ویژگی‌های هیدروژئومورفولوژیکی مانند بارش، ذخیره و تلفات برگابی و چالابی، تبخیر و تعرق و نفوذپذیری و اقدامات ناشی از فعالیت‌های بشری، در بروز و تشدید سیلاب یا کاهش و افزایش میزان خسارت‌های ناشی از آن دخالت دارند. شناخت این عوامل و دسته‌بندی آن‌ها در هر منطقه‌ای، از اصول اولیه مهار سیلاب و کاهش خطرات آن است (اسمیت^۳، به نقل از قنواتی، ۱۳۸۲: ۱۷۴).

کارهای مختلفی در زمینه پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری و سیل‌خیزی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. کرمی و همکاران (۱۳۸۷)، برای حوضه رودخانه دوغ در استان گلستان پهنه‌بندی سیلاب‌دشت را با استفاده از تلفیق مدل هیدروژئومورفولوژیکی و سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام دادند و دریافتند بین پارمترهای میزان و شدت بارش، شیب حوضه و مناطق سیل‌گیر رابطه مستقیمی وجود دارد؛ و در مناطقی که ضریب نفوذپذیری کمتری دارند شدت سیل‌گیری به صورت تصاعدی رو به افزایش است. آقاعلیخانی (۱۳۸۸)، با استفاده از مدل منطق‌فازی پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی و سیل‌گیری را برای حوضه فرحزاد تهران انجام دادند و نتیجه گرفتند که پهنه‌های با خطر بسیار زیاد در بالادست حوضه واقع گردیده‌اند، این سطوح اغلب سستی‌ها و خط‌الراس‌ها با دامنه‌های محدب و شیب بالای ۴۰ درصد را تشکیل می‌دهند. در نقشه پهنه‌بندی خطر سیل‌گیری، پهنه‌های با خطر بسیار زیاد در پایین‌دست حوضه و منطبق بر دره‌ها و خط‌العرها می‌باشند. امیدوار و کیان‌فر (۱۳۸۹)، با استفاده از ۲۸ پارامتر فیزیوگرافی، هیدرومتری، نفوذپذیری و اقلیم پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی را برای حوضه کنجانچم انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در بین این پارامترها عامل شکل با ضریب ویژه ۹/۷۵ بیشترین تأثیر را در بین سایر عوامل، در سیل‌خیزی حوضه دارد. بهشتی جاوید (۱۳۹۰) پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی را با استفاده از تلفیق مدل‌های CN و

1- Bates

2- Wanders et al.,

3- Esmi

AHP برای حوضه بالخلو انجام داد و به این نتیجه رسید که مدل با توجه به برآورد میزان رواناب تولیدی قابلیت مناسبی را در ارزیابی پتانسیل سیل‌خیزی در منطقه دارد. خیری زاده و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی به پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه‌ی آبریز مردق چای با استفاده از مدل ANP پرداختند، نتایج حاصله از این پژوهش نشان می‌دهد که عامل شیب و ارتفاع رواناب سطح حوضه در رابطه با رخداد سیلاب، از بیشترین میزان اهمیت و عوامل پوشش گیاهی (NDVI) و سنگ‌شناسی از کمترین میزان اهمیت برخوردار هستند. با توجه به استقرار نقاط سکونتگاهی در این محدوده، انجام اقداماتی برای کاهش خطر وقوع سیلاب در این قسمت از حوضه ضروری است. اصغری سرسکانرود و همکاران (۱۳۹۲)، به برآورد سیلاب حوضه آبخیز و مخاطرات آن در حوضه آلتاق پرداخته‌اند. در این تحقیق از روش SCS استفاده نموده سپس مقادیر سیلاب را به ازای دوره بازگشت‌های^۲ تا ۱۰۰ ساله برآورد کردند. نتایج تحقیق نشان داد که روش SCS به جهت این که پارامترهای بیشتری را به‌ویژه شماره منحنی (CN) حوضه را در نظر می‌گیرد نسبت به دیگر روش‌های برآورد سیلاب، جواب بهتری را می‌دهد. قاسمی و همکاران (۱۳۹۳)، در پژوهشی به بررسی سیل‌خیزی و تعیین عوامل مؤثر در آن در حوضه رودخانه بالقلی چای با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که قسمت‌های جنوبی و شمال غرب حوضه از نظر تولید سیلاب بسیار مستعد است. همچنین، زیرحوضه سقزچی چای در قسمت جنوبی حوضه بالقلی چای از نظر سیل‌خیزی در رتبه اول و زیرحوضه لاطران چای در رتبه آخر قرار دارد.

از نمونه کارهای خارجی نیز می‌توان به کار کوتگودا و همکاران^۱ (۲۰۰۰)، اشاره کرد که با استفاده از تکنیک شماره منحنی و آمار بارش ورودی، جریان‌های سیلابی روزانه را برای سه حوضه در کشور ایتالیا مدل‌سازی آماری کردند. نتیجه تحقیق نشان داد که استفاده از داده‌های بارش و تکنیک شماره منحنی می‌تواند یک روش پیشنهادی معنی‌دار، کاربردی و امکان‌پذیر برای مدل‌سازی آماری جریان‌های روزانه باشد. ساهو^۲ و همکاران (۲۰۱۰)، تحقیقی را در ۷۶ حوضه کشاورزی کوچک در کشور آمریکا جهت پهنه‌بندی مناطق آسیب‌پذیر در هنگام رخداد سیل انجام دادند. در این تحقیق مدل اولیه SCS-CN با سایر متغیرهای موجود مورد مقایسه قرار گرفت و درنهایت یک مدل بهبود یافته جهت پهنه‌بندی سیلاب، توسط آن‌ها ارائه شد. هاگن و همکاران^۳ (۲۰۱۰)، با ارائه روشی به نام مهندسی معکوس سیلاب^۴ سعی کردند تا راه‌حلی جهت تهیه نقشه پتانسیل خطر سیل‌گیری را فراهم نمایند. این روش تکیه بر عمق طغیان‌های گذشته دارد و هدف اولیه استخراج وسعت پهنه‌های سیل‌خیز از روی سیلاب حداکثر می‌باشد. عمق سیلاب از تفریق حداقل نقاط

1- Kottegoda & Natale E. Raiteri

2- Sahu. R.K

3- Hagen, Shrodr Jr. & John F. Teufert

4- Reverse engineered flood

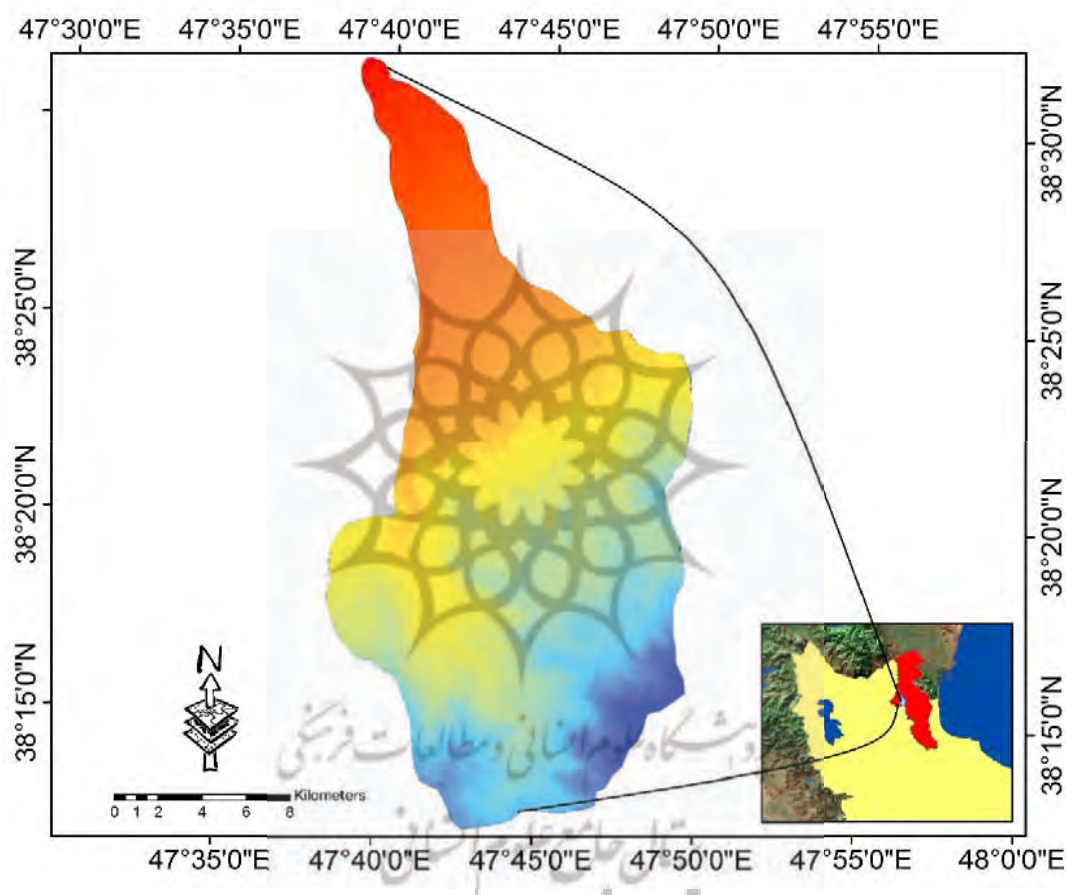
اندازه‌گیری شده از حداکثر نقاط طغیان برآورد شده است. در پژوهشی دیگر زو^۱ و همکاران (۲۰۱۳)، اقدام به پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی پرداخته و بیان می‌دارد که استفاده از این روش از نظر صرف زمان و هزینه مقرون به‌صرفه بوده و متکی بر نظرات متخصصان و داده‌های مورد استفاده و روشی دانش‌پایه می‌باشد. شفاپور تهرانی و همکاران (۲۰۱۴)، به پهنه‌بندی مناطق مستعد سیلاب با استفاده از مدل‌های آماری دو متغیره و چندمتغیره در بوسان کره جنوبی پرداختند. نتایج نشانگر دقت بالای مدل در ارزیابی مناطق مستعد خطر سیل گیری با ضریب دقت بالای ۹۲ درصد و ضریب پیش‌بینی ۸۷ درصد بوده است.

با توجه به بررسی منابع موجود در بخش پیشینه تحقیق، کمبود یا خلاء مطالعات در خصوص استفاده عملیاتی در زمینه به کارگیری و استفاده از مدل ANP در ارزیابی و پهنه بندی خطر وقوع سیلاب، سعی شد ضمن انجام تحقیق حاضر، گامی در جهت پرکردن خلاء مذکور برداشته شود. در ادامه عوامل موثر در ایجاد سیل و رواناب و تهیه نقشه‌های این عوامل با استفاده از نرم افزارهای مختلف از جمله ENVI و ARCGIS انجام پذیرفت. همچنین وزن هر یک از معیارها با استفاده از مدل ANP و با توجه به نظر متخصصان امر مشخص گردید و در نهایت نقشه پهنه‌بندی جهت اولویت‌بندی حوضه، از نظر پتانسیل سیل‌خیزی و مناطق حساس، صورت پذیرفت.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز خیاوچای با مختصات جغرافیایی ۴۷ درجه ۳۹ دقیقه ۲۰ ثانیه تا ۴۷ درجه ۴۳ دقیقه ۴۷ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه ۱۷ دقیقه ۴ ثانیه تا ۳۸ درجه ۲۳ دقیقه ۱۰ ثانیه عرض شمالی در غرب استان اردبیل، جنوب شهرستان مشکین‌شهر و شمال غربی توده آتشفشانی سبلان واقع شده است. ارتفاع این حوضه از سطح دریا ۲۳۶۸ متر بوده که ارتفاع حوضه از جنوب به شمال کاهش می‌یابد. بستر رودخانه این حوضه در بالادست عمدتاً دارای شیب زیاد بوده و جزو رودخانه‌های جوان می‌باشد. مساحت حوضه در حدود ۳۴۰ کیلومتر مربع می‌باشد. بیشتر بخش‌های شرقی و جنوب شرقی حوضه را ارتفاعات تشکیل می‌دهند و شمال شرق حوضه و غرب را اراضی پست و تپه‌ماهوری در برمی‌گیرند. بر اثر سیلاب اخیر که در سال ۹۲ در این بخش روی داد، ده‌ها واحد مسکونی و محل نگهداری احشام را در روستاهای این بخش از جمله ساریخانلو، دوست بیگلو، صاحب دیوان و کوچنق، ویران گردید.

بارندگی سالانه محدوده مورد مطالعاتی ۳۴۳/۸ میلی‌متر است که از ۱۸۹/۳ میلی‌متر در اهل ایمان تا ۴۰۸/۱ میلی‌متر در ایستگاه لای تغییر می‌کند. همچنین بر طبق اطلاعات استخراجی از ایستگاه‌های منتخب، ماه می (اردیبهشت) با متوسط بارش ۷۴/۵ میلی‌متر مرطوب‌ترین ماه و ماه آگوست (مرداد) با ۷ میلی‌متر بارش خشک‌ترین ماه سال در طول ۲۰ سال آماری (۱۳۷۰ الی ۱۳۹۰)، بوده است جدول (۱). شکل (۱) موقعیت حوضه مورد مطالعه را در استان اردبیل نشان می‌دهد.



شکل (۱) موقعیت حوضه مورد مطالعه

جدول (۱) ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

ردیف	نام ایستگاه	مختصات
۱	اهل ایمان	۳۸°۲'۱۲" ۴۷°۵۸'۵۵"
۲	کلور	۳۸°۱۲'۶" ۴۸°۴'۴۸"
۳	لای	۳۸°۷'۸" ۴۷°۵۴'۴۷"
۴	پل سلطانی	۳۸°۲۴'۴" ۴۷°۳۸'۴۲"
۵	دوست بیگلو	۳۸°۳۵'۱۵" ۴۷°۳۲'۷"

مواد و روش‌ها

برای اجرای مدل و تهیه نقشه پیش‌بینی احتمال وقوع خطر سیلاب، انتخاب فاکتورهای مؤثر بر وقوع سیلاب از مهم‌ترین مراحل تحقیق است. در این پژوهش با استفاده از ۱۰ پارامتر طبیعی، انسانی، سنگ‌شناسی، فاصله از رودخانه، بارش، شیب زمین، جهت شیب، کاربری زمین، شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص حمل رسوب^۱ (STI)، شاخص توان آبراهه^۲ (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافیک^۳ (TWI)، پهنه‌بندی صورت گرفته است. در اولین گام از این مرحله با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه (شامل شیت ۵۵۶۶ مشکین شهر، ای و نقدی بالا)، لایه DEM با پیکسل‌های ۳۰ متری تهیه شد. با داشتن این لایه با استفاده از عملگرهای مختلف موجود در بسته نرم‌افزاری GIS لایه‌هایی همچون شیب، جهت شیب و شبکه زهکشی که به صورت فاصله از رودخانه در مدل استفاده شده است، استخراج شدند (شکل ۲). همچنین با استفاده از باندهای ۳ و ۴ تصاویر ماهواره لندست هشت، سنجنده ETM+ مربوط به سال‌های (۲۰۱۳/۰۸/۱۵)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حوضه تهیه شد (شکل ۳). برای تهیه نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از محیط نرم‌افزار پردازش تصویر ENVI و روش طبقه‌بندی نظارت شده (الگوریتم حداکثر مشابهت^۴ (MLC) و نیز تصویر رنگی کاذب ماهواره لندست (حاصل شده از ترکیب باندی ۷، ۵، ۴)، استفاده شده است. در نهایت برای به دست آوردن لایه پهنه‌های بارشی حوضه از آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه (در طول ۲۰ سال آماری ۱۳۷۰ الی ۱۳۹۰)، استفاده شد و لایه بارش به صورت پهنه‌های بارشی به دست آمد (شکل ۳). هر کدام از پارامترهای فوق بنابه ماهیت و عملکردشان در مدل پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری و سیل‌خیزی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برای به دست آوردن میزان اهمیت هر یک از این عوامل (معیارها) در رابطه با رخداد سیل و همچنین وزندهی به متغیرهای اصلی و طبقه‌های فرعی متغیرها بر اساس نظر متخصصان و کارشناسان مربوطه، از مدل ANP استفاده گردید.

– شاخص قدرت آبراهه SPI

مور^۵ و همکاران (۱۹۹۱)، رابطه (۱) را برای محاسبه شاخص قدرت رودخانه (SPI) پیشنهاد نمودند که در این معادله اندازه‌گیری قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار بوده که عمل تخلیه متناسب با وسعت حوضه بوده است (مور و همکاران، ۱۹۸۶:۱۳۵۳). این مدل به طور کلی فرسایش خالص را در نواحی که نیمرخ به صورت محدب مماسی است و در این منطقه شدت جریان بالا بوده و منطقه حالت محدب دارد، را پیش‌بینی

1- Sediment Transport Index
2- Stream Power Index
3- topographic wetness index
4- Maximum likelihood classifier
5- Moore

می‌کند از طرفی رسوب‌گذاری خالص در نواحی انجام‌گرفته که نیمرخ بصورت مقعر است و در این ناحیه شدت جریان کاهش می‌یابد (شکل ۲). در این پژوهش تحدب و تعقر دامنه‌ها با استفاده از الحاقیه Spatial Analysis در محیط نرم افزار ArcMap صوت پذیرفت.

$$\text{SPI} = A_s \cdot \tan\beta \quad \text{رابطه (۱)}$$

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه (A_s) و گرادیان شیب ($\tan\beta$) که جهت برآورد میزان قدرت نسبی آبراهه برای فرآیند فرسایش را محاسبه می‌کند.

- شاخص حمل رسوب $\text{STI} \pm$

در این مطالعه از جمله شاخص‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده شاخص حمل رسوب است. این شاخص قدرت فرساینده‌گی جریان‌ها را در روی زمین نشان می‌دهد. فرمول تجربی (رابطه ۲) که برای به‌دست آوردن این شاخص وجود دارد شبیه معادله جهانی فرسایش خاک است از این‌رو می‌تواند در نشان دادن موقعیت مناطق با خطر فرسایش مورد استفاده قرار گیرد (مور و بورچ، ۱۹۸۶).

$$\text{STI} = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.62} \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3} \quad \text{رابطه (۲)}$$

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه (A_s) و سینوس گرادیان شیب ($\sin\beta$) قابلیت حمل رسوب در حوضه را کنترل می‌کند. بر همین اساس ممکن است سیستم زهکشی را آشفته کند و دامنه‌های با گرادیان شیب کم به ایجاد زمین‌لغزش تمایل پیدا کنند (نفیس اوغلو^۱ و همکاران، ۲۰۰۸: ۴۰۵).

- شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

شاخص رطوبت توپوگرافیک (شاخص ترکیب توپوگرافیک^۲ (CTI) یا رطوبت خاک^۳ که برای توصیف الگوی فضایی رطوبت خاک استفاده می‌شود (ویلسون و گالانت^۴، ۲۰۰۰: ۷)، به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\text{TWI} = \text{LN} \left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

از شاخص رطوبت توپوگرافیک می‌توان برای ارزیابی الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییرات رخ داده در بافت خاک به دلیل فرسایش استفاده کرد (اسمیت و پیرسون^۵، ۲۰۰۳: ۱۷۹). مقدار LN لگاریتم طبیعی (بر مبنای

1- Nefeslioglu et al.,
2- Compound Topographic Index
3- Soil wetness
4- Wilson, J.P. Gallant
5- Schmidt, F. Persson

نپر)، در رابطه (۳)، حاصل از نسبت مساحت به شیب حوضه مورد نظر می‌باشد. این شاخص عموماً برای تعیین کنترل توپوگرافی روی فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (سورنس^۱ و همکاران، ۲۰۰۶) و مقادیر بالای TWI معمولاً در بدنه زمین لغزش‌ها پیدا می‌شود (شکل ۲).

– مدل تحلیل شبکه

فرایند تحلیل شبکه‌ای یکی از جدیدترین تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است که به وسیله ساعتی ارائه شده است این مدل بر مبنای فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی طراحی شده است و شبکه را جایگزین سلسله‌مراتب کرده است (قدسی‌پور، ۱۳۸۴). فرض اصلی در AHP بر عملکرد مستقل گروه‌های بالایی سلسله‌مراتبی از همه قسمت‌های پایینی آن و از معیارهای هر سطح و طبقه بنا نهاده شده است (دایسون^۲، ۲۰۰۴). بسیاری از مسائل تصمیم‌گیری را نمی‌توان در یک ساختار سلسله‌مراتبی جای داد و این به دلیل تعاملات بین فاکتورهای مختلف است که بعضاً فاکتورهای سطح بالا وابستگی خاصی به فاکتورهای سطح پایین دارند. ساختار بندی یک مسئله با وابستگی‌های عملیاتی اجازه می‌دهد بازخوردی بین خوشه‌های شناسایی شده در سیستم شبکه دریافت گردد. ساعتی^۳ استفاده از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی را برای حل مسائل با معیارها و متغیرهای مستقل پیشنهاد کرده و برای حل مسائل با معیارها و متغیر وابسته به هم مدل تحلیل شبکه‌ای را پایه‌ریزی نموده است. بدین ترتیب روش ANP به‌عنوان تعمیمی از AHP ارائه گردید، ساختار شبکه‌ای ANP رویکرد بازخوردی را با ساختار سلسله‌مراتبی جایگزین کرده است و این حاکی از آن است که روابط بین سطوح مختلف تصمیم‌گیری را نمی‌توان به سادگی بالا- پایین، غالب- مغلوب یا مستقیم- غیرمستقیم تصور کرد. برای نمونه می‌توان گفت نه تنها اهمیت بین معیارها مشخص‌کننده اهمیت بین گزینه‌ها در سلسله مراتب است، بلکه اهمیت گزینه‌ها نیز ممکن است در اهمیت بین معیارها تأثیرگذار باشد. بنابراین، ارائه ساختار سلسله‌مراتبی با روابط خطی بالا به پایین نمی‌تواند در مورد سیستم‌های پیچیده مناسب باشد (ساعتی، ۱۹۸۰، موموه^۴، ۱۹۹۸، لی^۵، ۲۰۱۱). به‌طورکلی، روش ANP دارای سه مرحله می‌باشد: بخش اول، سلسله‌مراتب کنترل برای شبکه معیارها و زیرمعیارها، بخش دوم، شبکه‌ای از روابط میان عناصر و خوشه‌ها و بخش سوم، بازخورد بین خوشه‌های مختلف و عناصر داخل یک خوشه است (یوکسل و متین^۶، ۲۰۰۷: ۳۳۶۷). جهت انجام این سه فرآیند بایستی مراحل زیر در تشکیل ساختار شبکه صورت پذیرد. ۱- ساختمان

1- Sorensen

2- Dayson

3- Saaaty

4- Moveh

5- Lee

6- Yuksel & Metin

مدل و ساختار مسئله: مسئله باید به روشنی تبیین شود و به صورت یک سیستم منطقی و عقلانی مانند شبکه تجزیه شود. ۲- ماتریس مقایسه زوجی و بردار ارجحیت^۱: این قسمت شبیه به ماتریس مقایسه‌ای سلسله‌مراتبی است که در آن عناصر سیستم در هر گروه با توجه به اهمیت‌شان نسبت به معیار کنترل مقایسه می‌شوند. خود گروه‌ها نیز با توجه به اهمیت آنها در شکل‌دهی به هدف مقایسه می‌شوند. ۳- تشکیل ماتریس عالی: برای انتخاب ارجحیت‌های کلی در یک سیستم با وابستگی متقابل بردار ارجحیت درونی در یک ستون اختصاصی ماتریس وارد می‌شود. ۴- مرحله چهارم مدل ANP، انتخاب بهترین آلترناتیو یا استراتژی بر اساس وزن به‌دست‌آمده آن می‌باشد.

– مدل و ساختار موضوع

پس از تعیین معیارها و شاخص‌ها به منظور سنجش پتانسیل سیل‌خیزی حوضه به تعیین ضرایب اهمیت هر یک از مؤلفه‌ها می‌پردازیم. در مرحله دوم تجزیه مسئله مورد نظر، ساختار شبکه‌ای شامل هدف، معیارها، زیر معیارها و استراتژی‌ها تقسیم می‌گردد و در نهایت ساختار شبکه‌ای پژوهش را به وجود می‌آورد. سپس با شفاف‌سازی مسئله و تجزیه آن در هر قالب مجموعه عوامل موجود در زیر معیارها به صورت مجزا در نرم‌افزار سوپر دسیژن^۲ اقدام گردید. وزن نسبی هر یک از زیر معیارها از طریق روش مقدار ویژه (ارزش نهایی)، اوزان نهایی هر معیار تعیین گردید.

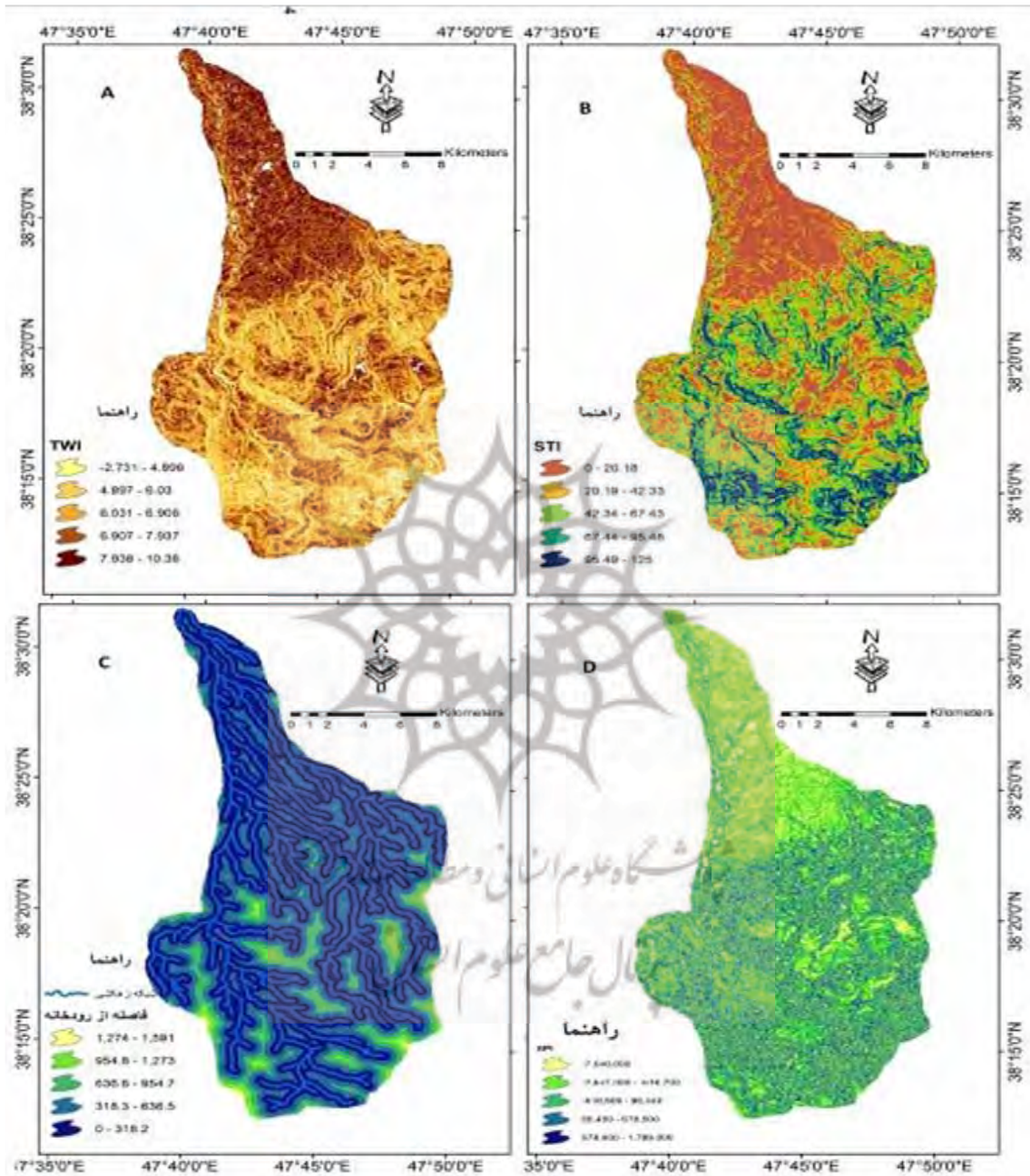
– آماده‌سازی داده

برای این‌که بتوان لایه‌ها را در مدل تحلیل شبکه‌ای مورد استفاده قرار داد، با توجه به میزان دسترسی به متخصصان امر و کارشناسان مرتبط (آبخیزدای و اداره منابع طبیعی، اساتید دانشگاه)، که آشنایی کامل با خصوصیات هیدروژئومورفولوژی منطقه مورد مطالعه دارند، تعداد ۱۱۰ عدد پرسشنامه (بر مبنای متخصصان موجود و در دسترس)، برای به‌دست آوردن رابطه و میزان اثر این عوامل در رابطه با خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آبریز تهیه شده و در اختیار کارشناسان آبخیزداری و ژئومورفولوژی قرار گرفت. پس از تحلیل پرسشنامه، برای محاسبه وزن‌های نهایی هر معیار و زیرمعیار (با توجه ارتباطات درونی) از نرم‌افزار سوپر دسیژن استفاده شد. این بسته نرم‌افزاری، توانایی ساخت مدل‌های تصمیم به همراه وابستگی‌ها و بازخورد و محاسبه‌ی سوپر ماتریس را دارد (مؤمنی و شریفی سلیم، ۱۳۹۰: ۱۰۱). وزن‌های نهایی منتج از این نرم‌افزار، وارد جداول توصیفی لایه‌های اطلاعاتی در نرم‌افزار Arc GIS شده و پس از آماده‌سازی با استفاده از مدل

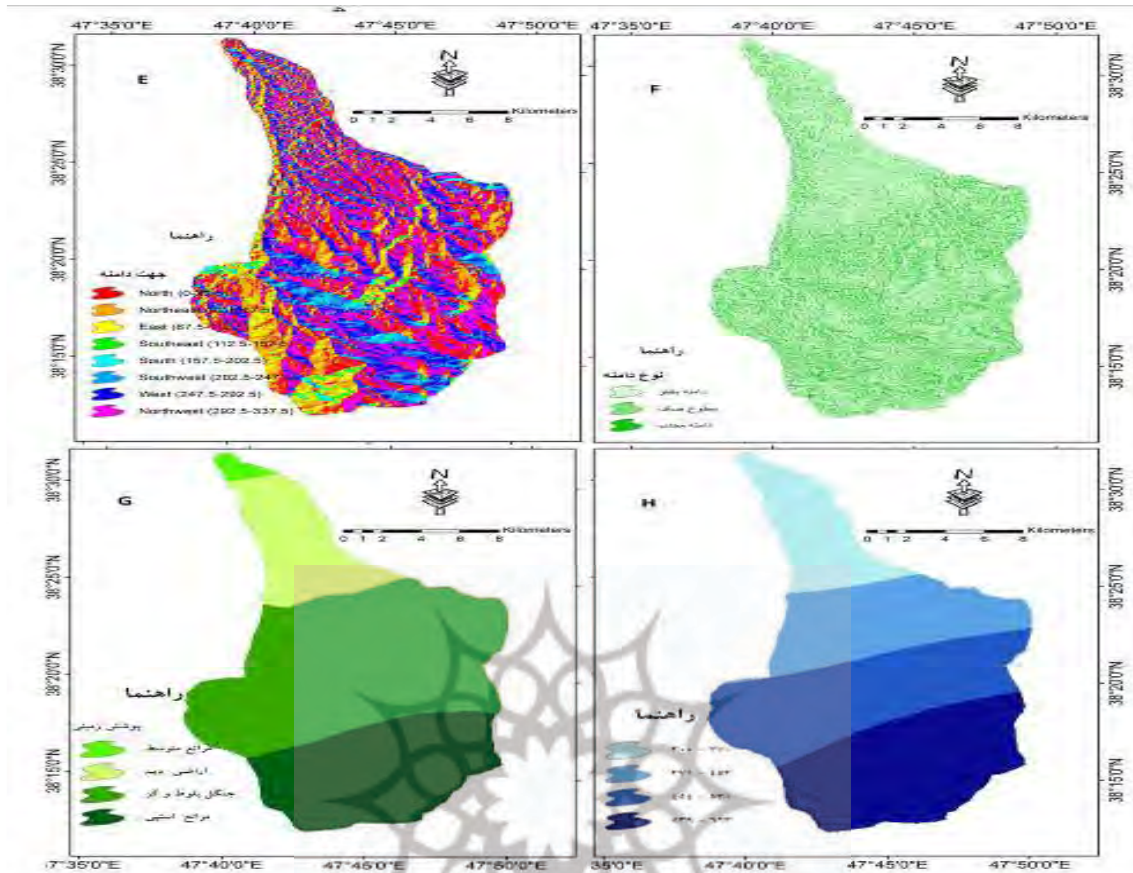
1- Paired comparison matrix and vector preference

2- Super Decision

همپوشانی ریاضی، نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب در سطح حوضه آماده شد.



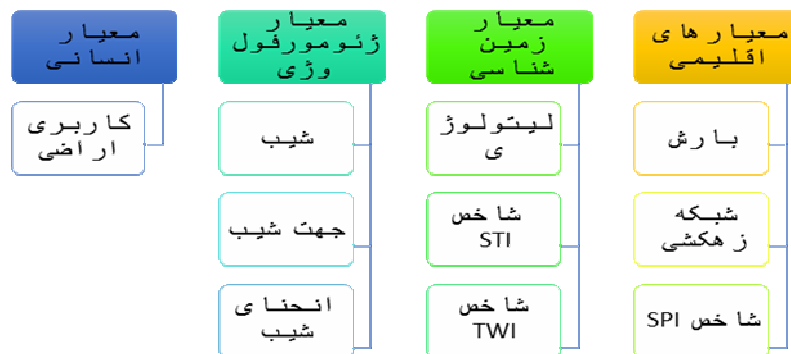
شکل (۲) لایه‌های استفاده‌شده در پهنه‌بندی پتانسیل سیل خیزی



شکل (۳) لایه‌های استفاده‌شده در پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی

تعیین درجه اهمیت متغیرهای مؤثر بر وقوع سیل

پس از به‌دست آوردن لایه‌های اطلاعاتی، برای وزندگی از مدل ANP استفاده شد. بدین منظور پس از تشکیل ساختار (شکل ۴) و ماتریس مقایسه‌ای برابر جداول (۲، ۳، ۴)، شامل ۱۴ سطر و ۱۴ ستون، از طریق پرسش‌نامه و دیدگاه‌های کارشناسان ژئومورفولوژی، برای تعیین رابطه و میزان اهمیت هر یک از این معیارها و زیرمعیارها استفاده شد.



شکل (۴) معیارها و زیر معیارهای پژوهش

بحث و نتیجه‌گیری

پس از تشکیل ماتریس‌های نهایی، وزن‌ها یا ارزش‌های هر معیار و وزن‌های نسبی هر زیرمعیار و ارتباطات درونی آنها نسبت به هدف پژوهش در قالب ماتریسی و در سه مرحله محاسبه و به‌دست آمد. بدین‌صورت ابتدا نتایج حاصل از مقایسه و اعمال نظر کارشناسان وارد نرم‌افزار سوپر دسیژن گردیده و سپس جهت نرمال‌سازی داده‌ها، هریک از ضرایب در عدد مشترکی ضرب شده و نرمال گشته و ماتریس وزنی را تشکیل داده و در ادامه هم نتایج این ماتریس، به‌صورت متوالی به توان عدد ثابتی می‌رسد که این فرآیند در محیط نرم افزار و در ساختار شبکه صورت می‌پذیرد. که در نهایت حاصل این فرآیند تشکیل ماتریس حدی است. اعداد حاصله از محاسبات نرم‌افزار که با نظر متخصصان امر در مرحله اول به هر یک از عوامل اختصاص داده‌شده بود و نشانگر میزان اثرگذاری هر عامل بر سایر معیارها می‌باشد را در جداول ۲ و ۳ و ۴ داده‌ها و نتایج حاصل از این سه ماتریس را مشاهده می‌کنید

جدول (۲) نتایج ماتریس غیر وزنی معیارها و زیر معیارها

فاکتور انسانی	فاکتور ژئومورفولوژی	فاکتور زمین‌شناسی	فاکتور اقلیمی	پهنه‌بندی سیلاب
۱	۱	۱	۰	۰
۰/۱۲۵	۰/۳۲۶	۰/۲۸۳	۰/۰۶۱	۰/۱۷۴
۰/۳۹۷	۰/۲۰۴	۰/۱۷۲	۰/۴۲۹	۰/۲۶۱
۰/۰۹۷	۰/۱۴۱	۰/۲۶	۰/۱۷۹	۰/۲۹
۰/۳۸۱	۰/۳۲۹	۰/۲۸۵	۰/۳۳	۰/۲۷۴
۰	۰/۲۵	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰/۲۶	۰
۰/۲۸۹	۰	۰	۰	۰
۰	۰	۱	۰	۰
۰	۰	۰	۰/۳۲۷	۰
۰	۰/۷۵	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰/۴۱۳	۰
۰/۳۳۱	۰	۰	۰	۰
۰/۳۷۹	۰	۰	۰	۰

	جهت شیب	انحنای شیب	تراکم زهکشی	کاربری زمین	سنگ شناسی	بارش	شیب	شاخص SPI	STI شاخص	TWI شاخص
جهت شیب	۰	۰	۰	۰/۰۹۳	۰	۰/۴۰۶	۰/۲۵۹	۰/۰۸۱	۰	۰/۱۰۴
انحنای شیب	۰	۰	۰/۳۲	۰/۰۹۱	۰/۲۹۳	۰	۰/۱۵۱	۰/۲	۰	۰/۰۹۵
تراکم زهکشی	۰	۰	۰	۰/۱۴	۰	۰/۰۵۳	۰	۰/۰۷۳	۰	۰/۱۱
کاربری زمین	۰	۰	۰	۰	۰/۳۲۷	۰/۲۲۴	۰/۱۹۴	۰/۱۵	۰/۶۶۷	۰/۱۵
سنگ شناسی	۰/۷۵	۰	۰	۰/۲۰۳	۰	۰	۰/۱۳۶	۰/۲۰۹	۰	۰/۱۴۴
بارش	۰	۰	۰	۰/۱۸۷	۰/۲۸۹	۰	۰/۰۹۶	۰/۰۵۳	۰	۰/۲۵۸
شیب	۰/۲۵	۱	۰/۵۵۸	۰/۱۰۵	۰	۰/۰۸۴	۰	۰/۰۹۸	۰/۳۳۳	۰/۰۶۷
شاخص SPI	۰	۰	۰/۱۲۲	۰/۰۳۱	۰	۰/۰۸۹	۰/۱۰۵	۰	۰	۰/۰۴۲
شاخص STI	۰	۰	۰	۰/۰۵۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳
شاخص TWI	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۹۱	۰/۱۴۵	۰/۰۵۹	۰/۱۲۸	۰	۰

منبع: یافته‌های تحقیق ۱۳۹۳

جدول (۳) نتایج ماتریس وزنی معیارها و زیر معیارها

	پهنه‌بندی سیلاب	فاکتور اقلیمی	فاکتور زمین‌شناسی	فاکتور ژئومورفولوژی	فاکتور انسانی
پهنه‌بندی سیلاب	۰	۰	۰/۲۵۵	۰/۲۵۵	۰/۲۵۵
فاکتور اقلیمی	۰/۱۷۴	۰/۰۲۳	۰/۰۸	۰/۰۹۱	۰/۰۳۵
فاکتور زمین‌شناسی	۰/۲۶۱	۰/۱۶۲	۰/۰۴۸	۰/۰۵۷	۰/۱۱۱
فاکتور ژئومورفولوژی	۰/۲۹	۰/۰۶۸	۰/۰۷۳	۰/۰۴	۰/۰۲۷
فاکتور انسانی	۰/۲۷۴	۰/۱۲۵	۰/۰۸	۰/۰۹۳	۰/۱۰۷
جهت شیب	۰	۰	۰	۰/۱۱۶	۰
انحنای شیب	۰	۰	۰	۰	۰
تراکم زهکشی	۰	۰/۱۶۲	۰	۰	۰
کاربری زمین	۰	۰	۰	۰	۰/۱۳۴
سنگ شناسی	۰	۰	۰/۴۶۴	۰	۰
بارش	۰	۰/۲۰۴	۰	۰	۰
شیب	۰	۰	۰	۰/۳۴۸	۰
شاخص SPI	۰	۰/۲۵۷	۰	۰	۰
شاخص STI	۰	۰	۰	۰	۰/۱۵۴
شاخص TWI	۰	۰	۰	۰	۰/۱۷۶

	جهت شیب	انحنای شیب	تراکم زهکشی	کاربری زمین	سنگ شناسی	بارش	شیب	شاخص SPI	STI شاخص	TWI شاخص
جهت شیب	۰	۰	۰	۰/۰۹۳	۰	۰/۴۰۶	۰/۲۵۹	۰/۰۱۹	۰	۰/۱۰۴
انحنای شیب	۰	۰	۰/۳۲	۰/۰۹۱	۰/۲۹۳	۰	۰/۱۵۱	۰/۰۴۸	۰	۰/۰۹۵
تراکم زهکشی	۰	۰	۰	۰/۱۴	۰	۰/۰۵۳	۰	۰/۰۱۷	۰	۰/۱۱
کاربری زمین	۰	۰	۰	۰	۰/۳۲۷	۰/۲۲۴	۰/۱۹۴	۰/۰۳۸	۰/۶۶۷	۰/۱۵
سنگ شناسی	۰/۷۵	۰	۰	۰/۲۰۳	۰	۰	۰/۱۳۶	۰/۰۵	۰	۰/۱۴۴
بارش	۰	۰	۰	۰/۱۸۷	۰/۲۸۹	۰	۰/۰۹۶	۰/۰۱۳	۰	۰/۲۵۸
شیب	۰/۲۵	۱	۰/۵۵۸	۰/۱۰۵	۰	۰/۰۸۴	۰	۰/۰۲۳	۰/۳۳۳	۰/۰۶۷
شاخص SPI	۰	۰	۰/۱۲۲	۰/۰۳۱	۰	۰/۰۸۹	۰/۱۰۵	۰	۰	۰/۰۴۲
شاخص STI	۰	۰	۰	۰/۰۵۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۳
شاخص TWI	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۹۱	۰/۱۴۵	۰/۰۵۹	۰/۰۳۱	۰	۰

منبع: یافته‌های تحقیق ۱۳۹۳

جدول (۴) نتایج ماتریس محدود معیارها و زیر معیارها

فاکتور انسانی	فاکتور ژئومورفولوژی	فاکتور زمین شناسی	فاکتور اقلیمی	پهنه بندی سیلاب
۱	۱	۱	۰	پهنه بندی سیلاب
۰/۱۲۵	۰/۳۲۶	۰/۲۸۳	۰/۰۶۱	فاکتور اقلیمی
۰/۳۹۷	۰/۲۰۴	۰/۱۷۲	۰/۴۲۹	فاکتور زمین شناسی
۰/۰۹۷	۰/۱۴۱	۰/۲۶	۰/۱۷۹	ژئومورفولوژی
۰/۳۸۱	۰/۳۲۹	۰/۲۸۵	۰/۳۳	فاکتور انسانی
۰	۰/۲۵	۰	۰	جهت شیب
۰	۰	۰	۰	انحنای شیب
۰	۰	۰	۰/۲۶	تراکم زهکشی
۰/۲۸۹	۰	۰	۰	کاربری زمین
۰	۰	۱	۰	سنگ شناسی
۰	۰	۰	۰/۳۲۷	بارش
۰	۰/۷۵	۰	۰	شیب
۰	۰	۰	۰/۴۱۳	SPI شاخص
۰/۳۳۱	۰	۰	۰	STI شاخص
۰/۳۷۹	۰	۰	۰	TWI شاخص

TWI شاخص	STI شاخص	شاخص SPI	شیب	بارش	سنگ شناسی	کاربری زمین	تراکم زهکشی	انحنای شیب	جهت شیب
۰/۱۰۴	۰	۰/۰۸۱	۰/۲۵۹	۰/۴۰۶	۰	۰/۰۹۳	۰	۰	جهت شیب
۰/۰۹۵	۰	۰/۲	۰/۱۵۱	۰	۰/۲۹۳	۰/۰۹۱	۰/۳۲	۰	انحنای شیب
۰/۱۱	۰	۰/۰۷۳	۰	۰/۰۵۳	۰	۰/۱۴	۰	۰	تراکم زهکشی
۰/۱۵	۰/۶۶۷	۰/۱۵۸	۰/۱۹۴	۰/۲۲۴	۰/۳۲۷	۰	۰	۰	کاربری زمین
۰/۱۴۴	۰	۰/۲۰۹	۰/۱۳۶	۰	۰	۰/۲۰۳	۰	۰/۷۵	سنگ شناسی
۰/۲۵۸	۰	۰/۰۵۳	۰/۰۹۶	۰	۰/۲۸۹	۰/۱۸۷	۰	۰	بارش
۰/۰۶۷	۰/۳۳۳	۰/۰۹۸	۰	۰/۰۸۴	۰	۰/۱۰۵	۰/۵۵۸	۱	شیب
۰/۰۴۲	۰	۰	۰/۱۰۵	۰/۰۸۹	۰	۰/۰۳۱	۰/۱۲۲	۰	SPI شاخص
۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۵۹	۰	۰	STI شاخص
۰	۰	۰/۱۲۸	۰/۰۵۹	۱/۴۵	۰/۰۹۱	۰/۰۹	۰	۰	TWI شاخص

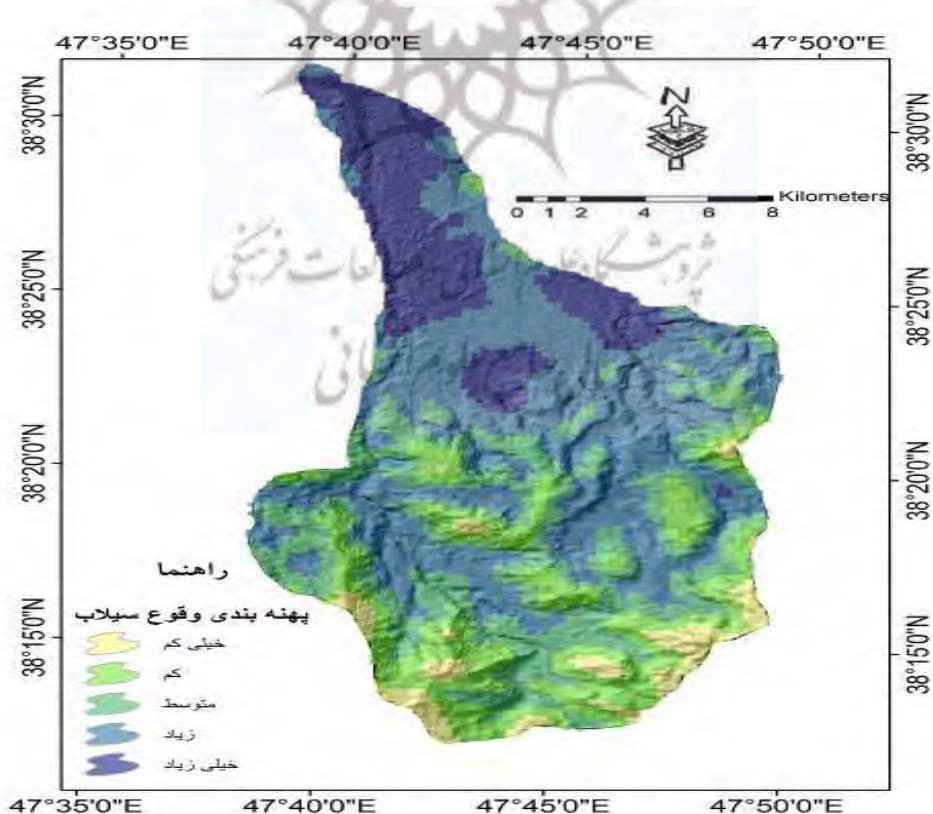
در ادامه نتایج حاصل از ماتریس حدی، در ماتریس خوشه‌ها نرمال شده و در نهایت ضرایب اصلی و نهایی

عناصر و شاخص‌های پهنه‌بندی سیلاب حوضه آبخیز خیاو چای تعیین می‌گردد (جدول ۵).

جدول (۵) ضرایب نهایی شاخص‌های پهنه‌بندی سیلاب

جهت شیب	انحنای شیب	تراکم زهکشی	کاربری زمین	سنگ‌شناسی	بارش	شیب	شاخص SPI	STI شاخص	TWI شاخص
۰/۵۹۸	۰/۵۵	۰/۱۷۴	۰/۶۹۸	۰/۸۲۲	۰/۵۵۷	۹۹۹/	۰/۲۲۶	۰/۰۶۵	۰/۳۰۱

وزن‌های نهایی نهایی برای هر یک از زیرمعیارها (با توجه به ارتباطات درونی) در محیط نرم‌افزار سوپر دسیژن مطابق جدول (۵)، محاسبه و به هر یک از لایه‌های مربوطه در نرم‌افزار Arc GIS اعمال شد. بعد از تهیه لایه‌های طبقه‌بندی‌شده، حال برای تهیه نقشه نهایی بایستی این لایه‌ها با یکدیگر ترکیب شده و ضریب نهایی که در فرآیند تحلیل شبکه‌ای حاصل شده بود به آن‌ها اعمال شود. همان‌طور که در جدول (۵)، ملاحظه می‌شود، معیار شیب با ضریب (۰/۹۹)، معیار سنگ‌شناسی با ضریب (۰/۸۲۲) و معیار کاربری اراضی با ضریب (۰/۶۹۸)، بیشترین امتیازات را به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر وقوع سیلاب حوضه آبخیز خیاو چای با توجه به ضریب اهمیت موردنظر برای هر معیار و تلفیق نهایی کلیه معیارها در پنج طبقه با عنوان خطر بسیار زیاد، زیاد، متوسط، کم و بسیار کم تقسیم‌بندی شد (شکل ۵). مزیت این پژوهش در مقایسه با سایر پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص پهنه‌بندی سیلاب استفاده از شاخص‌های STI SPI و TWI در کنار سایر معیارهای عمومی مورد استفاده در زمینه پهنه‌بندی سیلاب می‌باشد.



شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب و طبقه‌بندی آن



شکل (۶) نمودار مساحت پهنه‌های در معرض سیل‌گیری حوضه خیابو چای

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که نقشه پهنه‌بندی خطر فرسایش نشان می‌دهد، مناطق پست شمال غربی حوضه دارای بیشترین پتانسیل برای سیل‌گیری می‌باشند و عمدتاً با زمین‌های پست کناره رودخانه، پرشیب، سازندهایی با نفوذپذیری کم، تراکم زهکشی بالا و پوشش گیاهی تنک مشخص می‌شوند. با توجه به شکل (۵ و ۶) که در آن پهنه‌های در معرض خطر وقوع سیل حوضه خیابو چای برحسب درصد از کل حوضه نمایش داده شده است، بیش از ۱۵ درصد از سطح حوضه دارای سیل‌خیزی بسیار زیاد و حدود ۳۷ درصد از سطح حوضه در کلاس زیاد می‌باشد، که بیشتر در قسمت‌هایی از پایین‌دست حوضه واقع شده است. با توجه به نقشه پهنه‌بندی خطر وقوع سیل حوضه (شکل ۵)، می‌توان نتیجه گرفت که به‌استثنای قسمت‌هایی از بالادست حوضه، همزمان با نزدیک شدن و بهم پیوستن دو شعبه اصلی حوضه مورد مطالعه، خطر وقوع سیلاب افزایش می‌یابد. این امر به دلیل دخالت مشترک تعدادی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر رخداد سیلاب و همچنین برقراری ارتباطات درونی بین متغیرها است. در بیشتر این قسمت‌ها، پوشش زمین غیرقابل نفوذ بوده، در نتیجه برای یک بارش با مقدار مشخص، ارتفاع رواناب در این قسمت از حوضه به حداکثر مقدار خود خواهد رسید. همچنین در این محدوده، شاخص پوشش گیاهی NDVI (به‌استثنای اطراف شعبه‌های اصلی) همراه با قسمت‌هایی از اطراف قله‌های آتشفشانی بالادست حوضه، از کمترین میزان در سطح حوضه برخوردار هستند. این عوامل در ترکیب با عوامل دیگری چون تراکم زهکشی بالا، باعث شده که در این قسمت از حوضه خطر وقوع سیلاب افزایش یابد. افزون بر این، در این محدوده از حوضه آبریز، شعبات اصلی به تدریج به هم نزدیک شده و در نهایت با تشکیل یک آبراهه واحد سبب افزایش میزان دبی به میزان قابل توجهی می‌شوند که در

صورت محدودیت بستر اصلی در انتقال جریان آب، می‌تواند باعث وقوع سیل شود. تحلیل وزن‌های نهایی منتج از مدل ANP، نشان می‌دهد که در رابطه با خطر وقوع سیلاب، عامل شیب با مقدار (۰/۹۹) و عامل سنگ‌شناسی با مقدار ۰/۸۲۲ با توجه به کنترل زیادی که بر میزان و چگونگی نفوذ و تخلیه رواناب از سطح حوضه دارند، از بیشترین میزان اهمیت و تأثیر برخوردار هستند و شاخص SPI با ۰/۲۲۶ و شاخص STI با ۰/۰۶۵ نسبت به عوامل دیگر دارای اهمیت کمتری هستند. در تصمیم‌گیری طراحی برای طراحی امور کنترل سیل، باید ملاحظات اقتصادی و هم ملاحظات زیستی در زمینه وضعیت هیدرولوژیک بررسی شود. از این رو با این که کنترل عوامل اقلیمی منطقه، مانند شدت، مدت و نوع بارش، امکان‌پذیر نیست؛ ولی با انجام اقداماتی در محدوده حوضه آبریز (به‌ویژه در پهنه‌های با خطر بالای وقوع سیل) مانند کاهش شیب به‌صورت پلکانی در قسمت‌های مختلف حوضه، تراس‌بندی و یا سکوبندی در نقاط خاصی از حوضه و ساماندهی بستر آبراهه اصلی، آبخیزداری و مانند آن، می‌توان خطرات وقوع سیلاب را به حداقل رساند. برای کنترل سیلاب‌ها همیشه باید حریم رودخانه‌ها را با همان ویژگی‌هایی که خود به‌وجود آورده است حفظ کرد و از دست‌اندازی و دخل و تصرف به حریم رودخانه‌ها جدا باید جلوگیری به‌عمل آید.



منابع

- آقاعلیخانی، مرضیه (۱۳۸۸)، پهنه‌بندی پتانسیل سیلخیزی و سیل‌گیری حوضه فرحزاد تهران با استفاده از مدل منطق فازی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران.
- امیدوار، کمال؛ آمنه کیانفر (۱۳۸۹)، پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی حوضه آبریز کنجانچم، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۲، صص-۷۳-۹۰.
- بهشتی‌جاوید، ابراهیم (۱۳۹۰)، پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه رودخانه بالخلوچای، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خوارزمی تهران، صص ۱۵۰-۱۴۲.
- بهشتی، مسعود. سادات فیض‌نیا. علی سلاجقه. حسن احمدی (۱۳۸۸)، بررسی کارایی پهنه‌بندی زمین لغزش فاکتور اطمینان: مطالعه موردی حوضه آبخیز معلم کلایه، فصلنامه جغرافیایی طبیعی، سال دوم، شماره ۵، صص ۳۲-۲۰.
- پورطاهری، مهدی (۱۳۸۹)، کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه در جغرافیا، چاپ اول، انتشارات سمت، تهران.
- دادرسی سبزواری، احمد (۱۳۸۷)، مقایسه مدل منطق فازی با سایر مدل‌های مفهومی سازگار با GIS در مکان‌یابی مناطق مستعد گسترش سیلاب با کاربرد اطلاعات ماهواره‌ای سنجنده ETM. همایش ژئوماتیک ۸۷، ۲۲ تا ۲۳ اردیبهشت ماه، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران.
- حسین‌زاده، سیدرضا؛ مهناز جهادی طرقي (۱۳۸۵)، تجزیه و تحلیل ژئومورفولوژیک سیلاب‌های کاتاستروفیک رودخانه‌ها در سو(جنگل گلستان)، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره ۷، صص ۸۹-۱۱۵.
- خیری‌زاده، منصور؛ ملکی، جبرئیل؛ عمونیا، حمید (۱۳۹۲)، پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز مردق چای با استفاده از مدل ANP، فصلنامه پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال اول، شماره ۳، صص ۵۶-۳۹.
- سوری، مهشید؛ جعفری، محمد؛ آذرنیوند، حسین؛ فرخ‌زاده، بهنوش (۱۳۹۱)، تعیین مناطق مناسب اجرای پروژه پخش سیلاب با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز میخوران کرمانشاه)، پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)، زمستان ۱۳۹۱، دوره ۲۵، شماره ۴ صفحه ۹۲ تا صفحه ۱۰۳.
- صیاد اصغری سرسکانرود، صالح اصغری سرکانرود، بتول زینالی (۱۳۹۲)، برآورد سیلاب حوضه آبخیز و مخاطرات آن در حوضه آلاق، دومین کنفرانس بین‌المللی مخاطرات محیطی، تهران، ایران.
- کرم امیر، درخشان فرزانه (۱۳۹۱)، پهنه‌بندی سیل‌خیزی، برآورد سیلاب و ارزیابی کارایی کانال‌های دفع آب‌های

سطحی در حوضه‌های شهری (مطالعه موردی: حوضه آبشوران در کرمانشاه)، جغرافیای طبیعی: تابستان ۱۳۹۱، دوره ۵، شماره ۱۶، از صفحه ۳۷ تا صفحه ۵۴.

- کرمی، حجت؛ اردشیز، عبدالله؛ حسینی، سیدهادی؛ میکائیلی، محمدعلی (۱۳۸۷)، پهنه‌بندی سیلابدشت با تلفیق مدل هیدرولیکی و سامانه اطلاعات جغرافیایی، مقاله سمینار چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور.

- قاسمی، علی، سلاجقه، علی، ملکیان، آرش، اسمعیلی، اباذر (۱۳۹۳)، بررسی سیل خیزی و تعیین عوامل مؤثر در آن در حوضه رودخانه بالقیلای چای با استفاده از تکنیک GIS، RS و AHP، فصلنامه محیط‌شناسی، سال چهارم، شماره ۷۰، صص ۳۸۹-۴۰۰.

- مؤمنی، محمد و شریفی سلیم، علی (۱۳۹۰)، مدل‌ها و نرم‌افزارهای تصمیم‌گیری چندشاخصه، چاپ اول، نشر مؤلفین، تهران.

- Agha Alikhani, M. (2009), **Flood zonation of Farahzad Tehran basin using fuzzy logic models**, Thesis, University of Tehran Kharazmi. In Persian
- Akgun, A. Kincal, C. (2010), **Landslide risk as an environmental threat for Izmir (West Turkey) City and its urban expansion**. EGU General Assembly Conference Abstracts p. 1249.
- Akgun, A. Türk, N. (2010), **Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis**. Environ. Earth Sci. 61, 595–611.
- Akgun, A. Sezer, E.A. Nefeslioglu, H.A. Gokceoglu, C. Pradhan, B. (2012), **An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm**. Comput. Geosci. 38 (1), 23–34.
- Aleotti, P. Chowdhury, R. (1999), **Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives**. Bull. Eng. Geol. Environ. 58, 21–44.
- Althuwaynee, O.F. Pradhan, B. Lee, S. (2012a), **Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping**. Comput. Geosci. 44, 120–135.
- Althuwaynee, O.F. Pradhan, B. Mahmud, A.R. Yusoff, Z.M. (2012b), **Prediction of slope failures using bivariate statistical based index of entropy model**, Humanities, Science and Engineering (CHUSER). IEEE Colloq. IEEE 362–367.
- Bates, P.D. (2004), **Remote sensing and flood inundation modelling**. Hydrol. Process. 18, 2593–2597.
- Beheshti, J.E. E. (2011), **Zonation Balkhli chay flooding in the river basin**, MSc Thesis, University of Tehran Kharazmi. In Persian.
- Beheshti, M. Feiz nia, S. A. Salajegheh. Ahmad, H. (2009), **Studied the efficacy of zoning**

- landslide Confidence Factor: A Case Study of Moalem Kalaye watershed, physiographic Quarterly**, Vol 2, No. 5, pp 20-32. In Persian.
- Dadrasi Sabzevar, A. (2008), **Comparison of fuzzy logic model is consistent with conceptual models with GIS for locating flood-prone areas by using satellite data**, Landsat ETM. Geomatics 87, 22 and 23 April, the topography of the country, Tehran. In Persian.
- Devkota, K. Regmi, A. Pourghasemi, H. Yoshida, K. Pradhan, B. Ryu, I. Dhital, M. Althuwaynee, O. (2013), **Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya**. Nat. Hazards 65, 135–165.
- Elshorbagy, A. Corzo, G. Srinivasulu, S. Solomatine, D. (2010a), **Experimental investigation of the predictive capabilities of data driven modeling techniques in hydrology-Part 1: concepts and methodology**. Hydrol. Earth Syst. Sci. 14, 1931–1941.
- Feng LH, Lu J (2010), **The practical research on flood forecasting based on artificial neural networks**. Expert Syst Appl 37:2974–2977
- Fenicia, F. Kavetski, D. Savenije, H.H. Clark, M.P. Schoups, G. Pfister, L. Freer, J. (2013), **Catchment properties, function, and conceptual model representation: is, there a correspondence** Hydrol. Process... <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9726>.79-85.
- Hagen E.J.F. Shrodr Jr. X.X.Lu, John F.Teufert. (2010), **Reverse engineered flood hazard mapping in Afghanistan: A parsimonious flood map model for developing Countries**. Quaternary International, Pages 1-10.
- Khu, S.T. Liong, S.Y. Babovic, V. Madsen, H. Muttil, N. (2001), **Genetic programming and its application in real-time runoff forecasting**, Water Resour. Assoc. 37, pp 439–451.
- Lee, Seungbum, Walsh, Patrick, (2011), **SWOT and AHP hybrid model for sport marketing outsourcing**, Sport Management Review, Vol.14, No. 4, 361-369.
- Mugagga, F. Kakembo, V. Buyinza, M. (2012), **Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides**. Catena 90, pp 39–46.
- Movoh, J.A. Zhu, J.z. (1998), **Application of AHP/ANP to Unit Commitment in the Deregulated Power Industry**, In: IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Vol. 1 San Diego, pp. 817-822.
- Moore, I.D. Burch, G.J. (1986), **Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory**. Water Resource 22, 1350-1360.
- Nefeslioglu, H.A. Duman, T.Y. Duemaz, S. (2008), **Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey)**. Geomorphology 94, pp 401–418.
- Oh, H.J. Pradhan, B. (2011), **Application of a neuro-fuzzy model to landslides susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area**. Comput. Geosci. 37, pp 1264–

1276.

- Pradhan, B. Shafiee, M. (2009), **Flood hazard assessment for cloud prone rainy areas in a typical tropical environment**. Disaster Adv. 2, pp 7–15.
- Pradhan, B. Mansor, S. Pirasteh, S. Buchroithner, M.F. (2011), **Landslide hazard and risk analyses at a landslide prone catchment area using statistical based geospatial model**. Int. J. Remote Sens. 32 (14), pp 4075–4087.
- Pradhan, B. (2011), **Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia**. Environ. Earth Sci. 63, pp 329–349.
- Pradhan, B. Hagemann, U. Shafapour Tehrany, M. Prechtel, N. (2014), **An easy to use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image**. Comput. Geosci. 63, pp 34–43.
- Shafapour Tehrany, M., Mounj-Jin Lee ., Pradhan, B., Neamah Jebur, M., Lee, S. (2014), **Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models**, Environ Earth Sci., DOI 10.1007/s12665-014-3289-3.
- Sahu. R.K, S.K.Mishra, T.I.Eldho. (2010), **Comparative evaluation of SCS-CN-inspired models in applications to classified datasets**. Agricultural Water Management 97(2010) pp 749–756.
- Schmidt, F. Persson, A. (2003), **Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices**. Precision Agriculture 4, pp 179–192.
- Smith, K. Ward, R. (1998), **Floods: Physical Processes and Human Impacts**. Wiley, Chichester, pp. 382.
- Sorensen, R. Zinko, U. Seibert, J. (2006), **On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations**. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2, pp 1807–1834.
- Wanders, N. Bierkens, M.F. de Jong, S.M. de Roo, A. Karssenber, D. (2013), **The benefits of using remotely sensed soil moisture in parameter identification of large-scale hydrological models**. In: EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 15, pp. 10215.
- Zou, Q. Zhou, J. Zhou, C. Song, L. Guo, J. (2013), **Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP**. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 27, 525–546.