



دوره‌ی ۳۴، شماره‌ی ۲، شماره‌ی پیاپی ۱۳۱، تابستان ۱۴۰۰، صفحه‌های ۱۲۳-۱۰۸
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2021.128834.1295

مقاله‌ی پژوهشی

پژوهش‌های آبخیزداری

بررسی حساسیت به رخداد سیل در آبخیز عموقین با کاربرد فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی

یاسر حسینی

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی مغان - دانشگاه محقق اردبیلی

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: y_hoseini@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۷ دی ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۳۰ آذر ۱۳۹۹

چکیده

آگاهی از آب‌دهی سیل در پژوهش‌های بهره‌وری از منابع آب و کاهش دادن زیان‌های سیل اهمیت زیادی دارد. این پژوهش با هدف به‌کاربردن سامانه‌ی تحلیل سلسله‌مراتبی برای تعیین کردن منطقه‌های پرخطر از نظر سیل‌گیری در آبخیز عموقین، استان اردبیل، انجام شد. مساحت آبخیز ۷۸ کیلومتر مربع است. برای تعیین کردن مقدار شماره‌ی منحنی منطقه، تلفیق نقشه‌ی کاربری زمین و گروه نفوذپذیری خاک (C، B، و D) به‌کار برده شد، که برای سال ۱۳۹۴ به‌اندازه‌ی ۷۸/۷ برآورد شد. شاخص‌های موثر بر سیلاب شامل شیب، شماره‌ی منحنی، فاصله از رودخانه، توان فرسایش آبراه، شاخص رطوبت پستی بلندی، جهت شیب، بارندگی، و ارتفاع بررسی، و لایه‌های موثر بر خطر سیل‌خیزی به‌نه رده طبقه‌بندی شد. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر سیل‌گیری با پنج رده‌ی خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، و خیلی زیاد به‌دست آمد. نتیجه‌ها نشان داد که بیش‌ترین تاثیر بر خطر سیل‌گیری از شماره‌ی منحنی نفوذ بود. فاصله از رودخانه و اندازه‌ی بارندگی در رده‌های بعدی اهمیت، و کم‌ترین شاخص تاثیر‌گزار شکل شیب بود. نتیجه‌ها نشان داد که ۰/۶۴ و ۴/۴٪ از منطقه‌ی بررسی شده به‌ترتیب منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی زیاد و خیلی کم است.

واژگان کلیدی: آبخیز، اردبیل، تحلیل حساسیت، تحلیل سلسله‌مراتبی، سیلاب

مقدمه

در بین آسیب‌های طبیعی سیل، زلزله و خشک‌سالی از دیدگاه زیان مالی و جانی اهمیت ویژه‌ی دارند. بررسی وضعیت و اطلاعات زیان‌های سالانه‌ی جاری شدن سیل در ایران و سرتاسر جهان، تأثیر جهانی این پدیده بر منابع طبیعی را نشان می‌دهد. ایران از نظر سیل‌خیزی رتبه‌ی ششم دنیا را داشته است (خسروشاهی و ثقفیان ۲۰۰۳). در سال‌های اخیر در منطقه‌های مختلف ایران به‌خصوص شمال و شمال غرب کشور از جمله استان گلستان و شهرستان‌های آذرشهر، مشکین‌شهر، اردبیل و تبریز سیل‌هایی رخ داده است که باعث زیان‌های جبران‌ناپذیر جانی و مالی شده است. بنابراین توسعه‌دادن برنامه‌های یکپارچه برای جلوگیری، مهار و به‌کاربردن سیل برای کنش‌های مناسب مدیریتی گریزناپذیر است. یکی از راه‌کارها برای شناسایی منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی تهیه‌ی نقشه‌های حساسیت به رخداد سیل با نرم‌افزارهای آماری دو و چندمتغیره، داده‌کاوی، و یادگیری ماشین است. زمین‌شناسان نرم‌افزارهای فراوانی را برای تهیه‌ی نقشه‌های حساسیت به رخداد سیل به‌کار برده‌اند، اما بسیاری از این نرم‌افزارها به داده‌های زیادی نیاز دارد و واسنجی آن‌ها پیچیده است. در سال‌های اخیر نرم‌افزارهای زیادی برای تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به رخداد سیل آزمایش شده (لی ۲۰۰۲؛ لو و همکاران ۲۰۰۹)، و سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی نیز ابزار پایه‌ی برای تحلیل کردن داده‌های مکانی بوده است (اوه و بردهان ۲۰۱۱؛ عبدالله و همکاران ۲۰۱۳). ترکیب کردن نرم‌افزارهای آماری و احتمالاتی با سنجش‌ازدور و جی‌آی‌اس توانایی نرم‌افزار را در پیش‌بینی کردن افزایش می‌دهد، و محققان بسیار به آن توجه کرده‌اند (یوسف و همکاران ۲۰۱۱؛ بردهان ۲۰۰۹؛ گارسیا و همکاران ۲۰۱۳). تهرانی و همکاران (۲۰۱۵) ماشین بردار پشتیبان با چهار تابع خطی، چند جمله‌ی، شعاعی، و سیگموئیدی را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مساحت زیر منحنی و منحنی مشخصه‌ی عمل کرد سامانه به ترتیب برای این تابع‌ها ۸۴، ۸۳ و ۸۴٪ است. تأثیر کل شاخص‌های در نظر گرفته شده شامل شیب، طبقه‌های ارتفاعی، انحنا، زمین، و کاربری زمین، جز روان‌آب سطحی، در سیلاب مثبت بود. بر این اساس شیب و طبقه‌های ارتفاعی در همه‌ی نوع‌های تابع‌ها از موثرترین شاخص‌ها است. تهرانی و همکاران (۲۰۱۴) ترکیب روش ماشین بردار پشتیبان و وزن واقعه را بررسی کردند و نشان دادند که صحت نتیجه در ترکیب این روش‌ها با هم بیشتر است. در این حالت، سطح زیر منحنی برای اندازه‌ی موفقیت و اندازه‌ی پیش‌بینی به ترتیب ۹۶/۴۸ و ۹۵/۶۷ بود، که از سایر روش‌ها در حالت انفرادی دقیق‌تر بود. خسروی و همکاران (۲۰۱۶) حساسیت به رخداد سیل را در آبخیز هراز با روش‌های آنتروپی شانون (۱۹۴۸)، شاخص آماری، و شاخص وزن‌دهی بررسی کردند.

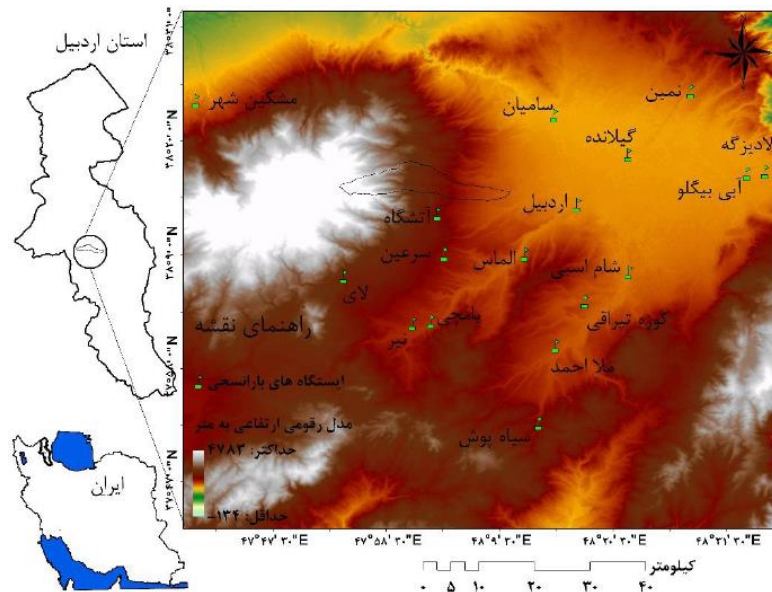
نتیجه‌ی پژوهش آنها نشان داد که دقت روش شاخص آماری در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت به رخداد سیل بیش‌ترین بود، و پس از آن روش شاخص وزن‌دهی و آنتروپی شانون بود. اعظم و همکاران (۲۰۱۷) پیش‌بینی سیلاب لحظه‌ی و سامانه‌ی هشدار خطر سیل گیری را در آبخیز موشیم در کره‌ی جنوبی با نرم‌افزار آب‌شناختی بارش-روان‌آب HEC-HMS بررسی کردند. ویژگی‌های آبخیز را تهیه و برای داده‌های بارش اطلاعات ایستگاه پیش‌بینی بارندگی را با فاصله‌ی زمانی سه ساعت به‌کار بردند. انتظار آنان این بود که در آینده با دسترسی به اطلاعات پیش‌بینی آب‌وهوا با دقت زیاد و فاصله‌ی زمانی بیشتر، امکان دسترسی به سامانه‌ی هشدار سیلاب با دقت بهتر فراهم شود. خیری‌زاده و همکاران (۲۰۱۹) توان خطر رخداد سیلاب را در آبخیز مردقچای از روش تحلیل شبکه‌ی پهنه‌بندی کردند و نتیجه گرفتند که ۵٪ از سطح آبخیز در خطر رخداد سیلاب بسیار زیاد، و ۲۷٪ از آن در خطر زیاد است، و این منطقه‌ها بیشتر در قسمت‌های پایین‌دست آبخیز است. رسول‌زاده و همکاران (۲۰۱۶) در ناحیه‌ی مرکزی استان اردبیل برای انتخاب بهترین روش تحلیل منطقه‌ی سیلاب در اقلیم نیمه‌خشک چهار روش مساحت، مساحت-شیب، مساحت-شیب-آبراه و روش فولر را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش مساحت-شیب-طول آبراه برای دوره‌ی بازگشت کم‌تر از ۵۰ سال دقتی پذیرفتنی می‌دهد. پرادهان (۲۰۰۹) نقشه‌ی سیل‌خیزی و محدوده‌های خطر سیل‌گیری را با کاربرد داده‌های شیب، پستی‌بلندی، شبکه‌ی زه‌کشی، خاک، پوشش زمین، مقدار بارش، مقدار تجمع جریان و سیل‌های تاریخی، با تصویرهای ماهواره‌ی در سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی تهیه کرد، و از هم‌پوشانی لایه‌ها و استخراج ضریب، منطقه‌های سیل‌خیز را در چهار دامنه‌ی خطر زیاد، متوسط، کم و بی‌خطر تشخیص داد. نتیجه‌های فرناندز و لوتوس (۲۰۱۰) در تهیه‌ی نقشه‌ی حساسیت سیل‌گیری در آرژانتین نشان داد که روش تحلیل سلسله‌مراتبی ابزاری مفید در جی‌آی‌اس برای تشخیص منطقه‌های در خطر سیل‌گیری است. در این تحقیق شیب، ارتفاع، عمق تراز ایست‌آبی، کاربری زمین، و فاصله از آبراه شاخص‌های موثر بر سیلاب گرفته شد. بدری و همکاران (۲۰۱۴) در آبخیز بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری با نرم‌افزار HEC-HMS زیرآب‌خیزهای آبخیز را از نظر توان سیل‌خیزی اولویت‌بندی کردند. روش SCS را برای شبیه‌سازی بارش-روان‌آب در سطح زیرآب‌خیزها، و روش ماسکینگام را برای روندیابی آب‌نگار سیل خروجی آبخیز به‌کار بردند، و با روش حذف متوالی، میزان مشارکت زیرآب‌خیزها را در آورد اوج خروجی آبخیز معلوم کردند. نتیجه‌های روندیابی سیل در آبراه‌ها نشان داد که مشارکت زیرآب‌خیزها در سیل خروجی متناسب با آورد اوج زیرآب‌خیزها نیست. در این تحقیق توانمندی‌های روش

آبی و دیم با شیب ۱ تا ۲۵٪ است. این منطقه در ناحیه‌ی زمین‌ساختی آتشفشانی دوران سوم است، که در آن آتشفشان‌های جدید نوزایی (نئوژن) و دوران چهارم روی سنگ‌های آتشفشانی قدیمی‌تر جا گرفته‌است (رسول‌زاده و همکاران ۲۰۱۶). برای پژوهش‌های گیتاشناسی نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰ آبخیز و نرم‌افزار WMS به کار برده شد. محیط آبخیز ۵۸۲۱۷ متر، طول شاخه‌ی اصلی رودخانه ۲۰۷۱۵ متر و متوسط ارتفاع آبخیز ۲۲۱۹ متر محاسبه شد. شیب متوسط آبخیز ۰/۰۱۲۲۹ متر بر متر و ضریب شکل آبخیز ۵/۷۷ مترمربع بر مترمربع و ضریب سینوسی آن ۰/۹۷ برآورد کرده‌شد.

تحلیل سلسله‌مراتبی، که توانایی تلفیق سامانه‌ی ارزش‌گذاری شاخص‌های موثر بر سیل را به کار می‌گیرد، برای شناخت منطقه‌های مستعد و سیل‌خیز در آبخیز عموقین به کار برده شد.

مواد و روش‌ها منطقه‌ی پژوهش

آبخیز عموقین در استان اردبیل در شمال غربی دشت اردبیل (۷۸ کیلومتر مربع) روی رودخانه‌ی یدی‌بولیک‌چای شهرستان اردبیل است (شکل ۱). کم‌ترین و بیش‌ترین ارتفاع منطقه ۱۴۳۶ و ۳۸۴۸ متر است، و کاربری قسمت زیادی از منطقه کشاورزی



شکل ۱- موقعیت آبخیز عموقین در استان اردبیل و کشور.

رطوبت پستی‌بلندی (TWI) نیز با معادله‌ی ۱ و ۲ در نرم‌افزار کیوجی‌آی‌اس به دست آمد.

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{B}\right) \quad (1)$$

$$SPI = A_s \times \tan \beta \quad (2)$$

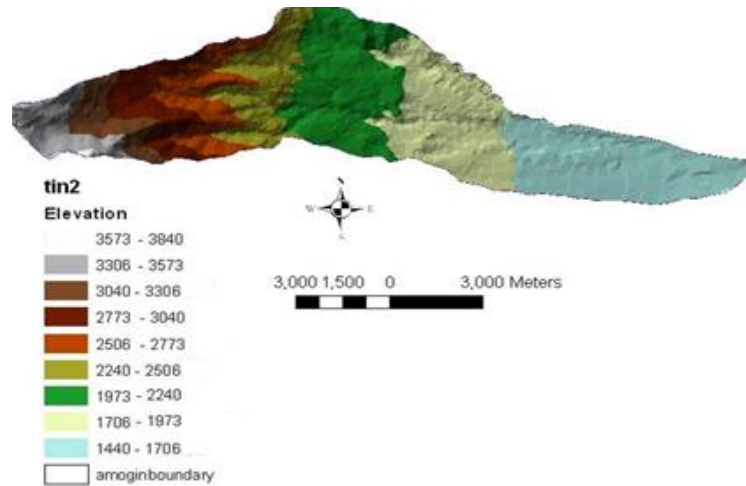
A و β به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مساحت آبخیز (متر مربع بر متر) و زاویه‌ی شیب (درجه) است. TWI نشان‌دهنده‌ی مقدار جریان تجمعی یک نقطه از آبخیز است که بر اثر نیروی گرانش تمایل به بردن آب به ناحیه‌های با شیب کم‌تر دارد. SPI نشان‌دهنده‌ی قدرت فرسایش روان‌آب سطحی است. برای تهیه‌ی لایه‌ی بارندگی داده‌های ۲۰ سال گذشته‌ی ایستگاه‌های بارندگی استان اردبیل، و برای میان‌یابی بارندگی روش معکوس

انتخاب عامل‌های موثر برای تهیه‌ی نقشه‌های توان سیل‌خیزی در منطقه

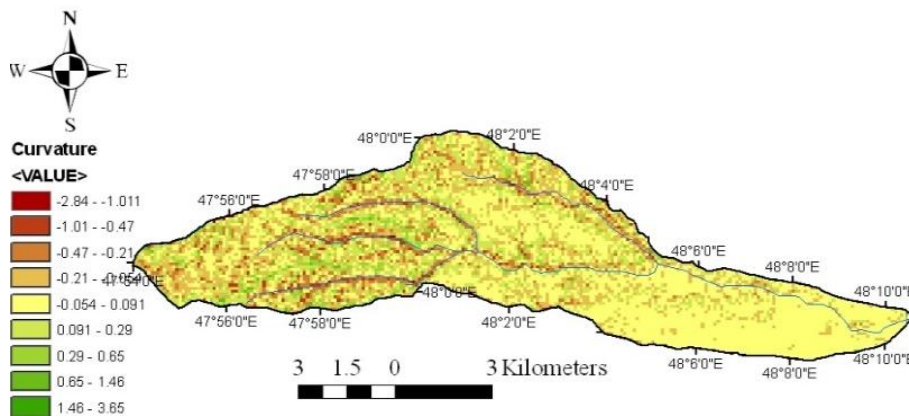
مشخص کردن عامل‌های موثر بر سیلاب مهم‌ترین بخش شناخت توان سیل‌خیزی آبخیز است. هشت شاخص مهم و تاثیرگذار شامل ارتفاع، شماره‌ی منحنی، اندازه‌ی شیب، شکل شیب، بارندگی، شاخص توان آبراه و شاخص رطوبت پستی‌بلندی برای تهیه‌ی نقشه‌ی توان سیل‌خیزی منطقه به کار برده شد. برای تهیه‌ی لایه‌های اطلاعاتی نرم‌افزار آرک‌جی‌آی‌اس ۱۰.۱ و نرم‌افزار کیوجی‌آی‌اس ۲،۱۶،۱ به کار برده شد. مدل رقومی منطقه با نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰ آبخیز در جی‌آی‌اس تهیه، و لایه‌های درجه‌ی شیب، ارتفاع و شکل شیب مستقیمانه از آن استخراج شد. فاصله از رودخانه نیز یکی دیگر از عامل‌های مهم و تاثیرگذار بر سیل است که در جی‌آی‌اس تهیه شد. شاخص‌های وابسته به آب آبخیز مانند شاخص توان آبراه (SPI) و شاخص

تلفیق نقشه‌های کاربری زمین و نفوذپذیری خاک به دست آمد، به کار برده شد. در شکل ۲ تا ۸ نقشه‌ی عامل‌های موثر بر خطر سیل‌خیزی نشان داده شده است.

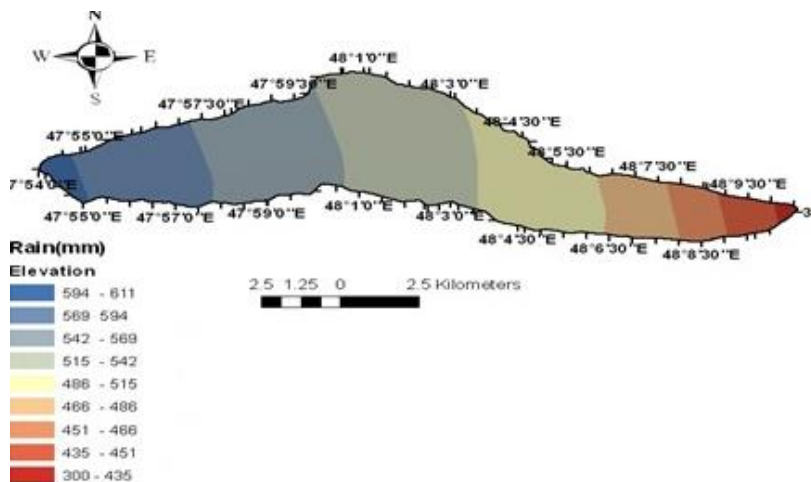
فاصله (IDW) در آرک‌جی‌آی‌اس به کار برده شد. برای در نظر گرفتن تاثیر هم‌زمان کاربری زمین و گروه آب‌شناختی خاک بر توان سیل‌خیزی آبخیز، نقشه‌ی شماره‌ی منحنی که از



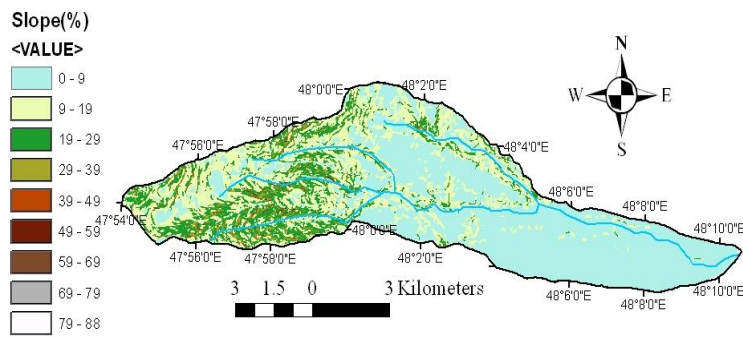
شکل ۲- نقشه‌ی رقومی ارتفاع آبخیز عموقین.



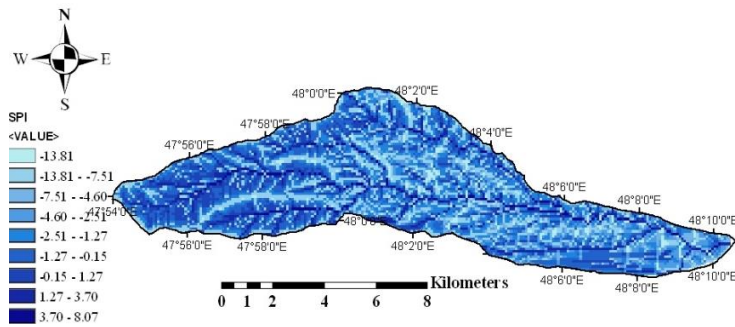
شکل ۳- نقشه‌ی جهت تقعر شیب آبخیز عموقین



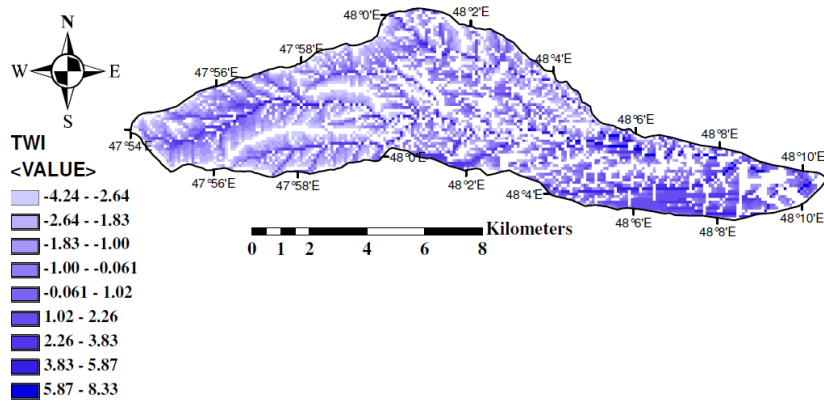
شکل ۴- نقشه‌ی اندازه‌ی بارندگی آبخیز عموقین.



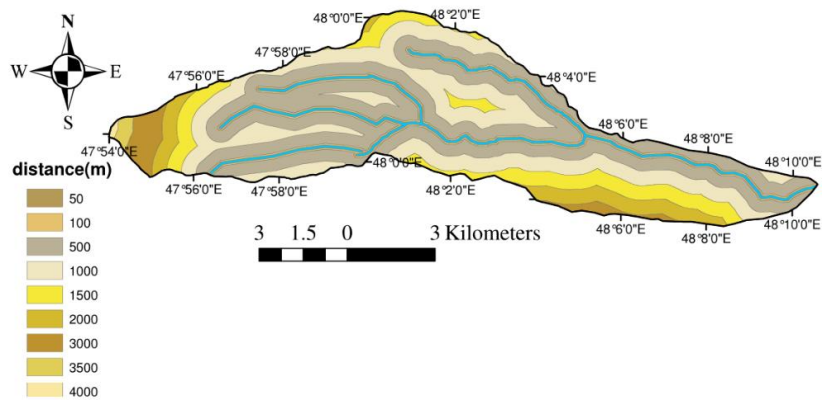
شکل ۵- نقشه‌ی درصد شیب آبخیز عموقین.



شکل ۶- نقشه‌ی شاخص توان آبراه آبخیز عموقین.



شکل ۷- نقشه‌ی شاخص رطوبت پستی بلندی آبخیز عموقین.

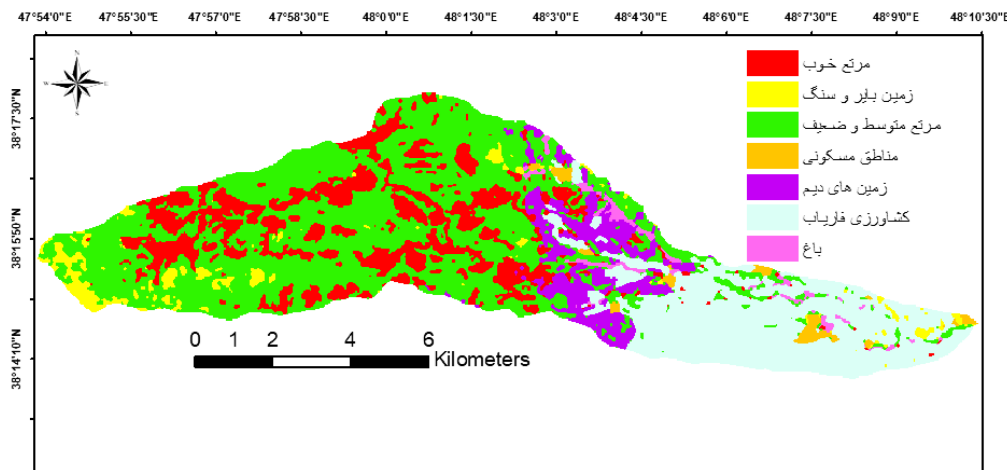


شکل ۸- نقشه‌ی فاصله از رودخانه در آبخیز عموقین.

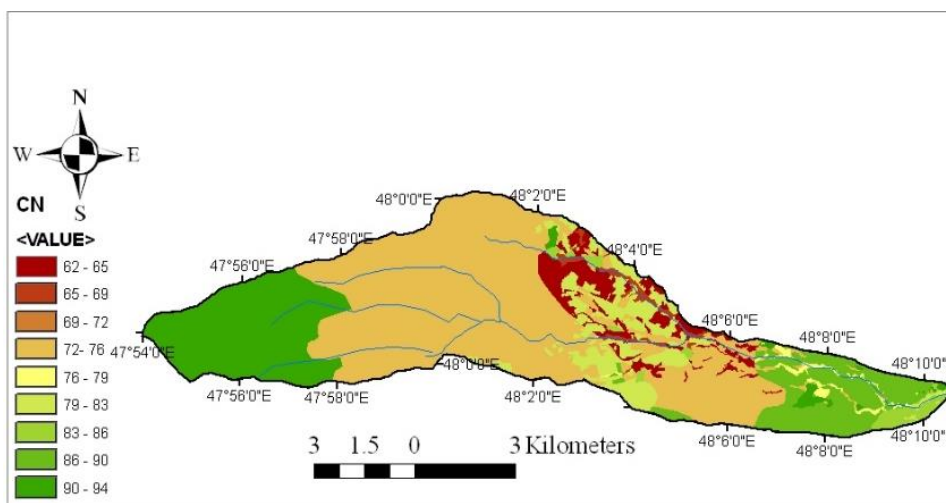
روش طبقه‌بندی آندرسون و همکاران (۱۹۷۶) انجام شد، و طبقه‌های کاربری زمین شامل مرتع خوب، زمین بایر و سنگ، مرتع‌های متوسط و ضعیف، منطقه‌های مسکونی، زمین‌های دیم، کشاورزی فاریاب و باغ مشخص کرده شد. با تحلیل کردن آن‌ها در نرم‌افزار Idrisi32، نقشه‌ی اولیه‌ی کاربری زمین آبخیز برای سال‌های ۱۳۹۴ تهیه شد (شکل ۹). این نقشه شامل لایه‌های رقومی منطقه‌های مسکونی، پوشش گیاهی، سیل‌گذر و جاده است. در نرم‌افزار جی‌آی‌اس نقشه‌ی گروه آب‌شناختی و نقشه‌ی کاربری زمین تلفیق شد، و با انجام محاسبه‌ها نقشه‌ی شماره‌ی منحنی به‌دست آمد (شکل ۱۰). مقدار شماره‌ی منحنی سال ۱۳۹۴ برای زیرآبخیز عموقین ۷۸/۷ تخمین زده شد. خاک‌های آبخیز از دیدگاه زمین‌شناسی در گروه B، C و D است (علیزاده ۱۳۸۶)، و برآوردها در شرایط رطوبتی متوسط بود.

به‌دست آوردن شماره‌ی منحنی

داده‌های سنجنده‌ی او ال آی ماهواره‌ی لندست، نقشه‌های پستی‌بلندی ۱:۲۵۰۰۰ رقومی سازمان نقشه‌برداری، نقشه‌های زمین‌شناسی، جدول‌های بمعیار SCS، نقشه‌های پوشش گیاهی، کاربری زمین و دیگر اطلاعات رقومی چاپ‌شده‌ی منطقه و نرم‌افزارهای جی‌آی‌اس و سنجنش از دور به‌کار برده شد. برای تهیه‌ی نقشه‌ی کاربری زمین، تصحیح‌های هندسی و نیواری (اتمیسری) بر تصویرهای ماهواره‌ی لندست سنجنده‌ی او ال آی (۲ تیر ۱۳۹۴: گذر ۱۶۷، ردیف ۳۳) و تصویرهای سنجنده‌ی تی ام (۹ تیر ۱۳۹۴) انجام شد. برای تولید کردن نمونه‌های معرف طیفی پس از ایجاد کردن تعداد نمونه‌های تعلیمی کافی برای هر طبقه‌ی نوارهای دو، سه، چهار، پنج، شش و هفت به‌کار گرفته شد. برای طبقه‌بندی کردن تصویرها الگوریتم بیشینه‌ی احتمال به‌کار رفت. الگوی طبقه‌بندی کاربری‌های زمین با



شکل ۹- نقشه‌ی کاربری زمین آبخیز عموقین در سال ۲۰۱۵.



شکل ۱۰- نقشه‌ی شماره‌ی منحنی آبخیز عموقین در سال ۲۰۱۵.

تا زمانی که چهارچوب سازگار شود. ابتدا $\max \lambda$ از رابطه‌ی ۳ محاسبه شد.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a} \times W_{(i,j)}}{W_{(i,j)}} \quad (3)$$

$\max \lambda$: میانگین بردار سازگاری، \bar{a} : میانگین هندسی چهارچوب $W_{i,j}$ ، (i,j) : وزن یا اولویت جای‌گزینی، N : تعداد جای‌گزین‌های مقایسه‌شده. شاخص ناسازگاری (CI) از رابطه‌ی ۴ محاسبه شد.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)} \quad (4)$$

n اندازه‌ی چهارچوب است. برای محاسبه‌ی اندازه‌ی ناسازگاری (CR) رابطه‌ی ۵ به کار برده شد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

RI: شاخص ناسازگاری چهارچوب تصادفی است که در برنامه برای هر شاخص تأثیر‌گزار محاسبه می‌شود.

اگر مقدار CR کمتر از ۰/۱ محاسبه شود، چهارچوب قضاوت سازگار است، اگر نه می‌توان با بازبینی کردن ضریب اختصاصی به شاخص‌ها و اولویت‌بندی آن‌ها، مقدار CR را کمتر از حد آستانه محاسبه کرد.

پنجم- پس از محاسبه‌ی ضریب نهایی لایه‌ها، هم‌پوشانی لایه‌ها در جی‌آی‌اس انجام، و نقشه‌ی رده‌بندی نهایی ارزیابی زمین برای خطر سیل‌خیزی استخراج شد.

ارزیابی سیل‌خیزی آبخیز با فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی برای به‌کاربردن روش تحلیل سلسله‌مراتبی در مرحله‌ی نخست باید عامل‌های موثر بر سیل‌خیزی منطقه که شامل اندازه‌ی شیب، شکل شیب، شماره‌ی منحنی، فاصله از رودخانه، شاخص رطوبت پستی‌بلندی، شاخص توان آبراه، بارندگی و ارتفاع است را طبقه‌بندی کرد، به این ترتیب که هر شاخص موثر بر اساس محدوده‌ی تغییر آن، به نه رده طبقه‌بندی شد. رده‌ی یک: شاخص با وضعیت خیلی خیلی بد، رده‌ی دو: شاخص با وضعیت خیلی بد، رده‌ی سه: شاخص با وضعیت بد، رده‌ی چهار: شاخص با وضعیت نسبتاً بد، رده‌ی پنج: شاخص با وضعیت متوسط، رده‌ی شش: شاخص با وضعیت نسبتاً خوب، رده‌ی هفت: شاخص با وضعیت خوب، رده‌ی هشت: شاخص با وضعیت خیلی خوب، رده‌ی نه: شاخص با وضعیت عالی.

گام‌های تحلیل سلسله‌مراتبی به شیوه‌ی زیر برداشته شد. اول- تعریف مسأله و مشخص کردن هدف‌های آن (اندازه‌ی تأثیر شاخص‌های مختلف در یافتن منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی زیاد).

دوم- تعیین معیارهای موثر برای خطر سیل‌خیزی و رده‌بندی شاخص‌ها به این شیوه که هر شاخص موثر بر اساس محدوده‌ی تغییر آن به نه رده طبقه‌بندی شد (جدول ۱).

سوم- تعیین وزن عامل‌های موثر مقایسه‌ی شاخص‌های موثر بر اساس نظر کارشناسی محققان در قالب ۱۰ پرسشنامه. به دلیل تأثیر شاخص‌های موثر بر سیل‌خیزی، مقایسه‌های دوتایی انجام شد (جدول ۲). چهارچوب‌های مقایسه‌ی دوتایی در اندازه‌ی 8×8 با $n(1-n)$ قضاوت، در افزونه‌ی AHP در نرم‌افزار جی‌آی‌اس ایجاد شد و وزن نهایی داده‌ها به‌دست آمد.

چهارم- مشخص کردن سازگاری چهارچوب. اگر چهارچوب سازگار نبود باید مقایسه‌های دوتایی دوباره انجام داده می‌شد.

جدول ۱- طبقه‌بندی عامل‌های موثر بر خطر سیل‌خیزی.

رده‌ی طبقه‌بندی	خیلی خیلی بد	خیلی بد	بد	نسبتاً بد	متوسط	نسبتاً خوب	خوب	خیلی خوب	عالی
رقم	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹

جدول ۲- مقیاس انجام مقایسه‌های دوتایی در اولویت‌های تحلیل سلسله‌مراتبی.

رقم	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
قضاوت برای اولویت	برتری شدید	بسیار قوی و تاحدی شدید	برتری	قوی	تایسار قوی	تایسار قوی	قوی	متوسط	برتری
مساوی	مساوی	مساوی	مساوی	مساوی	مساوی	مساوی	مساوی	مساوی	مساوی

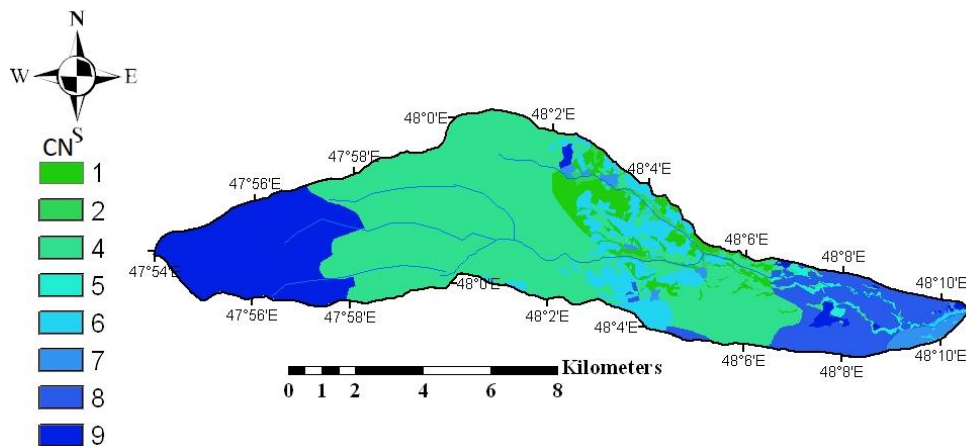
نتایج و بحث

آمد که کم‌تر از حد آستانه‌ی ۰/۱ و پذیرفته است. نقشه‌ی رده بندی شاخص‌های موثر در سیل خیزی در شکل‌های ۱۱ تا ۱۸ نشان داده شده است. در جدول ۴ مساحت هر رده‌ی حساسیت به رخداد سیل آورده شده است.

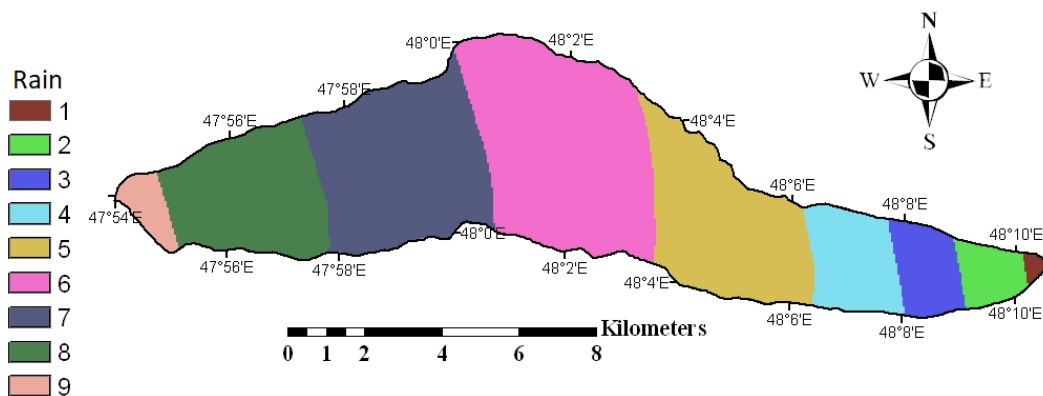
براساس نظر کارشناسی و بررسی اندازه‌ی ناسازگاری، و برپایه‌ی تاثیر شاخص‌های موثر بر سیل خیزی، وزن مناسب به هر شاخص داده شد (جدول ۳). اندازه‌ی ناسازگاری ۰/۰۳ به دست

جدول ۳- اندازه‌های وزن شاخص‌های موثر در ارزیابی.

بردار اولویت	شماره‌ی منحنی	فاصله از رودخانه	اندازه‌ی بارندگی	اندازه‌ی شیب	ارتفاع آبراه	توان فرسایش	شاخص رطوبت پستی‌بندی	جهت تععر شیب	وزن
	۰/۲۶	۰/۲۴	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۰۹۹	۰/۰۴۷	۰/۰۴	۰/۰۲۷	

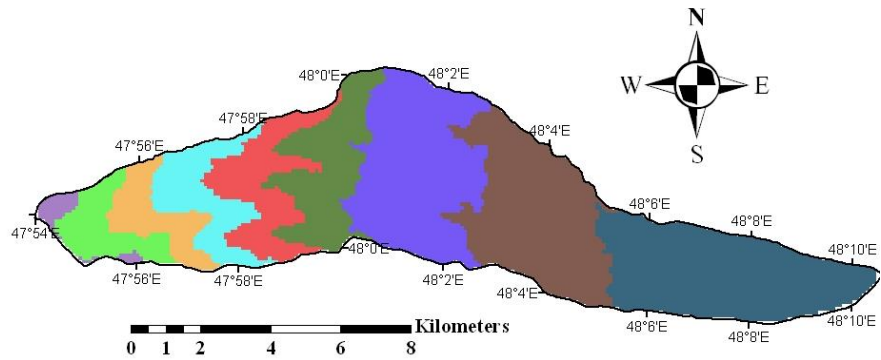


شکل ۱۱- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت شماره‌ی منحنی در آبخیز عموقین.



شکل ۱۲- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت بارندگی در آبخیز عموقین.

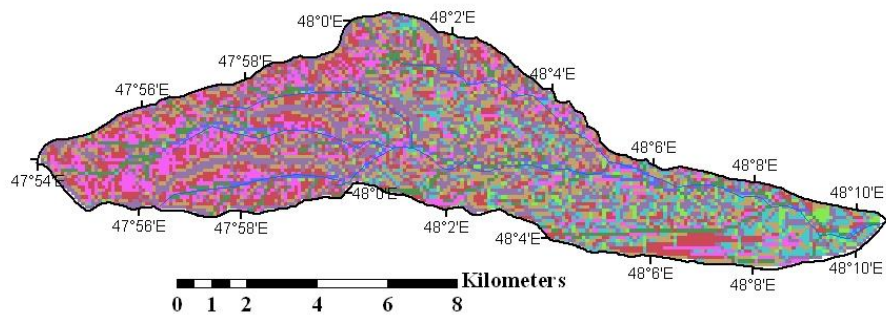
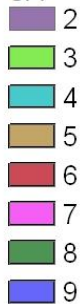
Elevation



شکل ۱۳- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت ارتفاع در آبخیز عموقین.



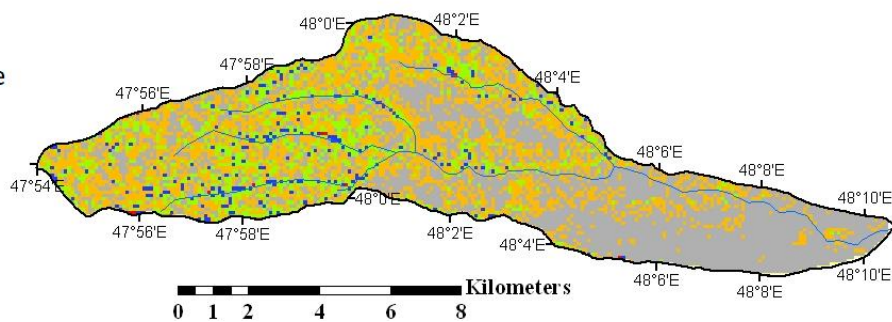
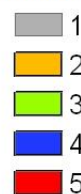
SPI



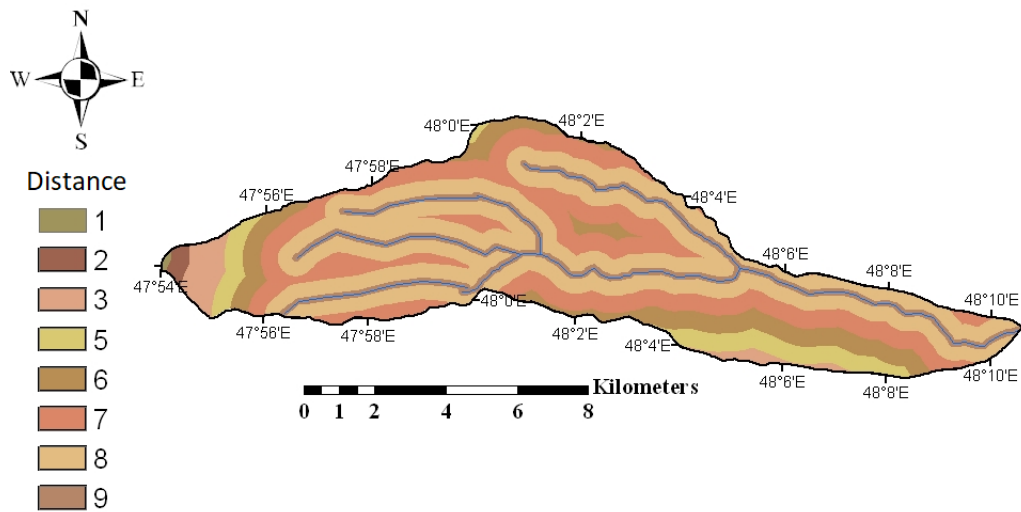
شکل ۱۴- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت توان فرسایش آبراه در آبخیز عموقین.



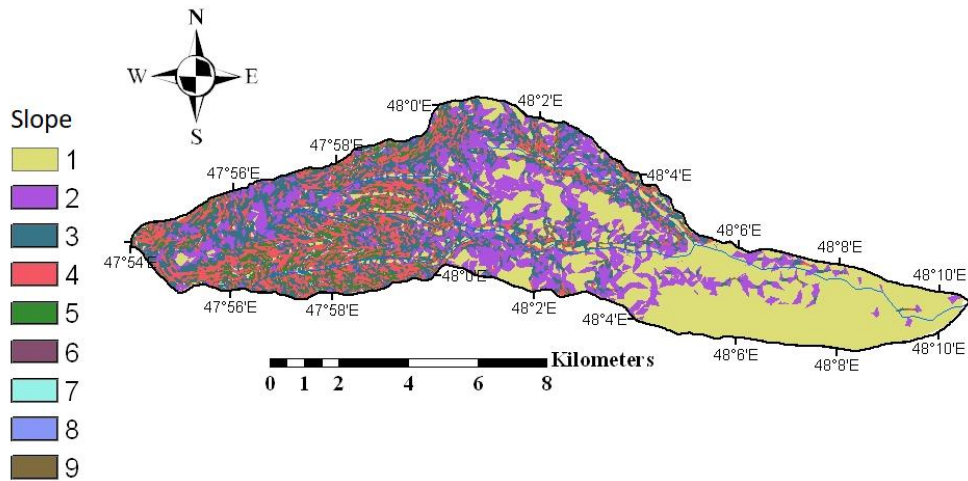
Curvature



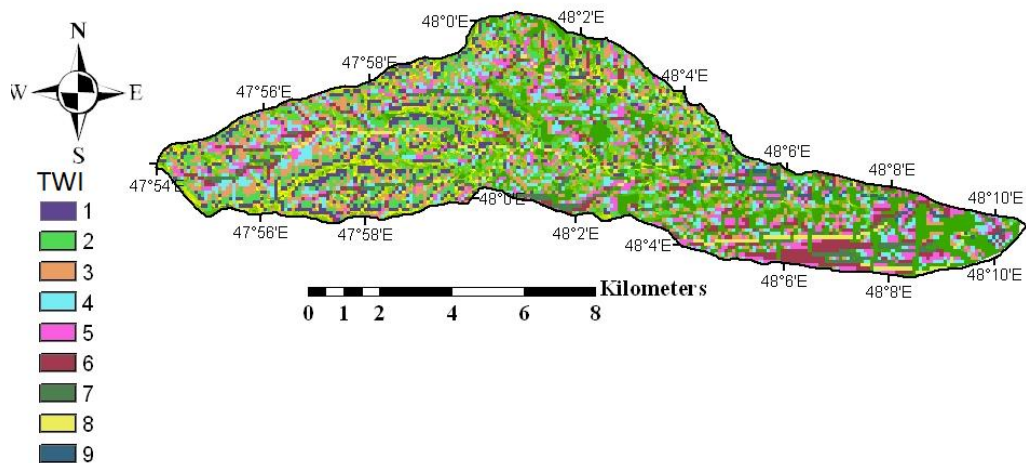
شکل ۱۵- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت شکل شیب در آبخیز عموقین.



شکل ۱۶- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت فاصله از رودخانه در آبخیز عموقین.



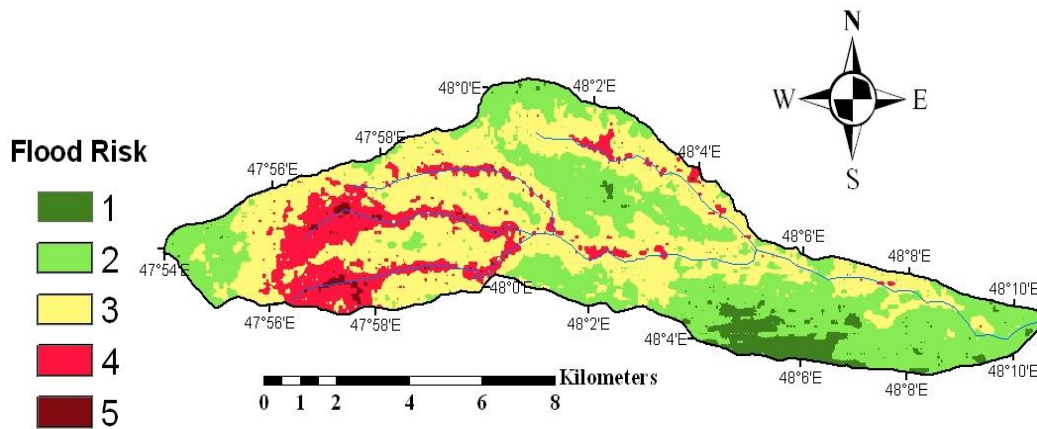
شکل ۱۷- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت شیب در آبخیز عموقین.



شکل ۱۸- نقشه‌ی رده‌بندی تابع عضویت شاخص رطوبت پستی‌بلندی در آبخیز عموقین.

جدول ۳ مساحت هر رده‌ی حساسیت آورده شده‌است.

برای دانستن اندازه‌ی تاثیر هر یک از عامل‌ها، نقشه‌ی خطر سیل خیزی در آبخیز عموقین برآورد کرده‌شد (شکل ۱۹). در



شکل ۱۹- نقشه‌ی نهایی خطر سیل خیزی برای آبخیز عموقین به روش سلسه‌مراتبی.

جدول ۴- مساحت هر یک از رده‌های حساسیت به رخداد سیل در آبخیز عموقین.

طبقه‌ها	مساحت (کیلومتر مربع)	مساحت (درصد)
خیلی کم	۳/۵	۴/۴
کم	۲۹	۳۷/۱۷
متوسط	۳۵	۴۴/۸۷
زیاد	۱۰	۱۲/۸۲
خیلی زیاد	۰/۵	۰/۶۴

عامل‌های موثر بر سیل خیزی در دو دسته‌ی مشخص تقسیم‌بندی شد. دسته‌ی اول شامل عامل‌هایی است که عملاً تغییرپذیر نیست، شامل خصوصیت‌های گیاتاشناسی آبخیز از جمله شیب، ارتفاع، و جهت تقعر، و دسته‌ی دوم عامل‌هایی است که در آبخیزداری تغییرپذیر است و با کاربرد آن‌ها می‌توان تا حدی تغییر آورد و خطر سیل خیزی را در آبخیز بررسی کرد. در تحقیق حسینی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی حساسیت آورد سیلاب خروجی به شاخص‌های تغییرپذیر از جمله شماره‌ی منحنی و بررسی صحت وزن‌دهی شاخص‌های موثر، مقدار شماره‌ی منحنی آبخیز ۰/۳٪ افزایش یافت. مقدار سیل ایجادشده در آبخیز عموقین به ترتیب برای دوره‌ی بازگشت‌های ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال، ۲۲، ۲۶ و ۲۵/۵٪ افزایش یافت. این بیان‌گر آن است که افزایش شماره‌ی منحنی به اندازه‌ی ۰/۳٪ ممکن است تاثیر چندبرابری بر حجم سیلاب داشته باشد، که در سیلاب‌های با دوره‌ی بازگشت‌های زیادتر ممکن است آسیب‌های مالی و جانی فراوانی به همراه داشته باشد. این موضوع با نتیجه‌های تحقیق مقدسی و همکاران

(۲۰۱۷) مطابقت دارد، که ۵٪ افزایش در شماره‌ی منحنی باعث ۶۰٪ افزایش در آورد اوج شد. نتیجه‌های تحلیل حساسیت به اندازه‌ی بارندگی در آبخیز نشان داد که در اندازه‌های یکسان از نظر شماره‌ی منحنی آبخیز، با افزایش تقریباً شش درصدی اندازه‌ی بارندگی در آبخیز، اندازه‌ی آورد سیلاب خروجی برای دوره‌ی بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال به ترتیب ۱۱/۷٪ و ۱۰/۸٪ افزایش یافت، که با وزن‌دهی شاخص‌ها در آبخیز مطابقت دارد. شاخص شماره‌ی منحنی و فاصله از رودخانه بیش‌ترین، و جهت تقعر شیب کم‌ترین عامل موثر در خطر رخداد سیل در منطقه بود، که با نتیجه‌های نوری و همکاران (۲۰۱۹) که تاثیر عامل شماره‌ی نفوذ منحنی را بر خطر رخداد سیل کم‌ترین دانستند مغایرت دارد. البته قاسمی و همکاران (۲۰۱۹) و خسروی و همکاران (۲۰۱۶) نقش عامل فاصله از رودخانه را بر خطر رخداد سیلاب موثر دانستند، که با نتیجه‌های این تحقیق مطابقت دارد. در نقشه‌ی خطر سیل خیزی آبخیز نشان داده شد که منطقه‌های غربی آبخیز که کوهستانی است و ارتفاع آن بیش‌تر از سایر

خطر با افزایش اندازه‌های شاخص رطوبت پستی‌بلندی هست، که با پژوهش‌های سامانتا و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. در نظر گرفتن تغییر تدریجی شاخص‌های موثر، ارزش‌گذاری لایه‌ها، و تعیین وزن هر لایه در ارزیابی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مسلماً ممکن است سبب دقت بیش‌تر این روش از سایر روش‌ها شود. ارزیابی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی سبب می‌شود که اگر یکی از شاخص‌های موثر بر سیل‌خیزی امتیاز کمی داشت، با تاثیر دادن وزن لایه‌ی آن، تاثیر نهایی شاخص، و تاثیر آن بر ارزیابی نهایی کاهش یابد. این موضوع در منطقه‌های شرقی آبخیز عموقین مشاهده شد. از آن‌جا که این منطقه‌ها امتیاز زیادی در تاثیر‌گذاری شاخص شماره‌ی منحنی گرفت، و نفوذپذیری آن کم بود و در گروه نفوذ D طبقه‌بندی شد، به دلیل گرفتن امتیاز کم در سایر شاخص‌های تاثیر‌گزار، از جمله شیب، بارندگی و ارتفاع، در ارزیابی سلسله‌مراتبی در منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی کم طبقه‌بندی شد، در حالی که اگر شاخص‌ها وزن‌دهی نمی‌شد ممکن بود به دلیل تاثیر دادن یکسان لایه‌ها، و در نظر نگرفتن وزن لایه‌ها، در منطقه‌های با خطر زیاد طبقه‌بندی شود.

تاثیر روش سلسله‌مراتبی و وزن‌دهی لایه‌ها در ارزیابی نهایی در ناحیه‌ی غرب آبخیز به خوبی مشاهده می‌شود. فاصله از رودخانه، شیب زمین، و اندازه‌ی بارندگی شاخص‌های مهم و تاثیر‌گزار در محدوده‌ی غرب آبخیز بود و باعث شد امتیاز این منطقه زیاد شود و مانند منطقه‌های شمالی آبخیز در گروه منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی لحظه‌ی زیاد باشد (شکل ۱۱ تا ۱۸). نکته‌ی دیگری که تفسیر کاربری زمین در سطح آبخیز روشن می‌سازد، زیاد بودن خطر سیل‌خیزی در مکان‌هایی است که غالب گروه نفوذ زمین آن از نوع D است و توان فرسایش‌پذیری آن زیاد است. در این منطقه‌ها در حاشیه‌ی رودها در غرب آبخیز که شیب نسبتاً زیاد است، روند به‌هم‌پیوستگی منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی زیاد به دلیل گسترش سطح این منطقه‌ها دیده می‌شود. علاوه بر این، این منطقه‌ها با شیب غالب شمال به جنوب که به سمت رودخانه‌ی اصلی آبخیز است، ممکن است کانون فرسایش و سیلاب منطقه شود. از آن‌جا که نحوه‌ی مشارکت بخش‌های مختلف آبخیزها در سیل‌خروجی لزوماً یکنواخت نیست، و مکان‌های با شیب بیش‌تر و نزدیک به رودخانه‌ی اصلی آبخیز ضرورتاً تاثیر بیش‌تری در سیل‌خیزی آبخیز دارند (امیراحمدی و همکاران ۲۰۱۳)، برای مهار کردن سیل یا کاهش دادن آورد اوج در خروجی آبخیز، باید مطابق با نقشه‌ی سیل‌خیزی به‌دست‌آمده در منطقه، کنش‌های آبخیزداری در قسمت غربی آبخیز انجام شود، تا با کاهش دادن مشارکت این بخش از آبخیز در آورد سیلاب خروجی، آورد اوج و حجم سیلاب نهایی آبخیز کاهش داده‌شود.

منطقه‌ها است، همه‌ی شاخص‌های موثر بر سیل‌خیزی موثر عمل کردند و خطر سیل‌خیزی را افزایش دادند. به‌خصوص در نقطه‌های نزدیک به رودخانه‌ی اصلی و آبراه‌های منتهی به آن، احتمال رخداد سیل بیش‌تر است، به‌طوری که در فاصله‌ی عرض جغرافیایی $47^{\circ} 56'$ تا $47^{\circ} 58'$ در غرب آبخیز عموقین، منطقه‌های با خطر زیاد سیل‌خیزی به هم متصل شده و منطقه‌ی تقریباً یکپارچه را به وجود آورده‌اند. البته منطقه‌های مسکونی آبخیز عموماً در قسمت شرق آبخیز است که در محدوده‌ی منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی کم است. طبقه‌بندی خطر سیل‌خیزی مربوط به سیل‌های ناگهانی است و این موضوع در شرایطی که سیلی با حجم زیاد در بستر رودخانه جریان یابد و به نقطه‌ی خروجی آبخیز برسد، سبب زیان‌های فراوان در این منطقه‌ها می‌شود. اسکان مردم در این آبخیز در نقطه‌های نزدیک به خروجی آبخیز است که خطر سیل‌خیزی لحظه‌ی در آن‌ها کم‌تر است، اما اگر در سطح آبخیز بارندگی شود و جریان‌های سطحی به هم پیوندند و به سمت نقطه‌ی خروجی حرکت کند، سیلاب‌های بزرگی را درست خواهد کرد. تحقیق حسینی و همکاران (۲۰۱۹) با کاربرد نرم‌افزار WMS نشان داد که سیلاب با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال بیش از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه آب را در بستر رودخانه به جریان خواهد انداخت، که مسلماً منطقه‌های وسیعی از دشت‌های مسکونی را خواهد گرفت و زیان‌های زیادی را سبب خواهد شد. از آن‌جا که این بیش از ۱۰ برابر آورد پایه‌ی رودخانه در محل ایستگاه عموقین در قسمت خروجی آبخیز است، اهمیت توجه به پیش‌گیری از آسیب‌های احتمالی سیل چندین برابر می‌شود، زیرا حجم سیلاب برآوردشده با نرم‌افزار ۱-Hec پس از صحت‌سنجی و اعتبارسنجی برای دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال نزدیک به ۱۰،۰۰۰،۰۰۰ مترمکعب برآورد شد.

بیش‌ترین رخداد سیلاب در فاصله‌ی کم‌تر از ۵۰۰ متر، در طبقه‌ی ۲۷۷۳-۳۰۴۰ متر و شیب ۲۹٪ (به دلیل جاری شدن سیلاب در منطقه‌های با ارتفاع و شیب متوسط)، و در شیب‌های رو به رودخانه بود. راه افتادن سیلاب‌های ناگهانی در شیب‌های بیش‌تر با تحقیق تهرانی و همکاران (۲۰۱۷) مغایرت دارد، که نشان دادند که احتمال رخداد سیل در شیب‌های کم، بیش‌تر است. بیش‌ترین رخداد سیلاب در طبقه‌ی ۲/۲۶-۱/۰۲ از رطوبت پستی‌بلندی، و در مرتع‌های حاشیه‌ی رودها در منطقه‌های مرتفع بود، که تراکم پوشش گیاهی در آن کم است. نزدیکی منطقه‌های پرخطر سیل‌خیزی به رودخانه‌ها و مکان‌های با پوشش گیاهی کم و شیب متوسط با نتیجه‌های تحقیق رضوی ترمه و ملک (۲۰۱۷) مطابقت دارد. با تطابق نقشه‌های شاخص رطوبت پستی‌بلندی و منطقه‌های با خطر سیل‌خیزی زیاد، مشخص می‌شود که رابطه‌ی مثبت و معنی‌داری بین افزایش

نتیجه‌گیری

کاربرد سامانه‌ی اطلاعات مکانی و سنجش‌ازدور در پژوهش‌های سیل‌خیزی و منابع آب به‌دلیل داشتن دقت زیاد و سرعت و زمان که دو مؤلفه‌ی اصلی شبیه‌سازی سیلاب است، ممکن است مفید باشد. نتیجه‌های این تحقیق نشان داد که روش سلسله‌مراتبی می‌تواند به‌دلیل توانایی در به‌کاربردن نظرهای کارشناسی و وزن‌دهی به لایه‌های موثر بر سیل‌خیزی منطقه، به خوبی منطقه‌های مستعد سیل‌خیزی را شبیه‌سازی کند. تاثیر شاخص

شماره‌ی منحنی و فاصله از رودخانه در تولید سیل در منطقه بیش‌ترین، و جهت تقعر شیب کم‌ترین بود.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت معاون محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی در قرارداد طرح شماره‌ی ۱۱۵۹ (۱۳۹۷/۱/۲۶) تهیه شده است. بدین‌وسیله از ایشان قدردانی می‌شود.

- Abdullah AF, Vojinovic Z, Rahman AA. 2013. A methodology for processing raw LiDAR data to support urban flood modelling framework (Case study: Kuala Lumpur Malaysia). In: Rahman AA, Boguslawski P, Gold C, Said M (eds) *Developments in multidimensional spatial data models*. Springer, Berlin, pp 49–68.
- Amir Ahmadi A, Mohammadnia M, Golshani N. 2015. Analysis of geomorphological factors influencing the flood using the HEC-HMS model. *Hydro Geomorphology*, 1(3):21–42. (In Persian).
- Anderson JR, Hardy ET, Roach JT, Witmer RE. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. U.S. Geol. Survey prof. Paper 964. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Alizadeh A. 2001. *Principals of applied hydrology*, Mashhad, Astan Ghods Razavi press, 13th edition, (In Persian).
- Azam M, Hyung SK, Seung JM. 2017. Development of flood alert application in Mushim stream watershed Korea. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 21(3): 11–26.
- Badri B, Zare Bidaki R, Honarbakhsh A, Atashkhar F. 2014. Prioritization of flooding potential in Beheshtabad Sub Basins. *Natural Geography Research*, 48(1): 143–158. (In Persian).
- Fernandez DS, Lutz MA. 2010. Urban flood Hazard Zoning in Tucumán Province, Argentina, Using GIS and Multicriteria Decision Analysis. *Engineering Geology*. 111(4): 90–98.
- García-Pintado J, Neal JC, Mason DC, Dance SL, Bates PD. 2013. Scheduling satellite-based SAR acquisition for sequential assimilation of water level observations into flood modeling. *Journal of Hydrology*. 495(1): 252–266.
- Ghasemi A, Salajegheh A, Malekian A, Esmaliouri A. 2019. Investigation of flooding and causative factors in Balegli Chay Watershed by GIS, RS, and AHP techniques, *Journal of Environmental Studies*. 40(2): 389–400. (In Persian).
- Hoseini Y, Ramezani Moghaddam J, Abdolizadeh Z. 2019. Evaluating the impact of land use changes on flooding and flood runoff in Amuqin Drainage Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards*. 8(22): 145–163. (In Persian).
- Khairizadeh-Arugh M, Maleki J, Amunia H. 2019. Zoning of flood risk potential in Mardeghai catchment using model ANP. *Quantitative Geomorphology Research*. 1(3): 39–56. (In Persian).
- Khosravi K, Pourghasemi HR, Chapi K, Bahri M. 2016. Flash flood susceptibility analysis and its mapping using different bivariate models in Iran: a comparison between Shannon's entropy, statistical index, and weighting factor models. *Environmental Monitoring and Assessment*. 188(12): 658–692.
- Khosroshahi M, Saghfian B. 2003. Investigating the role of watershed sub-basin participation in basin flood intensity. *Journal of Research and Construction*. 59(2): 67–75. (In Persian).
- Li N. 2002. The flood risk management system based on GIS. PhD Paper. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydropower Research. 156 p.
- Lu L, Shi Zh, Yin W, Zhu D, Sai N, Leung C, Chong F, Leia L. 2009. A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco-environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou Reservoir Area. *China Ecological Modeling*. 220(23): 3439–3447.
- Moghadasi N, Karimirad I, Vahedberdi Sh. 2017. Assessing the impact of land use changes and rangeland and forest degradation on flooding using watershed modeling system. *Journal of Rangeland Science*, 7(2): 93–106.
- Nouri H, Shahedi K, Habibnezhad R, Kaviani A, Faramarzi M. 2019. Susceptibility to flooding in the Razavar Watershed using analytical hier-

- archy process method, Journal of Natural Environmental Hazards. 8(19):35–50. (In Persian).
- Oh HJ, Pradhan B. 2011. Application of a neuro-fuzzy model to landslide- susceptibility mapping for shallow landslides in a hilly area, Computers & Geosciences. 37(9): 1264–1276.
- Pradhan B. 2009. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. Journal of Spatial Hydrology. 9: 1–18
- Rasulzadeh A, Azartaj E, Farzi P. 2016. Derivation and investigation of regional flood analysis models as a function of return period (Case study: Ardabil Province). Journal of Water and Soil Conservation. 22(4):261–268. (In Persian).
- Razavi Termeh V, Malek MR. 2017. Flood susceptibility mapping using ensemble of evidential belief (EBF) function with analytical hierarchy process (AHP) (Case study: Jahrom Township). Geospatial Engineering Journal. 8 (3):1–15.
- Samanta R, Bhunia G, Shit P, Pourghasemi HR. 2018. Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin, India. Modeling Earth Systems and Environment. 4(1): 395–408.
- Shannon CE. 1948. A mathematical theory of communication, Bell Telephone System Technical Publications.
- Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. Journal of Hydrology. 512(2):332–343.
- Tehrany MS, Pradhan B, Jebur MN. 2015. 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.



Assessing the Flooding Susceptibility in the Amuqin Watershed Using the Analytical Hierarchy Process Method

Yaser Hoseini

(Corresponding Author)* Moghan College of Agriculture and Natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Corresponding Author Email: y_hoseini@uma.ac.ir

Received: 28 December 2019 Accepted: 20 December 2020

Abstract

Knowledge of the flood discharge rate is of the utmost importance in water resources utilization and flooding damage mitigation studies. Therefore, the aim of the current research was mainly to assess the Analytical Hierarchy Process (AHP) method to predict the flooding susceptibility of the Amuqin Basin, located in the Province of Ardabil. The basin's area is approximately 78 km². The curve number (CN) of the basin was found by integrating the land use maps with the soil hydrologic groups namely: B, C, D. The CN was estimated 78.7 the year for 2015. Different effective factors, namely: the slope percentage, land curvature, distance from the river, topographic wetness index, stream power index (SPI), and the CN were used in the application of the AHP method, and the effective layers were classified into nine classes. A flooding into susceptibility map was constructed and classified into five classes with very low, low, moderate, high, and very high susceptibility. The results indicated that the CN was the most prominent in flooding susceptibility; the distance to the river and the amount of rain occupied the next priorities. The lowest factor in the flooding susceptibility was related to the plan curvature. Moreover, the results indicated that about 0.64% and 4.4% of the study area were categorized with high and very low sensitivities, respectively.

■ **Keywords:** Watershed, Ardabil, AHP, flooding, susceptibility analysis ■