



"مقاله پژوهشی"

بررسی خطرپذیری سیل در حوضه‌های فاقد آمار با استفاده از ویژگی‌های ژئومرفیک (مطالعه موردی: وازرود)

کریم سلیمانی^۱ و فاطمه شکران^۲

۱- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- استادیار گروه مهندسی آبخیزداری دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، (نویسنده مسوول: shokrian.f@gmail.com)
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۱۸ صفحه: ۱۲۰ تا ۱۳۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: در حوضه‌های فاقد آمار هیدرومتری نمی‌توان رفتار هیدرولوژیک را نسبتاً دقیق به دست آورد؛ اما با پرداختن به ویژگی‌های ژئومرفیک می‌توان بر این مشکل فائق آمده تا در آینده به کاهش خسارات ناشی از سیل پرداخت. در این تحقیق به‌منظور تعیین خطر سیلاب مناطق سیل گیر از دو عامل ژئومرفیک شامل شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص قدرت رودخانه استفاده شد.

مواد و روش‌ها: با توجه به نبود داده‌های کافی در ارتباط با دبی رودخانه حوزه آبخیز وازرود اقدام به تعیین مشخصه‌های خطر سیل تاریخی در این منطقه شد. در مرحله نخست از روش SCS به منظور شبیه‌سازی دبی اوج استفاده شد. پس از تعیین مشخصه‌های کمی خطر سیل (دبی اوج) در مرحله بعد اقدام به پیش‌بینی خطر کیفی سیل شد. به‌منظور تعیین خطر کیفی سیل از تلفیق دو عامل قدرت رودخانه و سطح اراضی سیل گیر استفاده شد. اراضی سیل گیر با دوره بازگشت‌های مختلف با روش آستانه شاخص رطوبت توپوگرافی مشخص شد.

یافته‌ها: نتایج اجرای این روش نشان داد که با افزایش دوره بازگشت سیل، اراضی سیل گیر افزایش می‌یابد و میزان شاخص رطوبت توپوگرافی با افزایش دوره بازگشت سیل کاهش می‌یابد. نتایج نقشه‌های خطر سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف نشان داد که هرچه دوره بازگشت سیل بزرگ‌تر می‌شود مناطق تحت تأثیر خطر سیل در طبقات خطر به‌طور کلی افزایش پیدا می‌نماید. اراضی که در خطر سیل با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله قرار خواهند گرفت به ترتیب ۲/۲، ۳، ۴/۲ و ۹/۸٪ در کل حوضه می‌رسد. همچنین روستاهای واز تنگه، وازعلیا و نوجمه به ترتیب با ۲۰/۶، ۱۶/۴ و ۱۳/۱٪ اراضی تحت تأثیر سیل به عنوان آسیب‌پذیرترین مناطق روستایی در حوضه آبخیز وازرود تعیین شدند.

نتیجه‌گیری: پیش‌بینی خطر سیل بستگی به ویژگی‌های حوزه آبریز و عوامل هیدرولوژیک و ژئومرفیک منطقه دارد. به‌طوری که در حوزه‌هایی که دارای آمار ناقص و کم می‌باشند به عنوان یکی از ابزارهای مدیریت غیرسازه‌ای سیلاب و مکمل روش‌های سازه‌ای، نقش مهمی را در کنترل سیلاب و کاهش خسارات محتمل ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص قدرت رودخانه، شماره منحنی، مدیریت ریسک سیل

مقدمه

وقوع پدیده‌های طبیعی چون سیل، تاکنون موجب بروز خسارات زیادی به جوامع بشری شده است. بر اساس داده‌های بانک اطلاعاتی معاونت آبخیزداری سازمان جنگل‌ها و مراتع ایران طی چند دهه اخیر، به‌طور متوسط خسارات ناشی از سیل بالغ بر ۱۰ هزار میلیارد ریال معادل ۴۰ میلیارد دلار آمریکا در سال بوده است. همچنین سیل در ایران در بازه زمانی ۱۳۳۰ تا ۱۳۸۰ باعث مرگ ۱۱ هزار و ۷۳۹ نفر و مفقودالاًثر شدن ۲۳۸۱ نفر دیگر شده است. یک‌میلیون و ۵۸۰ هزار رأس دام تلف شده و دو میلیون ۳۰۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی در همین بازه زمانی از سیل آسیب‌دیده است. متأسفانه در فاصله سال‌های ۱۳۳۰ تا ۱۳۶۰ حدود ۲۶ درصد از وقایع سیل اتفاق افتاده در کشور به درستی ثبت نشده است (۵،۱۷). بسیاری از تلفات ناشی از این سیل‌ها قابل پیشگیری و مدیریت بوده است (۲۶). بر اساس آمارهای موجود، وقوع سیلاب‌های بزرگ ثبت نشده در دهه‌های پیش می‌توانست در جهت مدیریت بهتر در مقابله با رخدادهای سیل آتی کمک نماید (۱۴،۱۵). خصوصیات سیلاب برای درک چگونگی عمل و نحوه مقابله با آن دارای اهمیت است (۱۶). در پیش‌بینی سیلاب، خصوصیات رگبار و خصوصیات حوضه نقش تعیین‌کننده‌ای دارند (۲۸). تلاش محققان، در جهت درک بهتر از پدیده‌های اساسی که رفتار فرآیندهای ژئوفیزیک در پیش‌بینی شرایط آتی را کنترل می‌کنند و همچنین ترکیب این وضعیت‌های پیش‌بینی شده برای طراحی، از موارد قابل توجه

است. به دلیل فقدان ایستگاه‌های دبی و بارش در حوضه وازرود نمی‌توان رفتار هیدرولوژیک نسبتاً دقیق از منطقه داشت. لذا با پرداختن به ویژگی‌های ژئومرفیک می‌توان بر این مشکل فائق آمده تا در آینده به کاهش خسارات ناشی از سیل پرداخت. بنا بر اطلاعات توصیفی از ساکنان محلی دو واقعه سیل در تاریخ‌های ۱۳۳۷ و ۱۳۶۰ در منطقه رخ داده است که با پرسش و پاسخ از آن‌ها تمامی روستاهای واز علیا، واز سفلی و واز تنگه را تحت تأثیر قرار داده است. به گفته بومیان ارتفاع سیل در این دو رخداد حتی به ۵ متر نیز رسید و خسارت کامل به این مناطق مسکونی وارد ساخت. تغییرات کاربری اراضی در بالادست در پی فعالیت‌های انسانی از جمله تشدید چرای دام و تخریب پوشش گیاهی منجر به تشدید بلایای طبیعی از جمله وقوع سیلاب‌های مهیب و ویران گر در حوضه‌ها نظیر وازرود گردیده است (۲۰،۲۱،۲۴،۲۵). متأسفانه علیرغم رخدادهای سیل در حوضه‌های مختلف آبخیز در مقیاس جهانی فقدان داده‌های ثبت شده مشکل را مضاعف نموده است. در ایران فراوانی وقوع سیلاب‌ها هر ساله خسارات جانی و مالی زیادی وارد می‌نماید که متأسفانه بخش اعظمی از این رخدادهای مربوط به حوضه‌های فاقد آمار می‌باشد. نهایتاً فقدان داده‌های ثبتی در حوضه‌های فاقد آمار برنامه ریزان را با در انتخاب مکان‌های مناسب جهت احداث سدها، استقرا مناطق مسکونی و ایجاد زیرساخت‌های توسعه‌ای نظیر جاده‌ها، پل‌ها و... با مشکلات عدیده‌ای روبرو ساخته است. لذا یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای برون‌رفت از چنین

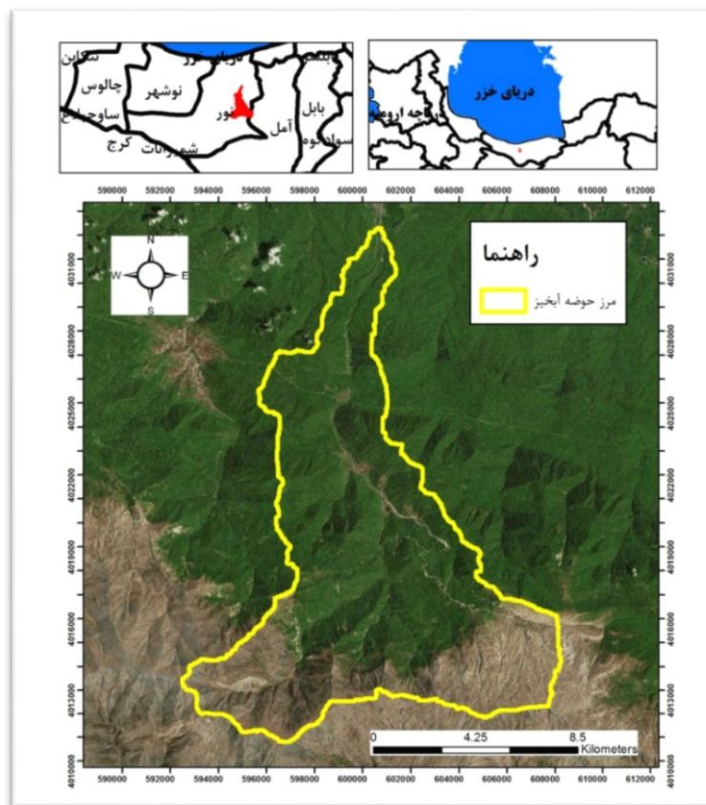
برای سیلاب شناسایی شد.

عابدینی و جوکدان (۱) به پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در حوضه‌ی گرگان رود با استفاده از Arc GIS پرداختند. ابتدا متغیرهای تأثیرگذار در وقوع سیل نظیر شیب، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، خاک، میزان بارندگی و رتبه‌بندی آبراهه‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که حوضه‌ی مورد مطالعه به دلیل برخورداری از متوسط بارندگی سالانه‌ی ۱۰۵۸/۷ میلی‌متر، شیب زیاد، سازندهای نسبتاً نفوذناپذیر و همچنین به دلیل داشتن شکلی دایره‌وار از قابلیت سیل‌خیزی نسبتاً زیادی برخوردار می‌باشد. شیرزادی و هاشم‌زاده (۱۹) بر اساس روش سازمان حفاظت خاک امریکا SCS، برای تعیین ارتفاع رواناب از نقشه‌های شماره منحنی CN و نقشه خطوط هم‌باران استفاده کردند. سپس با مدل‌سازی و نوشتن فرمول‌های مرتبط در محیط نرم‌افزار GIS نقشه پهنه‌بندی ارتفاع رواناب و سیل‌خیزی منطقی تهیه کردند. بررسی نتایج نشان داد که شبکه منتخب MLP با همبستگی ۰/۹۸ در مرحله آموزش و ۰/۹۷۹ در مرحله آزمایش و خطای کمتر نسبت به سایر روش‌ها به عنوان بهترین مدل در بین انواع شبکه‌ی عصبی شناخته شد. با توجه به تحقیقات انجام گرفته می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که از جمله مهم‌ترین عوامل بروز سیل تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی و کاهش نفوذپذیری خاک بوده است (۲). همچنین بررسی منابع نشان داد که استفاده از عوامل ژئومورفیک از قبیل شاخص توان آبراهه، شاخص رطوبت توپوگرافی در برخی مطالعات داده‌کاوی پهنه‌بندی مناطق سیل‌گیر مورد استفاده قرار گرفته است (۵)، اما در این تحقیق با استفاده از تلفیق دو ویژگی اراضی سیل‌گیر و شاخص قدرت آبراهه به ارزیابی خطرپذیری اراضی سیل‌گیر پرداخته خواهد شد و پس از شبیه‌سازی دبی اوج در دوره بازگشت‌های مختلف ۲ تا ۱۰۰ ساله، سناریوهای سیل‌گیری قدرت سیل و میزان وسعت خسارات وارده به مناطق مسکونی بررسی خواهد شد.

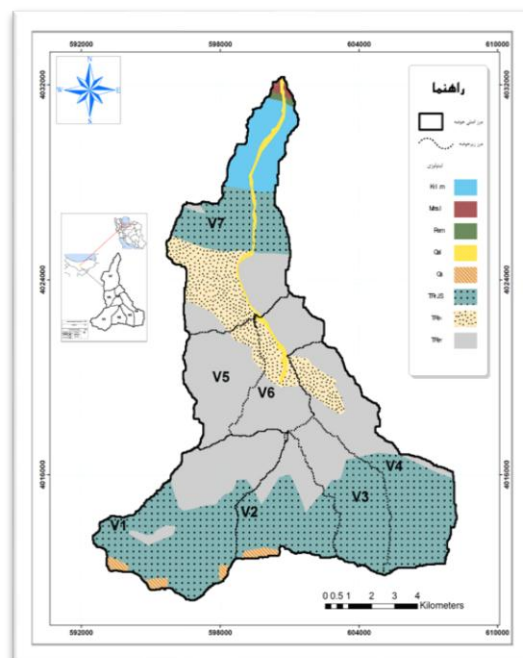
مواد و روش‌ها

محدوده حوضه آبخیز توسط نقشه‌های رقومی ۲۵۰۰۰:۱ و بررسی نقشه‌های توپوگرافی نمارستاق و چمستان از سازمان جغرافیایی ایران تعیین گردیده است. محدوده حوضه آبخیز وازرود در بخش میانی استان مازندران در عرض شمالی ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه و ۲۶ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه و ۵۴ ثانیه و طول شرقی ۵۲ درجه و ۰۱ دقیقه و ۴۶ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۱۲ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱) (۲۴). این حوضه از شمال به شهرستان نور، از جنوب به حوضه آبخیز هزار، از غرب به حوضه آبخیز لاریج رود از شرق به حوضه ناپالارود ختم می‌گردد، مساحت این حوضه ۱۳۷ کیلومتر مربع و محیط آن ۷۲/۳۲ کیلومتر می‌باشد (۲۴). از مهم‌ترین شاخه‌های آن رودخانه نوجمه-گزنا سرا در بخش شرقی از ارتفاعات تترستاق، رودخانه دولت سرا که از ارتفاعات رودبارک، ایتا، واکمر و میشنو سرچشمه گرفته و بعد از طی مسیر در محل روستای واز بالا به رودخانه اصلی متصل می‌گردد (۲۴).

مشکلاتی رهگشا باشد. هدف از انجام این تحقیق تعیین مقدار عددی دبی اوج و میزان گسترش مکانی پهنه‌های سیل گیر در حوضه‌های فاقد آمار است. در حوضه آبخیز واز رود مطالعات زیادی در زمینه پهنه‌بندی خطر سیل انجام نشده است. مطالعات قابل ذکر در این حوضه می‌توان به مطالعه هادیان امری و حبیب‌نژاد (۱۰) به مقایسه روش‌های تجربی برآورد دبی حداکثر سیل در حوضه آبخیز واز رود استان مازندران اقدام نمودند. نتایج نشان داد که تنها بین مقادیر حاصل از مدل‌های کریگر و دیکن در سطح اطمینان ۹۵٪ تفاوت معنی‌داری وجود ندارد و ضمناً با توجه به نزدیک بودن مقادیر این دو مدل با واقعیت منطقه، از نتایج آن‌ها می‌توان در طراحی‌ها استفاده نمود. زندگی و همکاران (۳۰) به ارزیابی نقشه خطر فرسایش خاک و ارتباط آن با برخی عوامل محیطی در حوضه وازرود اقدام نمودند. نتایج نشان داد که بازدیدهای گسترده میدانی صورت گرفته صحت کلی (۹۰ درصد) نقشه خطر فرسایش و مدل مورد بررسی را تأیید کرد. بخش اعظم طبقات فرسایشی زیاد و خیلی زیاد در شیب‌های ۲۵ تا ۴۵ درجه، ارتفاع ۱۱۸۰ تا ۲۱۸۰ متر از سطح دریا و در اراضی لخت منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب را برای تصمیم گیران در اولویت‌بندی نواحی برای کاهش فرسایش در حوضه آبخیز وازرود امکان‌پذیر می‌کند. سلیمانی و همکاران (۲۲) به ارزیابی کارایی روش‌های نسبت فراوانی، آماری دومتغیره Wi و Wf در تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه آبخیز وازرود پرداختند. فرایند اعتبارسنجی نشان داد که مقدار سطح زیر منحنی ROC در روش وزن‌دهی به فاکتورها (Wf) برابر با ۰/۹۶۲ همراه با خطای استاندارد ۰/۰۰۲ بوده و نسبت به دیگر روش‌ها پیش‌بینی بهتری در رخداد زمین‌لغزش‌ها داشته است. صادقی و همکاران (۱۸) به تأثیر برداشت شن و ماسه رودخانه‌ای بر تغییرپذیری ماهانه غلظت رسوب معلق حوضه آبخیز واز رود پرداختند. مقدار غلظت بار معلق در شرایط فعالیت معدن و شدت برداشت، افزایش بیشتری نسبت به قبل از معدن داشت. همچنین، دامنه اثر محدود و حداکثر در حدود چند صد متری محل برداشت بر غلظت رسوبات معلق و قاعداً هم‌زمان با مدت برداشت نیز مورد تأیید قرار گرفت. غلامی و همکاران (۸) به بررسی تأثیر افزایش جمعیت بر میزان تغییر کاربری اراضی حوضه آبخیز واز پرداختند. در بررسی روند تغییرات کاربری‌های مختلف در سه دوره مختلف از سال‌های ۴۵ تا ۷۱ و ۸۱ تا ۸۱، اثرات افزایش جمعیت بر روی سطح حوضه برای کاربری‌های مختلف مثبت نشان داده شد. مهاجرت افراد غیربومی جهت احداث ویلا بیشتر گردیده و در نتیجه عدم موفقیت برخی از طرح‌های مرتبط با بخش جنگل، کاهش سطح جنگل در دهه اخیر اتفاق افتاده است. یوسف‌زاده و همکاران (۲۹) به استخراج پتانسیل سیل‌خیزی حوضه سیمینه رود با کمک تصاویر ماهواره‌ای، شاخص رطوبت توپوگرافی و ویژگی‌های مورفولوژیکی پرداختند. براساس نقشه استخراجی و تجزیه و تحلیل نتایج، از کل مساحت منطقه، حدود ۸۱/۶ کیلومتر مربع (۲/۵ درصد) مستعد سیلاب بوده و ۱/۹ درصد از منطقه با میزان خطر متوسط



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز وازرود در ایران و استان مازندران (۲۴)
Figure 1. Position of Vazroud Watershed in Iran and Mazandaran Province (24)



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوضه آبخیز وازرود (۲۴)
Figure 2. Geological map of Vazroud watershed (24)

سازند شمشک، رسوبات کرتاسه $K2^{L,m}$ و سری سنگ‌های دوران سوم سنوزوئیک شامل رسوبات Qs , $M^{M.S}$, Pe^m و رسوبات بستر رودخانه Qal را می‌توان مشاهده نمود (شکل ۲)

در حوضه آبخیز وازرود، تشکیلات زمین‌شناسی از نوع سنگ‌های رسوبی بوده و از نظر سنگ‌شناسی منطقه به‌ترتیب از قدیم به جدید سری سنگ‌های دوران دوم نظیر سازند الیکا،

در محدوده حوضه وازرود که از ایستگاه‌های تنگه لایوچ و چمستان اقتباس شده اقدام به توزیع بارش در حوضه آبخیز وازرود شده است. در جدول ۱ شدت رگبارهای کوتاه‌مدت بادوام‌ها و دوره برگشت‌های مختلف معرف منطقه طی دوره آماری موجود (۱۳۳۱-۱۳۶۰) ارائه شده است.

(۲۴). خصوصیات رگبار براساس مقادیر شدت- مدت محاسبه شده و در دوره برگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به مدل معرفی شده است. این مقادیر بر اساس محدوده حدی که در سال‌های ۱۳۳۶ و ۱۳۶۰ اتفاق افتاده در نظر گرفته شده و برای زیر حوضه‌ها و کل حوضه آبخیز وازرود اعمال شده است. با توجه به بیشترین مقدار بارش ۲۴ ساعته

جدول ۱- شدت رگبارهای شش ساعته با دوره‌های برگشت مختلف (mm/h)(۲۴)

Table 1. Intensity of six-hour storm with different reversal periods (mm/h) (24)

کل حوضه	نام زیر حوضه							دوره بازگشت
	V7	V6	V5	V4	V3	V2	V1	
۵/۸	۶/۳	۸/۸۵	۵/۸۵	۵/۴	۶/۳	۳/۹	۵/۴	۲
۱۱/۴	۱۲/۶	۱۱/۷	۱۱/۷	۱۰/۳۵	۱۲/۴۵	۷/۹۵	۱۰/۳	۱۰
۱۴/۲	۱۵/۷۵	۱۴/۴	۱۴/۴	۱۲/۶	۱۵/۴۵	۱۱/۲۵	۱۳/۰۵	۲۵
۱۶/۳	۱۸	۱۶/۶۵	۱۶/۶۵	۱۴/۴	۱۷/۷	۱۲/۷۵	۱۴/۸۵	۵۰
۱۸/۳	۲۰/۲۵	۱۸/۴۵	۱۸/۹	۱۶/۶۵	۱۹/۹۵	۱۵/۷۵	۱۶/۶۵	۱۰۰

متوسط به دست آورده می‌شود. با توجه به CN به دست آمده مقادیر شماره منحنی (CN) هر یک از زیر حوضه‌ها در ادامه در شکل ۵ ارائه شده است. دقت در تخمین عدد شماره منحنی تأثیر بسیار مهمی در محاسبات دارد (۷). استفاده از تکنیک‌های جدید می‌تواند باعث افزایش دقت و سرعت در کار گردد. لذا در این مطالعه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و با کمک نرم‌افزار ArcGIS اقدام به تهیه نقشه شماره منحنی (CN) منطقه گردید (۴).

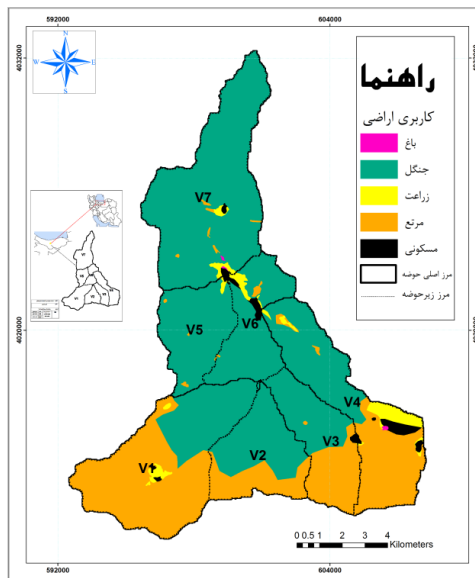
محاسبه حجم سیلاب با استفاده از هیدروگراف واحد

برای تهیه هیدروگراف واحد از روش تجربی SCS استفاده گردید. همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد زیر حوضه‌های V1 و V7 دارای بیشترین دبی پیک در مقایسه به دیگر حوضه‌ها و کل حوضه می‌باشند. در ادامه مقادیر CN با توجه به گروه هیدرولوژیکی خاک (شکل ۳) و کاربری اراضی (شکل ۴) ارائه شده است. با توجه به نقشه‌های گروه‌های هیدرولوژیک و کاربری اراضی، مقدار CN را تعیین نموده و سپس میانگین وزنی آن را گرفته و CN حوضه در شرایط

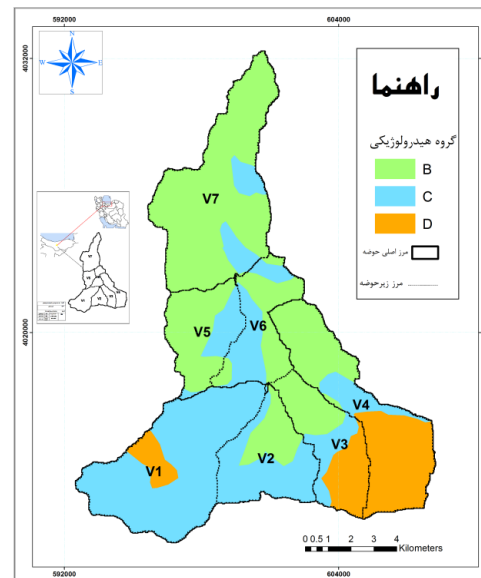
جدول ۲- مقادیر دبی حداکثر لحظه‌ای برای هر یک از زیرحوضه‌ها در هیدروگراف واحد به روش SCS برای یک سانتی‌متر رواناب (۲۴)

Table 2. Maximum instantaneous discharge values for each of the sub-basins in the unit hydrograph by SCS method for one centimeter of runoff (24)

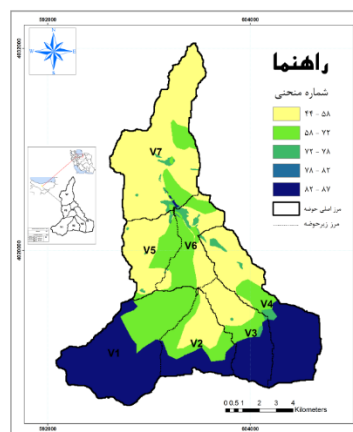
نام زیرحوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	Tc	D	TL	TP	Qp
V1	۲۹/۴۵	۳/۰۸	-/۴۱	۱/۸۵	۲/۰۵	۲/۹۹
V2	۱۴/۵	۲/۴۹	-/۳۳	۱/۴۹	۱/۶۶	۱/۸۲
V3	۱۳/۵۴	۲/۲۹	-/۳	۱/۳۷	۱/۵۳	۱/۸۵
V4	۲۳/۴۴	۳/۶	-/۴۸	۲/۱۶	۲/۴	۲/۰۴
V5	۱۱/۹۴	۲/۰۷	-/۲۸	۱/۲۴	۱/۳۸	۱/۸
V6	۱۲/۳	۲/۰۶	-/۲۷	۱/۲۴	۱/۳۷	۱/۸۷
V7	۳۲/۱۱	۴/۵۱	-/۶	۲/۷۱	۳/۰۱	۲/۲۲
کل حوضه	۱۳۷/۳	۸/۹۵	۱/۱۹	۵/۲۷	۵/۹۷	۴/۷۹



شکل ۴- نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز وازرود
Figure 4. Land use map of Vazrood watershed



شکل ۳- گروه‌های هیدرولوژی حوضه آبخیز وازرود
Figure 3. Hydrological groups of Vazrood watershed



شکل ۵- نقشه شماره منحنی حوضه آبخیز وازرود
Figure 5. Curve number map of Vazrood watershed

شاخص رطوبت توپوگرافی

توپوگرافی مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده در الگوی مکانی حوضه آبخیز می‌باشد که نشان‌دهنده بسیاری از تغییرات و فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد. توپوگرافی به‌عنوان یک عامل اولیه در تغییرات مکانی شرایط هیدرولوژیکی می‌باشد که توزیع مکانی رطوبت را کنترل کرده و جریان آب سطحی نیز از آن پیروی می‌کند (۱۷). بنابراین از شاخص رطوبت توپوگرافی برای توصیف الگوی مکانی رطوبت اشباع استفاده می‌شود (۱۲). شاخص رطوبت توپوگرافی TWI ابزاری مفید برای تعیین شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه می‌باشد و بنابراین مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت در حوضه‌ها را تخمین می‌زنند (۱۳). شاخص رطوبت توپوگرافی توسط کرکی و بیون (۳) در مدل بارش رواناب TOPMODEL معرفی شد که تأثیر توپوگرافی را بر روی تولید رواناب به‌صورت کمی بیان کرد. این شاخص به‌صورت رابطه ۱ تعریف شد. شاخص رطوبت توپوگرافی که از ترکیب

مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می‌آید، معمولاً برای کمی کردن کنترل توپوگرافی بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد. اگرچه روش‌های مختلفی برای محاسبه این شاخص وجود دارد که این روش‌های محاسباتی اصولاً در الگوریتم جهت جریان برای محاسبه مساحت حوضه بالادست و تخمین مقدار شیب باهم اختلاف دارند. در نهایت مناطقی که در یک حوضه مقدار TWI مشابهی داشته باشند، در صورتیکه شرایط محیطی دیگر آن‌ها یکسان باشد، فرض می‌شود که پاسخ هیدرولوژیکی مشابهی به باران داشته باشند و می‌توانند یکسان تلقی شوند.

$$TWI = (\ln \alpha / \tan \beta)$$

(رابطه ۱)

که در این رابطه α مساحت ویژه حوضه (مترمربع) و β درجه شیب می‌باشد. سطح ویژه محدوده آبخیز براساس سطح بالادست سهمیه در جریان آب، در هر نقطه از محدوده با توجه به توپوگرافی تعریف می‌گردد (۱۳).

تعیین آستانه شاخص رطوبت توپوگرافی

در این بخش، از روش ژئومرفیک با استفاده از یک روش احتمالاتی به منظور تهیه نقشه خطر سیل استفاده می‌شود. آستانه TWI با استفاده از روش حداکثر احتمال مورد استفاده در مطالعه متولی و وفاخواه (۱۳) برای شناسایی ناحیه‌های سیل‌خیز مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که هر چه دوره بازگشت سیل بیشتر می‌شود، شایستگی سیل و خصوصیات آن از قبیل عمق آن نمود بیشتر پیدا می‌کند و شاخص رطوبت توپوگرافی کمتر (اراضی سیل‌گیر بیشتر) می‌گردد. در این مطالعه آنان اشاره داشتند که آستانه توپوگرافی در حدود ۱۱/۶ می‌تواند عرصه‌های سیل‌گیر با عمق بیش از ۳ متر را اشیاع و به زیر آب ببرد. در این مطالعه نیز از این مقدار به‌عنوان آستانه توپوگرافی در حوضه آبخیز وازرود استفاده می‌گردد.

شاخص قدرت جریان

شاخص قدرت جریان نشان‌دهنده میزان قدرت فرساینده‌گی جریان آب است. این شاخص توسط مور و همکاران (۱۲) معرفی شد. بر این اساس این شاخص متناسب است با مساحت ویژه حوضه و شیب که با استفاده از رابطه ۲ به دست می‌آید.

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

که در این رابطه: A_s سطح سهیم در تجمع جریان است و β درجه شیب است. زمانی که هر دو عامل شیب و هم مقدار آب تأمین شده از سطح بالادست شیب افزایش یابد منجر به افزایش سرعت آب و SPI شده و خطر فرسایش شیب افزایش می‌یابد.

عدم قطعیت و خطریابی سیل

مفهوم‌سازی ارزیابی مکانی خطر سیل می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد برای تهیه نقشه خطر سیل که نشان‌دهنده قدرت و عمق سیل باشد را فراهم کند. تهیه نقشه‌های ارزیابی خطر سیل در عرصه مدیریت و تصمیم‌گیری در ارتباط با سیلاب زمانی مؤثرند که عدم قطعیت مدل و داده برای ارزیابی با هم تلفیق باشند (۱۲). عدم قطعیت در برخی از مطالعات در زمینه مدل‌سازی مخاطرات طبیعی مورد توجه قرار گرفته است

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه آبخیز وازرود (۲۳)

Table 3. Physiographic Characteristics of Vazroud Watershed (23)

نام واحد کاری	شیب متوسط وزنی حوضه (درصد)	طول آبراهه اصلی (km)	نسبت انشعاب km/km^2	تراکم زهکشی (km/km^2)	زمان تمرکز برانسی (ساعت)	شیب متوسط وزنی آبراهه (درصد)
V1	۶۴/۶۲	۱۲/۷۶	۷/۲۹	۴/۸۸	۳/۰۸	۱۴/۸
V2	۶۳/۳	۹/۷۶	۵/۲۹	۴/۳۸	۲/۴۹	۲۵/۳۵
V3	۴۶/۳۵	۹/۰۳	۳/۸۵	۴/۶۹	۲/۲۹	۱۵/۵۴
V4	۴۵/۱۷	۱۴/۰۵	۶/۷	۴/۵۴	۳/۶	۱۳/۹۴
V5	۵۷/۴	۸/۰۷	۴/۸۸	۳/۲۹	۲/۰۷	۳۴/۵۷
V6	۵۸/۹۶	۷/۸	۳/۴۸	۲/۸۵	۲/۰۶	۷/۲
V7	۴۸/۹۶	۱۶/۸۲	۴/۱۷	۳/۰۵	۴/۵۴	۴/۲۷

سیلاب شده است. در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی دبی اوج سیلاب حوضه آبخیز وازرود ارائه شده است (شکل ۶).

نتایج شبیه‌سازی دبی اوج سیلاب

با استفاده از اطلاعات بارش ۶ ساعته مقادیر بارش مازاد در شرایط رطوبتی متوسط از روش SCS محاسبه و در ادامه در

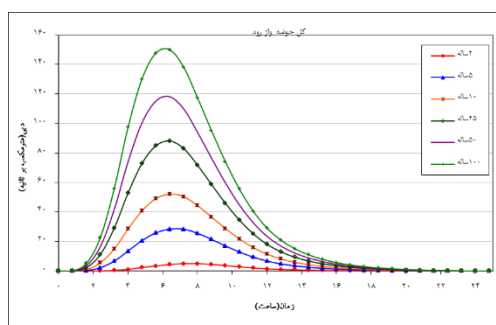
مدل‌سازی دبی اوج جریان در دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه آبخیز وازرود از طریق روش SCS انجام شد. در مرحله بعد به‌منظور تعیین میزان خطر سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف اقدام به تهیه عوامل شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص قدرت سیل و همچنین تعیین احتمال وقوع قدرت

دبی اوج با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله ۱۲۰/۶ و ۷۹/۵۵ مترمکعب بر ثانیه، سیل خیزترین زیرحوضه‌های وازرود تعیین شدند. در مرحله بعد ارتباط دبی اوج با مناطق سیل گیر از طریق نتایج شاخص‌های توپوگرافی SPI و TWI و تعیین خطرپذیری آن ارائه شده است.

جدول ۴ برای شرایط رطوبتی متوسط ارائه شده است. ارقام دبی مندرج در جدول ۴ برحسب مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد دبی اوج سیلاب در دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله به ترتیب ۵/۰۵، ۲۸/۴۹، ۵۲/۱۹، ۸۸/۱۶، ۱۱۸/۱ و ۱۴۹/۹۵ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد (شکل ۶). همچنین زیر حوضه‌های V1 و V3 با

جدول ۴- حداکثر دبی اوج ($m^3/sec.$) زیرحوضه و حوضه آبخیز وازرود با استفاده از روش SCS (۲۴)
Table 4. Maximum peak discharge ($m^3/sec.$) sub-basin and Vazrood watershed using SCS method (24)

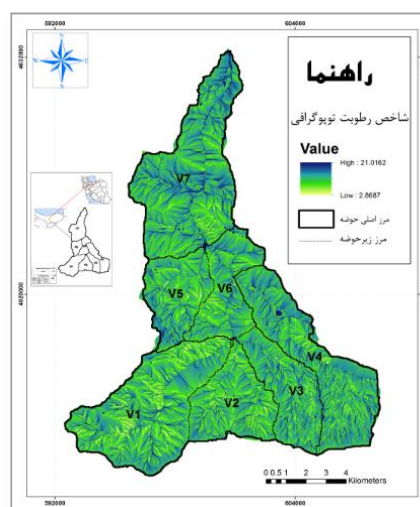
حداکثر دبی سیلاب دوره بازگشت (سال)						مساحت (km ²)	واحد کاری
۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲		
۱۳۰/۶۶	۹۹/۰۵	۷۸/۵۴	۵۰/۷	۳۴	۱۰/۴۷	۳۹/۵	V1
۴۵/۲۲	۲۸/۷۳	۲۱/۴۷	۸/۲۹	۲/۹۳	۰/۱۱	۱۴/۵	V2
۷۹/۵۵	۶۴/۱	۳۹/۶۷	۳۱/۹۸	۱۹/۵۶	۵/۰۷	۱۳/۵	V3
۶۷/۶۴	۵۱/۶۳	۳۹/۶۲	۲۵/۹	۱۴/۱۴	۴/۰۳	۲۳/۴	V4
۴۱/۳۲	۳۰/۵۲	۲۰/۸۷	۱۱/۲۹	۵/۲۸	۰/۱۶	۱۱/۹	V5
۴۸/۸۱	۳۸/۹۵	۲۷/۶۳	۱۵/۸۸	۸/۲۴	۰/۷۹	۱۲/۳	V6
۴۸/۹۴	۳۶/۴۱	۲۵/۲۱	۱۲/۶۳	۵/۸۹	۰/۰۲	۳۲/۱	V7
۱۴۹/۹۵	۱۱۸/۱	۸۸/۱۶	۵۲/۱۹	۲۸/۴۹	۵/۰۵	۱۳۷/۳	کل حوضه



شکل ۶- حداکثر دبی اوج حوضه آبخیز وازرود با استفاده از روش SCS (۲۴)
Figure 6. Maximum peak discharge of Vazrood watershed using SCS method (24)

شکل دیده می‌شود، مقدار TWI بین ۲/۸۶ و ۲۱/۰۱ تغییر می‌کند. بیشترین مقادیر TWI را می‌توان در اطراف کانال‌های رودخانه حوضه آبخیز وازرود مشاهده نمود.

شاخص رطوبت توپوگرافی
این عامل از طریق نقشه رقومی ارتفاعی با مقیاس ۱۰ متر در نرم‌افزار SAGA تهیه و وارد مدل‌سازی خطر سیلاب شد. این نقشه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در



شکل ۷- شاخص رطوبت توپوگرافی حوضه آبخیز وازرود (۲۴)
Figure 7. Topographic humidity index of Vazrood watershed (24)

شاخص قدرت رودخانه

شکل دیده می‌شود، مقدار SPI از صفر تا ۲۶۷ هزار تغییر می‌کند. بیشترین مقادیر SPI را می‌توان در خروجی و زیرحوضه V7 حوضه وازرود مشاهده نمود.

این عامل نیز از طریق نقشه رقومی ارتفاعی با مقیاس ۱۰ متر در نرم‌افزار SAGA تهیه و وارد مدل‌سازی خطر سیلاب شد. این نقشه در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در



شکل ۸- شاخص قدرت رودخانه حوضه آبخیز وازرود (۲۴)
Figure 8. River power Index of Vazrood Watershed (24)

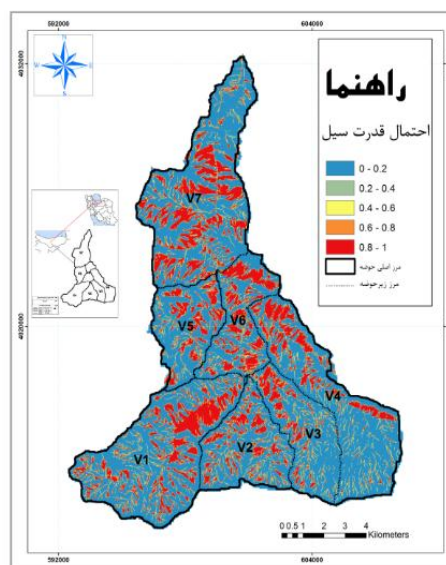
با دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰ ساله (تاریخی) در شکل‌های ۱۰ تا ۱۴ نشان داده شده است.

نتایج اجرای سناریوهای خطر سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف

در این مرحله خطر سیل در دوره بازگشت‌های مختلف تعیین شد. نتایج خطر مناطق سیل گیر در جدول ۵ نشان داده شده است. به‌طور کلی با افزایش دوره بازگشت کل اراضی تحت تأثیر سیل از ۲۴۲ هکتار در دوره بازگشت ۲ ساله به ۱۱۲۷ هکتار رسیده است.

نقشه‌های خطر سیلاب حوضه آبخیز وازرود در دوره بازگشت‌های مختلف

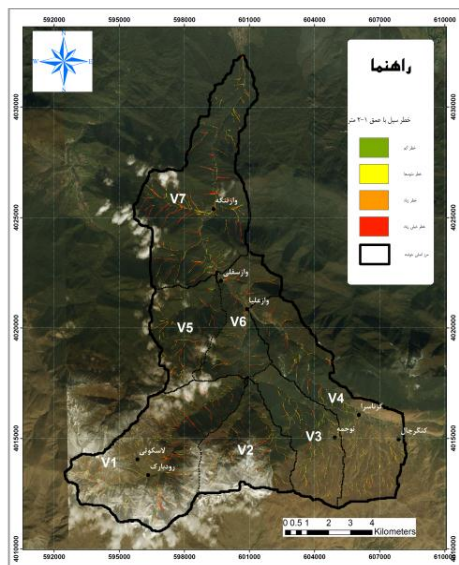
پس از آنالیز عدم قطعیت مونت کارلو و به دست آوردن احتمال قدرت سیل که نشان‌دهنده بزرگی میزان سیلاب در نقاط مختلف می‌باشد، ارزیابی خطر با توجه اثرات دبی اوج در حوضه آبخیز تعیین شد. نقشه احتمال قدرت رودخانه سیل حوضه آبخیز وازرود طبق نقشه ۹ و نقشه‌های خسارت سیل در دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ در نقشه‌های ۱۰ الی ۱۴ نشان داده شده است. در نهایت نقشه‌های خطر سیلاب



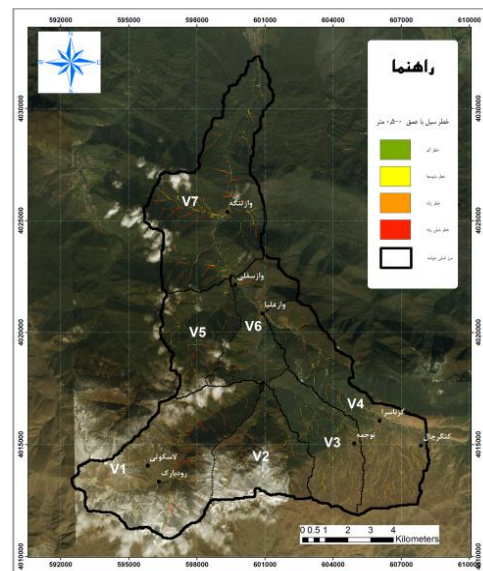
شکل ۹- نقشه احتمالاتی شاخص قدرت رودخانه حوضه آبخیز وازرود (۲۴)
Figure 9. Probability Map of The Power Index of The Vazrood Watershed (24)

جدول ۵- مساحت مناطق در خطر سیل در دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه آبخیز وازرود (کیلومتر مربع)
Table 5. Area of flood risk areas in different return periods in Vazrood watershed (square kilometers)

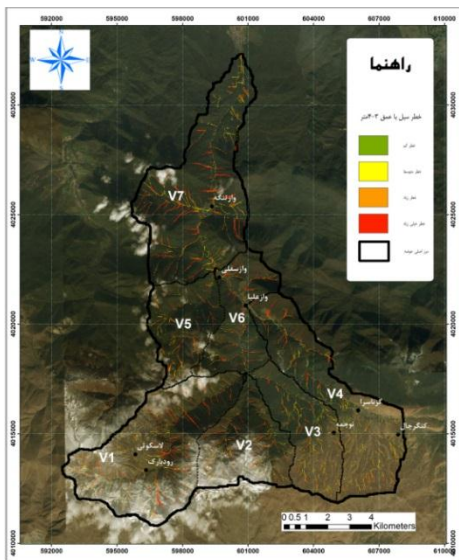
دوره بازگشت					طبقات خطر سیل
۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۲	
-/۹۳۳	-/۴۲۰	-/۳۳۲	-/۲۹۷	-/۲۳۳	خطر کم
۲/۲۳۴	۱/۱۲۸	۰/۸۶۱	۰/۷۵۹	۰/۶۰۲	خطر متوسط
۲/۰۶۶	۱/۰۸۷	۰/۸۱۸	۰/۷۰۸	۰/۵۳۳	خطر زیاد
۶/۰۵۱	۲/۵۰۴	۱/۷۵۶	۱/۴۷۸	۱/۰۵۲	خطر خیلی زیاد
۱۱/۲۷۵	۵/۱۳۹	۳/۷۶۷	۳/۲۴۱	۲/۴۲۱	مجموع



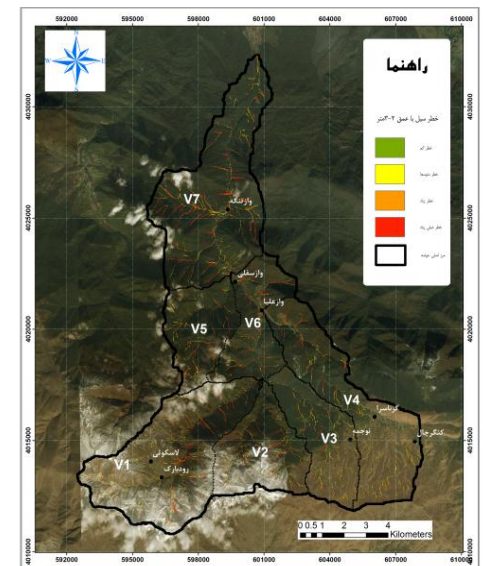
شکل ۱۱- نقشه خطر سیلاب ۱۰ ساله حوضه آبخیز وازرود
Figure 11. 10-year flood risk map of Vazrood watershed



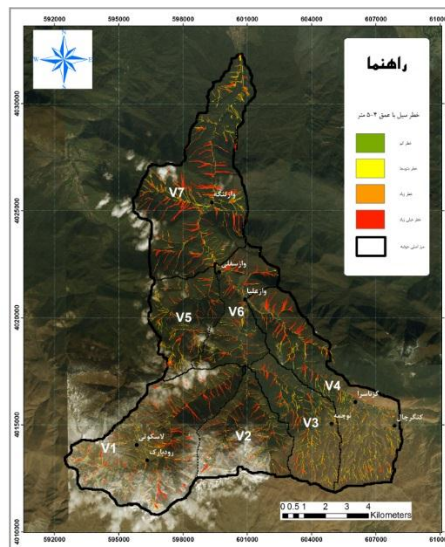
شکل ۱۰- نقشه خطر سیلاب ۲ ساله حوضه آبخیز وازرود
Figure 10. 2-year flood risk map of Vazrood watershed



شکل ۱۳- نقشه خطر سیلاب ۵۰ ساله حوضه آبخیز وازرود
Figure 13. 50-year flood risk map of Vazrood watershed



شکل ۱۲- نقشه خطر سیلاب ۲۵ ساله حوضه آبخیز وازرود
Figure 12. 25-year flood risk map of Vazrood watershed



شکل ۱۴- نقشه خطر سیلاب ۱۰۰ ساله حوزه آبخیز وازرود

Figure 14. 100-year flood risk map of Vazroud watershed

بیشترین مساحت اراضی تحت تأثیر خطر سیل آسیب‌پذیر روستاها تعیین شدند.

نتیجه‌گیری کلی

تعیین خطر سیل یکی از مهم‌ترین وظایفی است که در مدیریت ریسک سیلاب می‌توان به آن پرداخت، خصوصاً در رابطه با حفاظت از جان و اموال و دارایی‌ها ساکنان دارای اهمیت زیادی است. پیش‌بینی خطر سیل بستگی به ویژگی‌های حوزه و عوامل هیدرولوژیک و ژئومرفیک منطقه دارد (۲۷). لازم است تا قبل از بحران نسبت به تعیین خطر سیل اقدام نمود و با انجام اقدامات ضروری از خساراتی که در آینده ممکن است در اثر وقوع سیل به وجود آید کاست. با توجه به اینکه برای جلوگیری از بروز این‌گونه پدیده‌های زیان‌بار در حال حاضر نمی‌توان در عوامل و عناصر جوی تغییری ایجاد نمود، بنابراین هرگونه راه‌حل اصولی و چاره‌ساز را باید در حوزه آبخیز جستجو کرد. در این تحقیق سعی بر آن شد تا با توجه به نبود داده‌های کافی در ارتباط با دبی رودخانه حوزه آبخیز وازرود اقدام به تعیین مشخصه‌های خطر سیل تاریخی در این منطقه شود. در مرحله نخست از روش SCS به منظور شبیه‌سازی دبی اوج استفاده شد. به‌منظور تعیین نقشه شماره منحنی از عوامل کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیکی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی دبی اوج حوزه آبخیز وازرود با ایستگاه تنگه لایوچ به‌عنوان ایستگاه معرف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج این مقایسه نشان‌دهنده همبستگی مناسب دبی‌های سیلابی با ایستگاه تنگه لایوچ به عنوان ایستگاه معرف می‌باشد. این نتایج با مطالعه غلامی و همکاران (۸) و شیرزادی و همکاران (۱۹) مطابقت دارد. پس از اینکه مشخصه‌های کمی خطر سیل (دبی اوج) مشخص شد در مرحله بعد اقدام به پیش‌بینی خطر کیفی سیل شد. به منظور تعیین خطر سیلاب مناطق سیل‌گیر از دو عامل ژئومرفیک شامل شاخص رطوبت توپوگرافی و شاخص قدرت رودخانه استفاده شد. به منظور تعیین خطر کیفی سیل از تلفیق

نتایج خطر سیلاب در زیرحوضه‌های آبخیز وازرود

نتایج مدل‌سازی خطر سیل در زیرحوضه‌های آبخیز وازرود با دوره بازگشت ۲ ساله در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این نتایج، زیرحوضه‌های V1 و V7 دارای بیشترین اراضی سیل‌گیر می‌باشند و علاوه بر این که دارای دبی اوج بالاتری می‌باشند دارای بیشترین سطح خطر اراضی سیل‌گیر می‌باشند. در زیرحوضه V7 حدود ۴۷ هکتار و در زیرحوضه V1 تقریباً ۳۸ هکتار از اراضی تحت تأثیر خطر سیلاب قرار گرفته‌اند. همچنین در دوره بازگشت ۱۰ ساله نیز در زیرحوضه‌های V1 و V7 مساحت اراضی با خطر سیل بالا به ۶۵ و ۵۱ هکتار رسیده است. این میزان خطر در دوره بازگشت ۲۵ ساله در این دو زیرحوضه به ۷۵ و ۵۹ هکتار رسیده است. در دوره بازگشت ۵۰ ساله نیز پهنه‌های سیل‌گیر به ۱۰۵ و ۸۰ هکتار در دو حوزه V1 و V7 رسیده است. درنهایت در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله وسعت اراضی سیل‌گیر در زیرحوضه‌های V1 و V7 به‌ترتیب به ۲۳۱ و ۱۸۶ هکتار رسیده است.

نتایج خطر سیلاب در روستاهای حوزه آبخیز وازرود

توسعه مناطق روستایی در حاشیه رودخانه‌ها، بستر و حواشی دشت‌های سیلابی بدون شناخت و توجه به شرایط هیدرولوژیک و دینامیکی رودخانه‌ها و قسمت‌های بالادست حوزه که موجب افزایش خطر سیلاب و خسارات جانی، مالی و زیربنایی ناشی از آن می‌شود، توسعه را با مشکلاتی مواجه می‌سازد. از این‌رو خطر سیلاب در روستاهای حوزه آبخیز وازرود مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش دوره بازگشت سیل، مساحت اراضی سیل‌گیر در روستاهای حوزه آبخیز وازرود افزایش یافته است. بدین‌صورت که خطر سیل در دوره بازگشت ۲ ساله از ۲۷۹۵۲ مترمربع به ۱۲۵۴۷۸ مترمربع رسیده و تعداد روستاهای تحت تأثیر خطر سیل از ۶ مورد به ۸ مورد افزایش پیدا کرده است. در بین روستاهای تحت تأثیر سیل روستاهای وازتنگه، وازعلیا و گزناسرا با

شاخص قدرت سیل و شاخص رطوبت توپوگرافی از طریق عواملی از قبیل کاربری اراضی، گروه هیدرولوژیکی و شماره منحنی مرتبط دانست. نتایج کل اراضی که در خطر سیل با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله قرار خواهند گرفت به ترتیب ۲/۲، ۳، ۴/۲ و ۹/۸٪ می‌رسد. همچنین روستاهای واز تنگه، وازعلیا و نوجمه به ترتیب با ۲۰/۶، ۱۶/۴ و ۱۳/۱٪ اراضی تحت تأثیر سیل به‌عنوان آسیب‌پذیرترین مناطق روستایی در حوضه آبخیز وازرود تعیین شدند. پیش‌بینی خطر سیل در حوضه‌های که دارای آمار ناقص و کم می‌باشند به‌عنوان یکی از ابزارهای مدیریت غیرسازه‌ای سیلاب و مکمل روش‌های سازه‌ای، نقش مهمی را در کنترل سیلاب و کاهش خسارات محتمل ایفا می‌کند. به علاوه سیلاب از جمله سوانحی است که تا حد زیادی قابل پیش‌بینی می‌باشد، بنابراین پیش‌بینی خطر سیلاب می‌تواند تأثیر بسزایی در مدیریت ریسک سیلاب داشته باشد. احداث تأسیسات کنترل سیل علاوه بر هزینه‌های سنگین، ریسک ناشی از سیلاب را نیز نمی‌تواند به‌طور کامل از بین ببرد و ممکن است در سیلاب‌های مخرب‌تر، سیل، حادثه‌آفرین گردد. احداث سازه‌های عظیم کنترل سیلاب چون سیل‌بندها نمی‌تواند همواره به دلیل هزینه سنگین توجیه‌پذیر باشد و به لحاظ زیست‌محیطی و دیگر دلایل اقتصادی-اجتماعی مطلوب نیست. ارزیابی خطر سیلاب از جمله معیارهای غیرسازه‌ای می‌باشند که اهمیت آن روز به روز آشکارتر می‌شود، بطوریکه چه از دیدگاه مدیریت خطر سیلاب و چه از دیدگاه مدیریت غیرسازه‌ای سیلاب، در نواحی که می‌تواند منجر به خسارات جانی مالی شود منجر به کاهش خطرات و خسارات ناشی از سیلاب خواهد شد.

دو عامل قدرت رودخانه و سطح اراضی سیل گیر به‌عنوان خسارتی که می‌تواند وارد سازد استفاده شد. از روش آنالیز عدم قطعیت مونت کارلو به منظور تعیین احتمال قدرت رودخانه و خسارت اراضی سیل گیر استفاده شد. در این ارتباط تحقیقات انجام شده در داخل کشور (۲۲،۱۹،۱۳) در این زمینه خطرپذیری را بررسی نکرده‌اند و فقط آسیب‌پذیری و ارزیابی حساسیت و خطر را انجام داده‌اند. میزان اراضی سیل‌گیر با دوره بازگشت‌های مختلف با استناد به مطالعه متولی و همکاران (۱۳) در ارتباط با روش آستانه شاخص رطوبت توپوگرافی مشخص شد. نتایج اجرای این روش نشان داد که با افزایش دوره بازگشت سیل، میزان اراضی سیل گیر افزایش می‌یابد و میزان شاخص رطوبت توپوگرافی با افزایش دوره بازگشت سیل کاهش می‌یابد. این نتایج نیز با مطالعه درسی و همکاران (۵) مطابقت دارد. در مرحله بعد به منظور تعیین خطر سیل حوضه آبخیز وازرود با ترکیب احتمال قدرت رودخانه با خسارت اراضی سیل گیر، نقشه خطر سیل در دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله تعیین شد. در این ارتباط عابدینی و جوکدان (۱) به این نتایج رسیدند که هرچه دوره بازگشت سیل بزرگ‌تر می‌شود مناطق تحت تأثیر خطر سیل در طبقات خطر به‌طور کلی افزایش پیدا می‌نماید. همچنین وجود مطابقت در دو عامل هیدروگراف واحد و (میزان عددی دبی اوج) در زیرحوضه‌های V1 و V7 با نقشه‌های خطر (بیشترین وسعت اراضی در خطر سیل در این دو حوضه نسبت به سایر زیرحوضه‌ها بیشتر بوده است) که نشان‌دهنده ارتباط بین هیدروگراف واحد، زمان تمرکز با شاخص قدرت سیل و شاخص رطوبت توپوگرافی می‌باشد. همچنین مطابقت دبی اوج از روش SCS را می‌توان با

منابع

1. Abedini, M. and R. Fathi jukdan. 2016. Zoning the risk of flooding in the Gorganrood catchment using Arc GIS. Hydrogeomorphology, 7: 1-17 (In Persian).
2. Bazai, N.A., P. Cui, K.J. Zhou, S. Abdul, K.F. Cui, H. Wang, G.T. Zhang and D.Z. Liu. 2021. Application of the soil conservation service model in small and medium basins of the mountainous region of Heilongjiang, China. International Journal of Environmental Science and Technology, 1-16.
3. Beven, K.J. and M.J. kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / UN modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. Hydrol Sci Bull, 24: 43-69.
4. De Almeida, I.K., A.K. Almeida, J.L. Steffen and T.A. Sobrinho. 2016. Model for estimating the time of concentration in watersheds. Water Resour Manag, 30: 4083-4096.
5. De Risi, R., F. Jalayer and F. De Paola. 2015. Meso-scale hazard zoning of potentially flood prone areas. Journal of Hydrology, 527: 316-325.
6. Doerfliger, N., P.Y. Jeannin and F. Zwahlen. 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). Environmental Geology journal, 39: 165-176.
7. Du, J.K., L. Qian, H. Rui, T. Zuo, D. Zheng, Y. Xu and C.Y. Xu. 2012. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhua River basin, China. Journal of Hydrology, (464 -465): 127-139.
8. Gholami, SH., M. Habibnezhad roshan and M. Nooripoor. 2015. The effect of population growth on land use change (case study: Vaz catchment, Noor). Journal of Natural ecosystem of Iran, 6(1-2): 37-56 (In Persian).
9. Gurdak, J.J., J.E. McCray, G. Thyne and S.L. Qi. 2007. Latin hypercube approach to estimate uncertainty in ground water vulnerability. Ground Water, 45: 348-361.

10. Hadian amri, M.A. and M. Habibneghad roshan. 2011. Comparison of experimental methods for estimating maximum flood discharge in Vaz River basin of Mazandaran province. 7th National Conference on Watershed Management Science and Engineering, Iran, Esfahan. 7 pp (In Persian).
11. Loague, K., R.L. Bernknop, R.E. Green and T.W. Giambelluca. 1996. Uncertainty of groundwater vulnerability assessments for agricultural regions in Hawaii: Review. *Journal of environmental quality*, 25: 475-490.
12. Moore, I.D., R.B. Grayson and A.R. Ladson. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Process*, 5(1): 3-30.
13. Motevalli, A. and M. Vafakhah. 2016. Flood hazard mapping using synthesis hydraulic and geomorphic properties at watershed scale. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30: 1889-1900.
14. Müller, A., J. Reiter and U. Weiland. 2011. Assessment of urban vulnerability towards floods using an indicator-based approach-a case study for Santiago de Chile. *Natural Hazardous Earth System Sciences*, 11(8): 2107-2123.
15. Pelling, M. 1997. What determines vulnerability to floods; a case study in Georgetown, Guyana. *Environ Urban*, 9: 203-226.
16. Rahmani, A. 2019. Flood damage is a short-term consequence of natural resource protection. *Iran nature*, 4(2): 73-87 (In Persian).
17. Rahmati, O., H.R. Pourghasemi and H. Zeinivand. 2016. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31: 42-70.
18. Sadeghi, H., S. Gharemahmudli, A. Khaledi Darvishan, H. Kheirfam, M. Kiani Harchegani and P. Saeidi. 2014. Effect of river sand and gravel mining on monthly changeability of suspended sediment concentration. *Journal of Water and Soil Resources conservation*, 3(3): 65-77 (In Persian).
19. Shirzadi, M. and N. Hashemzadeh inisofla. 2016. Flood prediction in Ahar Chay catchment using SCS and GIS artificial neural network (ANN). 2nd International Congress of Earth Sciences and Urban Development, Tabriz, Iran, 14 pp (In Persian).
20. Solaimani, K. and F. Shokrian. 2020. Suitable Site Selection of Fog Water Harvesting Based-On RS Data in Upstream of Vazrud Watershed in Iran. *Jour a of Watershed Management Research*, 11(21): 249-258 (In Persian).
21. Solaimani, K., F. Shokrian, R. Tamartash and M. Banihashemi. 2010. Efficiency of ETM+ Data Analysis to Determining of Suitable Vegetation Indices (Case Study: Vazrud Watershed). *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 4: 71-82 (In Persian).
22. Solaimani, K., J. Zandi and M. Habibnejad. 2014. Evaluating the Efficiency of Frequency Ratio, Bivariate (Wi) and (Wf) Methods of Landslide Susceptibility Mapping, A Case Study: Vazroud Watershed, Mazandaran Province, Iran. *Geosciences Scientific Quarterly Journal*, 24: 41-50 (In Persian).
23. Solaimani, K. 2002. Morphometric analysis of Vazrood basin. Final report of the research project. Mazandaran University (In Persian).
24. Solaimani, K. 2021. Investigation of historical floods in non-statistical basins using remote sensing techniques (Case study: Vazrood Basin). Final report. Sari University of Agriculture and Natural Resources (In Persian).
25. Tariq, M. 2013. Risk-based flood zoning employing expected annual damages: The Chenab River case study. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27: 1957-1966.
26. Tehrani, M.S., B. Pradhan and M.N. Jebur. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512: 332-343.
27. Trigila, A., C. Iadanza, C. Esposito and G. Scarascia-Mugnozza. 2015. Comparison of Logistic regression and random Forests techniques for shallow landslide susceptibility assessment in Giampilieri (NE Sicily, Italy). *Geomorphology*, 249: 119-136.
28. Van Westen, C.J. 2013. Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Bishop, M.P. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, Remote Sensing and GIS science in *Geomorphology*, 3: 259-298.
29. Yousefzadeh, A., B. Zeinali, K. Khalil Valizadeh and S. Asghari Sar Eskinrood. 2019. The Extraction of Flood Potential of Simineh River Basin Applying Satellite Images, Topographic Wetness Index and Morphological Features. *Geographical and Sustainability of environment*, 9(32): 49-61 (In Persian).
30. Zandi, J., M. Habibnejad and K. Solaimani. 2013. Soil erosion risk assessment and its relationship with some environmental parameters (Case study: Vazroud watershed, Mazandaran). *Journal of Range and Watershed Management*, 66(3): 401-415 (In Persian).

Investigation of Flood Risk in Ungauged Watersheds using Geomorphic Features (A Case Study: Vazrood Watershed)

Karim Solaimani¹ and Fatemeh Shokrian²

1- Professor, Sari of Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran

2- Assistant Professor, Sari of Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran,

(Corresponding Author: shokrian.f@gmail.com)

Received: 18 February, 2021

Accepted: 7 April, 2021

Extended Abstract

Introduction and Objective: Due to the lack of discharge stations and rainfall in the Vazrood basin, it is not possible to have a relatively accurate hydrological behavior of the region. Therefore, by addressing the geomorphic features, this problem can be overcome to reduce the damage caused by floods in the future. In this study, in order to determine the flood risk of flood-prone areas, two geomorphic factors including topographic wetness index and stream power index were used.

Material and Methods: Due to the lack of sufficient data related to the discharge of Vazrood watershed, the characteristics of historical flood risk were determined in this area. In the first step, the SCS method was used to simulate the peak discharge. After determining the quantitative characteristics of flood risk (peak discharge) in the next step, the qualitative risk of flood was predicted. In order to determine the qualitative risk of floods, a combination of two factors, the strength of the river and the level of floodplains, was used as the damage that could be caused. The amount of flood-prone regions with different return periods was determined by topographic moisture index threshold method.

Results: The results of this method showed that with increasing the flood return period, the amount of flood-prone lands increases and the amount of topographic moisture index should decrease with increasing the flood return period. The results of flood risk maps with different return periods showed that as the flood return period becomes larger, the areas affected by flood risk in the hazard classes generally increase. The results of total lands that will be at risk of floods with return periods of 2, 10, 25, 50 and 100 years will reach 2.2, 3, 4.2 and 9.8% in the whole basin, respectively. Also, Vaz Tangeh, Nojmeh and Vaz olia villages with 20.6, 16.4 and 13.1% of flood-affected lands were determined as the most vulnerable rural areas in Vazrood watershed, respectively.

Conclusion: Flood risk prediction depends on the characteristics of the catchment and the hydrological and geomorphic factors of the region. So that in areas that have incomplete and low statistics as one of the non-structural flood management tools and complementary to structural methods, it plays an important role in flood control and reduction of potential damages.

Keywords: Curve Number, Flood Risk Management, Stream power index, Topographic wetness Index