مجله مخاطرات محیط طبیعی، دوره نهم، شماره بیست و چهارم، تابستان ۱۳۹۹
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲
تاریخ بازنگری نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۲۳
صفحات: ۹۸ - ۷۹

برآورد مقادیر ارتفاع رواناب و دبی حداکثر سیلاب با استفاده از تلفیق مدل‌های اتومات سلولی و SCS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لاویج‌رود)

حسن شعبانی‌نیا[۱]، صدرالدین متولی[۲*]، غلامرضا جانباز قبادی[۳]، شهریار خالدی[۴]

چکیده

حوضه آبخیز لاویج‌رود بیشتر به دلیل وضعیت توپوگرافی و فیزیوگرافی، موقعیت اقلیمی، عدم رعایت مشخصه‌های فنی در ساخت راه و بناهای فنی و تجاوز به حریم رودخانه، زمین‌شناسی و دیگر عوامل مؤثر در ایجاد رواناب، دارای پتانسیل تولید سیل در برخی از مواقع سال می‌باشد. در این پژوهش، کارایی مدل‌های اتومات سلولی و SCS، به منزله روش‌های نوین و امکان تلفیق آن‌ها با برنامه‌های GIS برای شبیه‌سازی خطر سیلاب و هیدروگراف جریان، برای لاویج‌رود مطالعه شد. از داده‌های کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، DEM، داده‌های بارش و ضریب زبری استفاده شد که همه لایه‌ها در قالب رسترهایی با اندازه سلول ۳۰×۳۰ تهیه شدند. بخش زیادی از حوضه دارای گروه هیدرولوژیکی C و D است که نفوذپذیری کم و خیلی کم دارند؛ بدین‌معنی که حجم زیادی از بارش در این قسمت‌ها می‌تواند تبدیل به رواناب شود. نیمه شمالی به‌ویژه شمال غربی حوضه، به‌دلیل قابلیت نفوذ کم و نیز نزدیکی به خروجی حوضه، دارای ارتفاع و عمق رواناب بسیار زیادی است. همچنین، خطر سیلاب در مسیر رودخانه لاویج و در اراضی اطراف آن (دشت سیلابی رودخانه) به‌ویژه در پایین‌دست رودخانه بالا است. شبیه‌سازی سیلاب در حوضه لاویج‌رود نشان داد که علاوه بر کاربری اراضی، خاک، نفوذپذیری و شیب، پراکنش مکانی مقدار بارش عامل مهمی در تجمع رواناب به یک سمت از جریان پایین‌دست حوضه و تولید سیلاب است.

واژگان کلیدی: خطر سیلاب، اتومات سلولی، SCS، GIS، حوضه آبخیز لاویج‌رود.

[۱] - دانشجوی دکتری اقلیم¬شناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور shabaniniah@gmail.com
[۲] - دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور (نویسنده مسئول) s_motevalli@iaunour.ac.ir
[۳] - استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور j_ghobadi@iaunour.ac.ir
[۴] - استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی تهران shahriar_khaledi6@yahoo.com

مقدمه

با توجه به فقدان ایستگاه‌های هیدرومتری در بیشتر حوضه‌های آبخیز، توسعه روش‌های تخمین رواناب برای این حوضه‌ها ضروری است (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵). روش‌های گوناگونی برای تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد آمار وجود دارد. یکی از روش‌های نوین، اتومات سلولی است؛ این روش در تحقیق‌های مربوط به آب و محیط زیست تلفیق خوبی با GIS پیدا کرده است (Zhan and Huang, 2004؛ Dewan et al., 2007؛ Kopp and Noman, 2008؛ Abou El-Magd et al., 2010؛ Haq et al., 2012؛ Kopp and Noman, 2008 و Elkhrachy, 2015). اتومات سلولی روشی ساده برای بررسی سیستم‌های دینامیکی است و می‌تواند ویژگی‌های طبیعی سیستم را در سطوح مختلف توصیف کند. به عبارتی دیگر، رویکرد اتومات سلولی روشی قوی برای توصیف، فهم و شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های پیچیده است. در اتومات سلولی دسته‌ای از قوانین ویژه برای نمایش ارتباط بین یک سلول و همسایگانش تعریف می‌شود (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵). از جمله ویژگی‌های اتومات سلولی این است که فضا و زمان به‌صورت گسسته پیش می‌روند. اتومات همگن است و عمل به‌روزرسانی به صورت همگام انجام می‌شود. قوانین بر اساس همسایه‌های هر سلول تعریف می‌شوند و می‌توانند فرم قطعی و احتمالی داشته باشند (Van et al., 2007). فهیمی‌فر و همکاران (۱۳۸۵) بیان کردند که مزایای اتومات سلولی شامل سرعت، فضای گسسته، محلی بودن و موازی بودن است. از مهم‌ترین کارهای پژوهشی و کاربردی در زمینه شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی می‌توان به کار ثانی‌خانی و همکاران در سال ۱۳۹۱ با عنوان شبیه‌سازی رواناب و فرسایش خاک با استفاده از روش اتوماتای سلولی، اعلمی و همکاران در سال ۱۳۹۴ با عنوان مدل‌سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل اتومای سلولی و خالقی و ملکانی در سال ۱۳۹۵ با عنوان شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز چرچر) اشاره نمود.

روش‌های گوناگونی هم برای تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد آمار وجود دارد؛ که یکی از این روش‌ها SCS است. روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) که به شماره منحنی (CN) معروف است، با در نظر گرفتن ویژگی‌های خاک، وضعیت هیدرولوژیکی زمین و نیز کاربری اراضی و شرایط رطوبت قبلی خاک، مقدار رواناب حاصل از یک بارش را در بخش‌های مختلف حوضه برآورد می‌کند و نیاز به تعیین شماره منحنی دارد. گروه هیدرولوژیکی خاک، نوع کاربری اراضی، پوشش گیاهی، اندازه‌گیری‌های حفاظت خاک و وضعیت رطوبت خاک پیشین، خصوصیت‌های اصلی مورد استفاده حوضه آبخیز برای به‌دست آوردن شماره منحنی رواناب می‌باشند. در زمینه تعیین شماره منحنی و برآورد ارتفاع رواناب یک حوضه آبخیز، پژوهش‌های مختلفی صورت گرفته است (Lewis et al., 2000؛ June et al., 2001؛ Foodi et al., 2008؛ Inci et al., 2006؛ Xiao et al., 2011؛ Soulis and Valiantzas, 2012؛ Saravanan and Manjula, 2015؛ Vinithra and Yeshodha, 2016؛ Satheeshkumar et al., 2017؛ حجازی و مزبانی، ۱۳۹۶؛ مصطفی‌زاده و هکاران، ۱۳۹۶؛ حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

وقوع سیلاب در حوضه آبخیز لاویج‌رود، باعث آسیب رساندن به شبکه آبرسانی، پل‌ها و آب بندان‌ها، اراضی و نهرهای کشاورزی و باغی، شکسته شدن تیرهای برق، ریزش سنگ و رانش زمین، آبگرفتگی معابر، منازل و مغازه‌ها در مناطق شهری و روستایی، تخریب راه‌های ارتباطی و آسیب‌های جانی می‌شود. بر اثر بارندگی‌های شدید و مداوم و جاری

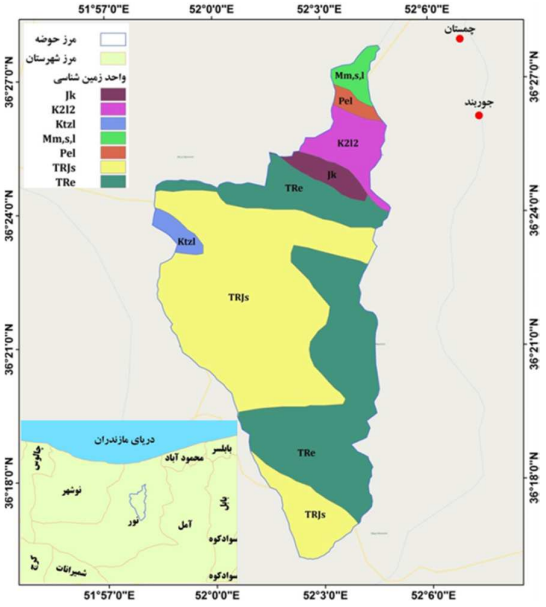
شدن سیل در حوضه لاویج‌رود طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸، برخی از معابر و راه‌های ارتباطی، دیواره‌های رودخانه، زمین‌های کشاورزی و واحدهای مسکونی دچار تخریب شده‌اند. علاوه بر آثار ملموس و مستقیم سیلاب در سطح حوضه مورد بررسی، هر ساله به‌واسطه وقوع سیلاب‌های بزرگ، فرسایش کناره‌ای قابل‌ملاحظه‌ای در رودخانه لاویج اتفاق می‌افتد که خود می‌تواند باعث از دسترس خارج شدن بخش قابل توجهی از خاک حاصلخیز سطح حوضه شود. با توجه با موارد یادشده، شبیه‌سازی خطر سیلاب این حوضه به‌منظور کاهش خسارت‌های ناشی از وقوع سیلاب ضروری می‌نماید و مدل اتومات سلولی روشی مناسب برای تخمین رواناب و سیلاب است. با توجه به قابلیت رویکرد اتومات سلولی، می‌توان با داده‌های ورودی ساده همانند مدل ارتفاعی رقومی و دبی رخداد سیلاب و میزان گسترش آن را تخمین زد و میزان ارتفاع آب ناشی از سیلاب را ارائه داد. آگاهی این مسأله می‌تواند در کاهش اثرهای سیل و مدیریت بهینه این پدیده مخرب مؤثر واقع شود. بنابراین هدف اصلی این پژوهش، شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل‌های اتومات سلولی و SCS بر پایه GIS و RS در حوضه آبخیز لاویج‌رود است تا مشخص شود که چه بخش-هایی از سطح حوضه خطر سیلاب بیشتری داشته و از خسارت‌های جانی و مالی ناشی از سیل تا حد امکان کاسته شود. با اجرای این مدل، مناطق پر خطر به‌لحاظ سیل در گستره حوضه آبخیز لاویج‌رود مشخص شده و مقدار دبی سیلابی رودخانه در بازه‌های مختلف آن در طی زمان محاسبه خواهد شد.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز لاویج در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز در جنوب شهر چمستان واقع شده است. حوضه آبخیز لاویج-رود بین عرض‌های جغرافیایی ´۱۶ °۳۶ تا ´´۳۰ ´۲۷ °۳۶ شمالی و طول جغرافیایی ´۵۸ °۵۱ تا ´۵ °۵۲ شرقی واقع شده است (شکل ۱). این حوضه با مساحتی معادل ۱۱۶ کیلومتر مربع از غرب به حوضه گلندرود، از شرق به حوضه واز و از جنوب به حوضه آبخیز هراز منتهی می‌شود. آبادی‌های رئیس‌کلا، کیاکلا، ملاکلا، سادات محله، کرچی، به بنک و دیزین کلا در این حوضه آبریز قرار گرفته‌اند. لاویج در حدود بیست کیلومتری غرب شهر چمستان واقع شده و جزئی از شهرستان نور، استان مازندران محسوب می‌شود. لاویج منطقه‌ای نیمه مرتفع و نیمه کوهستانی و ییلاقی و یا به‌عبارتی بهتر و دقیق‌تر و به اصطلاح معروف، میان‌بند است. از نظر زمین‌شناختی و شکل سرزمینی به‌صورت یک فرورفتگی و گسله و شکست بزرگ در میان کوه‌های مرتفع و بلند و یک سطح چاله ناودیسی عظیم به نظر می‌رسد. از نظر طبیعی و شکل ظاهری به نظر می‌رسد که در دوران‌های بسیار دور احتمالاً یک دریاچه بزرگ ناودیسی، سطح منطقه‌ی لاویج فعلی را فرا گرفته و سرزمینی مسطح و مرتفع در زیر آب دریاچه مزبور بوده است (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹).

لاویج از اطراف به‌وسیله کوه‌های زیر احاطه شده است: از شمال ارتفاعات کوه طارم یا نسالو و پیش آمدگی کوه سیلم، از جنوب به‌وسیله‌ی ارتفاعات پوشیده از جنگل نومه، میله‌بن و نیسم، از شرق ادامه نسالو و از غرب به‌وسیله‌ی ارتفاعات جنگلی نارمک، اسپی سنگ، کوه سیلم و سوردار. ناهمواری‌های داخلی آن شامل پستی و بلندی‌هایی نامنظم و پراکنده به شکل تپه‌های بزرگ و تاحدودی مرتفع با دره‌های عمیق و نسبتاً باز است. این تپه‌ها در سه

جهت مهم شرقی و غربی و جنوبی واقع شده‌اند و با شیب‌هایی تند به دره‌ها منتهی می‌شوند (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹). رود مهم حوضه آبخیز، لاویج‌رود نام دارد. سه رود کوچک‌تر به نام‌های نومه هراز، تیلن‌رود و کرچی‌رود در قسمت داخلی منطقه لاویج جریان دارند که در پای ارتفاعات شمالی و در مدخل تنگه لاویج، رودخانه لاویج‌رود را بوجود می‌آورند. مهم‌ترین شاخه لاویج‌رود، نومه هراز است. رودخانه کرچی‌رود از کنار روستاهای بهبنک و کرچی عبور می‌کند و رودخانه تیلن‌رود از کنار روستاهای خطیب کلا و وسط روستای رئیس کلا می‌گذرد. رودخانه نومه هراز از میان روستاهای کیاکلا، ملا کلا، سادات محله و ملا محله عبور می‌کند. نقشه واحدهای زمین‌شناسی حوضه مورد بررسی در شکل ۱ آورده شده است و جدول ۱ نیز مساحت و ویژگی این واحدها را نشان می‌دهد.



شکل ۱: نقشه واحدهای زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز لاویج‌رود

جدول ۱: مساحت واحدهای سنگ‌شناسی حوضه آبخیز لاویج‌رود

نام دوره	واحد	لیتولوژی	مساحت (Km^2)	%
کواترنر	Q	رسوب‌های آبرفتی و پادگانه‌های آبرفتی اطراف رودخانه	-	-
ژوراسیک میانی	Jk	کنگلومرا، ماسه سنگ، سیلت سنگ، مارن سیلت‌دار (سری قاره‌ای)	۰/۴۵	۰/۴
میوسن	Mm,s,l	مارن، ماسه سنگ آهکی، سنگ آهک ماسه‌ای دوکفه‌ای	۴	۳/۴
تریاس آغازین و میانی	Ktzl	سنگ آهک اربیتولین‌دار، شیل آهکی (سازند تیزکوه)	۲/۸	۲/۳
کرتاسه پایانی	K2l2	آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ کرم تا سفید	۲/۳۵	۲
تریاس - ژوراسیک	TRJs	شیل، ماسه سنگ، سیلت سنگ، شیل کربن‌دار، رس سنگ، کوارتزیت، کنگلومرا، رگه‌ها و عدسی‌های زغال سنگ (سازند شمشک)	۴۹/۱	۴۲/۳
تریاس آغازین و میانی	TRe	سنگ آهک دولومیتی ضخیم لایه تا توده‌ای شکل، دولومیت، سنگ آهک (سازند الیکا)	۴۵/۴۵	۳۹/۲
پرمین	Pel	سنگ‌آهک باچرت، شیل‌های مارنی و ماسه‌ای (سازند نسن)	۱/۴	۱/۲

داده‌ها و روش‌ها

شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل‌های اتومات سلولی و SCS نیاز به داده‌های کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، DEM، داده‌های بارش و ضریب زبری حوضه داشت که همه این لایه‌ها در قالب رستر و با اندازه سلول ۳۰×۳۰ متر تهیه شدند. بر اساس روش SCS، ارتفاع رواناب و خطر سیلاب در حوضه آبریز به‌دست آمد. یاد این نکته ضروری است که برای برآورد ارتفاع رواناب در مدل SCS از داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته منطقه مورد مطالعه طی دوره آماری ۳۵ ساله (۱۳۶۲-۱۳۹۶) و همچنین اطلاعات کاربری اراضی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat سال‌های ۱۳۶۷ و ۱۳۸۵ در کنار اطلاعات مربوط به بافت خاک و گروه‌های هیدرولوژیک آن، گروه رطوبتی خاک، شیب و پوشش اراضی استفاده شد. در نهایت، بر اساس مدل موج سینماتیک، عمق جریان و بر طبق معادله مانینگ و عمق جریان رواناب در سلول‌ها، سرعت جریان محاسبه شد و از روی سرعت جریان، هیدروگراف سیل ترسیم گردید.

روش SCS

بهترین روش برای محاسبه بارش اضافی سلول استفاده از رابطه SCS است؛ بدین‌منظور لازم است نقشه CN به‌دست آید. سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) در سال ۱۹۷۲ برای تخمین رواناب از روی رگبارها، ویژگی‌های نفوذپذیری خاک، پوشش گیاهی و مدیریت کشت حوضه‌های آبخیز روشی ارائه کرده است (قهرودی، ۱۳۸۵). این سازمان پس از مطالعه‌های فراوان، روی رگبارها (P) و جریان سطحی ناشی از آن‌ها (Q)، رابطه بین این دو را تقریباً خط فرض کرد و به شکل رابطه ۱ ارائه نمود.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8s)} \quad (۱)$$

در این رابطه، Q ارتفاع رواناب به میلی‌متر، P حداکثر بارش ۲۴ ساعته به میلی‌متر و S عامل مربط بـه نگهداشـت آب در خاک بر حسب میلی‌متر است که از روی مشخصه‌های خاک، پوشش گیاهی، شیب و شرایط رطوبت پیشین خـاک عدد بی‌بعدی به نام شماره منحنی (CN) تعیین می‌باشد که با استفاده از آن و به کمک رابطه ۲ می‌توان S را به‌دست آورد.

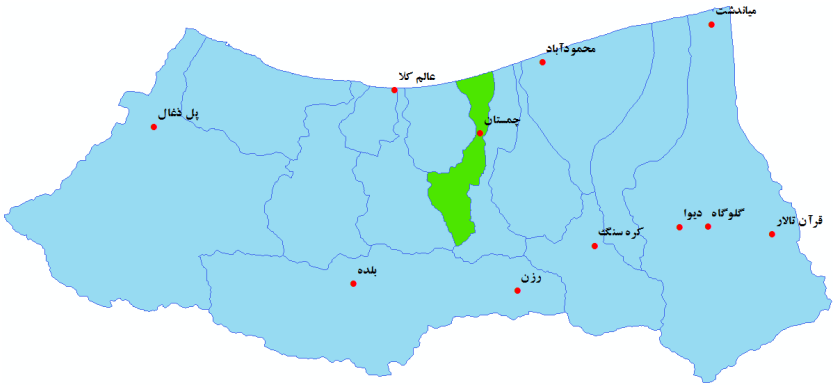
$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (۲)$$

بدین منظور، نخست با استفاده از نقشه بافت خاک اداره منابع طبیعی استان مازندران و نیز بازدیدهای میدانی با بهره‌گیری از جدول سازمان حفاظت خاک آمریکا، نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (Hydrographic Soil Groups) حوضه آبخیز لاویج تعیین می‌شود. همچنین نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز لاویج با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER و نیز از اداره منابع طبیعی استان مازندران تهیه می‌شود. سپس بر اساس تلفیق لایه HSG و کاربری اراضی در محیط GIS، نخست نقشه CN برای شرایط نرمال (خاک دارای رطوبت متوسط باشد و شیب بیشتر

از ۵ درصد نباشد) تهیه می‌شود و بر اساس روش شرودر و لارسن (۱۹۹۰)، پس از بررسی فراوانی وقوع AMSها (رطوبت پیشین خاک[1])، وضعیت ماه‌های سال بر اساس نوع AMC خشک شناخته می‌شود و با توجه به شیب‌دار بودن اراضی حوضه آبخیز لاویج و به دلیل برقرار نبودن شرایط نرمال، تصحیح‌ها بر روی CN با بهره‌گیری از روابط رایج انجام می‌گیرد. بنابراین، از رابطه ۳ برای تبدیل CN نرمال به CN خشک (CN_I) استفاده می‌شود.

$$CN_I = \frac{N_{II}}{2.3-0.013 \times CN_{II}} \quad (۳)$$

داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی همجوار با موقعیت حوضه موردمطالعه از ابتدای ثبت آمار آن‌ها تا سال ۱۳۹۶ از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری‌شده‌اند. شکل ۲ موقعیت این ایستگاه‌ها را نسبت به لاویج‌رود نشان می‌دهد. پس از بررسی این داده‌ها، رخدادهای حداکثر بارش ۲۴ ساعته طی دوره آماری مشترک ۳۵ ساله (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶) میان ۱۱ ایستگاه مورد استفاده شناسایی شدند. در ادامه، جهت تهیه لایه‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برای هرسال از دوره آماری ۳۵ ساله در سطح منطقه موردمطالعه، از روش‌های زمین‌آمار[2] درون‌یابی در محیط ArcMap استفاده شد.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی اطراف لاویج‌رود که داده‌های رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته آن‌ها طی دوره آماری ۳۵ ساله (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶) با استفاده از روش درون‌یابی کریجینگ با تابع دایره‌ای برای شبیه‌سازی سیلاب در این حوضه استفاده‌شده است.

مقایسه مقادیر RMSE به‌دست‌آمده از سه روش درون‌یابی IDW، RBD و Kriging (دایره‌ای[3]، کروی[4] و گوسین[5])، نشان می‌دهد که روش کریجینگ با تابع دایره‌ای دارای کمترین خطا و بیشترین دقت در درون‌یابی داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته در این پژوهش است (جدول ۲). یادآوری این نکته ضروری می‌نماید که دلیل استفاده از آمار ۳۵ ساله حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۱۱ ایستگاه نامبرده این است که داده‌های بارندگی از پراکنش مکانی مناسب در

1. Antecedent Moisture Condition
2. Geostatistical methods
3. Circular
4. Spherical
5. Gaussian

سطح منطقه موردمطالعه برخوردار بوده و تأثیر شرایط توپوگرافی را بر روی میزان بارش دریافتی در بخش‌های مختلف حوضه آبخیز لاویج (از مناطق مرتفع و کوهستانی گرفته تا مناطق دشتی و جلگه‌ای) به‌خوبی منعکس سازد.

جدول ۲: معیارهای آماری بررسی عملکرد و دقت روش‌های زمین‌آمار در درون‌یابی مقادیر حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته

روش / آماره	IDW	RBD	Kriging		
			Circular	Spherical	Gaussian
میانگین	۹	۲/۶	۳/۳	۱/۱	۱/۱
جذر میانگین مربعات	۳۶/۲	۳۳	۳۲	۳۲/۸	۳۲/۸
میانگین استاندارد	-	-	۰/۱	۰	۰
جذر میانگین مربعات استاندارد	-	-	۱	۱/۳	۱/۳
میانگین خطای استاندارد	-	-	۳۳/۶	۲۴/۴	۲۵/۳

شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از روش SCS نیاز به داده‌های کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، DEM، داده‌های بارش و ضریب زبری حوضه دارد که همه این لایه‌ها در قالب رستر و با اندازه سلول ۳۰×۳۰ متر تهیه می‌شوند. بر اساس روش SCS، ارتفاع رواناب و خطر سیلاب در حوضه آبریز به دست می‌آید. یادآوری این نکته ضروری است که برای برآورد ارتفاع رواناب در مدل SCS از داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته منطقه موردمطالعه طی دوره آماری ۳۵ ساله (۱۳۶۲-۱۳۹۶) و همچنین اطلاعات کاربری اراضی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat سال‌های ۱۳۶۷ و ۱۳۸۵ در کنار اطلاعات مربوط به بافت خاک و گروه‌های هیدرولوژیک آن، گروه رطوبتی خاک، شیب و پوشش اراضی استفاده می‌شود. از آمار رگبار و سیلاب اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران (رویدادهای هم‌زمان ثبت‌شده) برای ارزیابی دقت روش SCS در شبیه‌سازی سیل حوضه لاویج بر اساس ضریب همبستگی میان دبی اوج و زمان آن (مشاهداتی و محاسباتی) استفاده می‌شود.

مهم‌ترین پارامتر موردنیاز جهت برآورد رواناب با استفاده از مدل SCS و در ادامه شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبخیز موردبررسی، گروه هیدرولوژیک خاک می‌باشد. به‌منظور تعیین گروه هیدرولوژیک خاک در حوضه آبخیز لاویج‌رود، نقشه بافت خاک از اداره منابع طبیعی استان مازندران اخذ شد. بر اساس بافت خاک و دو پارامتر نفوذپذیری[1] (جدول ۳) و آبگذری[2] (جدول ۴)، ویژگی‌های خاک مشخص و گروه هیدرولوژیک آن تعیین گردید. برای تهیه لایه شماره منحنی نیاز به داده‌های گروه هیدرولوژیک خاک، انواع پوشش اراضی، کاربری اراضی و شرایط رطوبتی اولیه خاک در سطح حوضه آبخیز وجود دارد. در ابتدا، نقشه CN برای شرایط نرمال (خاک دارای رطوبت متوسط بوده و شیب بیشتر از ۵ درصد نباشد)، از تلفیق نقشه‌های گروه هیدرولوژیک خاک (HSG) و کاربری اراضی و به کمک جدول‌های SCS (جدول ۵) تهیه گردید (Hjelmfelt and Mockus, 2004).

1. Permeability
2. Water flow/ Drainage

جدول ۳: میزان نفوذ جریان آب در عمق خاک بر اساس بافت خاک (نفوذپذیری) (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷)

بافت خاک	عمق نفوذ آب در خاک (اینچ/ ساعت)
شن، شن لومی	۰/۰۵
شن ریز لومی، لوم شنی درشت، بافت تقریباً شنی (گراول)	۰/۱
لوم شنی، لوم رسی و شنی، لوم شنی ریز، رس سیلتی، رس شنی، رس	۰/۱۵
لوم، لوم سیلتی، سیلت، لوم رسی و سیلتی، لوم رسی	۰/۲

جدول ۴: تعیین افق سطحی آبگذری خاک با توجه به نوع بافت خاک (آبگذری) (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷)

بافت خاک	نفوذپذیری
رس سیلتی، رس، رس شنی	خیلی آرام
رس، رس شنی، رس سیلتی	آرام
رس، رس سیلتی یا رس شنی، لوم رسی و سیلتی، لوم رسی	آرام متوسط
لوم سیلتی، لوم، لوم رسی و شنی، لوم رسی و سیلتی	متوسط
لوم شنی درشت تا متوسط، لوم شنی ریز، لوم شنی خیلی متغیر	سریع متوسط
شن ریز، شن ریز لومی، بافت ریز لومی	سریع
شن درشت یا متوسط، بافت تقریباً شنی (گراول)	خیلی سریع

جدول ۵: شماره منحنی گروه‌های هیدرولوژیک خاک بر اساس ویژگی‌های اراضی (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷)

خصوصیات پوشش سطح حوضه	A	B	C	D
پوشش جنگلی متوسط	۳۶	۶۰	۷۳	۷۹
پوشش جنگلی خوب	۲۵	۵۵	۷۰	۷۷
مراتع طبیعی با پوشش متوسط	۴۹	۶۹	۷۹	۸۴
مراتع طبیعی با پوشش خوب	۳۹	۶۱	۷۴	۸۰
پشت بام‌ها، پارکینگ‌ها و دیگر جاده‌های آسفالتی	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸
مناطق مسکونی با ۶۵ درصد آسفالت	۷۷	۸۵	۹۰	۹۲
مناطق مسکونی با ۲۰ آسفالت	۵۱	۶۸	۷۹	۸۴
خیابان‌ها و جاده‌های آسفالتی	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸
جاده‌های خاکی	۷۲	۸۲	۸۷	۸۹
جاده‌های شوسه	۷۶	۸۵	۸۹	۹۱

روش اتومات سلولی

در اتومات سلولی فضا به‌صورت یک شبکه تعریف می‌گردد که به هر خانه آن، یک سلول گفته می‌شود. شبکه سلول‌ها می‌تواند ابعاد متفاوتی داشته و یک، دو و یا سه‌بعدی باشد. همچنین اشکال مختلفی از شبکه وجود دارد که به طبیعت پدیده فیزیکی وابسته است. شبکه مربعی، رایج‌تر از دو نوع دیگر مثلثی و شش‌گوشه می‌باشد. در این پژوهش، مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) و لایه‌های رستری حاصل از همه پارامترهای مؤثر، به‌صورت یک شبکه-بندی دوبعدی با ابعاد مشخص ۳۰×۳۰ متر، تشکیل‌دهنده فضای سلولی مدل اتومات سلولی پیشنهادی است. در CA

می‌توان از ساختارهای مختلفی برای همسایگی استفاده نمود. نوع همسایگی اهمیت بالایی در بروز نمودن حالت یک سلول دارد؛ زیرا تعیین‌کننده تعداد همسایگان شرکت‌کننده در قانون انتقال محلی بوده و بر روی شبکه انتقال مابین سلول‌ها تأثیرگذار است. معمول‌ترین آن‌ها همسایگی ون نیومن، مور، اسمیت و کول می‌باشد. با توجه به طبیعت پیکسلی داده‌های سنجش‌ازدور و دیگر منابع و هم‌چنین برنامه‌نویسی آسان‌تر، بیشتر مدل‌های CA در یک شبکه دوبعدی تشکیل می‌شوند. در این تحقیق نیز از یک اتومات سلولی دوبعدی مربعی شکل با شعاع همسایگی یک و شکل همسایگی مور یا هشت‌تایی استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن احتمال پخش و انتقال آب در همه جهت‌ها (هر هشت سلول کناری)، شکل همسایگی مور انتخاب می‌گردد. تراز آب در سلول‌ها (H) به‌عنوان حالت سلول در نظر گرفته‌شده و از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در این رابطه Z ارتفاع سلول مرکزی است که با توجه به DEM حوضه مشخص می‌شود. Hp ارتفاع ناشی از بارش باران در سلول و Hn ارتفاع آب دریافتی از سلول‌های همسایه است.

$$H = Z + Hp + Hn \qquad (۴)$$

بدین منظور، برای محاسبه رواناب ناشی از بارش در سلول‌ها از مدل موج سینماتیک استفاده می‌شود. با استفاده از این مدل می‌توان به شبیه‌سازی پیشروی جریان اقدام کرد. اغلب عرصه‌های پخش فاقد شیب جانبی است و فقط دارای شیب طولی است. بنابراین، می‌توان جریان یک‌بعدی و در دو جهت شیب طولی زمین فرض کرد. جریان یک‌بعدی با سطح آزاد از معادلات St. Venant پیروی می‌کند و شامل دو معادله بقای جرم و مومنتم است. یکی از شیوه‌های حل این معادله‌ها، فرض موج سیمانتیک یا جریان نرمال است. در این روش فرض می‌شود که جمله‌های شتاب و گرادیان عمق جریان در معادله کلی مومنتم در مقابل سایر اجزای معادله قابل‌چشم‌پوشی هستند؛ بدین ترتیب می‌توان جریان را یکنواخت فرض نمود. عمق جریان را می‌توان از رابطه‌ای که اورتون و میدوز ارائه کرده‌اند، به دست آورد (رابطه ۵).

$$y = (ni_e x/S_0^{0.5})^{0.6} \qquad (۵)$$

در این رابطه y عمق جریان رواناب برحسب متر، i_e شدت بارش اضافی برحسب متر بر ثانیه، n ضریب زبری مانینگ، x فاصله هر سلول در طول مسیر جریان از خروجی برحسب متر و S_0 شیب بدون بعد است.

قوانین انتقال CA در واقع نحوه گسترش پارامتر موردبررسی را نشان می‌دهد. قوانین انتقال یا تعیین جهت جریان بر اساس فرضیه انتقال آب از یک سلول با بار پتانسیل بزرگ‌تر به سلول مجاور دارای بار پتانسیل کوچک‌تر انجام می‌گیرد. درصورتی‌که چندین سلول همسایه دارای بار پتانسیل کمتر نسبت به سلول مرکزی باشد، آب به سلولی که اختلاف بار بیشتری با سلول مرکزی دارد، جریان می‌یابد. برای سلول‌های همسایه قطری، اختلاف ارتفاع پس از تقسیم‌بر جذر ۲ با سلول‌های دیگر مقایسه می‌شود. در اینجا قوانین اتومات سلولی همان قوانین فیزیکی شناخته‌شده در هیدرولوژی است که برای مدل‌سازی رواناب به‌منظور تجمیع بارش مازاد از سطح حوضه از روش D8 استفاده می-

شود؛ یعنی بارش مازاد در جهت شیب حرکت می‌کند و تجمیع می‌شود. روش تعریف شبکه زهکشی روش SFD8[1] نامیده می‌شود. الگوریتم D8 متداول‌ترین روش برای تعیین جهت جریان است که در این پژوهش از افزونه Arc Hydro که از الگوریتم D8 استفاده می‌کند و در محیط GIS به‌منظور تعیین جهت جریان در سطح حوضه آبخیز لاویج استفاده می‌شود. در هر گام زمانی و بعد از تعیین حالت‌ها، توزیع جریان بر اساس قانون انتقال (در جهت بیشترین شیب) صورت می‌گیرد. در این مرحله برای محاسبه زمان پیمایش به عرض سلول‌ها و سرعت نیاز است. زمان پیمایش، زمانی است که طول می‌کشد آب از یک نقطه حوضه به نقطه دیگر حوضه طی کند. درواقع، زمان پیمایش جزئی از زمان تمرکز است. زمان پیمایش از نسبت طول جریان به‌سرعت جریان به دست می‌آید. بنابراین، با معلوم شدن عمق جریان در مرحله قبل، با استفاده از رابطه مانینگ، سرعت جریان طبق رابطه ۶ به دست می‌آید. در این رابطه n ضریب مانینگ است و بر اساس جدول ۶ مشخص می‌شود.

$$v = 1/nR^{2.3}S0^{1.2} = {}^{1}/_{n}y^{2.3}S0^{1.2} = {}^{1}/_{n}(ni_{e}x/S0^{0.5})^{0.4}S0^{1.2} = (i_{e}x)^{0.4}S0^{0.3(0.6)}/n \qquad (۶)$$

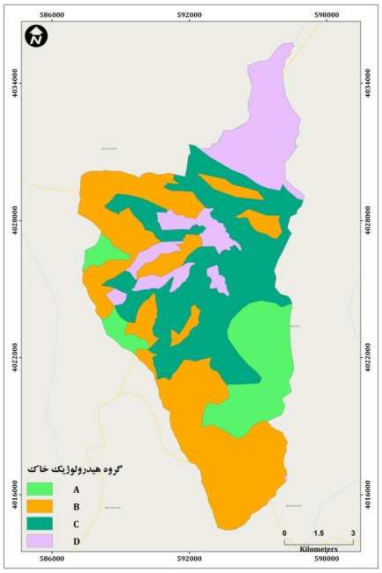
نتایج و بحث

نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک حوضه بر اساس لایه خصوصیت‌های بافت و عمق خاک (نفوذپذیری و آبگذری) آماده شد که در شکل ۳ آورده شده است. حوضه موردبررسی دارای چهار گروه هیدرولوژیکی خاک شامل A، B، C و D می‌باشد که ازنظر وسعت و گستردگی، گروه C دارای بیشترین مساحت است که پتانسیل تولید رواناب نسبتاً بالایی دارد. با انطباق نقشه‌های گروه هیدرولوژیک خاک و زمین‌شناسی حوضه، می‌توان بیان نمود که لایه مارن در گروه هیدرولوژیک D، لایه‌های شیل، شیل‌های مارنی و ماسه‌ای، رس‌سنگ و سنگ آهک‌های دولومیتی ضخیم لایه در گروه هیدرولوژیک C، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و شیل‌های کربن‌دار در گروه هیدرولوژیک B و رسوب‌های آبرفتی جدید کواترنری در گروه هیدرولوژیک A جای دارند. در ادامه، بر اساس تلفیق نقشه‌های HSG و کاربری اراضی و به کمک جداول SCS، نخست نقشه CN برای شرایط نرمال تهیه شد. با توجه به شیب‌دار بودن حوضه آبخیز لاویج‌رود و به دلیل برقرار نبودن شرایط نرمال، نخست با دخالت دادن شیب، شماره منحنی تعدیل شد و سرانجام شماره منحنی برای شرایط رطوبت متوسط خاک تهیه گردید. شکل ۴ نقشه شماره منحنی تعدیل‌شده برای حوضه موردبررسی را نشان می‌دهد.

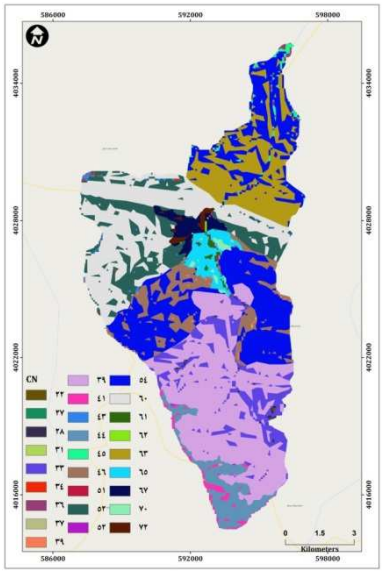
همچنین، نقشه نگهداشت سطحی خاک از روی نقشه شماره منحنی برای شرایط رطوبت پیشین خاک گروه مرطوب محاسبه‌شده است. سپس بر اساس نقشه نگهداشت سطحی خاک و نقشه‌های رستری، رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی، میزان ارتفاع رواناب به دست آمد. نقشه‌های رستری (درون‌یابی شده با استفاده از روش زمین‌آمار کریجینگ و تابع کروی) رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته در شکل ۵ و نقشه‌های رواناب به‌دست آمده (با استفاده از مدل برآورد ارتفاع رواناب SCS) در شکل ۶ آورده شده است. انطباق و همپوشانی لایه‌های رستری بارندگی، شماره منحنی، نگهداشت سطحی و رواناب حوضه نشان می‌دهد درجاهایی که مقدار شماره منحنی زیاد است، نگهداشت سطحی خاک پایین و درنتیجه میزان رواناب بالا است. البته نکته مهم دیگری که در

[1]. Single Flow Direction chosen from 8 possibilities

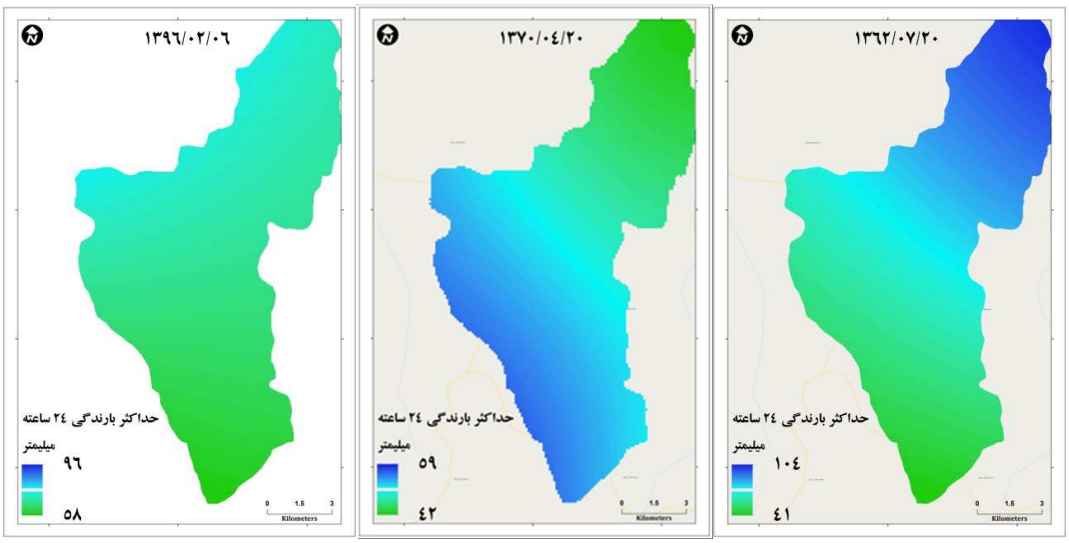
ارتباط با پتانسیل تولید رواناب در سطح حوضه وجود دارد، این است که در طی یک رخداد بارش معین، میزان بارش دریافتی در قسمت‌های مختلف حوضه متفاوت است. این تفاوت به صورتی است که ممکن است در یک رخداد بارشی، قسمت‌های جنوبی حوضه مقدار بارش بیشتری نسبت به قسمت‌های شمالی آن دریافت کنند و یا بالعکس. بنابراین، اگر به نقشه‌های درون‌یابی رخدادهای حداکثر ۲۴ ساعته توجه شود، می‌توان این تفاوت را در مقایسه بین رخدادهای بارندگی حداکثر ۲۴ ساعته در تاریخ‌های بررسی‌شده مشاهده نمود. به تبعیت از این تفاوت، حداکثر رواناب هم می‌تواند در سطح حوضه متغیر باشد.



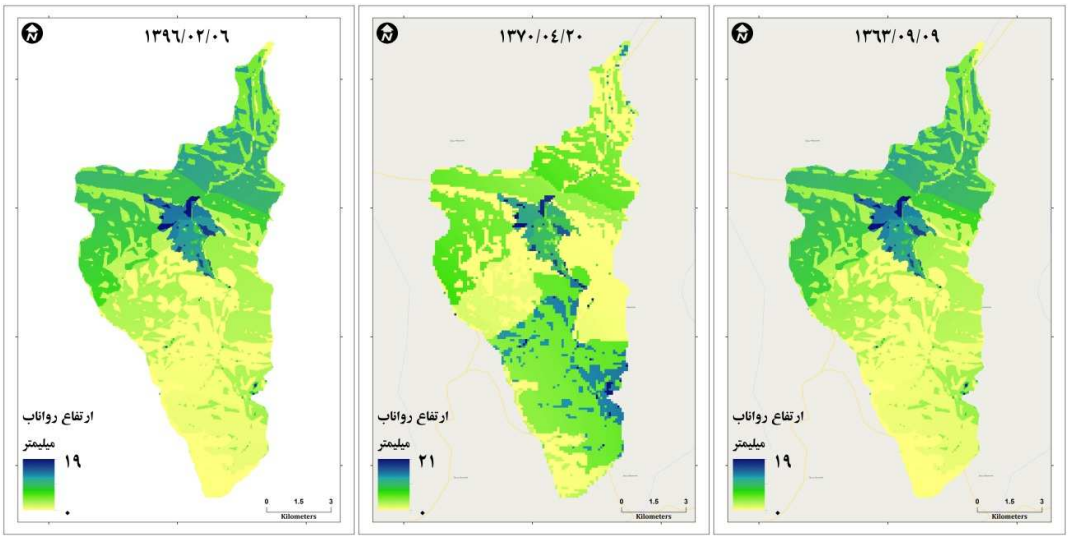
شکل ۳: (راست): نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک حوضه آبخیز لاویج‌رود



شکل ۴: (چپ): نقشه شماره منحنی تعدیل‌شده بر اساس شیب اراضی و گروه رطوبتی III

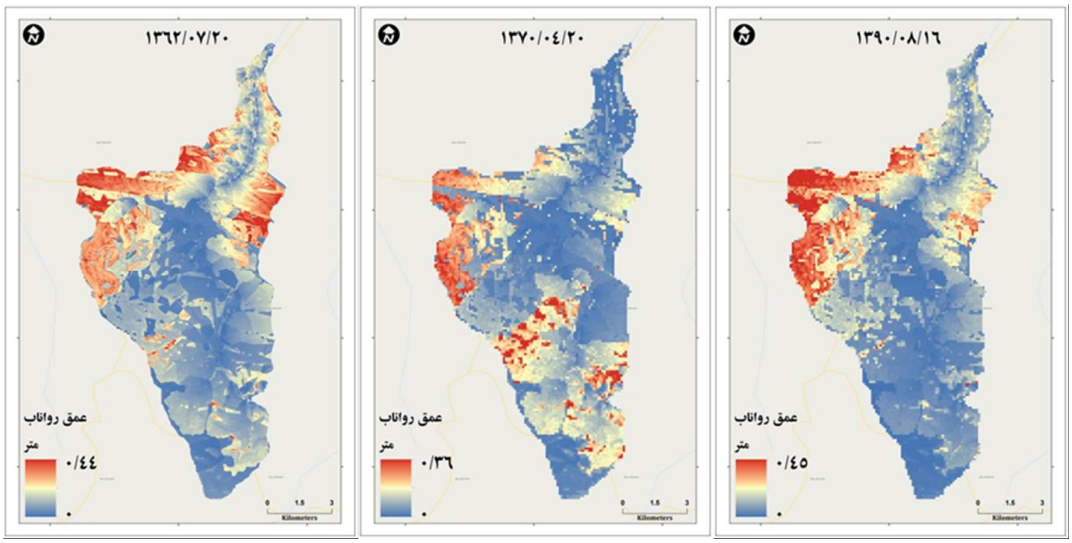


شکل ۵: نمونه‌ای از نقشه‌های درون‌یابی رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته در حوضه آبخیز لاویج‌رود



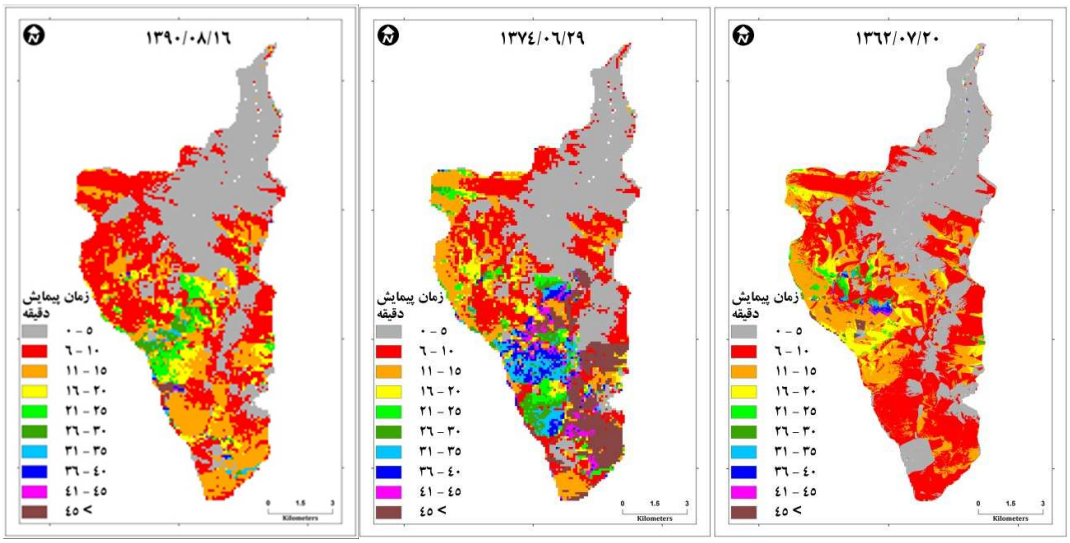
شکل ۶: نمونه‌ای از نقشه‌های پتانسیل تولید رواناب در حوضه آبخیز لاویج‌رود

پس از آماده شدن لایه‌های رواناب برای ۳۵ رخداد، حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ در حوضه آبخیز لاویج‌رود، شبیه‌سازی سیلاب این حوضه با استفاده از مدل اتومات سلولی نیاز به لایه‌های عمق جریان، سرعت جریان و زمان پیمایش داشت. از روی شدت بارش اضافی در سلول‌ها (ارتفاع رواناب)، شیب، ضریب زبری مانینگ و طول جریان، لایه عمق جریان رواناب به‌دست آمد که بر اساس مدل موج سینماتیک است و ارتفاع رواناب ناشی از بارش در سلول‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۷).



شکل ۷: نمونه‌ای از نقشه‌های عمق رواناب در حوضه آبخیز لاویج‌رود

همچنین، برای شبیه‌سازی سیلاب و ترسیم هیدروگراف آن به زمان پیمایش حوضه نیاز است. زمان پیمایش، زمانی است که طول می‌کشد آب از یک نقطه تا نقطه دیگری از حوضه را طی کند. زمان پیمایش از نسبت طول جریان به سرعت جریان به‌دست می‌آید (رابطه ۷). بدین منظور، از روی مدل ارتفاعی رقومی طول جریان آبراهه‌ها به‌دست آمد و سرعت جریان نیز با استفاده از ضریب زبری مانینگ، شیب و عمق جریان در محیط نرم‌افزاری ArcMap محاسبه شد. سپس نقشه رستری زمان پیمایش برای ۳۵ رخداد حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته موردمطالعه ترسیم شد که نقشه آن‌ها با کلاس‌بندی ۵ دقیقه فواصل زمانی در شکل ۸ آورده شده است.

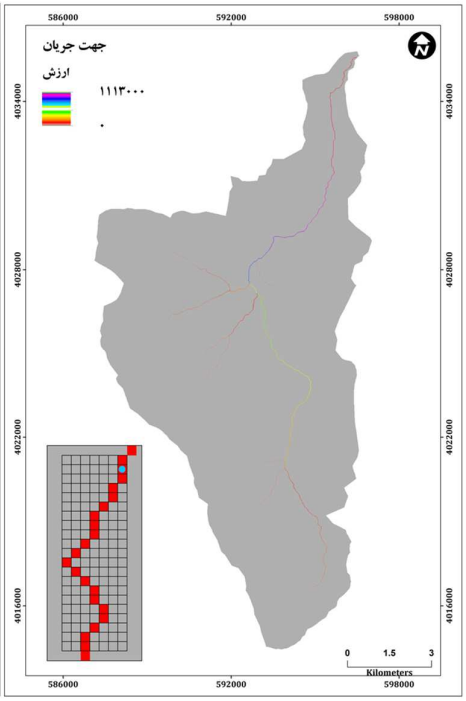


شکل ۸: نمونه‌ای از نقشه‌های زمان پیمایش حوضه آبخیز لاویج‌رود

$$\text{Travel time} = L/3600V \qquad (۷)$$

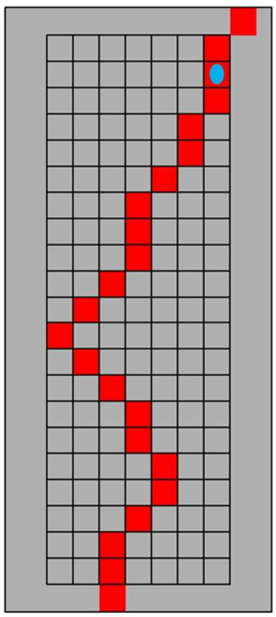
که در این رابطه، Travel Time زمان پیمایش به دقیقه، L لایه طول جریان استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع و V سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه است. با اجرای مدل اتومات سلولی، دبی متناظر با هرکدام از رخدادهای حداکثر بارش ۲۴ ساعته به‌صورت سری زمانی برای سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ استخراج‌شده است. برای رسیدن به این مرحله، تعداد ۳۵ نقشه جهت جریان و نقشه رستری رواناب تولید گردید. در نقشه جهت جریان تجمعی هر سلول بیانگر مسیر جریان است که به‌روش D8 تعیین گردید که نمونه‌ای از آن برای اطراف ایستگاه آغوزکتی - تنگه لاویج (ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه آبخیز لاویج‌رود) در شکل ۹ آورده شده است. شکل ۱۰ مقدار دبی سیلابی محاسبه‌شده در محدوده اطراف ایستگاه آغوزکتی برای رخداد بارش حداکثر ۲۴ ساعته درتاریخ ۱۳۸۱/۰۶/۱۶ را نشان می‌دهد. با دقت در مقادیر این نقشه، مشاهده می‌شود سلول‌هایی که در مسیر آبراهه قرار نگرفته‌اند رواناب بسیار ناچیزی دارند؛ درحالی‌که برای سلول‌های واقع در آبراهه، رواناب قابل‌ملاحظه‌ای دیده می‌شود. مطابق این شکل، مقدار دبی سیلابی برای این رخداد بارندگی در ایستگاه آغوزکتی ۳/۴۲ مترمکعب بر ثانیه است. با توجه به اینکه مقدار رواناب محاسبه‌شده توسط رابطه SCS رواناب ناشی از بارش بوده و مقدار دبی پایه در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین برای ارزیابی دقت نتایج با داده‌های مشاهداتی لازم است که مقدار دبی پایه ایستگاه آغوزکتی تعیین و به مقادیر دبی سیلابی اضافه گردد. در این مطالعه از روش حداقل محلی که یک روش ساده و دارای دقت قابل‌قبول است، برای محاسبه دبی پایه استفاده شد. مشخصه‌های آماری دبی‌های مربوط به ۳۵ رخداد حداکثر بارش ۲۴ ساعته به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش در جدول ۷ آورده شده است.

	0	1	2	3	4	5	6
0	68	77	212	74	29	198195	683501
1	66	221	88	30	6	251239	738381
2	96	222	69	4	88079	258059	690036
3	202	85	30	3	208790	683486	269085
4	198	63	2	88078	279740	690028	214792
5	64	28	88077	216376	665325	223493	96643
6	26	1	198179	683460	290711	96647	7
7	1	0	251226	738339	284822	9	10
8	0	88075	262423	701617	259944	3	7
9	88075	216373	646175	223473	96137	1	2
10	216367	646167	223472	96638	2	1	1
11	633233	294048	135531	8	5	3	1
12	218121	646017	221668	94438	9	3	1
13	90041	218046	645998	221668	93943	8	8
14	35	90059	258848	688497	222684	19	14
15	4	1	198940	684459	288171	94424	5
16	2	1	90059	258847	739539	213767	5
17	1	0	88032	262305	757760	246333	16
18	1	88031	216268	645866	253401	96597	6
19	0	198077	683110	268949	96106	6	2
20	0	251096	737962	270949	15	10	3



شکل ۹: نمایش جهت جریان تجمعی حوضه لاویج‌رود و محدوده اطراف ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی

	0	1	2	3	4	5	6
0	0.000217	0.000237	0.000694	0.00021	0.000046	0.43348	3.257827
1	0.000193	0.00073	0.000258	0.000058	0.000017	0.583391	3.422294
2	0.000396	0.000734	0.000159	0.000013	0.106112	0.737543	3.27893
3	0.000667	0.000338	0.000057	0.000011	0.326651	2.257776	0.789621
4	0.000655	0.000233	0.000007	0.141694	0.703288	2.278903	0.486763
5	0.000182	0.000097	0.141694	0.589771	2.191172	0.63128	0.162887
6	0.000048	0.000004	0.433435	2.257691	0.760554	0.162918	0.00002
7	0.000002	0.000001	0.583355	2.422159	0.506402	0.000027	0.000032
8	0.000001	0.106951	0.698555	2.314078	0.460681	0.000007	0.000022
9	0.141687	0.589761	2.119624	0.631218	0.125672	0.000002	0.000007
10	0.589746	2.119598	0.63122	0.159238	0.000007	0.000003	0.000004
11	2.099249	0.927061	0.320238	0.000025	0.000007	0.000009	0.000003
12	0.599946	2.119244	0.620828	0.157439	0.000028	0.00001	0.000005
13	0.146742	0.599657	2.119181	0.620827	0.121896	0.000023	0.000026
14	0.000067	0.146569	0.742441	2.273063	0.374779	0.000062	0.000046
15	0.000012	0.000002	0.438107	2.261939	0.750325	0.157379	0.000013
16	0.000006	0.000002	0.146569	0.742437	2.451592	0.481192	0.000021
17	0.000004	0	0.106899	0.698233	2.425598	0.531568	0.00006
18	0.000005	0.141617	0.589469	2.118611	0.637208	0.16281	0.000024
19	0.000002	0.433205	2.25654	0.789224	0.125668	0.000025	0.000005
20	0.000001	0.583045	2.420919	0.647303	0.000053	0.000034	0.000013

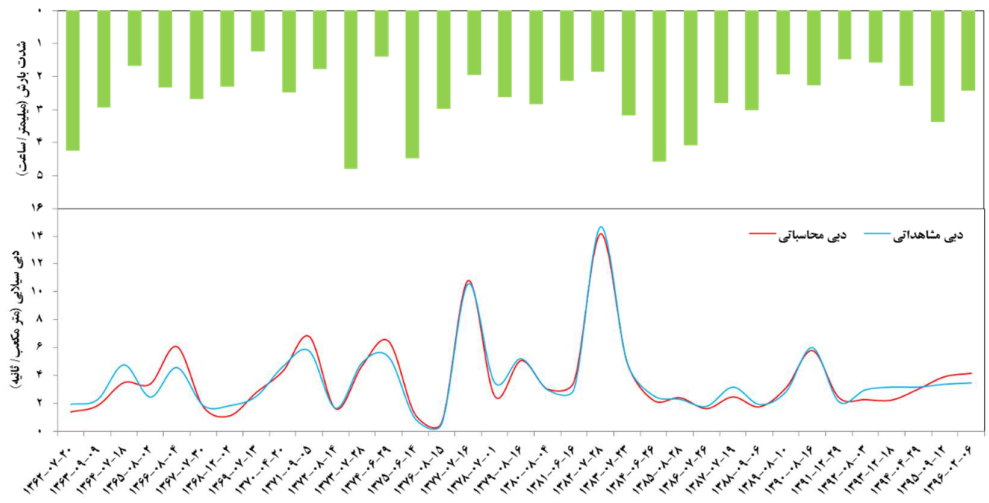


شکل ۱۰: مقدار دبی سیلابی محاسبه شده برای تاریخ ۱۳۸۱/۰۶/۱۶ در محدوده اطراف ایستگاه آغوزکتی

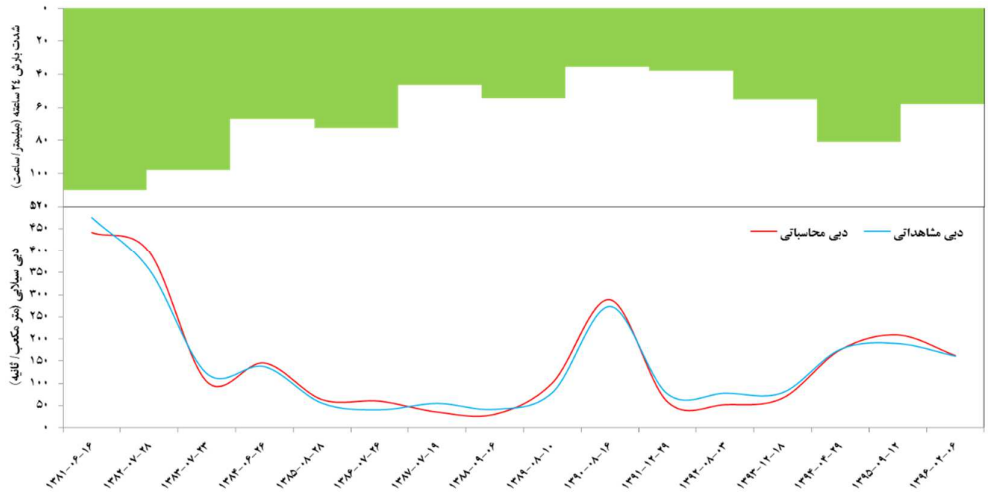
جدول ۷: مشخصات دبی‌های محاسباتی با اتومات سلولی در محل ایستگاه آغوزکتی لاویج

دبی/ آماره	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب چولگی
میانگین دبی در یک ساعت	۳/۸	۰/۷	۱۴/۲	۲/۹	۲/۱
دبی حداکثر بارش ۲۴ ساعته	۹۰/۹	۱۵/۵	۳۴۰/۹	۷۰/۴	۲/۱

سرانجام، بر اساس نقشه عمق جریان و زمان پیمایش حوضه، در محیط پایتون سری زمانی رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برای دوره آماری ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ ترسیم شد. با بررسی آمارهای رگبار و سیلاب اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، اطلاعات رویدادهای هم‌زمان ثبت‌شده با این داده‌ها استخراج شدند. مقایسه دبی‌های سیلابی مشاهداتی و محاسباتی به‌صورت میانگین دبی در یک ساعت و دبی حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته انجام گرفت که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. طبق این شکل‌ها، دبی سیلابی محاسبه‌شده با مدل اتومات سلولی هم برای وضعیت میانگین دبی در یک ساعت و هم برای مجموع دبی سیلابی حداکثر بارش ۲۴ ساعته مطابقت زیادی باهم دارند.



شکل ۱۱: سری زمانی دبی محاسباتی و مشاهداتی (میانگین دبی در یک ساعت) حوضه آبخیز لاویج‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی؛ این سری زمانی و همچنین هایتوگراف قابل‌مشاهده در بالای عکس، بر اساس داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال-های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ ترسیم‌شده است.



شکل ۱۲: سری زمانی دبی محاسباتی و مشاهداتی (دبی حداکثر بارش ۲۴ ساعته یا دبی کل) حوضه آبخیز لاویج‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی؛ این سری زمانی و همچنین هایتوگراف قابل‌مشاهده در بالای عکس، بر اساس داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ ترسیم‌شده است.

نتیجه‌گیری

حوضه لاویج‌رود تحت تأثیر شرایط خاص زمین‌شناسی، آب و هوایی، هیدرولوژیک، پوشش گیاهی و ژئومورفولوژیک به‌صورت یک سیستم درآمده است. پایین بودن معدل حداقل دما در فصول سرد سال باعث یخبندان و بالای صفر بودن معدل حداکثر دما در همین فصول باعث ذوب یخ می‌شود. درنتیجه این انقباض و انبساط، خاکدانه‌ها تخریب‌شده و توسط آب‌های جاری حمل می‌شوند و در دوره گرم سال هم بارش‌های رگباری بر روی شیب زیاد دامنه‌های حوضه، باعث ایجاد سیلاب می‌شوند. با توجه به سیل‌خیز بودن حوضه لاویج، به‌ویژه در طی بارش‌های رگباری، هدف اصلی از این مطالعه، نشان دادن امکان استفاده از روش SCS برای شبیه‌سازی سیلاب‌های ناشی از بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۹۶ در سطح حوضه بوده است. این مطالعه نشان داد که یک فرآیند پیچیده طبیعی همچون سیلاب/ رواناب می‌تواند با روش SCS و با استفاده از یک مدل رقومی ارتفاع و لایه-های رستری که بطورکلی در دسترس هستند، تخمین گردد. لایه‌های خروجی به‌صورت رستری بوده و حامل اطلاعاتی است که منجر به شناسایی فرآیندهای طبیعی موردمطالعه می‌گردد.

در این پژوهش کارایی روش SCS به‌منزله روشی نوین و امکان تلفیق آن با اپلیکیشن‌های GIS برای شبیه‌سازی خطر سیلاب و هیدروگراف جریان برای حوضه آبخیز لاویج‌رود مطالعه شد. بخش زیادی از حوضه آبخیز لاویج‌رود دارای گروه هیدرولوژیکی C و D است که نفوذپذیری کم و خیلی کم دارند؛ بدین معنی که حجم زیادی از بارش در این قسمت‌ها می‌تواند تبدیل به رواناب شود؛ اگرچه پوشش جنگلی سطح حوضه این ضریب تبدیل را به میزان قابل‌توجهی کاهش داده است. با توجه به نقشه‌های ارتفاع رواناب این دوره ۳۵ ساله، نیمه شمالی به‌ویژه شمال غربی

حوضه، به دلیل قابلیت نفوذ کم و نیز نزدیکی به خروجی حوضه، دارای ارتفاع و عمق رواناب بسیار زیادی است. همچنین، خطر رواناب در مسیر رودخانه لاویج و در اراضی اطراف آن به‌ویژه در پایین‌دست جریان بالا است. شبیه‌سازی رواناب در حوضه لاویج‌رود نشان داد که علاوه بر کاربری اراضی، خاک، نفوذپذیری و شیب، پراکنش مکانی مقدار بارش عامل مهمی در تجمع رواناب به یک سمت از جریان پایین‌دست حوضه و تولید سیلاب است. ازاین‌رو، اجرای کارهای مدیریتی در آبراهه‌های پایین‌دست و نواحی مجاور آن ضروری به نظر می‌رسد.

نتایج به‌دست آمده از این سری‌های زمانی با استفاده از روش SCS گویای این مطلب است که دبی مشاهداتی و دبی محاسباتی مطابقت زیادی با هم دارند و ارزیابی مدل نیز نشان‌دهنده دقت مناسب آن است. بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی میانگین دبی در یک ساعت ۰/۸۱ درصد همبستگی در ایستگاه آغوزکتی مشاهده گردید که مبین آن است که رویکرد SCS علیرغم سادگی‌اش می‌تواند نتایج واقع‌گرایانه‌ای برای یک رویداد طبیعی پیچیده مانند رواناب فراهم نماید. همچنین درصد خطای مقادیر مشاهداتی و برآوردی میانگین دبی در یک ساعت ۱۴ است که دقت مناسب مدل را نشان می‌دهد. بررسی نقشه‌های زمان پیمایش نشان می‌دهد که در اکثر رخدادهای بارشی، زیرحوضه‌هایی که در نیمه شمالی یا نزدیک به خروجی حوضه قرارگرفته‌اند، زمان پیمایش کمتری دارند تا جریان تجمعی به خروجی حوضه برسد. مضاف بر این امر، جهت جریان تجمعی نیز سبب می‌شود تا رواناب‌های تولیدشده در بخش‌های جنوبی‌تر و بالادست حوضه به سمت پایین‌دست سرازیر شده و تجمع جریان در بخش‌های نزدیک به خروجی حوضه باشد. با توجه به این موارد، زیرحوضه‌هایی که در پایین‌دست جریان حوضه آبخیز لاویج‌رود قرار دارند، پتانسیل سیل‌خیزی بیشتری نسبت به حوضه‌های بالادست دارند.

همچنین، خطر سیلاب در مسیر رودخانه لاویج و در اراضی اطراف آن به‌ویژه در پایین‌دست جریان بالا است. شبیه‌سازی سیلاب در حوضه لاویج‌رود نشان داد که علاوه بر کاربری اراضی، خاک، نفوذپذیری و شیب، پراکنش مکانی مقدار بارش عامل مهمی در تجمع رواناب به یک سمت از جریان پایین‌دست حوضه و تولید سیلاب است. ازاین‌رو، اجرای کارهای مدیریتی در آبراهه‌های پایین‌دست و نواحی مجاور آن ضروری به نظر می‌رسد. مقایسه دبی‌های محاسبه‌شده از مدل اتومات سلولی با دبی‌های مشاهداتی و همچنین با تغییرهای زمانی، مقدار بارندگی (که بر روی مقدار رواناب و درنتیجه دبی سیلابی تأثیرگذار است) نشان می‌دهد که مدل اتومات سلولی به‌خوبی توانسته است که سیلاب‌های ناشی از بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته را در حوضه آبخیز لاویج‌رود شبیه‌سازی کند.

نتایج این پژوهش با نتایج پژوهشگرانی چون Aboudagga (۲۰۰۵)، Rinaldi و همکاران (۲۰۱۲)، Cirbus و Podhoranyi (۲۰۱۳)، اعلمی و همکاران (۱۳۹۴) و خالقی و ملکانی (۱۳۹۵) انطباق دارد که بیان می‌کند مدل اتومات سلولی نسبت به روش‌ها معمول که از محیط ArcGIS استفاده می‌کنند، از دقت بسیار زیادی برخوردار است و این مدل به‌خوبی قادر به ترسیم نموداری سری زمانی و یا هیدروگراف سیل است. بنابراین، می‌توان از اتومات سلولی برای پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار استفاده نمود و نتایج قابل‌اعتمادی هم به‌دست آورد. از نقشه خطر سیلاب به‌دست آمده نیز می‌توان به‌عنوان یکی از اطلاعات پایه و مهم در مطالعه‌های طرح‌های عمرانی استفاده کرد. در انتهای این پژوهش، پیشنهادهایی ارائه می‌شود که می‌تواند هم به افزایش کیفیت این پژوهش و پژوهش‌های

آینده کمک نموده و هم درنهایت به رویکردی جامع برای کاهش خسارت‌های ناشی از تولید رواناب و سیلاب در حوضه آبخیز لاویج‌رود منجر گردد.

* ازآنجایی‌که محدودیت و شرایط خاصی برای استفاده از روش‌های اتومات سلولی و SCS وجود ندارد، بنابراین در شبیه‌سازی و تخمین فرآیندهای پیچیده طبیعی قابل استفاده می‌باشد و می‌توان مشابه با پژوهش انجام‌شده با تغییر در قوانین آن جهت پهنه‌بندی سیلاب، تخمین رسوب و سایر پارامترهای هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی به‌کار برد. لیکن بایستی نهایت سعی و دقت را در تعیین و تهیه نیازهای اطلاعاتی ورودی صرف نمود.

* یکی از مهم‌ترین پارامترهای برآورد و شبیه‌سازی سیلاب، تعیین مقدار شماره منحنی بخش‌های مختلف حوضه برمبنای گروه هیدرولوژیک خاک و وضعیت رطوبت پیشین آن است. با توجه به این‌که وضعیت رطوبت پیشین خاک تأثیر بسیار زیادی در شماره منحنی و شبیه‌سازی مقادیر دبی سیلابی دارد، در این پژوهش سعی شد تا برای همه رخدادهای بارش، وضعیت رطوبت پیشین خاک یکسان در نظر گرفته نشود. افزایش دقت در این مورد مهم، نیاز به داشتن سری زمانی کامل از داده‌های رگبار و سیلاب ایستگاه‌های هیدرومتری دارد که در این پژوهش داده‌های ایستگاه اندازه‌گیری آغوزکتی بسیار مفید و کافی بودند. پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های مشابه آینده، باید به این نکته مهم توجه گردد.

* در بخش پهنه‌بندی سیلاب در مسیر آبراهه‌ها با استفاده از مدل اتومات سلولی که در قالب جهت جریان تجمعی آن را ارائه می‌دهد، می‌توان محدوده گسترش سیلاب را برای بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته در دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از این مدل برآورد نموده و نتایج آن را نیز با مدل‌هایی همچون HEC-RAS مقایسه کرد.

منابع

اعلمی، محمدتقی؛ ملکانی، لیلا؛ قربانی، محمدعلی (۱۳۹۴). مدل‌سازی بارش - رواناب در حوضه لیقوان چای با استفاده از مدل اتومای سلولی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره سه، سال چهارم، صص ۶۰-۷۳.

ثانی‌خانی، هادی؛ خراسانی، علی؛ دین‌پژوه، یعقوب (۱۳۹۱). شبیه‌سازی رواناب و فرسایش خاک با استفاده از روش اتوماتای سلولی، مجله پژوهش آب ایران، سال ششم، شماره ۱۱، صص ۱۲۳-۱۳۳.

حجازی، اسدالله؛ مزبانی، مهدی (۱۳۹۶). برآورد مقادیر ارتفاع و دبی حداکثر رواناب با استفاده از روش شماره منحنی (CN) (مطالعه موردی: حوضه آبریز سراب دره‌شهر)، هیدروژئومورفولوژی، شماره پنجم، صص ۶۳-۸۱.

حسین‌زاده محمدمهدی؛ نصرتی کاظم؛ ایمنی، سپیده (۱۳۹۷). تعیین شماره منحنی و برآورد پتانسیل رواناب حوضه آبخیز حصارک، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال هجدهم، شماره ۵۱، صص ۱۳۳-۱۵۰.

خالقی سمیه؛ ملکانی لیلا (۱۳۹۵). شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز چرچر)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال چهل و هشتم، شماره ۴، صص ۵۸۹-۶۰۵.

فهیمی‌فر، احمد؛ بحری، میرعباس؛ بخشایش اقبالی، نسرین (۱۳۸۵). تحلیل فرآیند حرکت و لغزش زمین‌لغزه‌ها بر پایه مدل اتومات سلولی، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.

قهرودی تالی، منیژه (۱۳۸۵). ارزیابی مدل SCS-CN در تخمین رواناب مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد امیرکبیر (کرج)، جغرافیا و توسعه، سال چهارم، شماره ۷، صص ۱۸۵-۱۹۸.

مصطفی‌زاده، رئوف؛ میرزایی، شهناز؛ ندیری، پریا (۱۳۹۶). تعیین شماره منحنی از رویدادهای بارش و رواناب و تغییرات آن با مؤلفه‌های بارش در یک حوضه آبخیز جنگلی، نشریه علوم آب‌وخاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، شماره چهارم، صص ۱۵-۲۸.

Abou El-Magd, I., Hermas, E., and El Bastawesy, M., (2010), GIS-modeling of the spatial variability of flash flood hazard in Abu Dabbab catchment, Red Sea Region, Egypt, the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 13, pp. 81-88.

Aboudagga, N. (2005). Simulations by cellular automata of the floods in littoral lagoon areas, www.isn-oldenburg.de/projects/earselabstracts2005/ABS-Aboudagga-Nader.html.

Cirbus, J., and Podhoranyi, M. (2013). Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process. Applied Mathematics & Information Sciences, v. 7(6), p. 2149-2158.

Dewan, A.M., Islam, M.M., Kumamoto, T., and Nishigaki, M., (2007), Evaluating flood hazard for land-use planning in Greater Dhaka of Bangladesh using remote sensing and GIS techniques, Water Resources Manage, Vol. 21, pp. 1601-1612.

Elkhrachy, I., (2015), Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA), The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 18, pp. 261-278.

Foodi, G.M., Ghoneim E.M., and Arnell, W.N., (2004), Predicting Location Sensitive to Flash Flooding in Arid Environment, Journal of Hydrology, Vol. 292, pp. 48-58

Haq, M., Akhtar, M., Muhammad, S., Paras, S., and Rahmatullah, J., (2012), Techniques of Remote Sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: A case study of Sindh province, Pakistan, the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 15, pp. 135-141.

Hjelmfelt, A.T., and Mockus, V., (2004), Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall, Part 630 Hydrology National Engineering Handbooks, Chapter 10, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 235p.

Inci, T.Y., Akguül, S., Dengiz, O., and Aküzüm, T., (2006), Estimation of flood discharge for a small watershed using SCS curves number and geographic Information System, River basin flood management journal, pp. 527-538.

June, S., Yuan, Y., and Jing, Z., (2001), The effect of landuse/cover change on surface Runoff in Shenzheh Region, China, Institute of Resources ScienceBeigining normal university, 100875, Beijing.

Kopp, S., and Noman, N. (2008). ArcGIS Spatial Analyst - Hydrologic Modeling, ESRI User Conference Technical Workshop, http://www.scdhec.gov/gis/presentations/ESRI_Conference_08/tws/workshops/tw_37.pdf

Kumar RAI, P., and Mohan, K., (2014), Remote Sensing data & GIS for flood risk zonation mapping in Varanasi District, India, Forum geografic, Studii și cercetări de geografie și protecția mediului, Vol. 13, pp. 25-33.

Lewis, D., Singer, M.J., and Kate, K.W., (2000), Applicability of SCS curve number method for a California Woodlands Watershed, Journal of Soil and Water Conservation, Second Quarter, pp. 48-55.

Rinaldi, P.R., Dalponte, D.D., Vénere, M.J., and Clausse, A. (2012). Graph-based cellular automata for simulation of surface flows in large plains. Asian Journal of Applied Science, v. 5, p. 224-231.

Saravanan, S., and Manjula, R., (2015), Geomorphology based semi-distributed approach for modeling rainfall-runoff modeling using GIS, Aquatic Processes, Vol. 4, pp. 908-916.

Satheeshkumar, S., Venkateswaran, S., and Kannan, R., (2017), Rainfall-runoff estimation using SCS–CN and GIS approach in the Pappiredipatti watershed of the Vaniyar sub-basin, South India, Modeling Earth Systems and Environment, Vol. 3(24), pp. 1- 8.

Schroeder, S.A., and Larsen, J.K., (1990), Antecedent moisture conditions for North Dakota runoff predictions North Dakota, Farm Research, Vol. 48(0097, 5338), pp. 8-11.

Soulis, K.X., and Valiantzas, J.D., (2012), SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watershed-the two-CN system approach, Hydrology Earth System Science, Vol. 16, pp. 1001-1015.

Van, T.P.D., Carling, Paul, A., Coulthard, Tom, J., and Atkinson Peter, M. (2007). Cellular automata approach for flood forecasting in a bifurcation river system, PUBLS. INST. GEOPHYS. POL. ACAD. SC., v. E-7 (401), 256 pages.

Vinithra, R., and Yeshodha, L., (2016), Rainfall-runoff modeling using SCS–CN method: a case study of Krishnagiri District, Tamilnadu, International Journal of Science Research, Vol. 5(3), pp. 2319–7064.

Xiao, B., Wang, Q.H., Fan, J., Han, F.P., and Dai, Q.H., (2011), Application of the SCSCN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity, Pedosphere, Vol. 21(6), pp. 738-749.

Zhan, X., and Huang, M.L. (2004). ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps, Environmental Modeling & Software, v. 19, p. 875-879.

Research Article

Estimation of runoff height and flood maximum discharge using Cellular Automata and SCS models, (Case Study: Lavijrood watershed)

Hasan Shabaninia[1], Sadraldin Motevalli*[2], GholamReza Janbaz Ghobadi[3], Shahriar Khaledi[4]

Received: 22-04-2019 Revised: 28-11-2019 Accepted: 12-02-2020

Abstract

The Lavijrood watershed can produce seasonal floods; this is due to its topographical and physiological situation, climate system, non-compliance with technical construction standards, riverside violation, geology, and the other factors that affect the runoff production. In this research, we investigated the performance of the cellular automata (CA) and SCS model as a suitable estimation method and examined the possibility of integrating the method with the ArcGIS application to simulate the flood hazards and the hydrograph flow for the Lavijrood. The runoff height and the flood hazard were obtained through the SCS method. The flood simulation using the SCS method requires the data of land use, hydrologic groups of soils, Digital Elevation Map (DEM), rainfall, and the roughness coefficient of the basin. The raster format of all these layers was prepared with cell sizes of 30×30 m. A large part of the Lavijrood watershed belongs to the hydrological groups C and D, which have very low permeability. This means that a large volume of rainfall converts into runoffs. Due to the low permeability and closeness to the watershed outlet, the northern half, especially in the northwest of the watershed, has a very high runoff depth and height. Also, the flood risk is high in the Lavijrood River route and its surrounding area especially at the downstream. The runoff simulation in this watershed showed that land use, soil, permeability, slope, and the geographical distribution of rainfalls are the most important factors that control runoffs and their movement to downstream locations to produce floods.

Keywords: Flood Risk, Cellular Automata, SCS, GIS, Lavijrood Watershed.

[1]- Ph.D. Student of Climatology, Department of Geography, Islamic Azad University of Nour, Iran
[2]*- Associate Professor, Department of Geography, Islamic Azad University of Nour, Iran. Email: s_motevalli@iaunour.ac.ir
[3]- Assistant Professor, Department of Geography, Islamic Azad University of Nour, Iran.
[4]- Professor, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

References

References (in Persian)

Aelami. MT., Malekani, L., and Ghorbani, M.A., (2015), Rainfall-runoff modeling in Lighvanchay watershed using cellular automata model, Quantitative Geomorphological Researches Journal, Vol. 3, Issue. 4, pp. 60-73. [In Persian]
Fahimifar, A., Bahri, M.A., and Bakhshayesh Eghbali, N., (2006), Analysis of landslide movement processes based on cellular automata model, 25th Earth Science Conference, Industries and Mines Ministry, Geological Survey of Iran, Tehran. [In Persian]
Ghahroudi Tali, M., (2006), Evaluation of SCS-CN model in runoff estimation (case study: Amir Kabir Dam watershed), Geological and Development Journal, Vol. 4, Issue, 7, pp. 185-198. [In Persian]
Hejazi, A., and Mezbani, M., (2017), Estimation of maximum runoff discharge and height values using Curve Number (CN) method (case study: Sarab watershed od Darrehshahr), Hydro geomorphology Journal, Vol. 5, pp. 63-81. [In Persian]
Hosseinzadeh, M.M., Nosrati, K., and Imeni, S., (2018), Determination of curve number and estimation of runoff potential in Hesarak watershed, Geographical Sciences Applied Researches Journal, Vol. 18, Issue. 51, pp. 133-150. [In Persian]
Khaleghi, S., and Malekani, L., (2016), Flood risk simulation using cellular automata model based od GIS (case study: CherCher watershed), Physical Geography Journal, Vol. 48, Issue. 4, pp. 589-605. [In Persian]
Mostafazadeh, R., Mirzay, SH., and Nadiri, P., (2017), Determination of curve number of rainfall and runoff events and their changes with rainfall components in a forest watershed, Soil and Water Science Journal (Agricultural and Natural Resources Sciences and Technologies), Vol. 4, pp. 15-28. [In Persian]
Sanikhani, H., Khorasani, A., and Dinpajooh, Y., (2012), Simulation of runoff and soil erosion using cellular automata, Iranian Water Research Journal, Vol. 6, Issue. 11, pp. 123-133. [In Persian]

References (in English)

Abou El-Magd, I., Hermas, E., and El Bastawesy, M., (2010), GIS-modeling of the spatial variability of flash flood hazard in Abu Dabbab catchment, Red Sea Region, Egypt, the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 13, pp. 81-88.
Aboudagga, N. (2005). Simulations by cellular automata of the floods in littoral lagoon areas, www.isn-oldenburg.de/projects/earselabstracts2005/ABS-Aboudagga-Nader.html.
Cirbus, J., and Podhoranyi, M. (2013). Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process. Applied Mathematics & Information Sciences, v. 7(6), p. 2149-2158.
Dewan, A.M., Islam, M.M., Kumamoto, T., and Nishigaki, M., (2007), Evaluating flood hazard for land-use planning in Greater Dhaka of Bangladesh using remote sensing and GIS techniques, Water Resources Manage, Vol. 21, pp. 1601-1612.
Elkhrachy, I., (2015), Flash flood hazard mapping using satellite images and GIS tools: a case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA), The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 18, pp. 261-278.
Foodi, G.M., Ghoneim E.M., and Arnell, W.N., (2004), Predicting Location Sensitive to Flash Flooding in Arid Environment, Journal of Hydrology, Vol. 292, pp. 48-58
Haq, M., Akhtar, M., Muhammad, S., Paras, S., and Rahmatullah, J., (2012), Techniques of Remote Sensing and GIS for flood monitoring and damage assessment: A case study of Sindh province, Pakistan, the Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, Vol. 15, pp. 135-141.
Hjelmfelt, A.T., and Mockus, V., (2004), Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall, Part 630 Hydrology National Engineering Handbooks, Chapter 10, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 235p.
Inci, T.Y., Akguül, S., Dengiz, O., and Aküzüm, T., (2006), Estimation of flood discharge for a small watershed using SCS curves number and geographic Information System, River basin flood management journal, pp. 527-538.
June, S., Yuan, Y., and Jing, Z., (2001), The effect of landuse/cover change on surface Runoff in Shenzheh Region, China, Institute of Resources ScienceBeigining normal university, 100875, Beijing.
Kopp, S., and Noman, N. (2008). ArcGIS Spatial Analyst - Hydrologic Modeling, ESRI User Conference Technical Workshop, http://www.scdhec.gov/gis/presentations/ESRI_Conference_08/tws/workshops/tw_37.pdf
Kumar RAI, P., and Mohan, K., (2014), Remote Sensing data & GIS for flood risk zonation mapping in Varanasi District, India, Forum geografic, Studii și cercetări de geografie și protecția mediului, Vol. 13, pp. 25-33.
Lewis, D., Singer, M.J., and Kate, K.W., (2000), Applicability of SCS curve number method for a California Woodlands Watershed, Journal of Soil and Water Conservation, Second Quarter, pp. 48-55.
Rinaldi, P.R., Dalponte, D.D., Vénere, M.J., and Clausse, A. (2012). Graph-based cellular automata for simulation of surface flows in large plains. Asian Journal of Applied Science, v. 5, p. 224-231.
Saravanan, S., and Manjula, R., (2015), Geomorphology based semi-distributed approach for modeling rainfall-runoff modeling using GIS, Aquatic Processes, Vol. 4, pp. 908-916.
Satheeshkumar, S., Venkateswaran, S., and Kannan, R., (2017), Rainfall-runoff estimation using SCS–CN and GIS approach in the Pappiredipatti watershed of the Vaniyar sub-basin, South India, Modeling Earth Systems and Environment, Vol. 3(24), pp. 1- 8.

Schroeder, S.A., and Larsen, J.K., (1990), Antecedent moisture conditions for North Dakota runoff predictions North Dakota, Farm Research, Vol. 48(0097, 5338), pp. 8-11.
Soulis, K.X., and Valiantzas, J.D., (2012), SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watershed-the two-CN system approach, Hydrology Earth System Science, Vol. 16, pp. 1001-1015.
Van, T.P.D., Carling, Paul, A., Coulthard, Tom, J., and Atkinson Peter, M. (2007). Cellular automata approach for flood forecasting in a bifurcation river system, PUBLS. INST. GEOPHYS. POL. ACAD. SC., v. E-7 (401), 256 pages.
Vinithra, R., and Yeshodha, L., (2016), Rainfall-runoff modeling using SCS–CN method: a case study of Krishnagiri District, Tamilnadu, International Journal of Science Research, Vol. 5(3), pp. 2319–7064.
Xiao, B., Wang, Q.H., Fan, J., Han, F.P., and Dai, Q.H., (2011), Application of the SCSCN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity, Pedosphere, Vol. 21(6), pp. 738-749.
Zhan, X., and Huang, M.L. (2004). ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps, Environmental Modeling & Software, v. 19, p. 875-879.