

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: ۷۹ - ۹۸

## بر آورد مقادیر ارتفاع رواناب و دبی حداکثر سیلاب با استفاده از تلفیق مدل‌های اتومات سلولی و SCS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لایچرود)

حسن شعبانی نیا<sup>۱</sup>، صدرالدین متولی<sup>۲\*</sup>، غلامرضا جانباز قبادی<sup>۳</sup>، شهریار خالدي<sup>۴</sup>

### چکیده

حوضه آبخیز لایچرود 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 لایچرود 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؛ بدین معنی که حجم زیادی از بارش در این قسمت‌ها می‌تواند تبدیل به رواناب شود. 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 سیلاب در مسیر رودخانه لایچ و در اراضی اطراف آن (دشت سیلابی رودخانه) به‌ویژه در پایین‌دست رودخانه بالا است. شبیه‌سازی سیلاب در حوضه لایچرود 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 لایچرود.

shabaninia@gmail.com

s\_motevalli@iaunour.ac.ir

j\_ghobadi@iaunour.ac.ir

shahriar\_khaledi6@yahoo.com

<sup>۱</sup> - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

<sup>۲</sup> - دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور (نویسنده مسئول)

<sup>۳</sup> - استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

<sup>۴</sup> - استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

## 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 به صورت 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 اتوماتای 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؛ Saravanan, Soulis and Valiantzas, 2012؛ Vinithra and Yeshodha, 2016؛ and Manjula, 2015؛ Satheeshkumar et al., 2017؛ حجازی و مزبانی، ۱۳۹۶؛ مصطفی‌زاده و هکاران، ۱۳۹۶؛ حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷).

وقوع سیلاب در حوضه آبخیز لایوچ‌رود، باعث آسیب رساندن به شبکه آبرسانی، پل‌ها و آب‌بندان‌ها، 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

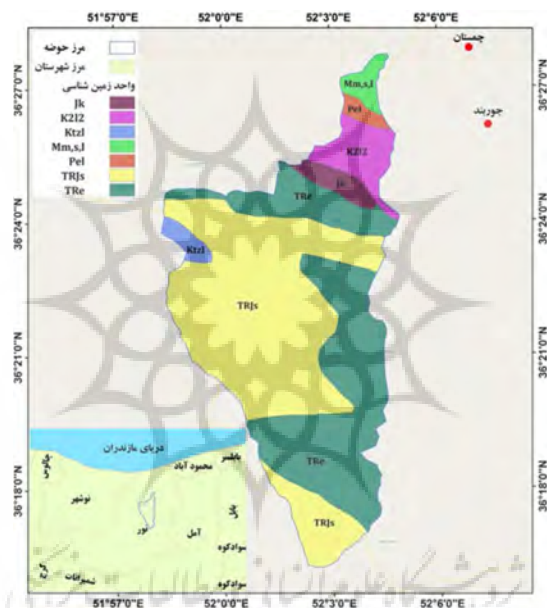
شدن سیل در حوضه لایوچ رود طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸، برخی از معابر و راه‌های ارتباطی، دیواره‌های رودخانه، زمین‌های کشاورزی و واحدهای مسکونی دچار تخریب شده‌اند. علاوه بر آثار ملموس و مستقیم سیلاب در سطح حوضه مورد بررسی، هر ساله به واسطه وقوع سیلاب‌های بزرگ، فرسایش کناره‌ای قابل‌ملاحظه‌ای در رودخانه لایوچ 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 به منظور 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 مسئله 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 لایوچ رود است تا مشخص شود که چه بخش‌هایی 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 به لحاظ سیل در گستره حوضه آبخیز لایوچ رود مشخص شده و مقدار دبی سیلابی رودخانه در بازه‌های مختلف آن در طی زمان محاسبه خواهد شد.

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز لایوچ در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز در جنوب شهر چمستان واقع شده است. حوضه آبخیز لایوچ-رود بین عرض‌های جغرافیایی  $36^{\circ} 16'$  تا  $36^{\circ} 27' 30''$  شمالی و طول جغرافیایی  $51^{\circ} 58'$  تا  $52^{\circ} 5'$  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، به‌بنک و دیزین کلا در این حوضه آبریز قرار گرفته‌اند. لایوچ در حدود بیست کیلومتری غرب شهر چمستان واقع شده و جزئی از شهرستان نور، استان مازندران محسوب می‌شود. لایوچ منطقه‌ای نیمه مرتفع و نیمه کوهستانی و بیلاقی و یا به عبارتی بهتر و دقیق‌تر و به اصطلاح معروف، میان‌بند است. از نظر زمین‌شناختی و شکل سرزمینی به صورت 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 لایوچ فعلی را فرا گرفته و سرزمینی مسطح و مرتفع در زیر آب دریاچه مزبور بوده است (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹).

لایوچ از اطراف به وسیله کوه‌های زیر احاطه شده است: از شمال ارتفاعات کوه طارم یا نسالو و پیش آمدگی کوه سیلم، از جنوب به وسیله ارتفاعات پوشیده از جنگل نومه، میله‌بن و نیسم، از شرق ادامه نسالو و از غرب به وسیله ارتفاعات جنگلی نارمک، اسپه 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، لایوچ‌رود نام دارد. سه رود کوچک‌تر به نام‌های نومه هراز، تیلن‌رود و کرچی‌رود در قسمت داخلی منطقه لایوچ جریان دارند که در پای ارتفاعات شمالی و در مدخل تنگه لایوچ، رودخانه لایوچ‌رود را بوجود می‌آورند. مهم‌ترین شاخه لایوچ‌رود، نومه هراز است. رودخانه کرچی‌رود از کنار روستاهای بهینک 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 لایوچ‌رود

جدول ۱: مساحت واحدهای سنگ‌شناسی حوضه آبخیز لایوچ‌رود

نام دوره	واحد	لیتولوژی	مساحت (Km <sup>2</sup> )	%
کواترن	Q	رسوب‌های آبرفتی و پادگانه‌های آبرفتی اطراف رودخانه	-	-
ژوراسیک میانی	Jk	کنگلومر، 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	Kz12	سنگ آهک اربیتولین‌دار، شیل آهکی (سازند تیزکوه)	۲/۸	۲/۳
کرتاسه پایانی	K212	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، کنگلومر، 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 پاچرت، 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.

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (1)$$

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

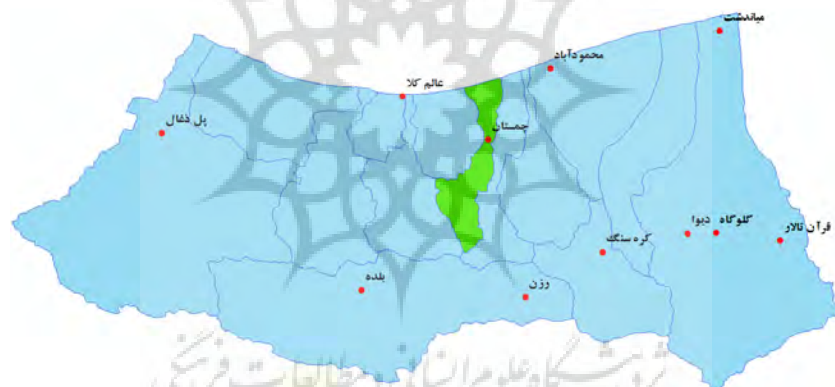
$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

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 لایچ تعیین می‌شود. همچنین نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز لایچ 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<sup>۱</sup>)، وضعیت ماه‌های سال بر اساس نوع AMC خشک شناخته می‌شود و با توجه به شیب‌دار بودن اراضی حوضه آبخیز لایچ 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<sub>I</sub>) استفاده می‌شود.

$$CN_I = \frac{N_{II}}{2.3 - 0.013 \times CN_{II}} \quad (3)$$

داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی همجوار با موقعیت حوضه مورد مطالعه از ابتدای ثبت آمار آن‌ها تا سال ۱۳۹۶ از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری شده‌اند. شکل ۲ موقعیت این ایستگاه‌ها را نسبت به لایچ‌رود 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 هر سال از دوره آماری ۳۵ ساله در سطح منطقه مورد مطالعه، از روش‌های زمین‌آمار<sup>۲</sup> درون‌یابی در محیط ArcMap استفاده شد.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی اطراف لایچ‌رود 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 استفاده شده است.

مقایسه مقادیر RMSE به‌دست‌آمده از سه روش درون‌یابی IDW، RBD و Kriging (دایره‌ای<sup>۳</sup>، کروی<sup>۴</sup> و گوسین<sup>۵</sup>)، 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 مورد مطالعه برخوردار بوده و تأثیر شرایط توپوگرافی را بر روی میزان بارش دریافتی در بخش‌های مختلف حوضه آبخیز لایوچ (از مناطق مرتفع و کوهستانی گرفته تا مناطق دشتی و جلگه‌ای) به خوبی منعکس سازد.

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

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

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 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 می‌شود. از آمار رگبار و سیلاب اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران (رویدادهای هم‌زمان ثبت شده) برای ارزیابی دقت روش SCS در شبیه‌سازی سیل حوضه لایوچ بر اساس ضریب همبستگی میان دبی اوج و زمان آن (مشاهداتی و محاسباتی) استفاده می‌شود.

مهم‌ترین پارامتر مورد نیاز جهت برآورد رواناب با استفاده از مدل SCS و در ادامه شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبخیز مورد بررسی، گروه هیدرولوژیک خاک می‌باشد. به منظور تعیین گروه هیدرولوژیک خاک در حوضه آبخیز لایوچ رود، نقشه بافت خاک از اداره منابع طبیعی استان مازندران اخذ شد. بر اساس بافت خاک و دو پارامتر نفوذپذیری<sup>۱</sup> (جدول ۳) و آبگذری<sup>۲</sup> (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)

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

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

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

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

D	C	B	A	خصوصیات پوشش سطح حوضه
۷۹	۷۳	۶۰	۳۶	پوشش جنگلی متوسط
۷۷	۷۰	۵۵	۳۵	پوشش جنگلی خوب
۸۴	۷۹	۶۹	۴۹	مراتع طبیعی با پوشش متوسط
۸۰	۷۴	۶۱	۳۹	مراتع طبیعی با پوشش خوب
۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	پشت بام‌ها، پارکینگ‌ها و دیگر جاده‌های آسفالتی
۹۲	۹۰	۸۵	۷۷	مناطق مسکونی با ۶۵ درصد آسفالت
۸۴	۷۹	۶۸	۵۱	مناطق مسکونی با ۲۰ آسفالت
۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	خیابان‌ها و جاده‌های آسفالتی
۸۹	۸۷	۸۲	۷۲	جاده‌های خاکی
۹۱	۸۹	۸۵	۷۶	جاده‌های شوسه

### روش اتومات سلولی

در اتومات سلولی فضا به صورت یک شبکه تعریف می‌گردد که به هر خانه آن، یک سلول گفته می‌شود. شبکه سلول‌ها می‌تواند ابعاد متفاوتی داشته و یک، دو و یا سه بعدی 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، به صورت 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.

$$H = Z + H_p + H_n \quad (۴)$$

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 سینماتیک 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 قابل چشم‌پوشی 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).

$$y = (n_i x / S_0)^{0.5} \quad (۵)$$

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. در صورتی که 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<sup>1</sup> 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 لایوچ 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. در واقع، زمان پیمایش جزئی از زمان تمرکز است. زمان پیمایش از نسبت طول جریان به سرعت 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.

$$v = 1/nR^{2.3}S_0^{1.2} = 1/nv^{2.3}S_0^{1.2} = 1/n(ni_e X/S_0^{0.5})^{0.4}S_0^{1.2} = (i_e X)^{0.4}S_0^{0.3(0.6)/n} \quad (6)$$

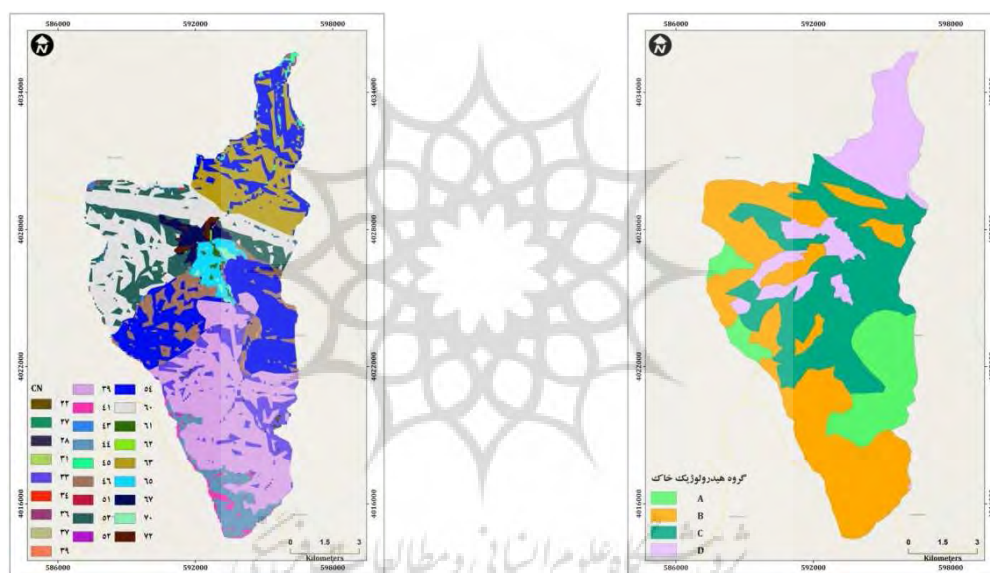
## نتایج و بحث

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 مورد بررسی دارای چهار گروه هیدرولوژیکی خاک شامل A، B، C و D می‌باشد که از نظر 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 لایوچ‌رود 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 مورد بررسی را نشان می‌دهد.

همچنین، نقشه نگهداشت سطحی خاک از روی نقشه شماره منحنی برای شرایط رطوبت پیشین خاک گروه مرطوب محاسبه شده 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 در جاهایی که مقدار شماره منحنی زیاد است، نگهداشت سطحی خاک پایین و در نتیجه میزان رواناب بالا است. البته نکته مهم دیگری که در

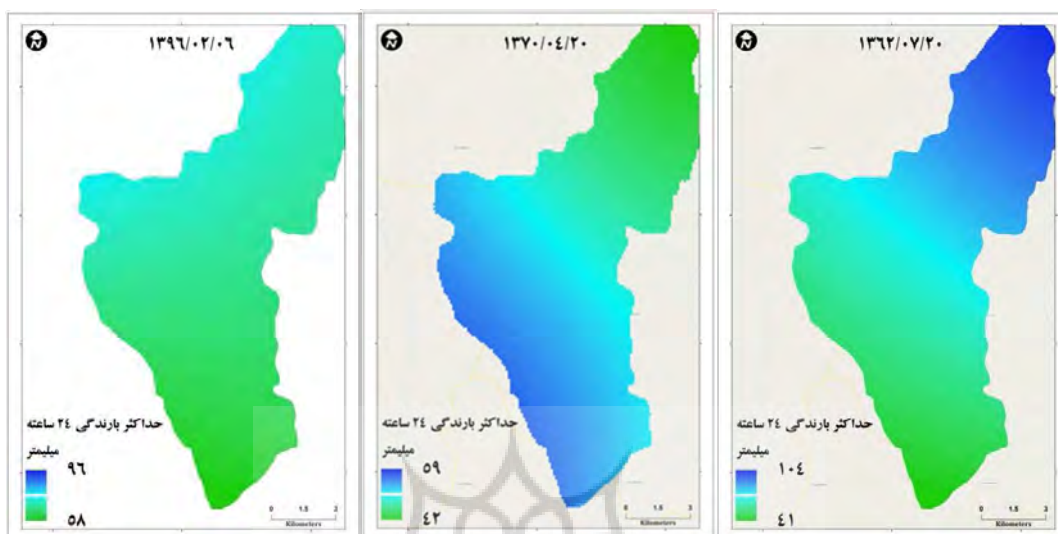
<sup>1</sup>. Single Flow Direction chosen from 8 possibilities

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 بررسی شده مشاهده نمود. به تبعیت از این تفاوت، حداکثر رواناب هم می‌تواند در سطح حوضه متغیر باشد.

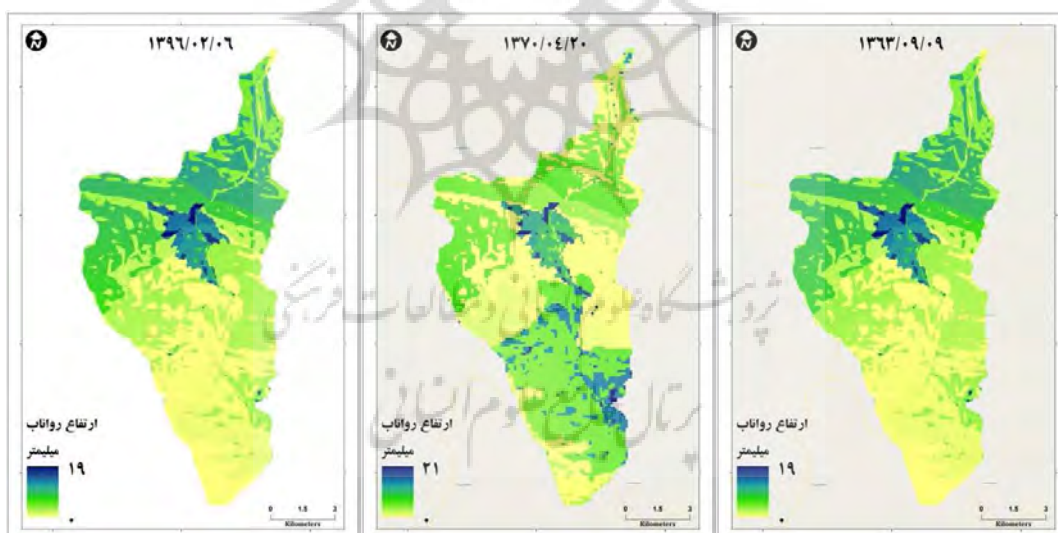


شکل ۳: (راست): نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک حوضه آبخیز لایچ رود شکل ۴: (چپ): نقشه شماره منحنی تعدیل شده بر

اساس شیب اراضی و گروه رطوبتی III

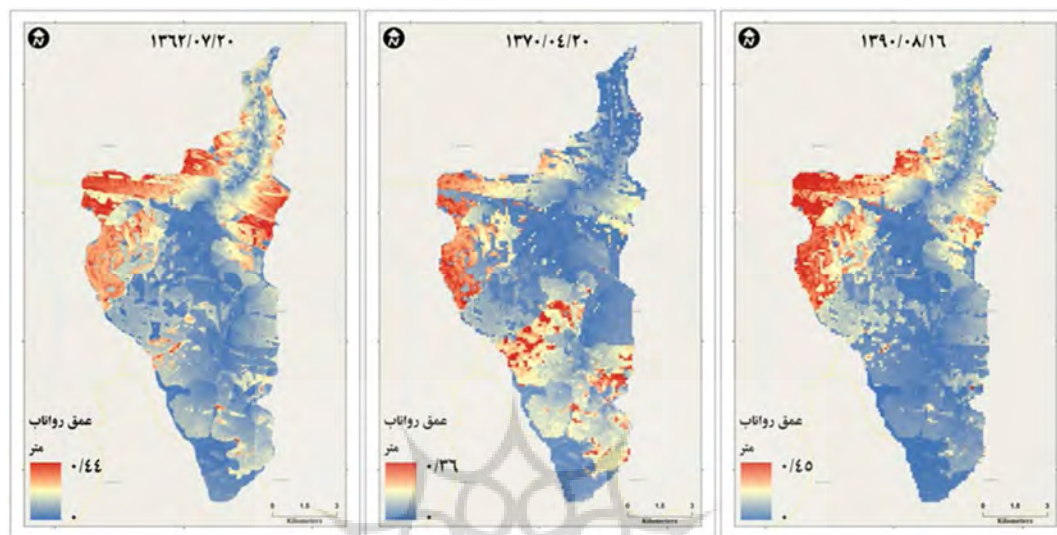


شکل ۵: نمونه‌ای از نقشه‌های درون‌یابی رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته در حوضه آبخیز لایوچرود



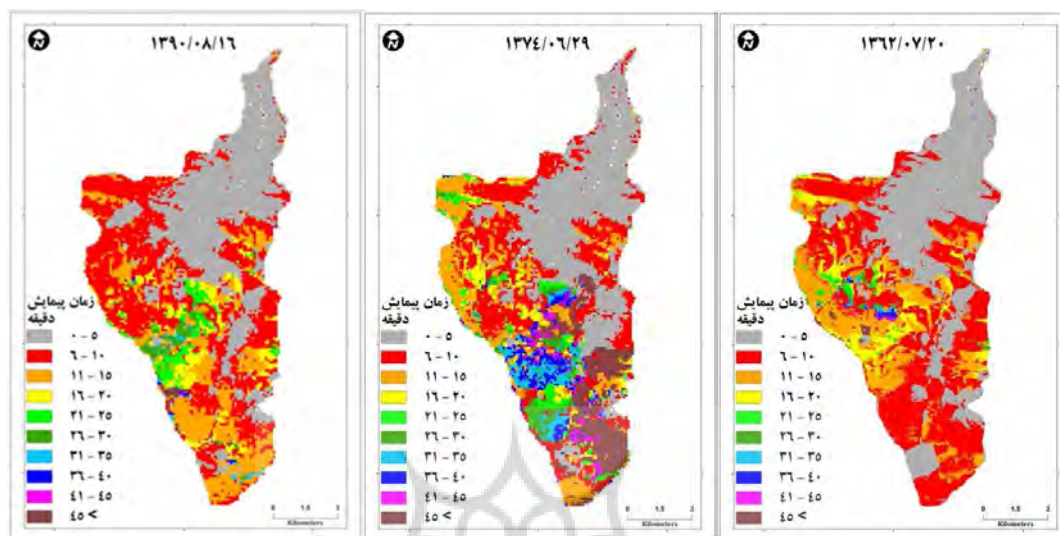
شکل ۶: نمونه‌ای از نقشه‌های پتانسیل تولید رواناب در حوضه آبخیز لایوچرود

پس از آماده شدن لایه‌های رواناب برای ۳۵ رخداد، حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ در حوضه آبخیز لایوچرود، 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 لاویج رود

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 به دست می‌آید (رابطه ۷). بدین منظور، از روی مدل ارتفاعی رقومی طول جریان آبراهه‌ها به دست 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 مورد مطالعه ترسیم شد که نقشه آن‌ها با کلاس‌بندی ۵ دقیقه فواصل زمانی در شکل ۸ آورده شده است.

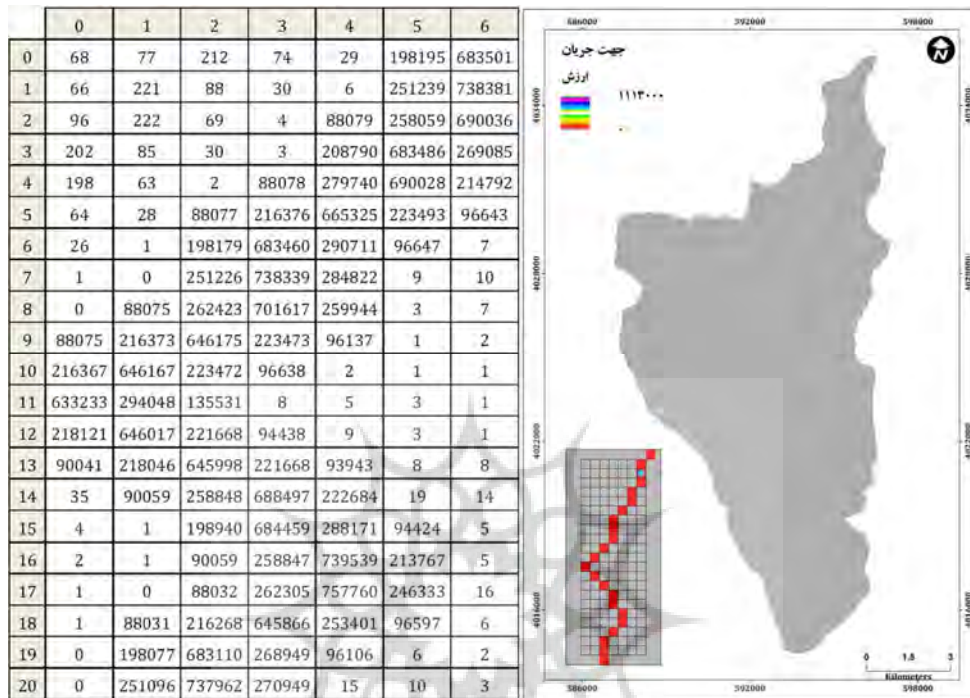


شکل ۸: نمونه‌ای از نقشه‌های زمان پیمایش حوضه آبخیز لایوچ رود

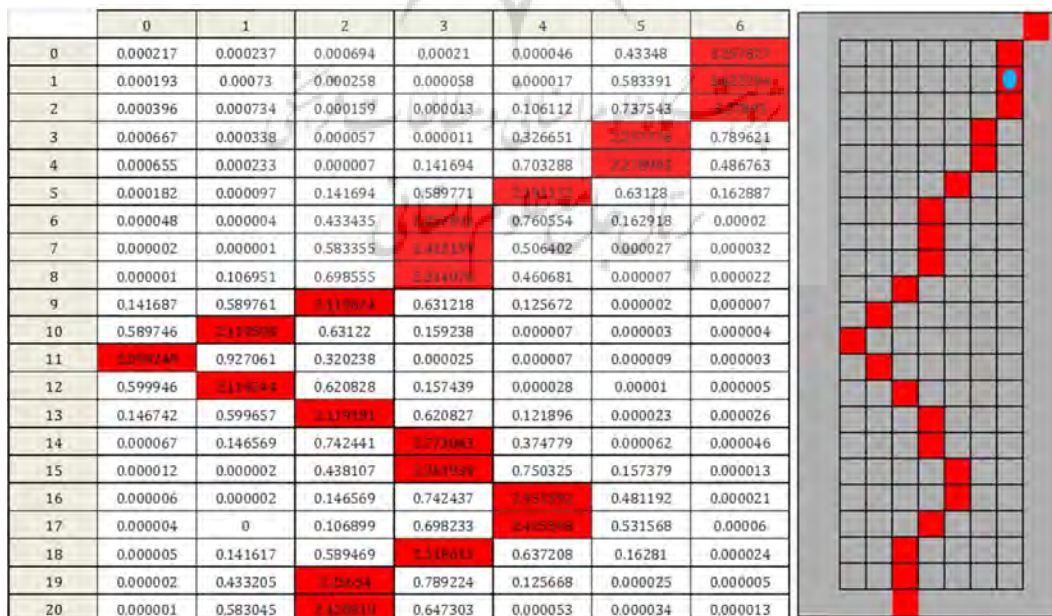
$$\text{Travel time} = L/3600V \quad (V)$$

که در این رابطه، Travel Time زمان پیمایش به دقیقه،  $L$  لایه طول جریان استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع و  $V$  سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه است. با اجرای مدل اتومات سلولی، دبی متناظر با هر کدام از رخدادهای حداکثر بارش ۲۴ ساعته به صورت سری زمانی برای سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ استخراج شده 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 به روش D8 تعیین گردید که نمونه‌ای از آن برای اطراف ایستگاه آغوزکتی - تنگه لایوچ (ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه آبخیز لایوچ رود) در شکل ۹ آورده شده است. شکل ۱۰ مقدار دبی سیلابی محاسبه شده در محدوده اطراف ایستگاه آغوزکتی برای رخداد بارش حداکثر ۲۴ ساعته در تاریخ 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 قابل ملاحظه‌ای 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 محاسبه شده 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 قابل قبول است، برای محاسبه دبی پایه استفاده شد. مشخصه‌های آماری دبی‌های مربوط به ۳۵ رخداد حداکثر بارش ۲۴ ساعته به کار گرفته شده در این پژوهش در جدول ۷ آورده شده است.





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

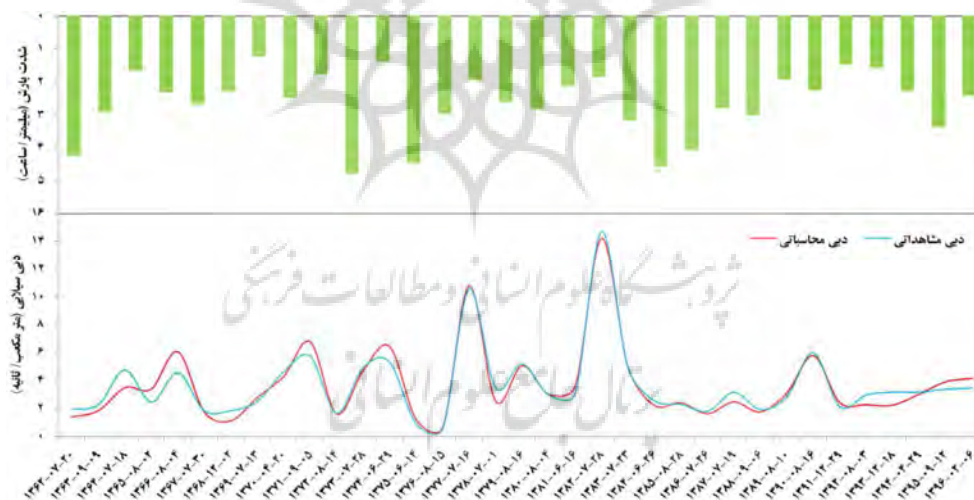


شکل ۱۰: مقدار دبی سیلابی محاسبه شده برای تاریخ ۱۳۸۱/۰۶/۱۶ در محدوده اطراف ایستگاه آغوزکتی

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

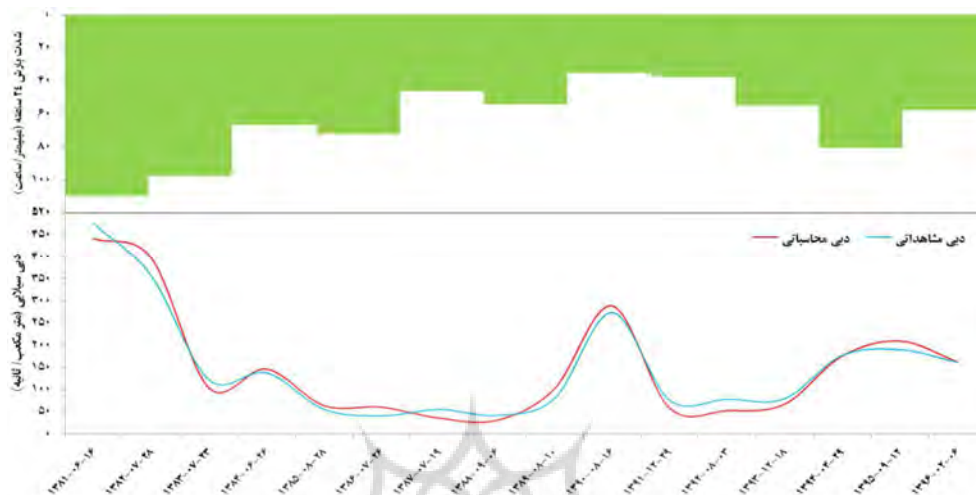
دبی / آماره	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب چولگی
میانگین دبی در یک ساعت	۳/۸	۰/۷	۱۴/۲	۲/۹	۲/۱
دبی حداکثر بارش ۲۴ ساعته	۹۰/۹	۱۵/۵	۳۴۰/۹	۷۰/۴	۲/۱

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 مشاهده‌ای 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 مشاهده‌ای (میانگین دبی در یک ساعت) حوضه آبخیز لایوچ رود 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 لایویج رود در محل ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی؛ این سری زمانی و همچنین هایتوگراف قابل مشاهده در بالای عکس، بر اساس داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ ترسیم شده است.

### نتیجه‌گیری

حوضه لایویج رود تحت تأثیر شرایط خاص زمین‌شناسی، آب و هوایی، هیدرولوژیک، پوشش گیاهی و ژئومورفولوژیک به صورت یک سیستم درآمدی 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. در نتیجه این انقباض و انبساط، خاکدانه‌ها تخریب شده 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 سیل خیز بودن حوضه لایویج، 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 بطور کلی در دسترس هستند، تخمین گردد. لایه‌های خروجی به صورت رستری بوده و حامل اطلاعاتی است که منجر به شناسایی فرآیندهای طبیعی مورد مطالعه 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 لایویج رود مطالعه شد. بخش زیادی از حوضه آبخیز لایویج رود 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 قابل توجهی 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 لویج و در اراضی اطراف آن به ویژه در پایین دست جریان بالا است. شبیه سازی رواناب در حوضه لویج رود 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 پایین دست حوضه و تولید سیلاب است. از این رو، اجرای کارهای مدیریتی در آبراهه های پایین دست و نواحی مجاور آن ضروری به نظر می رسد.

نتایج به دست آمده از این سری های 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 نشان دهنده دقت مناسب آن است. بین مقادیر مشاهده ای و برآوردی میانگین دبی در یک ساعت ۰/۸۱ درصد همبستگی در ایستگاه آغوزکتی مشاهده گردید که مبین آن است که رویکرد SCS علیرغم سادگی اش می تواند نتایج واقع گرایانه ای 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 می دهد. بررسی نقشه های زمان پیمایش نشان می دهد که در اکثر رخداد های بارشی، زیر حوضه هایی که در نیمه شمالی یا نزدیک به خروجی حوضه قرار گرفته اند، زمان پیمایش کمتری دارند تا جریان تجمعی به خروجی حوضه برسد. مضاف بر این امر، جهت جریان تجمعی نیز سبب می شود تا رواناب های تولید شده در بخش های جنوبی تر و بالادست حوضه به سمت پایین دست سرازیر شده و تجمع جریان در بخش های نزدیک به خروجی حوضه باشد. با توجه به این موارد، زیر حوضه هایی که در پایین دست جریان حوضه آبخیز لویج رود قرار دارند، پتانسیل سیل خیزی بیشتری نسبت به حوضه های بالادست دارند.

همچنین، خطر سیلاب در مسیر رودخانه لویج و در اراضی اطراف آن به ویژه در پایین دست جریان بالا است. شبیه سازی سیلاب در حوضه لویج رود 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 پایین دست حوضه و تولید سیلاب است. از این رو، اجرای کارهای مدیریتی در آبراهه های پایین دست و نواحی مجاور آن ضروری به نظر می رسد. مقایسه دبی های محاسبه شده از مدل اتومات سلولی با دبی های مشاهداتی و همچنین با تغییر های زمانی، مقدار بارندگی (که بر روی مقدار رواناب و در نتیجه دبی سیلابی تأثیر گذار است) نشان می دهد که مدل اتومات سلولی به خوبی توانسته است که سیلاب های ناشی از بارش های حداکثر ۲۴ ساعته را در حوضه آبخیز لویج رود شبیه سازی 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 می کند مدل اتومات سلولی نسبت به روش ها معمول که از محیط ArcGIS استفاده می کنند، از دقت بسیار زیادی برخوردار است و این مدل به خوبی قادر به ترسیم نموداری سری زمانی و یا هیدروگراف سیل است. بنابراین، می توان از اتومات سلولی برای پیش بینی رواناب در حوضه های فاقد آمار استفاده نمود و نتایج قابل اعتمادی هم به دست آورد. از نقشه خطر سیلاب به دست آمده نیز می توان به عنوان یکی از اطلاعات پایه و مهم در مطالعه های طرح های عمرانی استفاده کرد. در انتهای این پژوهش، پیشنهاد هایی ارائه می شود که می تواند هم به افزایش کیفیت این پژوهش و پژوهش های

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

\* از آنجایی که 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 به کار 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 بر مبنای گروه هیدرولوژیک خاک و وضعیت رطوبت پیشین آن است. با توجه به این که 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، لایلا؛ 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 محمد مهدی؛ 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 لایلا (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.
- فهمی‌فر، احمد؛ بحری، میرعباس؛ بخشایش اقبالی، نسرين (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](http://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., Akgüül, 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 Shenzhen Region, China, Institute of Resources Science Beijing 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](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 Clause, 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<sup>1</sup>, Sadraldin Motevalli<sup>\*2</sup>, GholamReza Janbaz Ghobadi<sup>3</sup>, Shahriar Khaledi<sup>4</sup>**

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.

<sup>1</sup>- Ph.D. Student of Climatology, Department of Geography, Islamic Azad University of Nour, Iran

<sup>2\*</sup>- Associate Professor, Department of Geography, Islamic Azad University of Nour, Iran.

<sup>3</sup>- Assistant Professor, Department of Geography, Islamic Azad University of Nour, Iran.

<sup>4</sup>- Professor, Department of Physical Geography, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

## References

### References (in Persian)

- Aelami, M.T., 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, 25<sup>th</sup> 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, S.H., 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 Dinpajoo, 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](http://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., Akgüül, 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 Shenzhen Region, China, *Institute of Resources Science Beijing 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](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 Clause, 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.

