

شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS و RS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لایچ‌رود)

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

۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

۲- دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

۳- استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نور

۴- استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۴

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۸/۲/۱۶

چکیده

پیش‌بینی و تعیین میزان کمی فرآیندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوضه آبخیز از اهمیت خاصی برخوردار است. برآورد پتانسیل تولید رواناب در یک حوضه جهت برنامه‌ریزی در حفاظت خاک و فرسایش و نیز مدیریت حوضه‌ها از لحاظ تولید رواناب و رسوب بسیار حائز اهمیت است. حوضه آبخیز لایچ‌رود عمدتاً به دلیل وضعیت توپوگرافی و فیزیوگرافی، موقعیت اقلیمی، عدم رعایت مشخصات فنی در احداث راه و ابنیه 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 مدل اتومات سلولی به منزله روشی نوین و امکان تلفیق آن 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 رسترهای با اندازه سلول ۳۰×۳۰ تهیه شدند. براساس روش SCS، ارتفاع رواناب و خطر سیلاب در حوضه به دست آمد. همچنین، براساس مدل موج سینماتیک، عمق جریان و بر طبق معادله مانینگ، سرعت جریان در سلول‌ها محاسبه شد و از روی سرعت جریان زمان پیمایش به دست آمد. براساس این داده‌های ورودی، گراف سری زمانی دبی سیلاب برای ۳۵ رخداد حداکثر بارش ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ ترسیم شد. بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی دبی میانگین در یک ساعت و دبی حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۸ درصد همبستگی در ایستگاه آغوزکنتی مشاهده گردید که مبین آن است که رویکرد CA 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 و دبی حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته هم به ترتیب ۱۴ و ۸/۳ است که دقت مناسب مدل را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اتومات سلولی، خطر سیلاب، GIS و حوضه آبخیز لایچ‌رود.

مقدمه

با وجود تحقیقات فراوان و به‌رغم روش‌های مختلف بررسی روند گسترش سیلاب، ایجاد روش‌هایی با صرفه‌جویی در زمان و هزینه برای اجرای این مسأله مهم هنوز ضروری به نظر می‌رسد. در این زمینه با محلی کردن مناطقی که پتانسیل فراوانی در وقوع سیلاب دارند، محدوده‌هایی که خطرپذیری بیش‌تری دارند، مشخص می‌شوند و امکان مدیریت بهینه سیلاب فراهم می‌شود. گام نخست در مدیریت سیلاب و دشت‌های سیلابی، کاربرد روش‌های گوناگون برای شبیه‌سازی خطر سیلاب است؛ یکی از جدیدترین این روش‌ها استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور است که در بسیاری از مطالعات به کار رفته است؛ از جمله دوان و همکاران (۲۰۰۷)، ابوالمجد و همکاران (۲۰۱۰)، هک و همکاران (۲۰۱۲)، کومار و موهان (۲۰۱۴)، الخراچی (۲۰۱۵) و لشکری و همکاران (۱۳۹۲). 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 تحقیقات مربوط به آب و محیط زیست تلفیق خوبی با GIS پیدا کرده است (ژان و هوانگ، ۲۰۰۴؛ کاپ و نومن، ۲۰۰۸). 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 به روزرسانی به صورت همگام انجام می‌شود. قوانین براساس همسایه‌های هر سلول تعریف می‌شوند و می‌توانند فرم قطعی و احتمالی داشته باشند (وان و همکاران، ۲۰۰۷). فهمی‌فر 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 اتوماتی سلولی و خالقی و همکاران در سال ۱۳۹۵ با عنوان شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS اشاره نمود که در بخش پیشینه پژوهش، روش‌شناسی و یافته‌های این پژوهش‌ها ارائه خواهد شد. وقوع سیلاب در حوضه آبخیز لایچ-رود، باعث آسیب رساندن به شبکه آبرسانی، پل‌ها و آب‌بندان‌ها، اراضی و نهرهای کشاورزی و باغی، شکسته شدن تیرهای برق، ریزش سنگ و رانش زمین، آبرفتگی 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 لایچ‌رود طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۸، برخی از معابر و راه‌های ارتباطی، دیواره‌های رودخانه، زمین‌های کشاورزی و واحدهای مسکونی دچار

از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS و RS در حوضه آبخیز لایچ 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 لایچ رود مشخص شده و مقدار دبی سیلابی رودخانه در بازه‌های مختلف آن در طی زمان محاسبه خواهد شد.

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبخیز لایچ 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. این حوضه با مساحتی معادل ۱۱۶ کیلومتر مربع از غرب به حوضه گلندرود و از شرق به حوضه واز منتهی می‌شود (شکل ۱).

تخریب شده‌اند. علاوه بر آثار ملموس و مستقیم سیلاب در سطح حوضه مورد بررسی، هر ساله به واسطه وقوع سیلاب‌های بزرگ، فرسایش کناره‌ای قابل ملاحظه‌ای در رودخانه لایچ اتفاق می‌افتد که خود می‌تواند باعث از دسترس خارج شدن بخش قابل توجهی از خاک حاصلخیز سطح حوضه شود. با توجه با موارد ذکر شده، شبیه‌سازی خطر سیلاب این حوضه به منظور کاهش خسارات 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 از این مسأله می‌تواند در کاهش اثرات سیل و مدیریت بهینه این پدیده مخرب مؤثر واقع شود. بنابراین، هدف اصلی پژوهش حاضر شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز لایچ رود

۳۰۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد (اسماعیلی و حسین‌زاده، ۱۳۸۹). طول آبراهه اصلی لایچ از مرتفع‌ترین نقطه (ارتفاع ۳۴۰۰ متر) تا خروجی رود از کوهستان (ارتفاع ۲۰۰ متر) حدود ۲۵

بارش متوسط حوضه به روش میانگین ۶۱۷ میلی‌متر در سال محاسبه گردیده است که این مقدار به سمت خروجی حوضه تا حدود ۸۰۰ میلی‌متر افزایش داشته و به سمت بالادست آن تا

دارا بوده و به نسبت سنگین تا بسیار سنگین می‌باشد. همین عامل می‌تواند تأثیر قابل توجهی را در هیدروگراف سیل داشته باشد.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی 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 30×30 متر تهیه شدند. براساس روش SCS، ارتفاع رواناب و خطر سیلاب در حوضه آبریز به دست آمد. ذکر 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. با توجه به تغییرات کاربری اراضی اتفاق افتاده در سطح حوضه و در نتیجه تغییر مقادیر CN که به تبع آن مقایر رواناب برآوردی طی زمان‌های مختلف تغییر پیدا می‌کند، لایه کاربری مستخرج از تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۶۷ به‌عنوان الگوی کاربری اراضی دوره اول مطالعاتی (۱۳۶۲ تا ۱۳۷۵) و از لایه کاربری استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای سال ۱۳۸۵ به‌عنوان الگوی کاربری اراضی دوره دوم مطالعاتی (۱۳۷۶ تا ۱۳۹۶) مینا قرار گرفتند. در نهایت، بر اساس مدل موج سینماتیک، عمق جریان و بر طبق معادله مانینگ و عمق جریان رواناب در

کیلومتر می‌باشد. از نظر توپوگرافی محدوده مورد مطالعه از سه واحد کوهستان، کوهپایه و دشت تشکیل شده است. در بازه جنوبی، رودخانه از یک طرف در مجاورت حاشیه دره قرار داشته و از طرف دیگر دارای دشت سیلابی می‌باشد. در بخش‌های میانی، رودخانه در بستری کاملاً آبرفتی قرار داشته و به‌صورت عمودی دشت سیلابی خود را حفر نموده و سه سطح پادگانه آبرفتی را در حاشیه رود به وجود آورده است. از اینرو کانال به‌صورت نسبتاً محدودی با پادگانه‌های آبرفتی مجاور در تماس است (متولی و همکاران، ۱۳۹۲). رسوبات بستر شامل ریگ، قلوه سنگ و قطعه سنگ و واریزه‌های بزرگ می‌باشد. در بخش‌هایی از مسیر رودخانه نیز به علت وجود رسوبات منفصل، کرانه کانال متصل به دشت سیلابی نسبت به زیربری و فرسایش حساس بوده و باعث پهن‌شدگی و جابجایی کانال می‌گردد که این پهن‌شدگی نیز با موانع رسوبی و سکوه‌های آبرفتی منطقه می‌باشد (متولی و همکاران، ۱۳۹۲). بنابر گزارشات سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران، تعداد سیل‌های ثبت در استان از سال ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۸ به بیش از ۱۹۰ مورد می‌رسد که حوضه لایوچ‌رود هم از این سیلاب‌ها بی‌بهره نبوده است. این حوضه عمدتاً به دلیل وضعیت توپوگرافی و فیزیوگرافی، موقعیت اقلیمی، عدم رعایت مشخصات فنی در احداث راه و ابنیه فنی و تجاوز به حریم رودخانه، زمین‌شناسی و دیگر عوامل مؤثر در ایجاد رواناب، دارای پتانسیل تولید سیلاب در برخی از مواقع سال می‌باشد. با توجه به وجود خاک‌های قهوه‌ای با افق رسی در سطح حوضه، نفوذپذیری بارش نسبتاً کم بوده و تولید رواناب زیاد است. این خاک‌ها در افق‌های بالا بافت متوسط تا کمی سنگین و در افق B رس زیادتری

اطلاعاتی لازم نیز شامل کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، مدل رقومی ارتفاع، آبراهه‌های حوضه، داده‌های بارش و دبی منطقه است که در ادامه روش آماده‌سازی هر کدام از آن‌ها تشریح می‌شود. با توجه به اینکه ساختار اتومات سلولی بر چهار اصل شبکه سلولی، حالت سلول، همسایگی سلول‌ها و قوانین انتقال و زمان استوار است، این مدل برای شبیه‌سازی سیلاب حوضه آبخیز لایوچ شامل مراحل زیر است.

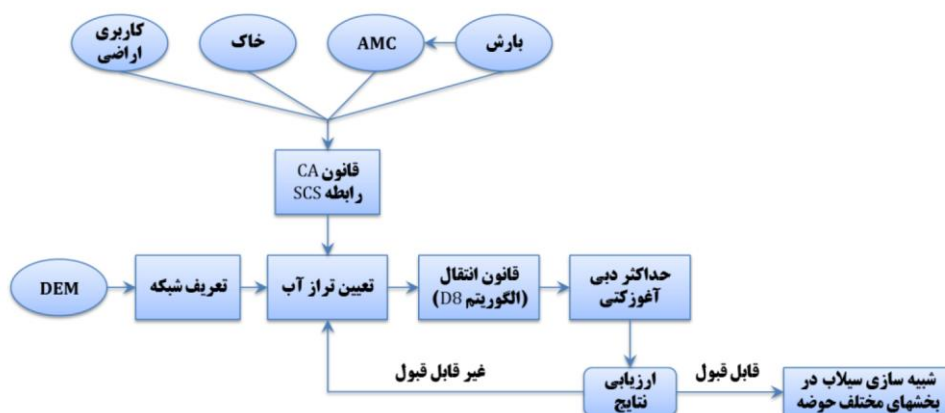
شبکه سلولی

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 شش گوشه می‌باشد. در این پژوهش، مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) و لایه‌های رستری حاصل از همه پارامترهای مؤثر به صورت یک شبکه‌بندی دو بعدی با ابعاد مشخص 30×30 متر، تشکیل دهنده فضای سلولی مدل اتومات سلولی پیشنهادی است (شکل ۲).

سلول‌ها، سرعت جریان محاسبه شد و از روی سرعت جریان، هیدروگراف سیل ترسیم گردید.

طراحی مدل گسترش سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی

اتومات سلولی (CA) را می‌توان در پدیده‌های فیزیکی که رفتار پدیده با معادلات دیفرانسیلی حاکم بر آن تشریح می‌شود، به کار برد. مدل‌های اتومات سلولی سیستم‌های ساده گسسته‌ای هستند که با قوانین ساده و محلی می‌توانند محاسبات و رفتارهای پیچیده‌ای از خود بروز دهند. محلی بودن به این معنا است که در تعیین مقدار جدید هر سلول، سلول‌هایی که در همسایگی خود هستند، تأثیرگذار بوده و سلول‌های دورتر تأثیری ندارند. هر سلول برای خود مجموعه‌ای از حالات را دارد که وضعیت یا حالت خود را در گام‌های زمانی گسسته ثابت، مطابق با قانون محلی تغییر می‌دهد. قوانین حالت در طول کار ثابت هستند و تغییر نمی‌کنند. استفاده از فرمول‌های ساده و شناخته شده به‌عنوان قوانین انتقال از مزایای این مدل می‌باشد. در این پژوهش از مدل اتومات سلولی و از Model Builder محیط ArcGIS به منظور شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبخیز لایوچ‌رود استفاده شده که مراحل مختلف آن در شکل ۲ آورده شده است. لایه‌های

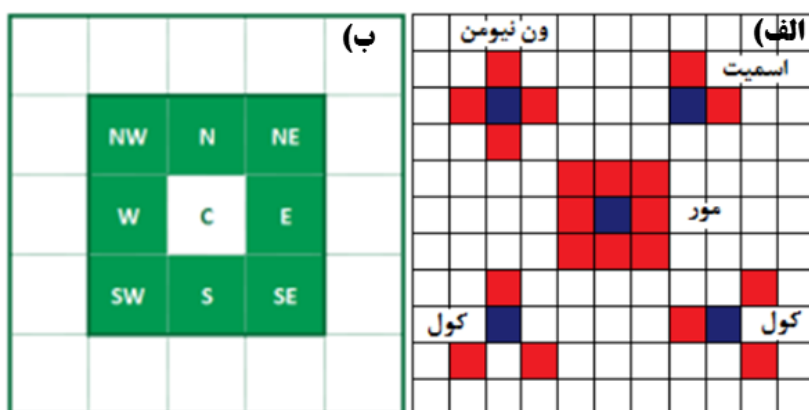


شکل ۲: فلوچارت مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیلاب با اتومات سلولی در حوضه آبخیز لایوچ‌رود

همسایگی سلول‌ها

در CA می‌توان از ساختارهای مختلفی برای همسایگی استفاده نمود. نوع همسایگی اهمیت بالایی در بروز نمودن حالت یک سلول دارد؛ زیرا تعیین کننده تعداد همسایگان شرکت کننده در قانون انتقال محلی بوده و بر روی شبکه انتقال مابین سلول‌ها تأثیرگذار است. معمول‌ترین آن‌ها همسایگی ون نیومن، مور، اسمیت و کول می‌باشد (شکل ۳ الف). با توجه به طبیعت پیکسلی داده‌های سنجنش از دور و دیگر منابع و همچنین

برنامه‌نویسی آسان‌تر، بیش‌تر مدل‌های CA در یک شبکه دو بعدی تشکیل می‌شوند. در این تحقیق نیز از یک اتومات سلولی دو بعدی مربعی شکل با شعاع همسایگی یک و شکل همسایگی مور یا هشت‌تایی استفاده می‌شود (شکل ۳ ب). با در نظر گرفتن احتمال پخش و انتقال آب در همه جهات (هر هشت سلول کناری)، شکل همسایگی مور انتخاب می‌گردد.



شکل ۳: الف) انواع همسایگی در مدل اتومات سلولی (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۴)؛ ب) همسایگی مور در مدل اتومات سلولی (خالقی و مکانی، ۱۳۹۵)

حالت سلول

تراز آب در سلول‌ها (H) به‌عنوان حالت سلول در نظر گرفته شده و از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در این رابطه Z ارتفاع سلول مرکزی است که با توجه به DEM حوضه مشخص می‌شود، H_p ارتفاع ناشی از بارش باران در سلول و H_n ارتفاع آب دریافتی از سلول‌های همسایه است (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵).

$$H = Z + H_p + H_n \quad (۱)$$

بدین‌منظور، 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. غالباً عرصه‌های پخش فاقد شیب جانبی است و فقط دارای شیب طولی است. بنابراین، می‌توان جریان یک بعدی و در دو جهت شیب طولی زمین فرض کرد. جریان یک بعدی با سطح آزاد از معادلات St. Venant پیروی می‌کند و شامل دو معادله بقای جرم و مومنتم است. یکی از شیوه‌های حل این معادلات فرض موج سینماتیک یا جریان نرمال است. در این روش فرض می‌شود که جملات 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.

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 لاریج تعیین شد. همچنین نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز لاریج با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و نیز از اداره منابع طبیعی استان مازندران تهیه شد. سپس براساس تلفیق لایه گروه هیدرولوژیکی خاک (HSG) و کاربری اراضی در محیط GIS، نقشه CN برای شرایط نرمال (خاک دارای رطوبت متوسط باشد و شیب بیش‌تر از ۵ درصد نباشد) تهیه شد و براساس روش شرودر و لارسن (۱۹۹۰)، پس از بررسی فراوانی وقوع AMSها (رطوبت پیشین خاک^۱)، وضعیت ماه‌های سال براساس نوع AMC خشک شناخته می‌شود و با توجه به شیب‌دار بودن اراضی حوضه آبخیز لاریج و به دلیل برقرار نبودن شرایط نرمال، تصحیحات بر روی CN با بهره‌گیری از روابط رایج انجام می‌گیرد. بنابراین، از رابطه ۵ برای تبدیل CN نرمال به CN خشک (CN_I) استفاده می‌شود (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵).

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013 \times CN_{II}} \quad \text{رابطه ۵}$$

همچنین، از آنجا که شیب زمین نیز عامل تأثیرگذار دیگری در میزان شماره منحنی رواناب است، با افزایش شیب توان حفظ رطوبتی خاک کاهش و رواناب افزایش می‌یابد. مقادیر CN مندرج در جدول SCS برای زمین‌هایی با شیب کم‌تر از ۵ درصد صحیح است و برای شیب‌های بیش‌تر از آن، باید اصلاح شود که از رابطه‌های ۶ و ۷ می‌توان استفاده نمود (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵).

$$CN_{Ia} = \frac{CN_{IIa}}{2.281 - 0.0128 \times CN_{IIa}} \quad \text{رابطه ۶}$$

عمق جریان را می‌توان از رابطه‌ای که اورتون و میدوز ارائه کرده‌اند، به دست آورد (رابطه ۲).

$$y = (ni_e x / S_0^{0.5})^{0.6} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه y عمق جریان رواناب بر حسب متر، i_e شدت بارش اضافی بر حسب متر بر ثانیه، n ضریب زبری مانینگ، x فاصله هر سلول در طول مسیر جریان از خروجی بر حسب متر و S_0 شیب بدون بعد است. بهترین روش برای محاسبه بارش اضافی سلول استفاده از رابطه SCS است، چون قابلیت اتصال این روش با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، استفاده از آن را بیش‌تر کرده و پیش‌بینی اتوماتیک رواناب را به صورت رضایت‌بخش فراهم نموده است. بنابراین، در این پژوهش از روش SCS استفاده می‌شود؛ بدین منظور لازم است نقشه CN به دست 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. این سازمان، پس از مطالعات فراوان روی رگبارها (P) و جریان سطحی ناشی از آن‌ها (Q)، رابطه بین این دو را تقریباً خطی فرض کرد و به شکل رابطه ۳ ارائه نمود.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad \text{رابطه ۳}$$

در این رابطه، Q ارتفاع رواناب به میلی‌متر، P حداکثر بارش ۲۴ ساعته به میلی‌متر و S عامل مربوط به نگهداشت آب در خاک بر حسب میلی‌متر است که از روی مشخصات خاک، پوشش گیاهی، شیب و شرایط رطوبت پیشین خاک عدد بی‌بعدی به نام شماره منحنی (CN) تعیین می‌شود که با استفاده از آن و به کمک رابطه ۴ می‌توان S را به دست آورد.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{رابطه ۴}$$

است که برای مدل‌سازی رواناب به‌منظور تجمیع بارش مازاد از سطح حوضه از روش D8 استفاده می‌شود. یعنی بارش مازاد در جهت شیب حرکت می‌کند و تجمیع می‌شود. روش تعریف شبکه زهکشی روش SFD8^۲ نامیده می‌شود. الگوریتم D8 متداول‌ترین روش برای تعیین جهت جریان است که در این پژوهش از افزونه ArcHydro، که از الگوریتم D8 استفاده می‌کند، در محیط ArcMap به منظور تعیین جهت جریان در سطح حوضه آبخیز لویج استفاده می‌شود.

زمان

در هر گام زمانی و بعد از تعیین حالت‌ها، توزیع جریان براساس 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 یک نقطه حوضه به نقطه دیگر را طی کند. در واقع، زمان پیمایش جزئی از زمان تمرکز است. زمان پیمایش از نسبت طول جریان به سرعت جریان به دست می‌آید. با معلوم شدن عمق جریان در مرحله قبل، با استفاده از رابطه مانینگ، سرعت جریان طبق رابطه ۸ به دست می‌آید. در این رابطه n ضریب مانینگ است و براساس جدول ۱ مشخص می‌شود (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵).

رابطه ۸)

$$v = \frac{1}{nR} S^{2/3} = \frac{1}{n} y^{2/3} S^{2/3} = \frac{1}{n} (n i_e x / S^{0.5})^{0.4} S^{1.2} = (i_e x)^{0.4} S^{0.3(0.6)} / n$$

رابطه ۷) $CN_{IIa} = CN_{II} \times \frac{322.79+15.63a}{a+323.52}$
در اینجا CN_{II} شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط، CN_I شماره منحنی برای شرایط رطوبتی خشک و a شیب زمین بر حسب درصد ($1/4 <$ $0/14$) است که $0/14$ یا همان ۱۴ درصد است. برای به دست آوردن نقشه رستری بارش (P) از روش درویابی IDW در محیط GIS و حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری بهره گرفته می‌شود. در این روش، پیکسل‌های مجهول از طریق میانگین‌گیری از نقاط معلوم در نزدیکی هر پیکسل تخمین زده می‌شود و مقادیری که به مرکز پیکسل نزدیک‌ترند، در تخمین مقدار مجهول وزن بیش‌تری دارند. در نهایت، با محاسبه P ، CN_I و S میزان Q تخمین زده می‌شود. سپس شدت بارش اضافی برای به کارگیری در مدل موج سینماتیک محاسبه می‌شود.

قوانین انتقال

قوانین انتقال در واقع نحوه گسترش پارامتر مورد بررسی را نشان می‌دهد. قوانین انتقال یا تعیین جهت جریان براساس 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 تقسیم بر جذر ۲ با سلول‌های دیگر مقایسه می‌شود. در اینجا قوانین اتومات سلولی همان قوانین فیزیکی شناخته شده در هیدرولوژی

جدول ۱: مقادیر ضریب زبری مانینگ براساس کاربری اراضی و نوع پوشش گیاهی در آبخیز لایویج رود

توصیف	ضریب زبری (مانینگ)	نوع کاربری / پوشش اراضی
درختان مثمر و باغ	۰/۴	باغ
جنگل انبوه و نیمه انبوه	۰/۸	جنگل
مراتع طبیعی و چمن زار	۰/۲۴	مرتع با پوشش خوب
مراتع طبیعی با تراکم متوسط	۰/۱۳	مرتع با پوشش متوسط
پوشش گیاهی پراکنده، خاک لخت	۰/۰۸	مرتع با پوشش ضعیف
مناطق شهری و روستایی / سطوح صاف مانند آسفالت و بتن	۰/۰۱	مناطق مسکونی
اراضی شخم خورده با زراعت آبی در مناطق کم شیب	۰/۰۵	زراعت آبی
اراضی شخم خورده دیم (پوشش باقیمانده کمتر از ۲۰ درصد)، اراضی آیش (بدون پوشش باقیمانده) در مناطق شیبدار	۰/۰۳	زراعت دیم

شبیه سازی سیلاب

سرانجام، برای شبیه سازی گسترش سیلاب از زبان برنامه نویسی پایتون استفاده شد. با استفاده از این زبان می توان قوانین ساده ریاضی با نام قوانین انتقال مدل اتومات سلولی را نوشت و اجرا کرد. در حقیقت، از برنامه پایتون برای انتقال رواناب از بالادست به پایین دست استفاده می شود. این بخش شبیه به روش مدت - مساحت در تعیین رواناب است. تعداد زیادی از برنامه نویسان پایتون را به دلیل سادگی، سهولت خواندن، انعطاف پذیری و امکانات فراوان به عنوان زبان برنامه نویسی برگزیده اند. پایتون یک زبان سطح بالا بوده و امروزه کاربرهای بسیار قوی از آن استفاده می نمایند. پایتون زبان برنامه های کاربردی GIS می باشد و برنامه نوشته شده با پایتون می تواند هماهنگی کاملی با محیط GIS و ابزارهای آن داشته باشد؛ درحالی که زبان های رایج دیگر نظیر جاوا این قابلیت را ندارند. بنابراین، در این پژوهش از زبان برنامه نویسی پایتون برای مدل CA استفاده شده است. مزیت عمده زبان پایتون شیء گرا بودن آن است؛ یعنی می توان از برنامه های نوشته شده توسط سایر برنامه نویسان استفاده

نمود (عباسی، ۱۳۹۳). این مزیت کاربرد و کمک فراوانی به کاربر می نماید؛ به گونه ای که می توان از ابزارهای GIS به سادگی در برنامه استفاده نمود و نیازی به نوشتن مجدد آن ها وجود ندارد. مدل اتومات سلولی با هدف شبیه سازی سیلاب حوضه آبخیز لایویج رود شامل مراحل زیر می باشد. - برنامه محاسبه ارتفاع رواناب ناشی از بارش در سلول ها؛

- برنامه تعیین تراز آب سلول ها، در واقع با اجرای آن وضعیت و حالت هر سلول تعیین می شود. هر سلول حاوی اطلاعات ارتفاع از DEM و ارتفاع رواناب از مرحله اول می باشد که مجموعاً مشخص کننده تراز آب خواهد بود؛

- برنامه تعیین جهت جریان^۳ و گسترش سیلاب که برای تعیین جهت جریان از الگوریتم D8 استفاده می شود. در این روش، جهت ها بین ۱ تا ۱۲۸ کدگذاری می شوند و ارزش عددی هر سلول مسیر حرکت آب را از درون پیکسل به خارج از آن بیان می نماید؛

- ورود نقشه بارش جدید و تکرار مراحل اول تا سوم به منظور تولید نقشه رواناب در تمامی رخدادهای دوره آماری

(۱۳۹۱) میان ۱۱ ایستگاه مورد استفاده شناسایی شدند. در ادامه، جهت تهیه لایه‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برای هر سال از دوره آماری ۳۰ ساله در سطح منطقه مورد مطالعه، از روش‌های زمین‌آمار^۴ درون‌یابی در محیط ArcMap استفاده شد. مقایسه مقادیر RMSE به دست آمده از سه روش درون‌یابی IDW، RBF و Kriging (دایره‌ای^۵، کروی^۶ و گوسین^۷)، 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). ذکر این نکته ضروری می‌نماید که دلیل استفاده از آمار ۳۰ ساله حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۱۱ ایستگاه نامبرده در جدول ۳ این است که داده‌های بارندگی از پراکنش مکانی مناسب در 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.

گروه هیدرولوژیک خاک

مهم‌ترین پارامتر مورد نیاز جهت برآورد ارتفاع رواناب با استفاده از مدل SCS و در ادامه شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبخیز مورد بررسی، گروه هیدرولوژیک خاک می‌باشد. به‌منظور تعیین گروه هیدرولوژیک خاک در حوضه آبخیز لایوچ‌رود، نقشه بافت خاک از اداره منابع طبیعی استان مازندران اخذ شد. براساس بافت خاک، و دو پارامتر نفوذپذیری^۸ (جدول ۴) و آب‌گذری^۹ (جدول‌های ۵ و ۶)، ویژگی‌های خاک مشخص و گروه هیدرولوژیک آن تعیین گردید. در واقع میزان نفوذپذیری، از طریق عمق خاک منطقه در بخش‌های مختلف (گزارش منابع خاک و قابلیت اراضی استان مازندران، منابع طبیعی استان

-ایجاد سری زمانی سیلاب‌های با حداکثر دبی ۲۴ ساعته در نقطه خروجی حوضه.

ارزیابی مدل

دبی اوج و زمان وقوع آن از مهم‌ترین مشخصه‌های هر هیدروگراف است. برای ارزیابی و بررسی عملکرد مدل در استخراج هیدروگراف محاسباتی، علاوه بر معیار مرسوم ضریب همبستگی، معمولاً از معیارهایی (رابطه‌های ۹ و ۱۰) نیز استفاده می‌شود (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵).

$$E_{Qp} = \frac{Q_{P(com)} - Q_{P(obs)}}{Q_{P(obs)}} \times 100 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$E_{Tp} = \frac{T_{P(com)} - T_{P(obs)}}{T_{P(obs)}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که E_{Qp} درصد خطای دبی اوج است و E_{Tp} درصد خطای رسیدن به دبی اوج $Q_{P(com)}$ و $Q_{P(obs)}$ و ترتیب دبی‌های اوج مشاهداتی و محاسباتی هستند و $T_{P(com)}$ و $T_{P(obs)}$ زمان‌های رسیدن به این دبی‌ها هستند. مقدار کمتر خطاها عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد. مقدار E_{Qp} نشان می‌دهد که مقدار دبی اوج محاسباتی کمتر از مشاهداتی است. مقدار منفی E_{Tp} نیز بیانگر آن است که مدل زمان رسیدن به دبی اوج را زودتر از زمان مشاهداتی پیش‌بینی کرده است.

آماده‌سازی داده‌ای مدل CA

شبکه بارش

به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبخیز لایوچ‌رود، داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی همجوار با موقعیت حوضه مورد مطالعه از ابتدای ثبت آمار آن‌ها تا سال ۱۳۹۱ از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری شده‌اند. شکل ۴ موقعیت این ایستگاه‌ها را نسبت به لایوچ‌رود نشان می‌دهد. پس از بررسی این داده‌ها، رخداد‌های حداکثر بارش ۲۴ ساعته طی دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۱۳۶۲ تا

جدول ۳: رخداد‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته در ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد بررسی طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۲ تا ۱۳۹۱)؛ تاریخ این رخدادها و میزان بارندگی به میلی‌متر آورده شده است.

تاریخ رخداد	قرآن طالار	گلوگاه	دیوا	میاندشت	بلده	رزن	کره سنگ	محمودآباد	چمستان	عالم کلا	پل ذغال
۱۳۶۲/۰۷/۲۰	۶۰	۱۰۳	۵۲	۵۲	۲۲	۲۲	۹۳	۱۰۰	۱۰۲	۶۴	۲۶
۱۳۶۳/۰۹/۰۹	۷۷	۶۶	۵۱	۱۰۵	۵۲	۲۰	۵۳	۵۹	۷۱	۱۰۴	۳۵
۱۳۶۴/۰۷/۱۸	۶۳	۵۷	۵۹	۵۴	۳۷	۲۰	۲۳	۳۶	۴۰	۹۷	۲۰
۱۳۶۵/۰۸/۰۲	۶۵	۶۹	۵۵	۱۰۱	۳۶	۱۲	۵۵	۸۰	۵۶	۷۷	۲۳
۱۳۶۶/۰۸/۰۴	۵۲	۵۷	۵۸	۷۱	۳۰	۲۴	۳۱	۱۰۰	۶۴	۱۰۲	۴۳
۱۳۶۷/۰۷/۳۰	۶۷	۶۷	۴۵	۱۳۴	۲۷	۲۲	۴۵	۸۹	۵۵	۱۳۲	۲۷
۱۳۶۸/۱۲/۰۲	۴۳	۴۳	۴۰	۵۵	۲۰	۲۲	۳۴	۴۸	۳۰	۵۱	۱۸
۱۳۶۹/۰۷/۱۳	۳۶	۴۴	۶۲	۵۲	۱۳	۱۲	۶۵	۵۸	۶۰	۵۵	۱۷
۱۳۷۰/۰۴/۲۰	۶۲	۸۰	۷۴	۳۱	۶۵	۲۶	۶۶	۶۴	۴۳	۶۹	۵۳
۱۳۷۱/۰۹/۰۵	۷۸	۱۰۰	۷۴	۱۱۷	۲۴	۱۸	۴۶	۸۸	۱۱۵	۱۲۵	۴۵
۱۳۷۲/۰۸/۱۴	۴۲	۳۳	۵۷	۵۴	۲۵	۴۳	۳۲	۶۸	۳۴	۵۸	۳۲
۱۳۸۳/۰۷/۲۸	۶۸	۵۹	۶۰	۱۱۹	۲۳	۱۸	۹۷	۱۸۲	۱۰۸	۱۱۵	۴۷
۱۳۷۴/۰۶/۲۹	۵۶	۵۳	۴۹	۶۳	۲۰	۳۳	۱۶۲	۵۲	۷۲	۵۲	۳۴
۱۳۷۵/۰۶/۱۴	۷۱	۵۳	۶۲	۱۰۵	۳۱	۳۴	۶۰	۶۱	۴۷	۷۶	۳۰
۱۳۷۶/۰۸/۱۵	۵۴	۵۵	۵۴	۸۱	۷۳	۴۷	۸۴	۶۶	۶۳	۸۲	۲۱
۱۳۷۷/۰۷/۱۶	۶۵	۷۵	۵۰	۹۳	۳۲	۲۰	۱۰۰	۶۹	۶۸	۸۵	۳۲
۱۳۷۸/۰۷/۰۱	۵۴	۸۵	۶۰	۶۶	۲۹	۲۴	۵۷	۵۱	۵۱	۹۵	۲۴
۱۳۷۹/۰۸/۱۶	۵۴	۶۵	۴۷	۶۱	۲۰	۱۹	۵۴	۶۱	۴۵	۷۵	۲۹
۱۳۸۰/۰۸/۰۴	۵۶	۵۴	۵۱	۷۹	۲۷	۳۰	۵۰	۶۱	۷۶	۱۰۰	۳۵
۱۳۸۱/۰۶/۱۶	۶۶	۶۴	۵۳	۱۶۳	۳۲	۲۰	۵۶	۷۹	۱۱۰	۱۸۵	۲۶
۱۳۸۲/۰۷/۲۸	۶۲	۹۱	۵۱	۱۴۵	۳۴	۳۵	۶۹	۱۰۰	۹۸	۲۲۳	۴۰
۱۳۸۳/۰۷/۲۳	۴۳	۷۶	۵۰	۶۶	۳۵	۲۷	۶۰	۷۰	۶۷	۱۲۰	۳۱
۱۳۸۴/۰۶/۲۶	۵۵	۵۳	۵۰	۹۳	۲۵	۱۳	۴۷	۷۹	۷۳	۱۲۵	۱۴
۱۳۸۵/۰۸/۲۸	۷۰	۸۲	۳۷	۷۶	۲۹	۱۸	۵۱	۷۱	۴۷	۸۵	۳۶
۱۳۸۶/۰۷/۲۶	۳۴	۳۰	۳۷	۸۸	۲۱	۲۲	۴۱	۶۰	۵۵	۸۷	۲۷
۱۳۸۷/۰۷/۱۹	۳۸	۴۶	۴۰	۷۳	۲۷	۲۱	۵۰	۷۰	۳۶	۶۵	۳۷
۱۳۸۸/۰۹/۰۶	۴۹	۴۹	۵۰	۸۹	۲۸	۲۲	۵۳	۷۷	۳۸	۸۰	۲۵
۱۳۸۹/۰۸/۱۰	۴۵	۴۵	۳۵	۵۶	۲۹	۳۰	۴۳	۷۳	۵۵	۱۰۵	۳۴
۱۳۹۰/۰۸/۱۶	۳۲	۷۶	۶۶	۸۲	۱۸	۲۳	۸۲	۷۱	۸۱	۱۵۲	۳۰
۱۳۹۱/۱۲/۲۹	۳۲	۴۳	۴۵	۱۲۶	۱۳	۲۱	۳۰	۱۲۶	۵۸	۵۶	۲۳

جدول ۴: نفوذ جریان آب در عمق خاک براساس بافت خاک (پارامتر نفوذپذیری) (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷)

عمق نفوذ آب در خاک (سانتی‌متر / ساعت)	بافت خاک
۰/۱۲۷	شن، شن لومی
۰/۲۵۴	شن ریز لومی، لوم شنی درشت، بافت تقریباً شنی (گراول)
۰/۳۸۱	لوم شنی، لوم رسی و شنی، لوم شنی ریز، رس سیلتی، رس شنی، رس
۰/۵۰۸	لوم، لوم سیلتی، سیلت، لوم رسی و سیلتی، لوم رسی

جدول ۵: تعیین افق سطحی آبگذری با توجه به نوع بافت خاک (پارامتر آبگذری) (حسین زاده 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 ۶: تعیین کلاس آبگذری خاک (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۷)

آبگذری در افقهای سطحی	کاهش آبگذری در افقهای زیرین	رتبه بندی آبگذری نیمرخ خاک (عمق، سانتی متر)		
		بیشتر از ۱۰۰	۵۰ تا ۱۰۰	کمتراز ۲۵
خیلی سریع یا سریع (بیش از ۱۲ سانتی متر در ساعت)	کم یا بدون کاهش	-	-	-
نسبتاً سریع (۵ تا ۱۲ سانتی متر در ساعت)	کاهش متوسط	۳ تا ۴	۳ تا ۴	۵ تا ۷
متوسط (۲ تا ۶ سانتی متر در ساعت)	کاهش زیاد	۴ تا ۸	۵ تا ۸	۸ تا ۱۰
کم و خیلی آرام (کمتر از ۰/۵۱ سانتی متر بر ساعت)	کم یا بدون کاهش	-	-	-
از ۰/۵۱ سانتی متر بر ساعت)	کاهش متوسط	۶ تا ۷	۶ تا ۷	۷ تا ۹
کاهش زیاد	کاهش زیاد	۷ تا ۹	۸ تا ۹	۹ تا ۱۰
نسبتاً آرام (۰/۵۱ تا ۲ سانتی متر بر ساعت)	کم یا بدون کاهش	-	-	-
کاهش متوسط	کاهش متوسط	۸ تا ۹	۸ تا ۹	۹ تا ۱۰
کاهش زیاد	کاهش زیاد	۹ تا ۱۰	۹ تا ۱۰	۱۰ تا ۱۰
کم یا بدون کاهش	کم یا بدون کاهش	-	-	-
کاهش متوسط	کاهش متوسط	۱۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۱۰
کاهش زیاد	کاهش زیاد	۱۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۱۰

جدول ۷: تعیین گروه هیدرولوژیک خاک براساس بافت خاک (نفوذپذیری و آبگذری) (حسین زاده و همکاران، ۱۳۹۷)

گروه خاک	توصیف	HSG شاخص
A	پتانسیل خیلی کم تولید رواناب	۵ - ۰
B	پتانسیل کم تولید رواناب	۱۰ - ۶
C	پتانسیل متوسط تولید رواناب	۱۵ - ۱۱
D	پتانسیل زیاد تولید رواناب	> ۱۶

شماره منحنی (CN)

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 ۸) تهیه گردید (هيلمفلد و موكوس، ۲۰۰۴). مطابق با روش شرودر و لارسن (۱۹۹۰)، پس از بررسی فراوانی وقوع AMCها، وضعیت رطوبت پیشین خاک منطقه در گروه سوم (با توجه به

اینکه متوسط حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ایستگاه‌های مجاور منطقه بیش‌تر از ۲۸ میلی‌متر در فصل خواب می‌باشد) قرار گرفت که نشان می‌دهد مقدار رطوبت خاک زیاد است (جدول ۹). همچنین با توجه به شیب‌دار بودن اراضی حوضه لاویج‌رود و به دلیل عدم برقراری شرایط نرمال تصحیحات لازم بر روی CN با بهره‌گیری از روابط رایج انجام گرفت (پونس و هاوکینز، ۱۹۹۶؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ هاوکینز و همکاران، ۲۰۰۹) که نمونه‌ای از اعداد تصحیح شده برای کاربری‌های مختلف در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۸: مقادیر شماره منحنی گروه‌های هیدرولوژیک خاک براساس ویژگی‌های پوشش اراضی

D	C	B	A	خصوصیات پوشش سطح حوضه
۷۹	۷۳	۶۰	۳۶	پوشش جنگلی متوسط
۷۷	۷۰	۵۵	۲۵	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

بالایی دارد. با انطباق نقشه‌های گروه هیدرولوژیک خاک و زمین‌شناسی حوضه می‌توان بیان نمود که لایه‌های مارن و آهک‌های توده‌ای ضخیم لایه در گروه هیدرولوژیک D، لایه‌های شیل، رس سنگ و سنگ آهک‌های دولومیتی ضخیم لایه در گروه هیدرولوژیک C، ماسه سنگ، کنگلومرا و شیل‌های کربن‌دار در گروه هیدرولوژیک B و بخش‌هایی از لایه‌های ماسه - سنگی در گروه هیدرولوژیک A

پس از تهیه لایه کاربری اراضی، نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک حوضه هم براساس لایه خصوصیات بافت و عمق خاک (نفوذپذیری و آبگذری) آماده شد که در شکل ۵ 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

دخالت دادن شیب، شماره منحنی تعدیل شد و سرانجام شماره منحنی برای شرایط رطوبت متوسط خاک تهیه گردید. شکل ۶ نقشه شماره منحنی تعدیل شده برای حوضه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جای دارند. در ادامه، براساس 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 لایچ‌رود و به دلیل برقرار نبودن شرایط نرمال، نخست با

جدول ۹: اصلاح مقادیر شماره منحنی از وضعیت گروه رطوبتی II به وضعیت گروه رطوبتی III

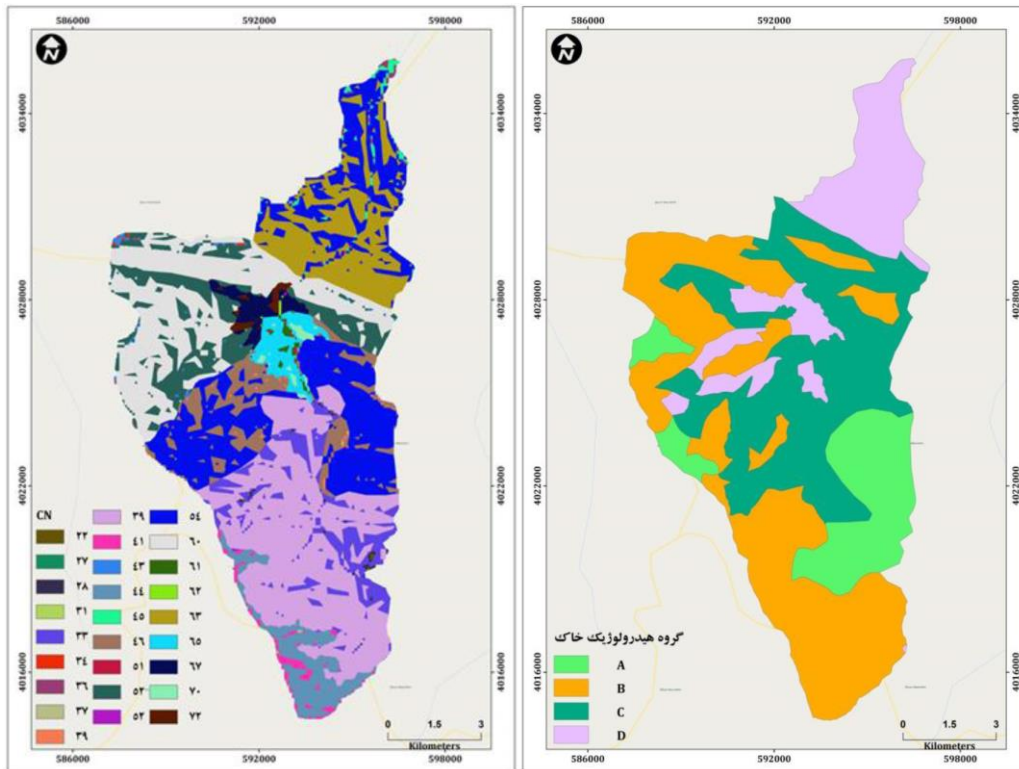
CN اصلاح شده برای گروه رطوبتی III				CN گروه رطوبتی II				گروه خاک / کاربری اراضی
۹۱	۸۷	۷۸	۵۶	۷۹	۷۳	۶۰	۳۶	درختکاری / پوشش جنگلی
۹۹	۹۹	۹۹	۹۹	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	صخره / اراضی بایر
۹۴	۹۲	۸۸	۸۲	۸۶	۸۲	۷۵	۶۵	زراعت
۹۹	۹۹	۹۹	۹۹	۹۸	۹۸	۹۸	۹۸	رخمون سنگی
۹۳	۹۱	۸۴	۶۹	۸۴	۷۹	۶۹	۴۹	مرتع
۹۴	۹۲	۸۸	۷۷	۸۶	۸۲	۷۴	۵۹	باغ
۹۷	۹۶	۹۴	۸۹	۹۲	۹۰	۸۵	۷۷	مناطق ساخته شده

است، نکه داشت سطحی خاک پایین و در نتیجه میزان رواناب بالاست. البته نکته مهم دیگری که در 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.

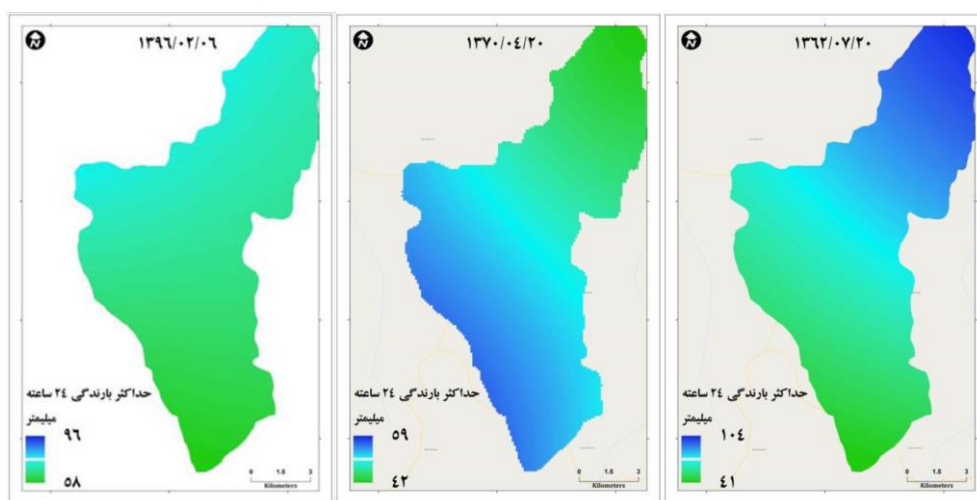
همچنین، نقشه نکه داشت سطحی خاک از روی نقشه شماره منحنی برای شرایط رطوبت پیشین خاک گروه مرطوب محاسبه شده است. سپس، براساس نقشه نکه داشت سطحی خاک و نقشه‌های رستری رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی، میزان ارتفاع رواناب به دست آمد. نقشه‌های رستری (درون‌یابی شده با استفاده از روش زمین‌آمار کریجینگ و تابع کرووی) رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته در شکل ۷ و نمونه‌هایی از نقشه‌های رواناب به دست آمده (با استفاده از مدل برآورد ارتفاع رواناب SCS) در شکل ۸ آورده شده است. انطباق و همپوشانی لایه‌های رستری بارندگی، شماره منحنی، نکه داشت سطحی و رواناب حوضه نشان می‌دهد در جاهایی که مقدار شماره منحنی زیاد

جدول ۱۰: تعیین ضریب رواناب حوضه آبخیز براساس نوع پوشش سطحی حوضه و شیب اراضی آن

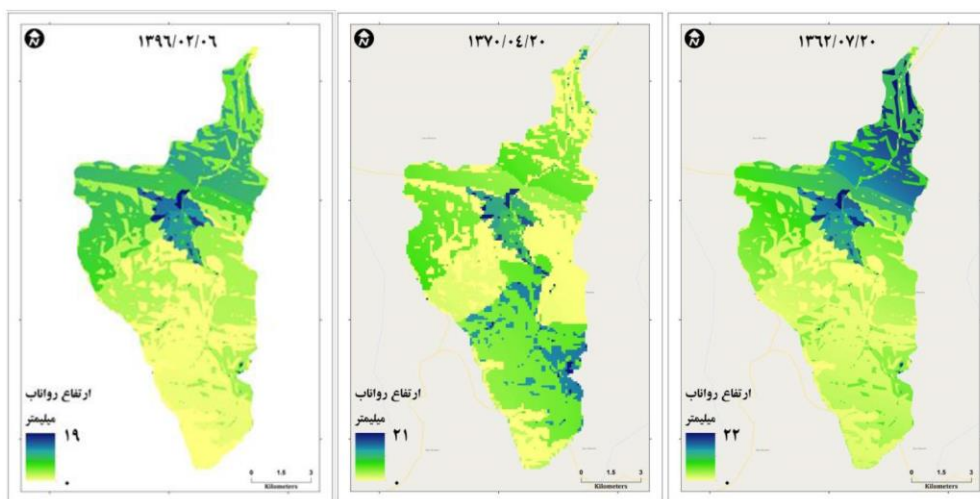
شیب زمین (درصد)			نوع پوشش سطح حوضه
۳۰ - ۱۰	۱۰ - ۵	۵ - ۰	
اراضی مرتعی			
۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱	خاک شنی لومی
۰/۴۲	۰/۳۶	۰/۳	خاک رسی لومی
۰/۶	۰/۵۵	۰/۴	خاک شنی سنگین
اراضی جنگلی			
۰/۳	۰/۲۵	۰/۱	خاک شنی لومی
۰/۵	۰/۳۵	۰/۳	خاک رسی لومی
۰/۶	۱/۵	۰/۴	خاک شنی سنگین
اراضی کشاورزی			
۰/۵۲	۰/۴	۰/۳	خاک شنی لومی
۰/۷۲	۰/۶	۰/۵	خاک رسی لومی
۰/۸۲	۰/۷	۰/۶	خاک شنی سنگین
اراضی شهری			
-	۰/۵	۰/۴	۳۰ درصد آسفالت
-	۰/۶۵	۰/۵۵	۵۰ درصد آسفالت
-	۰/۸	۰/۶۵	۷۰ درصد آسفالت



شکل ۵: گروه‌های هیدرولوژیک خاک / شکل ۶: شماره منحنی تعدیل شده براساس شیب اراضی و گروه رطوبتی III



شکل ۷: نمونه‌ای از نقشه‌های درون‌یابی رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته حوضه آبخیز لاریج‌رود



شکل ۸: نمونه‌ای از نقشه‌های پتانسیل تولید رواناب در حوضه آبخیز لاریج‌رود

نتایج

است و ارتفاع رواناب ناشی از بارش در سلول‌ها را نشان می‌دهد (شکل ۹). 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 ۱۱). بدین منظور، از روی مدل ارتفاعی رقومی طول جریان آبراهه‌ها به دست آمد و سرعت جریان نیز با استفاده از ضریب زبری مانینگ،

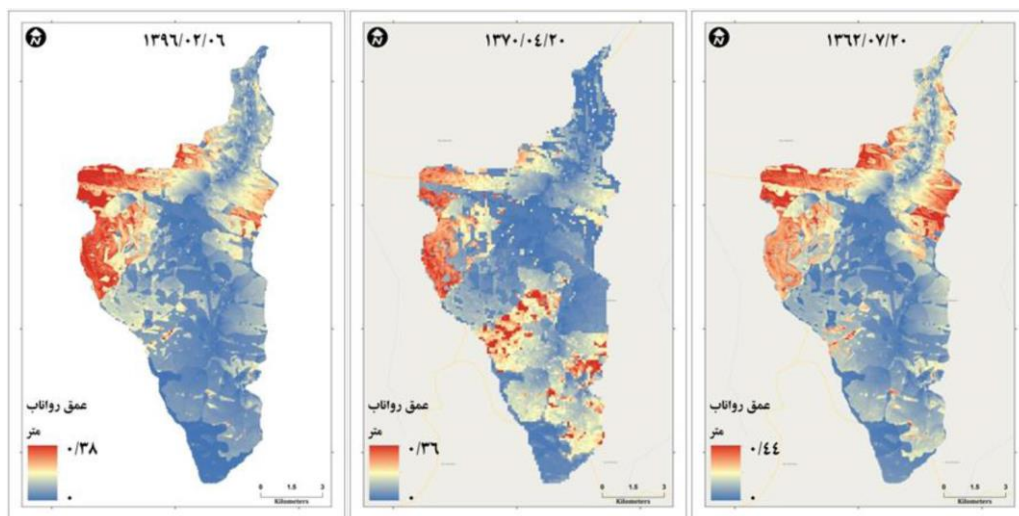
پس از آماده شدن لایه‌های رواناب برای ۳۵ رخداد حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ در حوضه آبخیز لاریج‌رود، شبیه‌سازی سیلاب این حوضه با استفاده از مدل اتومات سلولی نیاز به لایه‌های عمق جریان، سرعت جریان و زمان پیمایش داشت. از روی شدت بارش اضافی در سلول‌ها (ارتفاع رواناب)، شیب، ضریب زبری مانینگ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

مقدار دبی سیلابی محاسبه شده در محدوده اطراف ایستگاه آغوزکتی را برای رخداد بارش حداکثر ۲۴ ساعته تاریخ ۱۳۸۱/۰۶/۱۶ نشان می‌دهد. با دقت در مقادیر این نقشه، مشاهده می‌شود که 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^{۱۰} که یک روش ساده و دارای دقت قابل قبول است، برای محاسبه دبی پایه استفاده شد. مشخصات آماری دبی‌های مربوط به ۳۵ رخداد حداکثر بارش ۲۴ ساعته به کار گرفته شده در این پژوهش در جدول ۱۱ آورده شده است.

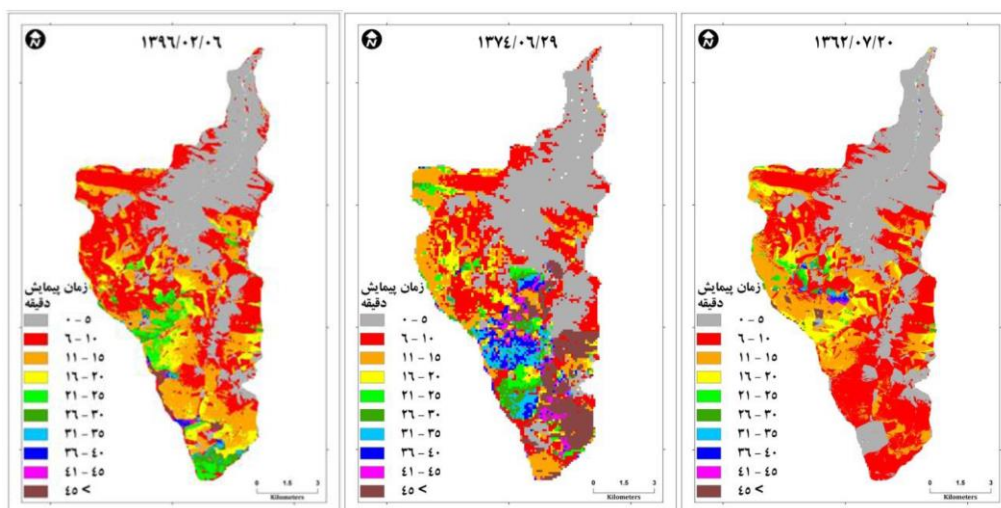
شیب و عمق جریان در محیط نرم‌افزاری ArcMap و با توجه به رابطه ۸ محاسبه شد. سپس نقشه رستری زمان پیمایش برای ۳۵ رخداد حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته مورد مطالعه ترسیم شد که نقشه آن‌ها با کلاس‌بندی ۵ دقیقه فواصل زمانی در شکل ۱۰ آورده شده است.

$$\text{Travel time} = L/3600V \quad (۱۱)$$

که در این رابطه، Travel Time زمان پیمایش به دقیقه، L لایه طول جریان استخراج شده از مدل رقومی ارتفاع و V سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه است (خالقی و ملکانی، ۱۳۹۵). 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 ۱۱ آورده شده است. شکل ۱۲



شکل ۹: نمونه‌ای از نقشه‌های عمق رواناب در حوضه آبخیز لایوچ رود



شکل ۱۰: نمونه‌ای از نقشه‌های زمان پیمایش حوضه آبخیز لایوچ‌رود

جدول ۱۱: مشخصات دبی‌های محاسباتی با اتومات سلولی در محل ایستگاه آغوزکتی لایوچ

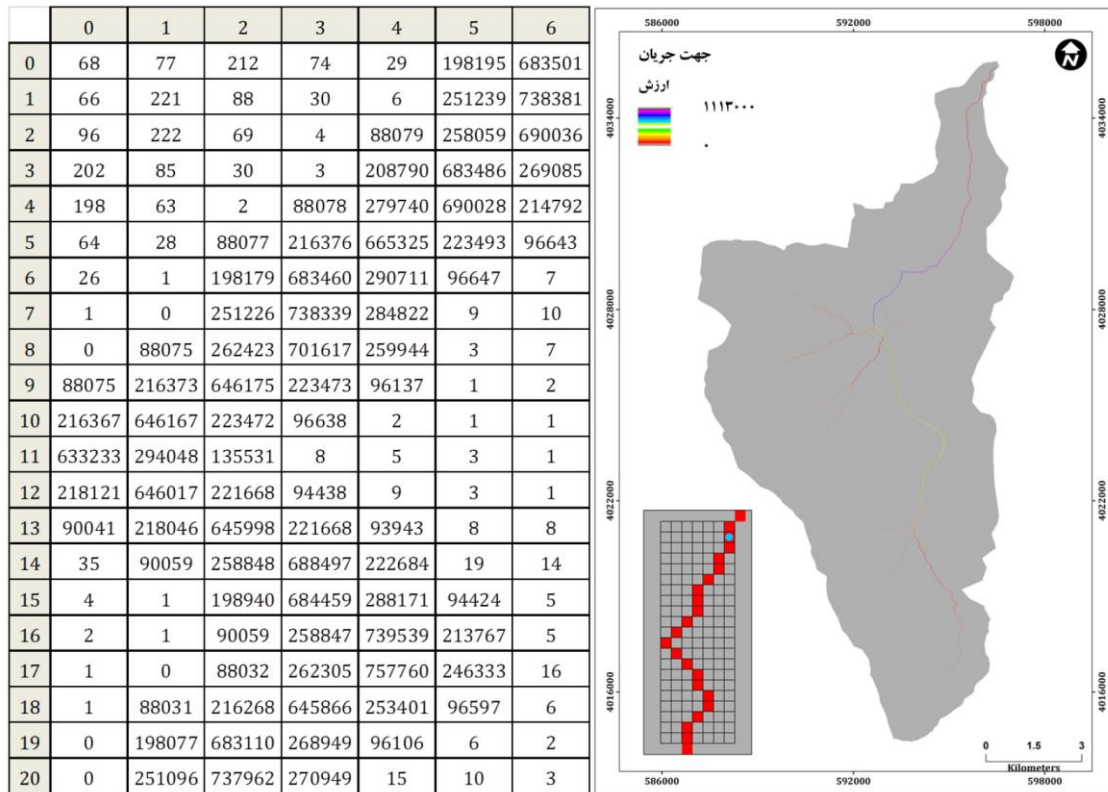
دبی / آماره	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب چولگی
میانگین دبی در یک ساعت	۳/۸	۰/۷	۱۴/۲	۲/۹	۲/۱
دبی حاصل از حداکثر بارش ۲۴ ساعته	۹۰/۹	۱۵/۵	۳۴۰/۹	۷۰/۴	۲/۱

اتومات سلولی هم برای وضعیت میانگین دبی در یک ساعت و هم برای مجموع دبی سیلابی حداکثر بارش ۲۴ ساعته مطابقت زیادی با هم دارند. جهت ارزیابی دقت نتایج مدل، از معیارهای کارایی ضریب همبستگی (R^2) و مجذور میانگین مربعات (RMSE) استفاده شده است. نتایج ارزیابی (جدول ۱۲) نشان می‌دهد مقدار ضریب همبستگی گویای دقت مناسب مدل است و درصدی کم خطا نیز نشان‌دهنده کارایی زیاد مدل اتومات سلولی در پیش‌بینی دبی سیلابی و زمان وقوع آن است.

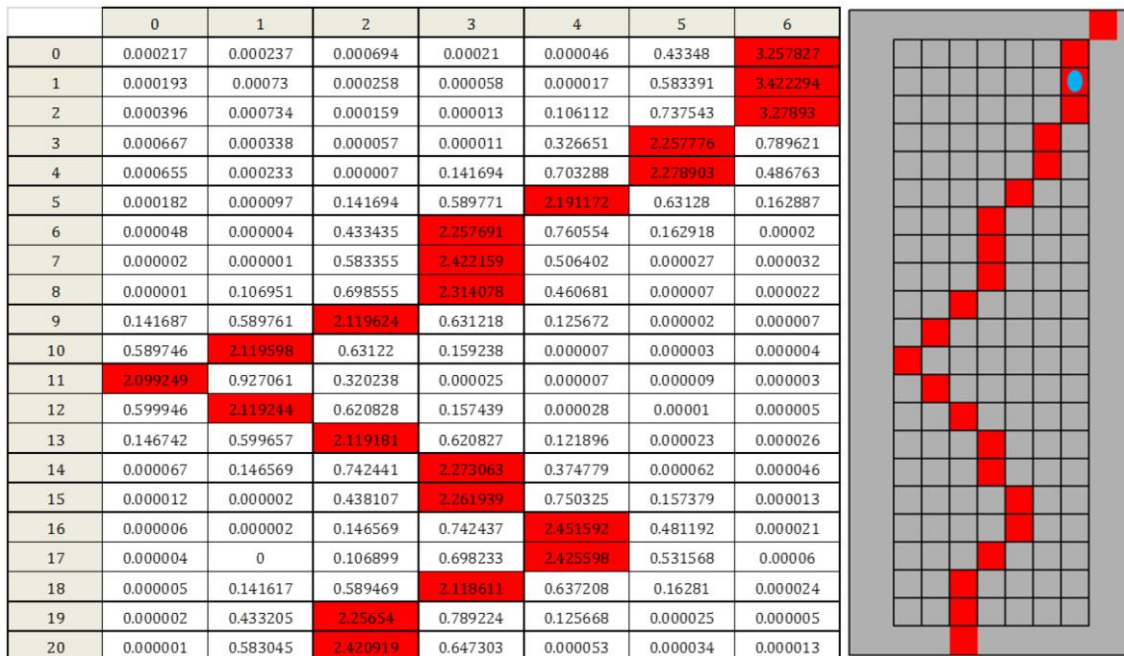
سرانجام، براساس نقشه عمق جریان و زمان پیمایش حوضه، در محیط پایتون سری زمانی رخدادهای حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته برای دوره آماری ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ ترسیم شد. با بررسی آمارهای رگبار و سیلاب اخذ شده از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، اطلاعات رویدادهای همزمان ثبت شده با این داده‌ها استخراج شدند. مقایسه دبی‌های سیلابی مشاهداتی و محاسباتی به‌صورت میانگین دبی در یک ساعت و دبی حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته انجام گرفت که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. طبق این شکل‌ها، دبی سیلابی محاسبه شده با مدل

جدول ۱۲: نتایج ارزیابی مدل اتومات سلولی در شبیه‌سازی سیلاب حوضه آبخیز لایوچ‌رود

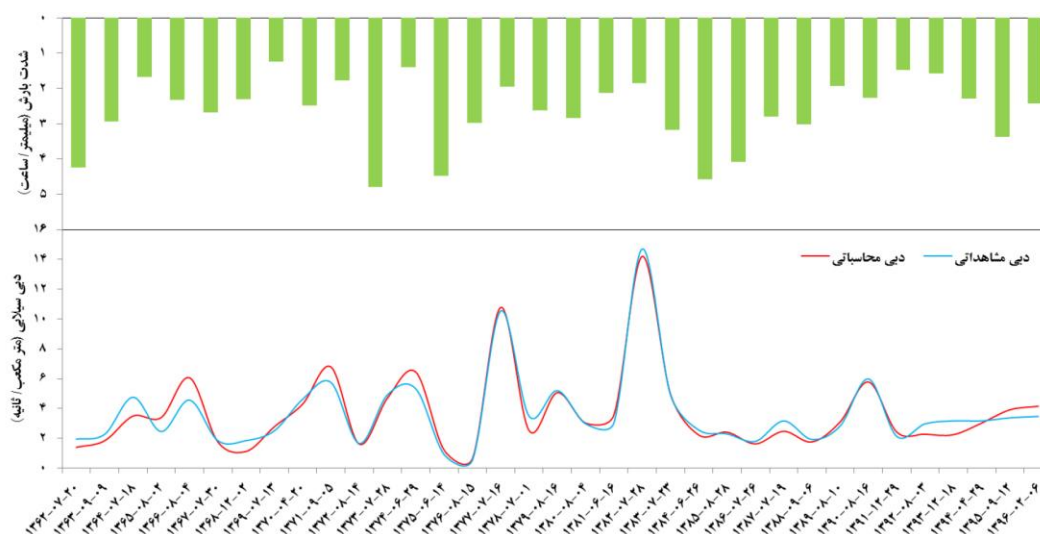
دبی	R^2	RMSE	درصد خطای دبی
میانگین دبی در یک ساعت	۰/۹۵	۰/۴	۱۴
دبی حداکثر بارش ۲۴ ساعته (دبی کل)	۰/۹۸	۱۳/۷	۸/۳



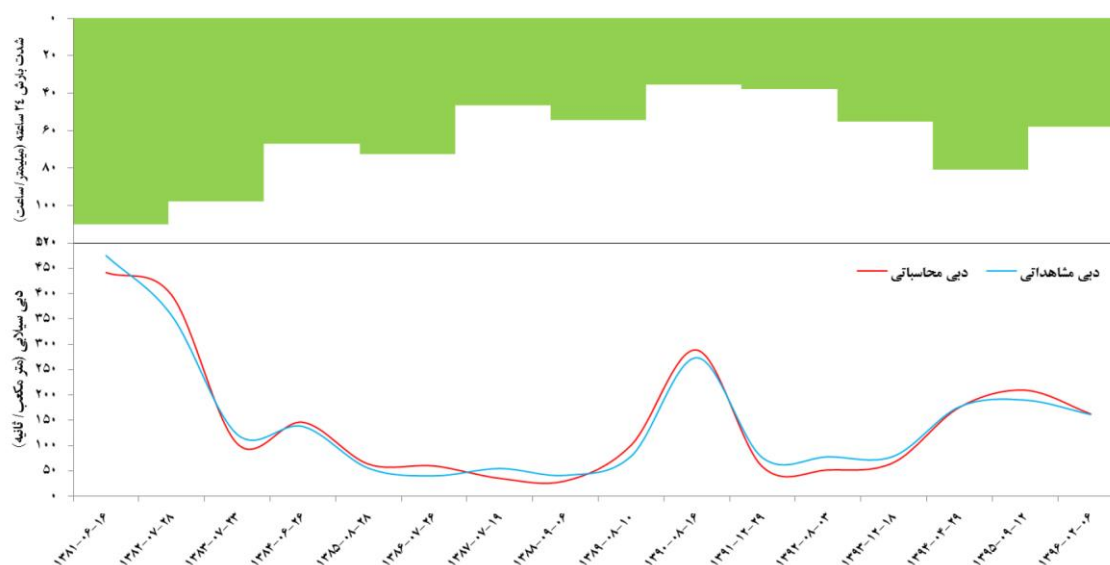
شکل ۱۱: نمایش جهت جریان تجمعی حوضه لایوچرود و محدوده اطراف ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی



شکل ۱۲: مقدار دبی سیلابی محاسبه شده برای تاریخ ۱۳۸۱/۰۶/۱۶ در محدوده اطراف ایستگاه آغوزکتی



شکل ۱۳: سری زمانی دبی محاسباتی و مشاهده‌ای (میانگین دبی در یک ساعت) حوضه آبخیز لایچ‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی؛ این سری زمانی و همچنین هایتوگراف قابل مشاهده در بالای عکس، براساس داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۶ ترسیم شده است. مقایسه دبی‌های محاسبه شده از مدل اتومات سلولی با دبی‌های مشاهده‌ای و همچنین با تغییرات زمانی مقدار بارندگی (که بر روی مقدار رواناب و در نتیجه دبی سیلابی تأثیرگذار است)، نشان می‌دهد که مدل اتومات سلولی به خوبی توانسته است که سیلاب‌های ناشی از بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته را در حوضه آبخیز لایچ‌رود شبیه‌سازی کند.



شکل ۱۴: سری زمانی دبی محاسباتی و مشاهده‌ای (دبی حداکثر بارش ۲۴ ساعته یا دبی کل) حوضه آبخیز لایچ‌رود در محل ایستگاه هیدرومتری آغوزکتی؛ این سری زمانی و همچنین هایتوگراف قابل مشاهده در بالای عکس، براساس داده‌های حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۶ ترسیم شده است. مقایسه دبی‌های محاسبه شده از مدل اتومات سلولی با دبی‌های مشاهده‌ای و همچنین با تغییرات زمانی مقدار بارندگی (که بر روی مقدار رواناب و در نتیجه دبی سیلابی تأثیرگذار است)، نشان می‌دهد که مدل اتومات سلولی به خوبی توانسته است که دبی سیلابی ناشی از بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته را در حوضه آبخیز لایچ‌رود شبیه‌سازی کند.

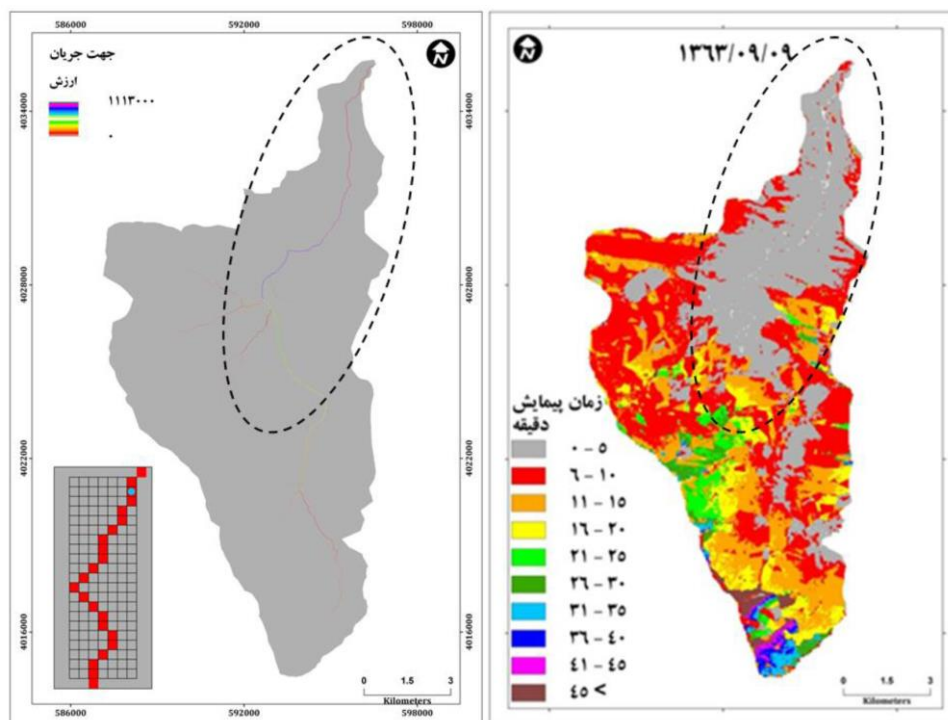
نتیجه‌گیری و بحث

حوضه لایوچ‌رود تحت تأثیر شرایط خاص زمین-شناسی، 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. 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 (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۹). با توجه به سیل‌خیز بودن حوضه لایوچ، به‌ویژه در طی بارش‌های رگباری، هدف اصلی از این مطالعه، نشان دادن امکان استفاده از اتومات سلولی برای شبیه‌سازی سیلاب‌های ناشی از بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته طی سال‌های ۱۳۶۲ و ۱۳۹۶ در سطح حوضه بوده است. در این پژوهش کارایی مدل اتومات سلولی به منزله روشی نوین و امکان تلفیق آن با اپلیکیشن‌های GIS برای شبیه‌سازی خطر سیلاب و هیدروگراف جریان برای حوضه آبخیز لایوچ‌رود مطالعه شد. بخش زیادی از حوضه آبخیز لایوچ‌رود 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، به‌دلیل قابلیت نفوذ کم و نیز نزدیکی به خروجی حوضه، دارای ارتفاع و عمق رواناب بسیار زیادی است. بررسی نقشه‌های زمان پیمایش نشان می‌دهد که در اکثر رخدادهای

بارشی، زیرحوضه‌هایی که در نیمه شمالی یا نزدیک به خروجی حوضه قرار گرفته‌اند، زمان پیمایش کمتری دارند تا جریان تجمعی به خروجی حوضه برسد. مضاف بر این امر، جهت جریان تجمعی نیز سبب می‌شود تا رواناب‌های تولید شده 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 لایوچ‌رود قرار دارند، پتانسیل سیل‌خیزی بیش‌تری نسبت به حوضه‌های بالادست دارند. علاوه بر این، به‌منظور اثبات فرضیه ذکر شده، شکل ۱۴ نیز ارائه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که هم به‌لحاظ زمان پیمایش و هم به‌لحاظ جهت جریان تجمعی، بخش‌های پایین‌دست حوضه نسبت به سایر قسمت‌های آن پتانسیل سیل‌خیزی بیش‌تری دارند. براساس مطالب فوق‌الذکر، این فرضیه تأیید می‌شود. همچنین، خطر سیلاب در مسیر رودخانه لایوچ و در اراضی اطراف آن به‌ویژه در پایین‌دست جریان بالا است. شبیه‌سازی سیلاب در حوضه لایوچ‌رود 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. از اینرو، اجرای کارهای مدیریتی در آبراهه‌های پایین‌دست و نواحی مجاور آن ضروری به‌نظر می‌رسد. نتایج این پژوهش با نتایج پژوهشگرانی چون ابوداگا (۲۰۰۵)، رینالدی و همکاران (۲۰۱۲)، سرباس و پودهورانی (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

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 مطالعات طرح های عمرانی استفاده کرد.

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



شکل ۱۵: نقشه زمان پیمایش (راست) و جهت جریان تجمعی (چپ) حوضه آبخیز لایوچ رود

پانوش

- 1-Antecedent Moisture Condition
- 2-Single Flow Direction chosen from 8 possibilities
- 3-Flow Direction
- 4-Geostatistical methods
- 5-Circular

- 6-Spherical
- 7-Gaussian
- 8-Permeability
- 9-Water flow/ Drainage
- 10-Local Minimum

منابع

-اعلمی، م.ت.، ملکانی، ل. و قربانی، م.ع.، ۱۳۹۴. مدل سازی بارش - رواناب در حوضه ليقوان چای با استفاده از مدل اتومای سلولی، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، سال ۴، شماره ۳، ص ۶۰-۷۳.

-اسماعیلی، ر. و حسین زاده، م.م.، ۱۳۸۹. بررسی فرآیندهای تشکیل دهنده موانع طولی در رودخانه های کوهستانی، مطالعه موردی البرز شمالی حوضه آبریز لایوچ، پژوهش های جغرافیایی، سال ۴۲، شماره ۷۱، ص ۴۳-۵۰.

بر پایه مدل اتومات سلولی، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین‌شناسی، سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران.

-لشکری، ح.، رشیدی، ع. و رضایی، ع.، ۱۳۹۲. پهنه‌بندی سیلاب رودخانه زرینه‌رود با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS در محیط GIS، پژوهش‌های دانش زمین، سال ۳، شماره ۱۳، ص ۵۱-۶۸.

-متولی، ص.، حسین‌زاده، م.م. و اسماعیلی، ر.، ۱۳۹۲. ارتباط دبی لبالبی با واحدهای ژئومورفیک در رودخانه‌های کوهستانی: مطالعه موردی، رودخانه لایچ در دامنه شمالی البرز مرکزی، پژوهش‌های دانش زمین، سال ۴، شماره ۱۴، ص ۱۷-۳۳.

-ثانی‌خانی، ه.، خراسانی، ع. و دین‌پژوه، ی.، ۱۳۹۱. شبیه‌سازی رواناب و فرسایش خاک با استفاده از روش اتوماتای سلولی، مجله پژوهش آب ایران، سال ۶، شماره ۱۱، ص ۱۲۳-۱۳۳.

-حسین‌زاده، م.م.، نصرتی، ک. و ایمنی، س.، ۱۳۹۷. تعیین شماره منحنی و برآورد پتانسیل رواناب حوضه آبخیز حصارک، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال ۱۸، شماره ۵۱، ص ۱۳۳-۱۵۰.

-خالقی، س. و ملکانی، ل.، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز چرچر)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، سال ۴۸، شماره ۴، ص ۵۸۹-۶۰۵.

-فهمی‌فر، ا.، بحری، م.ع. و بخشایش اقبالی، ن.، ۱۳۸۵. تحلیل فرآیند حرکت و لغزش زمین‌لغزه‌ها

-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, v. 13, p. 81-88.

-Aboudagga, N., 2005. Simulations by cellular automata of the floods in littoral lagoon areas, The EARSeL Symposium Global Developments in Environmental Earth Observation from Space Porto, Portugal, 6-11 June 2005.

-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, v. 21, p. 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, v. 18, p. 261-278.

-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, v. 15, p. 135-141.

-Hawkins, R.H., Ward, T.J., Woodward, D.E. and Van Mullem, J.A., 2009. Curve number hydrology, ASCE publication.

-Hjelmfelt, A.T. and Mockus, V., 2004. Estimation of Direct Runoff from Storm

- Rainfall, Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Chapter 10, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Huang, M., Gallichand, J., Wang, Z. and Goulet, M., 2006. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China, *Hydrological Processes*, v. 20(3), p. 579-589.
- Kopp, S. and Noman, N., 2008. ArcGIS Spatial Analyst - Hydrologic Modeling, ESRI User Conference Technical Workshop,
- 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*, v. 13, p. 25-33.
- Ponce, V.M. and Hawkins, R.H., 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 1(1), p. 11-19.
- 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.
- Schroeder, S.A. and Larsen, J.K., 1990. Antecedent moisture conditions for North Dakota runoff predictions North Dakota, *Farm Research*, v. 48(0097, 5338), p. 8-11.
- 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 p.
- 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.