

شبیه‌سازی خطر سیلاب با استفاده از مدل اتومات سلولی بر پایه GIS (مطالعه موردی: حوضه آبریز چرچر)

سمیه خالقی - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
لیلا ملکانی* - استادیار گروه عمران، دانشکده فنی - مهندسی مرنده، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۲۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۵/۲۱

چکیده

اتومات سلولی ابزاری است برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهایی که در جهان واقعی رخ می‌دهد؛ این ابزار همچنین در زمینه مدیریت بحران نیز کاربرد دارد. در این تحقیق از اتومات سلولی بر پایه GIS برای شبیه‌سازی سیلاب در حوضه آبریز چرچر در شمال غرب ایران استفاده شده است. نتایج نشان داد بیشترین مساحت حوضه چرچر دارای کاربری مرتع و گروه هیدرولوژیکی خاک D است و نفوذپذیری بسیار کمی دارد. ارتفاع رواناب در نیمه شرقی و جنوب شرقی حوضه، به دلیل قابلیت نفوذ کم و شیب زیاد، بالاست. همچنین، خطر سیلاب در مسیر رودخانه و اراضی اطراف آن، به‌ویژه در پایین‌دست جریان، زیاد است؛ به طوری که، علاوه بر کاربری اراضی، خاک، نفوذپذیری، و بارش، عامل شیب تأثیر بیشتری در تولید رواناب در حوضه گذارده است. سرانجام، مقایسه دبی محاسباتی با دبی مشاهداتی نشان داد مقادیر ضریب همبستگی دبی برای دو رویداد مورد بررسی به ترتیب برابر ۰/۸۲ و ۰/۷۰ است و درصد کم خطا نیز نشان‌دهنده کارایی بسیار مدل اتومات سلولی در پیش‌بینی دبی اوج سیلاب و زمان وقوع آن است. بنابراین، استفاده از اتومات سلولی در کنار GIS، علاوه بر سرعت بخشیدن به محاسبه رواناب، موجب افزایش نتایج دقیق نیز می‌شود.

کلیدواژه‌ها: اتومات سلولی، حوضه آبریز چرچر، خطر سیلاب، GIS.

مقدمه

در نیم قرن اخیر، رشد جمعیت در مناطق پُرخطر و آسیب‌پذیری سکونتگاه‌های انسانی افزایش یافته است. یکی از عمومی‌ترین مخاطرات محیطی سیلاب است؛ سیلاب هر ساله زندگی میلیون‌ها انسان را در سراسر دنیا تهدید می‌کند. سیلاب پدیده‌ای طبیعی و اجتناب‌ناپذیر است؛ این پدیده از زمانی به زمان دیگر و در همه رودخانه‌ها و سیستم‌های زهکشی طبیعی به‌وقوع می‌پیوندد و نه تنها به بروز خسارت جانی و منابع طبیعی و محیط، بلکه به بروز ضرر و زیان اقتصادی و بهداشتی منجر می‌شود (تیلاگواسی و همکاران، ۲۰۱۱: ۵۷۴، ۵۷۵). با وجود تحقیقات فراوان و به‌رغم روش‌های مختلف بررسی روند گسترش سیلاب، ایجاد روش‌هایی با صرفه‌جویی در زمان و هزینه برای اجرای این مسئله مهم هنوز هم ضروری به‌نظر 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 دون و همکاران (۲۰۰۷)؛ ابول‌ال‌مجد و همکاران (۲۰۱۰)؛ حق و همکاران (۲۰۱۲)؛ کومار رای و موهان (۲۰۱۴)؛ الکراکی (۲۰۱۵).

با توجه به فقدان ایستگاه‌های هیدرومتری در بیشتر حوضه‌ها، توسعه روش‌های تخمین رواناب برای این حوضه‌ها ضروری است. روش‌های گوناگونی برای تخمین رواناب در حوضه‌های فاقد آمار وجود دارد؛ یکی از روش‌های نوین اتومات سلولی^۱ است؛ این روش در تحقیقات مربوط به آب و محیط زیست تلفیق خوبی با GIS پیدا کرده است (ژان و هوآنگ، ۲۰۰۴؛ ۱؛ کاپ و نومن، ۲۰۰۸، ۳۸). 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.

در واقع، اتومات سلولی مدلی است که از یک سری اجزای مشابه و ساده تشکیل شده و قوانین بسیار ساده محلی نیز بر آن‌ها حاکم است. اما، این مدل سرانجام می‌تواند سیستم‌های پیچیده‌ای را مدل کند. اتومات سلولی در حقیقت سیستم‌های دینامیکی گسسته‌ای هستند که رفتارشان کاملاً بر اساس ارتباط محلی استوار است. ساختار اتومات سلولی بر چهار اصل - شبکه سلولی، حالت سلول، همسایگی سلول‌ها، و قوانین انتقال سلول‌ها - استوار است. در اتومات سلولی یک مجموعه منظم از سلول‌ها وجود دارد؛ این سلول‌ها به صورت همگام و در زمان‌های گسسته بر طبق یک قانون محلی به‌روزرسانی می‌شوند. محلی‌بودن بدین معناست که در تعیین مقدار جدید هر سلول سلول‌هایی که در همسایگی وی هستند تأثیرگذارند و سلول‌های دورتر تأثیری ندارند. شبکه سلول‌ها ابعاد متفاوتی دارند: می‌توانند یک‌بعدی، دو‌بعدی یا ابعاد بیشتری داشته باشند. ویژگی‌های اتومات سلولی را به‌اختصار می‌توان به صورت زیر بیان کرد: 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 (ون و همکاران، ۲۰۰۷؛ ۲۵۶). فهمی‌فر و همکاران (۱۳۸۵) بیان کردند که مزایای اتومات سلولی شامل سرعت، فضای گسسته، محلی‌بودن، و موازی‌بودن است؛ به سبب همین ویژگی‌ها، اتومات سلولی روشی مناسب برای تخمین رواناب و سیلاب است. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه کاربرد اتومات سلولی در شبیه‌سازی رواناب و سیلاب انجام گرفته است؛ از جمله ضیائیان فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۲) با تلفیق داده‌های سنجش از دور، به‌کارگیری مدل‌های هیدرولوژی موجود در زمینه برآورد سیلاب ناشی از بارش، و به‌کارگیری مدل سلول‌های خودکار (اتومات سلولی) گسترش سیلاب را شبیه‌سازی کردند. به منظور اجرای این مدل، نرم‌افزار رایانه‌ای شبیه‌ساز سیلاب توسعه داده شد. با بهره‌گیری از این نرم‌افزار از طریق ورود

اطلاعات هندسی حوضه و میزان بارش از پایگاه داده سیلاب شبیه‌سازی انجام شد. بر این اساس، عملیات شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل سلول‌های خودکار (اتومات سلولی) در دو حوضه کشور انجام پذیرفت. مقایسه نتایج این شبیه‌سازی با سایر روش‌ها و داده‌های واقعی سیلاب نشان داد شبیه‌سازی سیلاب با به‌کارگیری مدل سلول‌های خودکار با دقت مطلوب‌تری عمل می‌کند.

ثانی‌خانی و همکاران (۱۳۹۱) به شبیه‌سازی رواناب و فرسایش خاک با استفاده از روش اتومات سلولی پرداختند. در این روش از یک کرت آزمایشی واقع در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی هسته‌ای در زعفرانیه کرج استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد اندازه سلول‌ها، پارامترهای هیدرولیکی، انتخاب گام زمانی مناسب، و تعداد تکرارها تأثیر بسیار زیادی در نتایج شبیه‌سازی داشتند. در مقایسه نتایج محاسباتی و مشاهداتی، مقادیر ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا برای رواناب به ترتیب برابر ۰/۰۹۸ و ۰/۰۳۴ و برای تولید رسوب به ترتیب برابر ۰/۰۹۷ و ۰/۰۴۵ بود. بر اساس نتایج، روش اتومات سلولی را می‌توان به عنوان یک روش دقیق و کاربردی برای پیش‌بینی میزان فرسایش و رواناب ناشی از بارش به کار گرفت.

اعلمی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از اتومات سلولی به مدل‌سازی بارش- رواناب حوضه ليقوان پرداختند. آنان برای اجرای قوانین تخمین رواناب و گسترش آن بر اساس تکنیک اتومات سلولی از برنامه‌نویسی با زبان پایتون در GIS استفاده کردند. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده دقت مطلوب نتایج است.

وو و همکاران (۲۰۰۵) از ترکیب اصول پایه مدل‌های هیدرولوژیکی و اتومات سلولی سیستم شبیه‌سازی به نام HydroCA طراحی کردند. نتایج نشان داد مدل یادشده دارای سهولت بیشتری برای شبیه‌سازی رواناب حوضه‌هاست و همچنین اتومات سلولی گامی مؤثر در تحقیقات مربوط به مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی حوضه‌هاست.

دوونت و همکاران (۲۰۰۷) از اتومات سلولی برای ارزیابی تأثیرات مورفولوژیکی بر هیدرولوژی حوضه در خلال تمرکز فوق‌العاده سیلاب‌ها در حوضه پاریس استفاده نمودند و بیان کردند که ترکیب توپوگرافی و مساحت رواناب و شیب می‌تواند توزیع پیچیده تمرکز جریان در زمان و فضا را توضیح دهد.

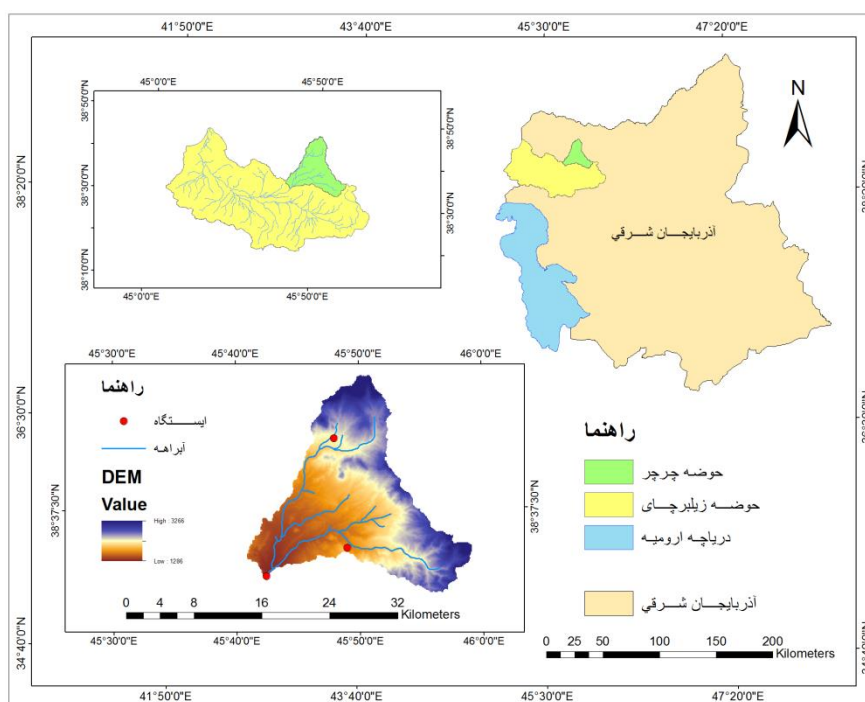
کای و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل ریاضی را برای مسیریابی سیلاب بر پایه اتومات سلولی به کار بردند. نتایج نشان داد سیلاب در همه جهات به طور هم‌زمان گسترش نمی‌یابد، بلکه نخست به سمت مناطق پایین دست جریان می‌یابد و مناطق را به سرعت می‌پوشاند. تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان داد مدل ارائه‌شده می‌تواند ابزاری ارزشمند برای مسیریابی سیل باشد.

با توجه به قابلیت رویکرد اتومات سلولی، می‌توان با داده‌های ورودی ساده نظر مدل ارتفاعی رقومی، دبی و غیره رخدادهای سیلاب و میزان گسترش آن را تخمین زد و میزان ارتفاع آب ناشی از سیلاب را ارائه داد. آگاهی از این مسئله می‌تواند در کاهش اثرهای سیل و مدیریت بهینه این پدیده مخرب مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

حوضه آبریز چرچر در استان آذربایجان شرقی و در شمال شرقی حوضه آبریز زلیبچای، در موقعیت جغرافیایی بین $38^{\circ}04'42''$ تا $38^{\circ}05'50''$ عرض شمالی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز چرچای و زیرحوضه چرچر را نشان می‌دهد. در داخل محدوده حوضه آبریز چرچر، ایستگاه هیدرومتری به نام پل چرچر در رودخانه زنونچای و همچنین سه ایستگاه باران‌سنجی چرچر، زنون، و میاب وجود دارد. مساحت حوضه آبریز چرچر $308/18$ کیلومتر مربع و محیط آن $123/84$ کیلومتر است. طبق گزارش سازمان جنگل‌ها، مراتع، و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی (۱۳۸۶)، حوضه آبریز زلیبچای و از جمله زیرحوضه چرچر در طی سال‌های اخیر شاهد وقوع سیلاب‌هایی بوده است. در اثر این سیلاب‌ها، بخش بسیار زیادی از اراضی کشاورزی و بخش کوچکی از باغ‌ها متحمل خسارتی شده‌اند. اراضی خسارت‌دیده در حاشیه و در حریم رودخانه واقع شده‌اند.



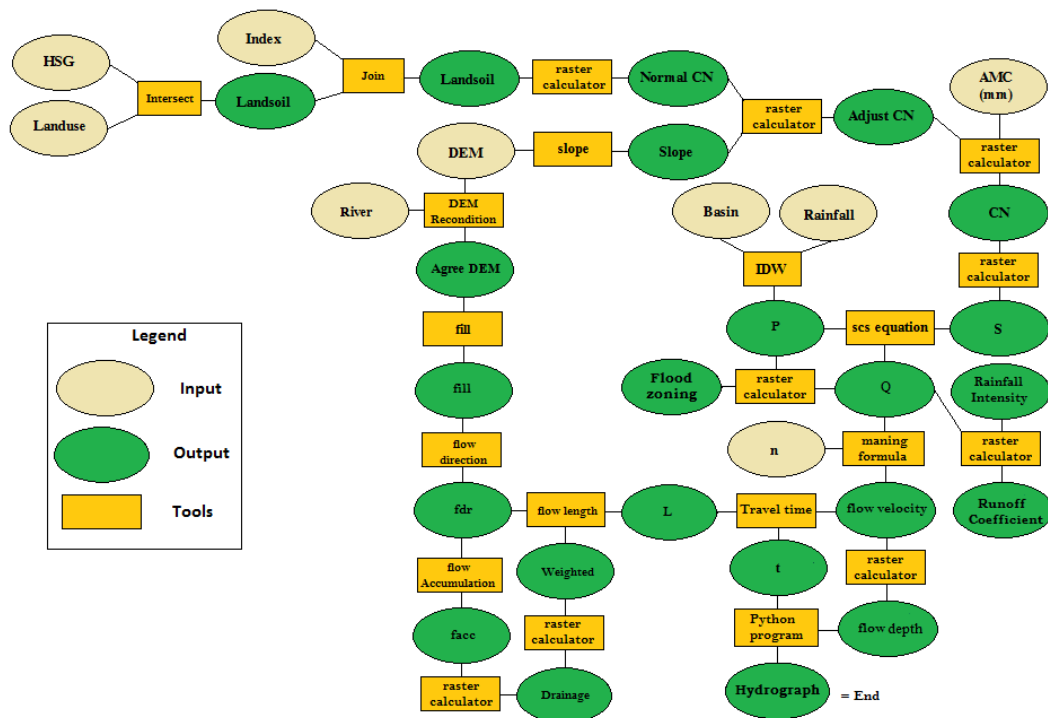
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز چرچر

روش پژوهش

در این تحقیق از مدل اتومات سلولی و از مدل بیلدر^۱ در محیط GIS استفاده شد که دربرگیرنده مراحل مختلف است

1. model builder

(شکل ۲). لایه‌های اطلاعاتی لازم نیز شامل کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، مدل ارتفاعی رقومی، لایه رودخانه، حوضه، و داده‌های بارش حوضه است.

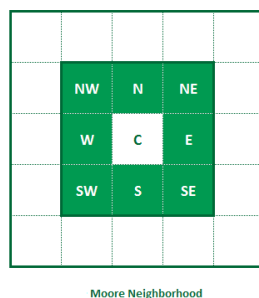


شکل ۲. فلوچارت شماتیک مدل‌سازی سیلاب در حوضه آبریز چرچر

با توجه به اینکه ساختار CA بر چهار اصل- شبکه سلولی، حالت سلول، همسایگی سلول‌ها، و قوانین انتقال و زمان- استوار است، اتومات سلولی در شبیه‌سازی سیلاب در این تحقیق شامل مراحل زیر است:

۱. شبکه سلولی: در واقع، مدل رقومی ارتفاع منطقه (DEM) و لایه‌های رستری حاصل از همه پارامترهای مؤثر به صورت یک شبکه‌بندی دوبعدی با ابعاد مشخص 30×30 متر تشکیل‌دهنده فضای سلولی مدل اتومات سلولی پیشنهادی است.

۲. همسایگی سلول‌ها: با توجه به طبیعت پیکسلی داده‌های سنجش از دور و دیگر منابع و همچنین برنامه‌نویسی آسان‌تر، بیشتر مدل‌های CA در یک شبکه دوبعدی تشکیل می‌شوند (بتی، ۱۹۹۹: ۲۰۶). در این تحقیق نیز از یک اتومات سلولی دوبعدی مربعی شکل با شعاع همسایگی یک و شکل همسایگی مور یا هشت‌تایی استفاده شده است. با در نظر گرفتن احتمال پخش و انتقال آب در همه جهات (هر هشت سلول کناری) شکل همسایگی مور انتخاب شده است.



Moore Neighborhood

شکل ۳. همسایگی مور در مدل اتومات سلولی

۳. حالت سلول: تراز آب در سلول‌ها به عنوان حالت سلول در نظر گرفته می‌شود. تراز آب سلول‌ها (H) 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 آب ناشی از بارش باران در سلول است و H_n ارتفاع آب دریافتی از سلول‌های همسایه است.

$$H = Z + H_p + H_n \quad (1)$$

بدین منظور، برای محاسبه ارتفاع 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 را یک‌بُعدی و در جهت شیب طولی زمین فرض کرد. جریان یک‌بُعدی 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 چشم‌پوشی‌اند؛ بدین ترتیب می‌توان جریان را یکنواخت فرض کرد. عمق جریان را می‌توان از رابطه‌ای که اورتون و میدوز ارائه کرده‌اند به دست آورد.

$$y = \left(n i_e x / S_0^{1/5} \right)^{2/3} \quad (2)$$

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 بُعد 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 این روش را بیشتر کرده است و پیش‌بینی اتوماتیک رواناب را به صورت رضایت‌بخش فراهم کرده است (نظیر مطالعات میشر و سینگ (۲۰۰۳)؛ راماسوبرامانیام و همکاران (۲۰۰۸)؛ پتیال و همکاران (۲۰۰۸)؛ ابراهیمیان و عبدالملک (۲۰۰۹)؛ ژبائو و همکاران (۲۰۱۱)؛ دواله (۲۰۱۳)). بنابراین، در اینجا از این روش 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 آبریز روشی ارائه کرده است. سازمان حفاظت خاک آمریکا، پس از مطالعات فراوان روی رگبارها (P) و جریان سطحی ناشی از آن‌ها (Q)، رابطه بین این دو را تقریباً خطی فرض کرد و سرانجام به صورت رابطه ۳ ارائه نمود:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3)$$

در این رابطه Q ارتفاع رواناب به میلی‌متر، P حداکثر بارش ۲۴ ساعته به میلی‌متر، و S عامل مربوط به نگره‌داشت 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.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

بدین منظور، نخست با استفاده از نقشه بافت خاک اخذ شده از اداره منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی و با بهره‌گیری از جدول سازمان حفاظت خاک امریکا نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک (HSG) حوضه چرچر تعیین شد. همچنین، نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز زیلبرچای نیز از اداره منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی اخذ و مطابق مرز حوضه آبریز چرچر برش داده شد. سپس، بر اساس تلفیق نقشه‌های HSG و کاربری و به کمک جداول SCS، نخست نقشه CN برای شرایط نرمال (خاک دارای رطوبت متوسط باشد و شیب بیشتر از ۵ درصد نباشد) تهیه شد و مطابق با روش شرودر و لارسن (۱۹۹۰: ۱۰)، پس از بررسی فراوانی وقوع AMC^۳ها (رطوبت پیشین خاک)، وضعیت ماه‌های سال بر اساس نوع AMC خشک شناخته شد و با توجه به شیب‌دار بودن اراضی حوضه آبریز چرچر و به دلیل برقرار نبودن شرایط نرمال، تصحیحات روی CN با بهره‌گیری از روابط رایج انجام گرفت. بنابراین، از رابطه ۵ برای تبدیل CN نرمال به CN خشک (CN_I) استفاده می‌شود (پُنک و هوآکین، ۱۹۹۶):

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2/3 - 0.13 * CN_{II}} \quad (5)$$

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 جداول SCS برای زمین‌هایی با شیب کمتر از ۵ درصد صحیح است و برای شیب‌های بیشتر از آن باید اصلاح شود. در این اینجا از رابطه ۶ که هاوکینگ و همکاران (۱۹۸۵) آن را ارائه کرده‌اند استفاده شده است.

$$CN_{I\alpha} = \frac{CN_{II\alpha}}{2/281 - 0.128CN_{II\alpha}} \quad (6)$$

$$CN_{II\alpha} = CN_{II} \times \frac{322/79 + 15/63\alpha}{\alpha + 323/52} \quad (7)$$

در اینجا CN_{II} شماره منحنی برای شرایط رطوبتی متوسط، CN_I شماره منحنی برای شرایط رطوبتی خشک، و α

شیب زمین بر حسب درصد (۱/۴ < α < ۰/۱۴) است که ۰/۱۴ همان ۱۴ درصد است.

برای به دست آوردن نقشه رستری بارش (P) از روش درون‌یابی^۱ IDW در GIS بهره گرفته می‌شود. به فرایند به دست آوردن نقاط مجهول از نقاط معلوم درون‌یابی گفته می‌شود. در روش IDW پیکسل‌های مجهول از طریق میانگین‌گیری از نقاط معلوم در نزدیکی هر پیکسل تخمین زده می‌شود و مقادیری که به مرکز پیکسل نزدیک‌ترین در تخمین مقدار مجهول وزن بیشتری دارند. در این مطالعه با استفاده از حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری و با بهره‌گیری از روش درون‌یابی IDW نقشه رستری منطقه به دست می‌آید. سرانجام، با محاسبه P، CNI، و S میزان Q تخمین زده می‌شود. سپس، شدت بارش اضافی برای به کارگیری در مدل موج سینماتیک محاسبه می‌شود.

۴. قوانین انتقال: قوانین انتقال در واقع نحوه گسترش پارامتر مورد بررسی 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 تقسیم بر جذر ۲ با سلول‌های دیگر مقایسه می‌شود (جنسون و دمینگو، ۱۹۸۸: ۱۵۹۴). در اینجا قوانین اتومای سلولی همان قوانین فیزیکی شناخته شده در هیدرولوژی است که برای مدل‌سازی رواناب به منظور تجمیع بارش مازاد از سطح حوضه از روش D8 استفاده شده است. 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 (کنی و ماتوس، ۲۰۰۵: ۷۷۰؛ ژائو و همکاران، ۲۰۰۹: ۲). در این تحقیق از اکستنشن Archydro، که از الگوریتم D8 استفاده می‌کنند، در محیط GIS به منظور تعیین جهت جریان استفاده می‌شود.

۵. زمان: در هر گام زمانی و بعد از تعیین حالت‌ها، توزیع جریان بر اساس قانون انتقال (در جهت بیشترین شیب) صورت می‌گیرد. این یک اصل اساسی است که جریان همواره به پست‌ترین مکان برای رسیدن به تعادل طی مسیر می‌کند (شائو و همکاران، ۲۰۱۵: ۸۱۸). بنابراین، نخست تراز آب در سلول‌ها تعیین می‌شود. سپس، تراز آب سلول مرکزی با سلول‌های همسایه مقایسه می‌شود. سلول‌های همسایه‌ای که تراز آن‌ها بیشتر از سلول مرکزی است آب آنها به سلول مرکزی اضافه می‌گردد و از سلول مرکزی به سلولی با بیشترین شیب کاهشی انتقال می‌یابد. این فرایند تا رسیدن به خروجی ادامه خواهد یافت. پس از پایان آن، همین فرایند برای زمان بعدی تکرار خواهد شد و تا زمانی تکرار خواهد شد که سیل ناشی از بارش از حوضه خارج شود (دووینت و همکاران، ۲۰۰۶: ۳).

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 ۸ به دست می‌آید:

1. Inverse Distance Weighted

2. Single Flow Direction chosen from 8 possibilities

$$v = \frac{1}{n} R^{1/2} S^{1/2} = \frac{1}{n} y^{1/2} S^{1/2} = \frac{1}{n} (ni_e x / S^{1/5})^{1/4} S^{1/2} = (i_e x)^{1/4} S^{1/3} / n^{1/6} \quad (8)$$

در این رابطه n ضریب مانینگ است و بر اساس پوشش زمین و با استفاده از جدول ۱ مشخص می‌شود.

جدول ۱. مقادیر ضریب زبری مانینگ برای پوشش‌های مختلف (سیربوس و پودهورانی، ۲۰۱۱: ۷)

پوشش سطحی	سطوح صاف (آسفالت، بتن، سنگ‌فرش)	زمین کشاورزی با پوشش کمتر از ۲۰٪	زمین کشاورزی با پوشش بیشتر از ۲۰٪	علف کوتاه	علف مرتع	جنگل بیشه‌زار	جنگل متراکم	n
	۰/۰۱۱	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۱۳	۰/۴۰
								۰/۸۰

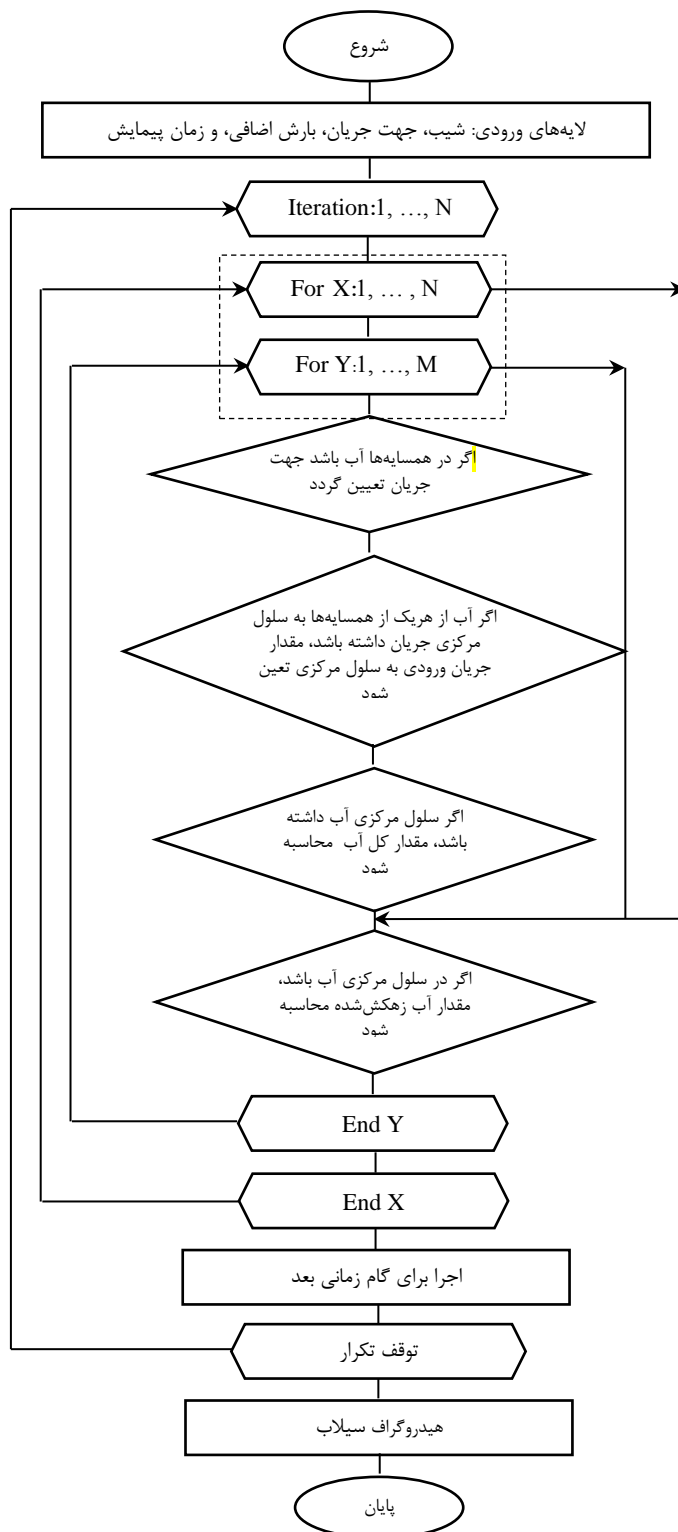
۶. شبیه‌سازی سیلاب: سرانجام، برای شبیه‌سازی گسترش سیلاب از زبان برنامه‌نویسی پایتون استفاده می‌شود. پایتون زبان برنامه‌های کاربردی GIS است و برنامه نوشته‌شده با پایتون می‌تواند هماهنگی کاملی با محیط GIS و ابزارهای آن داشته باشد. مزیت عمده زبان پایتون شیء‌گرایی آن است؛ یعنی می‌توان از برنامه‌های نوشته‌شده به دست سایر برنامه‌نویسان استفاده کرد (عباسی، ۱۳۹۳؛ اعلمی و همکاران، ۱۳۹۴: ۶۵). این مزیت کاربرد و کمک فراوانی به کاربر می‌کند؛ به گونه‌ای که می‌توان از ابزارهای GIS به‌سادگی در برنامه استفاده کرد و به نوشتن مجدد برنامه نیازی نیست. با استفاده از این زبان می‌توان قوانین ساده ریاضی با نام «قوانین انتقال» مدل CA را نوشت و اجرا کرد. در حقیقت، از برنامه پایتون برای انتقال رواناب از بالادست به پایین دست استفاده می‌شود. این بخش شبیه به روش مدت-مساحت در تعیین رواناب است. شکل ۴ فرایند شبیه‌سازی سیلاب حوضه آبریز چرچر را نشان می‌دهد.

۷. 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.

$$E_{Q_p} = \frac{Q_{P(\text{com})} - Q_{P(\text{obs})}}{Q_{P(\text{obs})}} \times 100 \quad (9)$$

$$E_{T_p} = \frac{T_{P(\text{com})} - T_{P(\text{obs})}}{T_{P(\text{obs})}} \times 100 \quad (10)$$

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



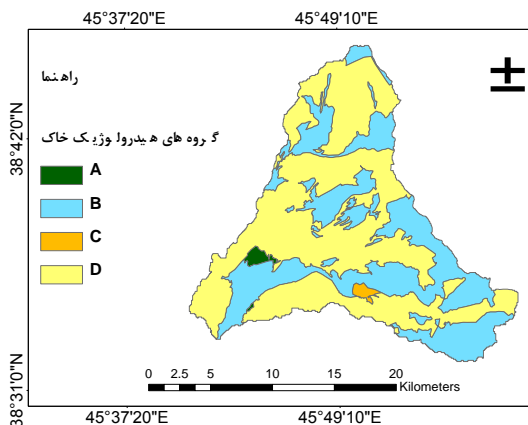
شکل ۴. فرایند شبیه‌سازی سیلاب

یافته‌های پژوهش

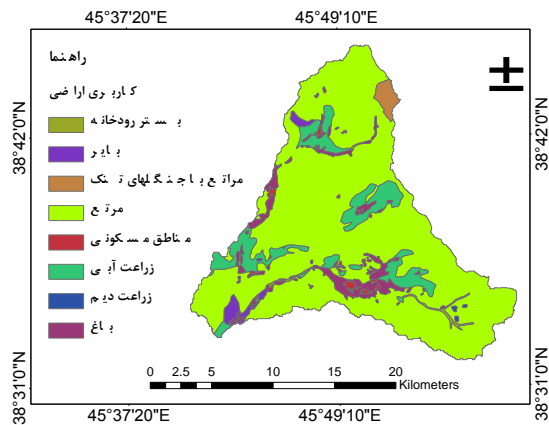
نقشه خطر سیل

نقشه کاربری اراضی، که سازمان جنگل‌ها، مراتع، و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی آن را تهیه کرده بود، متناسب با مرز حوضه برش داده شد و اطلاعات آن استخراج گردید. شکل ۵ اطلاعات مربوط به نوع کاربری‌ها را نشان می‌دهد. بیشترین مساحت حوضه مربوط به کاربری مراتع (۲۴۷/۱۶ کیلومتر مربع) و کمترین مساحت مربوط به زراعت دیم (۰/۴۳ کیلومتر مربع) است.

همچنین، نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک را- که بر اساس نقشه خاک که دارای خصوصیات بافت و عمق خاک است- سازمان جنگل‌ها، مراتع، و آبخیزداری استان آذربایجان شرقی تهیه کرده است. شکل ۶ نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک حوضه آبریز چرچر را نشان می‌دهد. گروه A دارای نفوذپذیری زیاد، B نفوذپذیری متوسط، C نفوذپذیری کم، و D نفوذپذیری خیلی کم است؛ بیشترین مساحت حوضه چرچر در گروه D است (۱۸۵/۴۰ کیلومتر مربع) که دارای نفوذپذیری خیلی کمی است؛ بدین معنی که حجم زیادی از بارش به رواناب تبدیل می‌شود. پس از آن، گروه‌های B (۱۱۸/۰۲ کیلومتر مربع)، A (۲/۴۳ کیلومتر مربع)، و C (۱/۸۴ کیلومتر مربع) به ترتیب بیشترین تا کمترین مساحت حوضه را شامل می‌شوند.

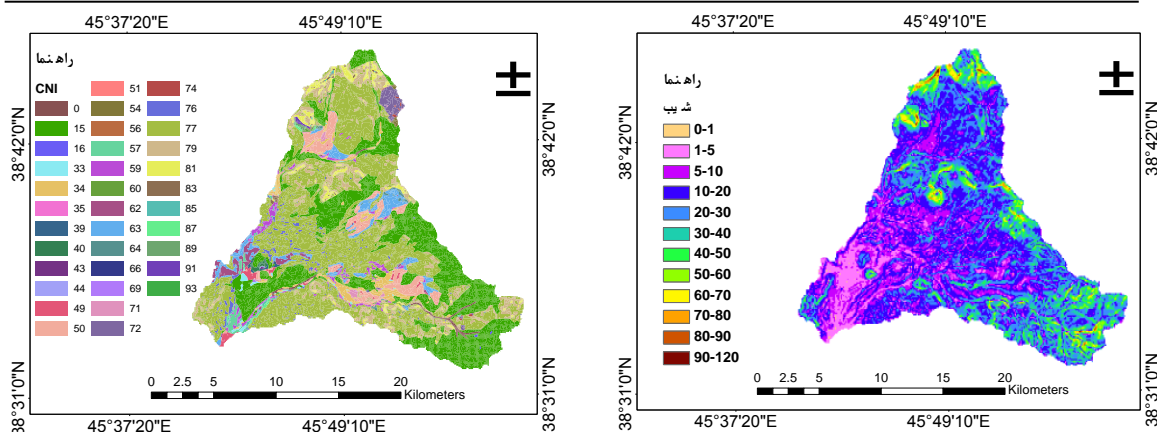


شکل ۶. نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک



شکل ۵. نقشه کاربری اراضی حوضه چرچر

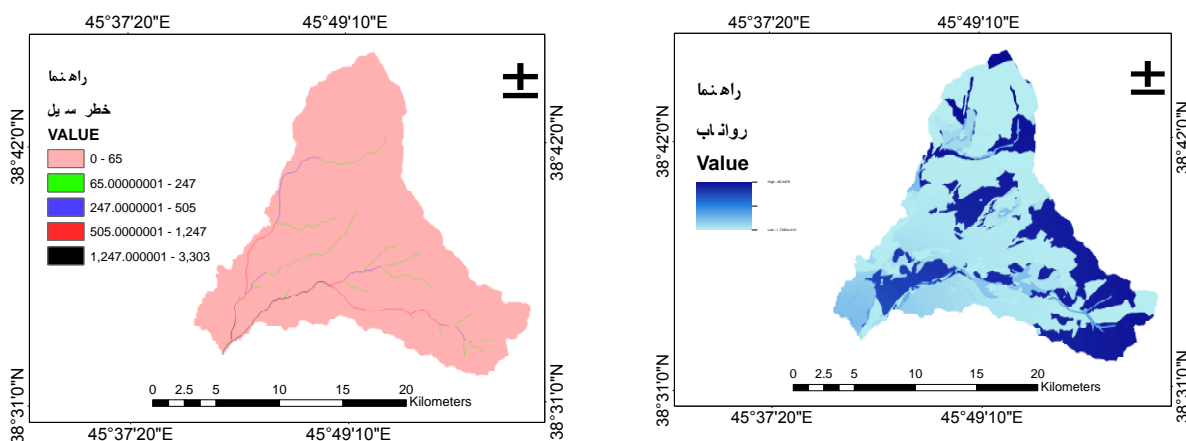
سپس، بر اساس تلفیق نقشه‌های HSG و کاربری و به کمک جداول SCS، نخست نقشه CN برای شرایط نرمال تهیه شد. با توجه به شیب‌دار بودن اراضی حوضه آبریز چرچر (شکل ۷) و به دلیل برقرار نبودن شرایط نرمال، نخست با دخالت دادن شیب، شماره منحنی تعدیل شد و سرانجام شماره منحنی برای شرایط خشک (شکل ۸) تهیه شد.



شکل ۷. نقشه شیب (درصد) حوضه چرچر

شکل ۸. نقشه شماره منحنی برای شرایط خشک حوضه چرچر

همچنین، نقشه نگاهداشت سطحی خاک از روی نقشه شماره منحنی برای شرایط خشک محاسبه شد. سپس، بر اساس نقشه نگاهداشت سطحی خاک و نقشه رستری بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته ایستگاه‌های حوضه، میزان ارتفاع رواناب (میلی‌متر) به دست آمد (شکل ۹). ملاحظه می‌شود که در جاهایی که مقدار شماره منحنی زیاد است نگاهداشت سطحی خاک پایین است و در نتیجه میزان رواناب بالاست. سرانجام نقشه طبقات خطر سیل ترسیم شد (شکل ۱۰)؛ به طوری که پیکسل‌های دارای ارزش عددی بیشتر پتانسیل زیادی برای تولید سیلاب دارند و بر این اساس آبراهه‌های پایین دست به سبب دریافت آب جریان‌های بالادست پتانسیل بیشتری برای وقوع سیلاب دارند.



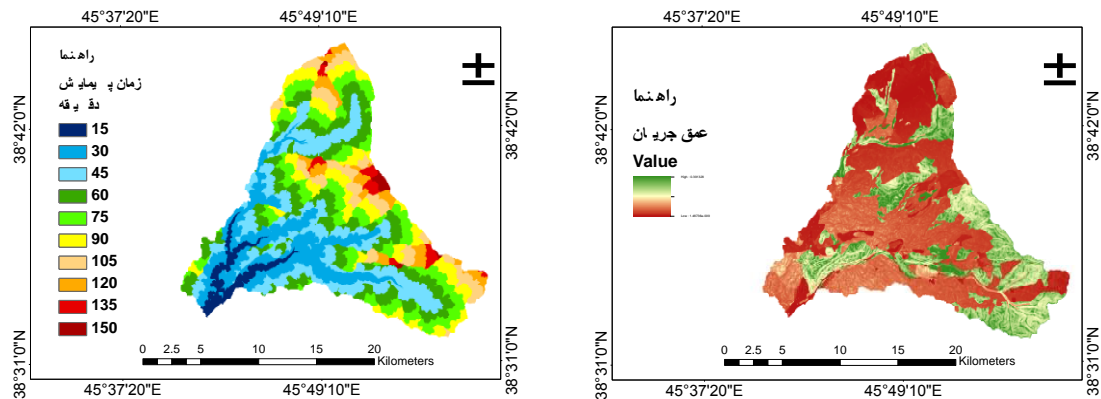
شکل ۹. نقشه پتانسیل تولید رواناب (میلی‌متر) در حوضه چرچر

شکل ۱۰. نقشه خطر سیلاب در حوضه چرچر

هیدروگراف سیل

از روی شدت بارش اضافی در سلول‌ها، شیب، ضریب زبری مانینگ و سایر پارامترها نقشه عمق جریان رواناب به متر (شکل ۱۱) به دست آمد که بر اساس مدل موج سینماتیک است و ارتفاع رواناب ناشی از بارش در سلول‌ها را نشان می‌دهد. همچنین، برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل به زمان پیمایش حوضه نیاز بود. زمان پیمایش زمانی است که طول می‌کشد آب از یک نقطه حوضه به نقطه دیگر حوضه طی کند. زمان پیمایش از نسبت طول جریان به سرعت جریان

به‌دست می‌آید. بدین منظور، از روی مدل ارتفاعی رقومی طول جریان آبراهه‌ها به‌دست آمد و سرعت جریان نیز با استفاده از ضریب زبری مانینگ و عمق جریان محاسبه شد. نقشه رستری زمان پیمایش (ایزوکرونال) ترسیم شد که برای فواصل زمانی ۱۵ دقیقه کلاس‌بندی شده است (شکل ۱۲).



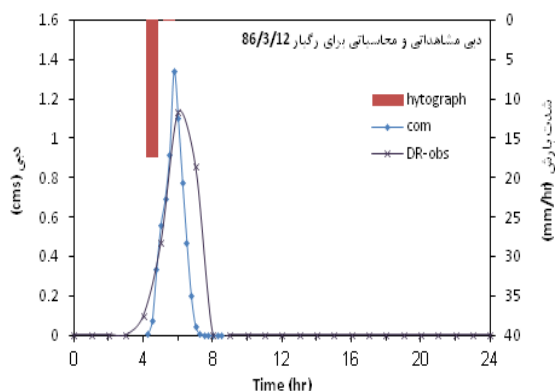
شکل ۱۲. زمان پیمایش حوضه چرچر برای فواصل زمانی ۱۵ دقیقه

شکل ۱۱. نقشه عمق رواناب (متر) حوضه چرچر

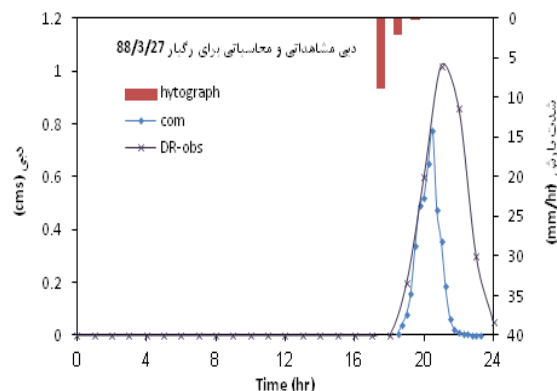
سرانجام، بر اساس نقشه عمق جریان و زمان پیمایش حوضه، در محیط پایتون هیدروگراف تاریخ‌های ۱۳۸۸/۳/۲۷ و ۱۳۸۶/۳/۱۲ ترسیم شد. با بررسی آمار رگبار و سیلاب اخذشده از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، رویدادهایی که هم‌زمان ثبت شده باشد کم بود و از این تعداد فقط این دو مورد قابل استفاده بودند. طبق شکل‌های ۱۳ و ۱۴، دبی مشاهداتی و دبی محاسباتی برای دو رویداد تاریخ ۱۳۸۸/۳/۲۷ و ۱۳۸۶/۳/۱۲ مطابقت زیادی با هم دارند. نتایج ارزیابی مدل (جدول ۲) نشان می‌دهد مقدار ضریب همبستگی گویای دقت مناسب مدل است و همچنین درصد‌های کم خطا نیز نشان‌دهنده کارایی زیاد مدل اتومات سلولی در پیش‌بینی دبی اوج سیلاب و زمان وقوع آن است.

جدول ۲. نتایج ارزیابی مدل اتومات سلولی

تاریخ رویداد	ضریب همبستگی	درصد خطای دبی اوج	درصد خطای زمان دبی اوج
۱۳۸۶/۳/۱۲	۰٫۸۲	۱۸٫۱۴	-۱۶٫۶۷
۱۳۸۸/۳/۲۷	۰٫۷	-۲۳٫۹	-۶٫۲۵



شکل ۱۴. هیدروگراف سیل رویداد ۱۲ خرداد ۱۳۸۶



شکل ۱۳. هیدروگراف سیل رویداد ۲۷ خرداد ۱۳۸۸

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق کارایی مدل اتومات سلولی به منزله روشی نوین و امکان تلفیق آن با اپلیکیشن‌های GIS برای شبیه‌سازی خطر سیلاب و هیدروگراف جریان برای حوضه آبریز چرچر مطالعه شد. نخست از داده‌های کاربری اراضی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک، DEM، داده‌های بارش، و ضریب زبری حوضه استفاده شد و همه لایه‌ها در قالب رستر با پیکسل 30×30 متر تهیه شدند. بر اساس روش SCS، ارتفاع رواناب و خطر سیلاب در حوضه آبریز به دست آمد. همچنین، 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 زمان پیمایش به دست آمد. سرانجام هیدروگراف سیل ترسیم شد. بیشترین مساحت حوضه چرچر دارای کاربری مرتع و گروه هیدرولوژیکی خاک D است که دارای نفوذپذیری خیلی کمی است؛ بدین معنی که حجم زیادی از بارش به رواناب تبدیل می‌شود. بنابراین، نقشه ارتفاع رواناب نشان داد که نیمه شرقی و جنوب شرقی حوضه، به دلیل قابلیت نفوذ کم و شیب زیاد، دارای ارتفاع رواناب بسیار زیادی است. همچنین، خطر سیلاب در مسیر رودخانه و اراضی اطراف آن به ویژه در پایین دست جریان بالاست. مطالعه حوضه چرچر نشان داد، علاوه بر کاربری اراضی، خاک، نفوذپذیری، و بارش، عامل شیب زمین نقش مهمی در تجمع آب به سمت پایین دست و تولید سیلاب دارد؛ به طوری که اجرای کارهای مدیریتی در آبراهه‌های پایین دست و نواحی مجاور آن لازم به نظر می‌رسد. از طرفی، با توجه به ضریب زبری حوضه چرچر (از ۰/۰۱ تا ۰/۴) و فاصله هر سلول در طول مسیر جریان از خروجی بر حسب متر و شیب، نقشه عمق رواناب در هر سلول به دست آمد؛ از این طریق می‌شود در حوضه آبریز چرچر - که تعداد ایستگاه‌های اندازه‌گیری کم است - عمق رواناب در هر نقطه از حوضه را به دست آورد. سرانجام، با توجه به عمق رواناب در سلول‌ها و با توجه به شیب و طول جریان و زمان طی مسیر آب تا خروجی، هیدروگراف سیل حوضه برای خرداد سال ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ به دست آمد. نتایج هیدروگراف‌ها گویای این مطلب است که دبی مشاهداتی و دبی محاسباتی مطابقت زیادی با هم دارند و ارزیابی مدل نیز نشان‌دهنده دقت مناسب مدل است؛ بدین صورت که نتایج این تحقیق با نتایج محققانی چون آبوداگا (۲۰۰۵)، رینالدی و همکاران (۲۰۱۲) و سیربوس و پودهورانی (۲۰۱۳) تطابق دارد. که بیان می‌کنند مدل اتومای سلولی، نسبت به روش‌های معمول، که از محیط GIS استفاده می‌شود، از دقت بسیار زیادی

برخوردار است و این مدل به خوبی قادر به ترسیم هیدروگراف سیل است. بنابراین، می‌توان از اتومات سلولی برای پیش‌بینی رواناب در حوضه‌های فاقد آمار استفاده کرد و نتایج قابل اعتمادی به دست آورد. از نقشه خطر سیلاب به دست آمده نیز می‌توان به عنوان یکی از اطلاعات پایه و مهم در مطالعات طرح‌های عمرانی استفاده کرد. از آنجا که، به گفته محققان، در مدل اتومات سلولی دقت نتایج تا حد زیادی به داده‌های ورودی بستگی دارد، می‌توان در تحقیقات بعدی با به کارگیری داده‌های ورودی و مدل‌های ارتفاعی رقومی با دقت بالا بر صحت و دقت نتایج افزود.

منابع

- علمی، م.ت؛ ملکانی، ل. و قربانی، م.ع. (۱۳۹۴). مدل‌سازی بارش - رواناب حوضه ليقوان چای با استفاده از مدل اتومات سلولی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۳(۴): ۶۰ - ۷۳.
- ثانی‌خانی، ه.؛ خراسانی، ع. و دین‌پژوه، ی. (۱۳۹۱). شبیه‌سازی رواناب و فرسایش خاک با استفاده از روش اتوماتای سلولی، مجله پژوهش آب ایران، ۶(۱۱): ۱۲۳ - ۱۳۳.
- ضیائی‌ان فیروزآبادی، پ.؛ موسوی، الف؛ شکیبیا، ع.ر. و ناصری، ح.ر. (۱۳۸۲). شبیه‌سازی رخداد سیلاب با استفاده از داده‌های سنجش از دور و مدل سلول‌های خودکار (مطالعه موردی بخشی از حوضه رودخانه تالار قائم‌شهر)، نشریه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیایی ایران، ۱: ۱۲۹ - ۱۳۰.
- عباسی، م. (۱۳۹۳). برنامه‌نویسی شیء‌گرا در ArcGIS با زبان برنامه‌نویسی Python، انتشارات نوآور.
- فهیمی‌فر، الف؛ بحری، م.ع. و بخشایش اقبالی، ن. (۱۳۸۵). تحلیل فرایند حرکت و لغزش زمین‌لغزه‌ها بر پایه مدل اتومات سلولی، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین‌شناسی، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- Abbasi, M. (2014). *Object-oriented programming in ArcGIS using Python language*, First edition, Noavar Publishing.
- 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*, 13: 81-88.
- Aboudagga, N. (2005). **Simulations by cellular automata of the flood in Littorallagoon areas.** Retrieved from (<http://www.isnoldenburg.de/projects/earsel-abstracts2005/ABS-Aboudagga-Nader.html>) in 2005/8/15.
- Alami, M.T; Malakan, L. and Ghorbani, M.A. (2015). **Modeling of rainfall-runoff in Lighvan Chai catchment using cellular Automata,** *Quantitative Geomorphology Research*, 4(4): 73-60.
- Batty, M.; Xie, Y. and Sun, Z. (1999). **Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata,** *Computers, Environment and Urban Systems*, 23: 205-233.
- Cai, X.; Li, Y.; Guo, X. and Wu, W. (2014). **Mathematical model for flood routing based on cellular automaton,** *Water Science and Engineering*, 7(2): 133-142.
- Cirbus, J. and Podhoranyi, M. (2011). **Cellular automata for earth surface flow simulation,** *GIS Ostrava*, 23. - 26. 1. 2011, Ostrava, pp. 1-8.
- Cirbus, J. and Podhoranyi, M. (2013). **Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process.** *Applied Mathematics & Information Sciences*, 7(6): 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 Resour Manage*, 21: 1601-1612.
- Dhawale, A.W. (2013). **Runoff estimation for Darewadi Watershed using RS and GIS,** *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 1(6): 46-50.

- Douvinet, J.; Delahaye, D. and Langlois, P. (2006). **Application of cellular automata modeling to analyze the dynamics of hyper-concentrated stream flows on loamy plateaux (Paris Basin, North-west France)**, *The 7th Hydro-Informatics Conference*, Sep 2006, France. AISH, 4000p., 2006. <halshs-00118890>, pp. 1-8.
- Douvinet, J.; Delahaye, D. and Langlois, P. (2007). **Use of cellular automata in physical geography**, *15th European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography*, Montreux, Switzerland.
- Ebrahimian, M. and Abdul Malek, I. (2009). **Application of natural resources conservation service curve number method for runoff estimation with GIS in the Kardeh Watershed, Iran**, *European Journal of Scientific Research*, 34 (4): 575-590.
- 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*, 18: 261-278.
- Fahimifar, A. ; Bahri, M.A. and Bakhshayesh Eghbali, N. (2007). **Analysis of movement and slip landslide process based on cellular automata model**, *The twenty-fifth meeting of Geological Sciences*, National Geological Organization.
- 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*, 15: 135-141.
- Hawkins, R.H.; Hjelmfelt, A.T. and Zevenbergen, A.W. (1985). **Runoff probability, storm depth and curve numbers**, *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 111: 330-340.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O. (1988). **Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis**, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 54(11): 1593-1600.
- Kenny, F. and Matthews, B. (2005). **A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology**, *Computers & Geosciences*, 31(6): 768-779.
- 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, visited 25 April 2011.
- 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*, 13: 25-33.
- Mishra, S.K. and Singh, V.P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*, Dordrecht, Germany: Kluwer Academic Publishers, ISBN1-4020-1132-6.
- Patil, J.P.; Sarangi, A.; Singh, O.P.; Singh, A.K. and Ahmad, T. (2008). **Development of a GIS Interface for Estimation of Runoff from Watersheds**, *Water Resources Management*, 22(9): 1221-1239.
- Ponce, V.M. and Hawkins, R.H. (1996). **Runoff curve number: Has it reached maturity?**, *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1): 11-19.
- Ramasubramaniam, K.; Pugazhendi, V.; Anitha, A. and Dawn, S.S. (2008). **Estimation of surface runoff using geospatial technology Kombai Micro Watershed – a case study**, *International Journal on Applied Bioengineering*, 2(1): 25-31.
- 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*, 5: 224-231.
- Shao, Q.; Weatherley, D.; Huang, L. and Baumgartl, T. (2015). **RunCA: A cellular automata model for simulating surface runoff at different scales**, *Journal of Hydrology*, 529: 816-829.
- Sanny Khani, H.; Khorasani, A. and Dinpajouh, Y. (2013). **Simulation of runoff and soil erosion using cellular automata**, *Journal OF Iran Water Research*, 6(11): 133-123.
- Schroeder, S.A.; Enz, J.W. and Larsen, J.K. (1990). **Antecedent moisture conditions for North Dakota runoff predictions North Dakota**, *Farm Research*, 48(0097-5338): 8-11.
- Thilagavathi, G.; Tamilenth, S.; Ramu, C. and Baskaran, R. (2011). **Application of GIS in flood hazard zonation studies in Papanasam Taluk, Thanjavur District, Tamilnadu**. *Advances in Applied Science Research*, 2(3): 574-585.

- 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., E-7 (401): 256.
- Wu, H.; Yi, Y. and Chen, X. (2005). **HydroCA: a watershed routing model based on GIS and cellular automata**, *Proceedings- Spie The International Society for Optical Engineering*, 6199: 61990Q.
- Xiao, B.; Wang, Q.H.; Fan, J.; Han, F.P. and Dai, Q.H. (2011). **Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity**, *Pedosphere*, 21(6): 738-749.
- Zhan, X. and Huang, M.L. (2004). **ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps**, *Environmental Modeling & Software*, 19: 875-879.
- Zhao, G.J.; Gao, J.F.; Tian, P. and Tian, K. (2009). **Comparison of two different methods for determining flow direction in catchment hydrological modeling**, *Water Science and Engineering*, 2(4): 1-15.
- Ziaeian Firouzabadi, P.; Mousavi, A.; Shakiba, A.R. and Naseri, H.R. (2004). **Simulation of flood event using remote sensing data and cellular automata model (Case study: part of the Talar river catchment in Ghaemshahr city)**, *Journal of Iran Geographical Society*, 1: 129-130.