مجله پژوهش آب ایران
سال ششم/ شماره یازدهم/ پاییز و زمستان ۱۳۹۱ (۱۲۳-۱۳۱)

شبیه‌سازی رواناب و فرسایش خاک با استفاده از روش اتوماتای سلولی

هادی ثانی‌خانی[۱*]، علی خراسانی[۲] و یعقوب دین‌پژوه[۳]

چکیده

فرسایش و رواناب ناشی از بارش در حوضه‌های آبخیز از موضوعات مهم مدیریت منابع طبیعی است. روش اتوماتای سلولی یک سیستم فیزیکی ایده‌آل است که قابلیت شبیه‌سازی ساده از یک فرآیند پیچیده نظیر فرسایش و رواناب را دارد. این تحقیق با هدف مطالعه کارآیی روش اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی فرسایش و رواناب ناشی از بارش انجام شد. این روش در یک کرت آزمایشی واقع در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی هسته‌ای در زعفرانیه کرج استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان دادند که اندازه سلول‌ها، پارامترهای هیدرولیکی، انتخاب گام زمانی مناسب و تعداد تکرارها تأثیر به سزایی در نتایج شبیه‌سازی داشتند. در مقایسه نتایج محاسباتی و مشاهداتی، مقادیر ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا برای رواناب به ترتیب برابر ۰/۹۸ و ۰/۰۳۴ و برای تولید رسوب به ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۰۴۵ بودند. نتایج به دست آمده نشان دادند که روش اتوماتای سلولی می‌تواند به عنوان یک روش دقیق و کاربردی برای پیش‌بینی میزان فرسایش و رواناب ناشی از بارش به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: اتوماتای سلولی، تولید رواناب، زعفرانیه (کرج)، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، فرسایش خاک.

ارجاع: 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):۱۲۳-۱۳۱.

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی منابع آب، عضو باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ساوه، ساوه.
۲- کارشناس خاکشناسی، سازمان انرژی اتمی، گروه پژوهشی کشاورزی هسته‌ای، کرج.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.
*** نویسنده مسئول: hsanikhani12@gmail.com**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۱۰/۱۱

مقدمه

تخریب زمین در اثر فرسایش آبی خطری جدی در حفاظت از منابع آب و خاک محسوب می‌شود (مارتینز منا و همکاران، ۲۰۰۸). فرسایش آبی یک پدیده پیچیده با مشخصات غیرخطی و رفتارهای دینامیک است. برای ارزیابی و پیش‌بینی فرسایش خاک روش‌های تجربی و مدل‌های فیزیکی زیادی ارایه شده و به طور وسیع به کار گرفته شده‌اند (بویان و همکاران، ۲۰۰۲). از روش‌های تجربی ارایه شده می‌توان به رابطه جهانی فرسایش خاک (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) و رابطه اصلاح شده آن (رینارد و همکاران، ۱۹۹۷) اشاره کرد. این روش‌ها تنها شدت متوسط فرسایش سالانه خاک را بسته به انتخاب مقادیر ورودی برای میزان فرسایش دهندگی بارش و قابلیت فرسایش پذیری خاک تخمین می‌زنند (مورگان و همکاران، ۱۹۹۸). در مقابل، از مدل‌های فیزیکی، می‌توان به مدل‌های CREAMS (نیسل، ۱۹۸۰)، ANSWERS (بیسلی و همکاران، ۱۹۸۰)، WEPP (نیرینگ و همکاران، ۱۹۸۹) و EUROSEM (مورگان و همکاران، ۱۹۹۸) اشاره کرد. این مدل‌ها قابلیت تخمین رویدادهای بارش را به صورت مجزا دارند و جزییات بیشتری از فرآیند فرسایش خاک ارایه می‌دهند. اما این مدل‌ها در تخمین صحیح و واقعی فرسایش خاک در نواحی شیبدار ضعیف عمل می‌کنند. علت این مسأله این است که در این مدل‌ها فرض می‌شود که شیارها از قبل وجود دارند و امکان توسعه طولی شیارها در این مدل‌ها وجود ندارد. از دیگر محدودیت‌های مدل‌های فیزیکی می‌توان به نیازمندی آن‌ها به پارامترهای ورودی زیاد اشاره کرد (فاویس مرتلاک، ۲۰۰۰).

روش اتوماتای سلولی[1] از جمله روش‌های خود سازمانده و کارآمد برای شبیه‌سازی دینامیکی فرآیندهای غیرخطی نظیر فرآیند بارش- رواناب و فرسایش است. این مدل یک مدل توزیعی[2] بوده و قابلیت شبیه‌سازی دینامیکی پدیده‌های مختلف را دارد. در روش اتوماتای سلولی از قوانین ساده فعل و انفعالی منطقه‌ای بسته به ماهیت پدیده مورد بررسی استفاده می‌شود (تافولی و مارگولوس، ۱۹۸۷). این روش توسط محققین مختلف برای شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف به کار گرفته شده است. مورای و پائولا (۱۹۹۷) برای بررسی رفتار رودخانه‌های حاشیه‌ای، رینالدی و همکاران (۲۰۰۷) برای شبیه‌سازی جریان سطحی در حوضه آبخیزی در آرژانتین، کاپولا و همکاران (۲۰۰۷) برای استخراج شبکه زهکشی جریان و شبیه‌سازی بارش و راوازانی و همکاران (۲۰۱۱) برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از اتوماتای سلولی استفاده کردند. در همه این مطالعات، کارآیی بالای این روش نشان داده شده است.

مطالعات محدودی در خصوص کاربرد این روش در شبیه‌سازی فرسایش انجام شده است. پیلوتی و مندانی (۱۹۹۷) برای بررسی میزان فرسایش و انتقال رسوبات ناشی از جریان ورقه‌ای و آرام از روش اتوماتای سلولی استفاده کرده و عملکرد مدل را قابل قبول دانستند. مطالعات انجام شده توسط فاویس مورتلاک و همکاران (۲۰۰۰) برای بررسی فرسایش شیاری با استفاده اتوماتای سلولی حاکی از قابلیت بالا و نتایج دقیق این مدل در پیش‌بینی میزان فرسایش شیاری بود. لو (۲۰۰۱) برای شبیه‌سازی فرسایش و تغییرات سطح زمین ناشی از تغییرات آب و هوایی از مدل توزیعی اتوماتای سلولی استفاده کرد و نتایج به دست آمده را رضایت‌بخش گزارش نمود و چنین عنوان کرد که روش اتوماتای سلولی می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش‌های فیزیکی در مطالعات فرسایش باشد. تینگ و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی میزان رواناب و فرسایش با استفاده از اتوماتای سلولی پرداختند. آن‌ها مطالعات خود را در دو کرت با مساحت ۲۰ متر مربع و شیب ۲۵ درجه انجام دادند و خطای حاصل از میزان رسوب تولید شده در کرت‌ها را ۵ و ۲۵ درصد گزارش کردند. با بررسی مطاطعات گذشته می‌توان نتیجه گرفت که پژوهش‌های انجام شده با روش اتوماتای سلولی در زمینه هیدرولوژی و منابع آب محدود می‌باشد. همچنین در بیشتر مطالعات انجام شده با استفاده از مدل اتوماتای سلولی، رفتار کیفی پدیده مورد توجه بوده و کمتر به مطالعه کمی پدیده پرداخته شده است. لذا این تحقیق با هدف بررسی میزان رواناب و رسوب تولید شده ناشی از ایجاد بارش مصنوعی در یک کرت آزمایشی با استفاده روش اتوماتای سلولی انجام شد. مطالب ارایه شده در این تحقیق در قالب بخش‌های مختلف و به شرح زیر است:

ابتدا مبانی نظری روش اتوماتای سلولی و قوانین انتقالی حاکم بر حرکت رواناب و تولید رسوب پرداخته می‌شود. سپس محدوده مورد آزمایش و نحوه انجام آزمایش‌ها و

1- Cellular Automata
2- Distributed

معیارهای ارزیابی تحقیق تشریح می‌شود. در نهایت به بحث در خصوص نتایج به دست آمده از تحقیق پرداخته شده و نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارایه می‌شود.

مواد و روش‌ها

مبانی نظری اتوماتای سلولی و قوانین انتقال

مدل اتوماتای سلولی یک سیستم فیزیکی ایده‌آل است که در فضای زمان و مکان گسسته‌سازی می‌شود. مهمترین ویژگی این مدل قابلیت ارایه یک شبیه‌سازی ساده از یک فرآیند و سیستم پیچیده است. مدل اتوماتای سلولی چهار مؤلفه دارد که به صورت معادله ۱ ارایه می‌شود:

$$A=(G,E,U,T) \qquad (۱)$$

در این معادله G معرف فضای شبکه‌بندی است که کل محدوده مورد مطالعه را تحت پوشش قرار می‌دهد و شامل یک سری از سلول‌های فضایی (c) با مشخصات هندسی یکسان و مشخصه‌های خاک مورد نظر می‌باشد. پارامتر E نمایانگر محدوده مجموعه سلول‌های فضایی، U معرف مجموعه سلول‌های همسایه (مجاور) و T نشان دهنده قانون انتقال جبری است. هر سلول فضایی با بردار مختصات متناظر خود (x_c, y_c) شناخته می‌شود. بنابراین فضای شبکه‌بندی (G) با ابعاد M×N که M اندازه ردیف و N اندازه ستون است در یک صفحه دو بعدی (Z^2) به صورت معادله زیر نشان داه می‌شود:

$$G=\{c(x_c,y_c)|c\in Z^2, x_c<M, y_c<N\} \qquad (۲)$$

در گام زمانی t در مدل اتوماتای سلولی، موقعیت سلول فضایی (E') با توجه موقعیت سلول‌های مجاور آن و موقعیت خود سلول در گام زمانی قبلی (t-1) با استفاده از تابع نگاشت (f) تعیین می‌شود که در معادله ۳ نشان داده شده است:

$$T: f<E(c,t-1),U(c)>E\rightarrow E'(c,t) \qquad (۳)$$

موقعیت کلیه سلول‌ها به طور همزمان با توجه به قوانین انتقال در هنگام اجرای مدل تعیین می‌شود (باستین و همکاران، ۲۰۰۲).

در مدل اتوماتای سلولی از قوانین انتقال که بر پایه اصول هیدرولیکی و هیدرولیک رسوب بنا شده‌اند، برای تبادل آب و رسوب بین سلول‌ها استفاده می‌شود. در این مدل مشخصات مکانی و ویژگی‌های خاک در درون یک سلول یکسان و یکنواخت در نظر گرفته می‌شود. بیلان آب برای یک سلول منفرد که دارای بردار مختصات z می‌باشد، از معادله زیر تعیین شد:

$$R(z)+Q(z)-I(z)-D(z)=0 \qquad (۴)$$

که در آن، R میزان بارش (میلی‌متر)، Q دبی جریان ورودی (میلی‌متر)، I میزان تلفات از طریق نفوذ (میلی‌متر) و D میزان تلفات ناشی از برگاب و گودال‌های سطحی است.

طبق معادله ارایه شده توسط شزی- مانینگ، سرعت جریان (V) بین دو سلول مجاور از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$V=\frac{h^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n} \qquad (۵)$$

که در آن، h عمق آب (متر)، S شیب سطح آب و n ضریب زبری مانینگ است. بنابراین میزان آب تبادلی بین دو سلول مجاور (Q) در بازه زمانی Δt از معادله زیر به دست می‌آید:

$$Q=\frac{L.\Delta t.h^{\frac{5}{3}}S^{\frac{1}{2}}}{n} \qquad (۶)$$

که در آن، L طول سلول (متر) است.

تعیین جهت جریان بر اساس فرضیه انتقال آب از یک سلول با بار پتانسیل بزرگ‌تر به سلول مجاور دارای بار پتانسیل کوچکتر انجام شد. اگر در سلول‌های مجاور، کمترین بار پتانسیل در بیش از یک سلول وجود داشته باشد، تعیین جهت جریان بر اساس قوانین احتمالاتی و به صورت تصادفی انجام شد.

در معادله ۴ میزان تلفات ناشی از ذخیره گودالی ثابت در نظر گرفته شد و میزان نفوذ بر اساس معادله هورتون و بر اساس معادله زیر تعیین شد:

$$f(t)=\left[f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}\right] \qquad (۷)$$

که در آن، f(t) شدت نفوذ در زمان t، f_c شدت نفوذ نهایی، f_0 شدت نفوذ اولیه و k یک عدد ثابت است. لازم به ذکر است که برای تعیین ضرایب معادله هورتون، آزمایش‌های نفوذ با استفاده از روش استوانه مضاعف در محدوده کرت مورد بررسی، انجام شد.

ذرات خاک قرار گرفته روی نواحی شیبدار هنگامی فرسایش می‌یابند که مجموع نیرو بالابرنده و نیروی کششی جریان بزرگتر از مؤلفه نیروی جاذبه باشد. در نظر گرفتن نکته ذکر شده در مدل‌های ریاضی بسیار مشکل است، چرا که لازم است تا عدد رینولدز محاسبه شود.

بنابراین در اینجا فرض شد که انتقال رسوبات هنگامی صورت می‌گیرد که جریان آب از یک سلول به سلول

مجاور وجود داشته باشد. میزان رسوب انتقالی به توانایی جریان آب بستگی دارد و از معادله زیر استفاده شده است:

$$S = pQV^q \quad (۸)$$

که در آن، S میزان رسوب انتقالی (کیلوگرم)، p و q نیز ضرایب ثابت مربوط به ظرفیت انتقال رسوبات هستند (تینگ و همکاران، ۲۰۰۹).

آزمایش‌های انجام شده

برای بررسی عملکرد روش اتوماتای سلولی جهت شبیه‌سازی فرسایش خاک و رواناب آزمایش‌هایی در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در مزرعه تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی، پزشکی و صنعتی هسته‌ای واقع در زعفرانیه کرج انجام شد. یک کرت آزمایشی در مزرعه با ابعاد ۳ در ۱۲ متر در نظر گرفته شد. کرت مورد نظر با استفاده موقعیت‌یاب (GPS[1]) و یک عدد متر فلزی با دقت ۱ میلی‌متر مورد پیمایش قرار گرفت و مختصات و ارتفاع نقاط مختلف آن تعیین شد. بر اساس اطلاعات به دست آمده نقشه خطوط ارتفاعی در محدوده مورد مطالعه تعیین شد. شیب کرت مورد نظر برابر ۱۵/۴ درصد بود. نوع خاک در کرت مطالعاتی از نوع لومی بوده و تحت کشت درختان سیب قرار داشت. به منظور انجام آزمایش‌ها، محدوده اطراف کرت توسط دیواره فلزی محدود شد. برای ایجاد بارش مصنوعی از یک نوع آبپاش مخصوص آبیاری بارانی کلاسیک که ارتفاع پایه آبپاش برابر ۵ متر بود استفاده شد. شدت پاشش آب توسط فشار آب و نصب فشارسنج در مقطع لوله قبل از ورود آب به آبپاش تنظیم می‌شد. میزان رواناب ناشی از بارش و همچنین میزان تولید رسوب در اثر بارش در انتهای کرت با در نظر گرفتن ظروف مخصوصی در بازه‌های زمانی ۲ دقیقه اندازه‌گیری شد. مشخصات کلی آزمایش انجام شده در جدول ۱ آورده شده است. شدت و مدت بارش با توجه به مطالعات تینگ و همکاران (۲۰۰۹) در نظر گرفته شد. همچنین تعداد اندازه‌گیری‌ها انجام شده با توجه به بازه‌های زمانی اندازه‌گیری (۲ دقیقه) و تداوم بارش در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی فرسایش و رواناب ناشی از بارش با استفاده از روش اتوماتای سلولی، محدوده کرت مورد نظر به ۱۵۰ در ۳۰ سلول مربعی شکل با اندازه طول ۰/۱ متر تقسیم و شبکه‌بندی شد. ارتفاع هر سلول با استفاده از نقشه رقوم ارتفاعی مشخص شد. سلول‌های قرار گرفته روی مرز شبکه (به جز وجه پایینی شبکه) به عنوان مرزهای بسته در نظر گرفته شدند و هیچ گونه آب یا رسوبی قابل عبور از مرزهای این سلول‌ها نبود. سلول‌های باز در خط مرزی زیرین شبکه قرار داشتند. آب و رسوبات از طریق این سلول‌های باز عبور کرده و در انتهای کرت جمع شده و قابل اندازه‌گیری بودند. هر سلول در فضای شبکه ۸ سلول در مجاورت خود داشت. نحوه انتقال آب و رسوبات در سلول‌ها بر اساس معادلات ارایه شده در بخش‌های قبلی صورت می‌گرفت.

جدول ۱- خلاصه ای از مشخصات آزمایش‌های انجام شده

متغیر مورد نظر	مقدار
شدت بارش (میلی‌متر بر ساعت)	۵۰
مدت بارش (دقیقه)	۴۵
تعداد اندازه‌گیری	۲۳
میزان رواناب (متر مکعب)	۰/۹
میزان تولید رسوب (کیلوگرم)	۰/۶

با توجه به اینکه در روش اتوماتای سلولی هر سلول به عنوان یک جزء مستقل عمل می‌کند، لذا پارامترهای هر سلول بر اساس شرایط ناحیه‌ای خاک تغییر می‌کنند. در این تحقیق، از آنجا که محدوده مورد مطالعه یک محدوده آزمایشی برای بررسی عملکرد روش اتوماتای سلولی بود، مقادیر پارامترها برای کلیه سلول‌ها یکسان در نظر گرفته شد. مقادیر پارامترها در جدول ۲ ارایه شده است. در این جدول، t_m معرف مدت زمان شبیه‌سازی در مدل و پارامتر N_e نشان دهنده تعداد تکرار مؤثر است. منظور از تعداد تکرار مؤثر، تعداد تکراری است که به ازای آن مقدار رواناب و رسوب تولید شده مقدار ثابتی پیدا می‌کند. ضریب زیری مانینگ با توجه به دانه‌بندی ذرات خاک و پوشش گیاهی از جداول مربوطه محاسبه شد (میدمنت، ۱۹۹۳). ضرایب معادله انتقال رسوب شامل p و q، با مشخص شدن مقدار سرعت، دبی جریان و مقدار رسوب در هر گام زمانی و برقرای رابطه رگرسیونی بین متغیرها، تعیین شد.

به لحاظ تئوری، تعیین گام زمانی باید با توجه به این نکته صورت گیرد که سرعت جریان در مدل شبیه‌سازی برابر مقدار واقعی سرعت در کرت آزمایشی باشد. اما در مدل اتوماتای سلولی، فاصله جابه‌جایی جریان آب با توجه به طول سلول در یک گام زمانی به دلیل در نظر گرفتن اثرات همزمانی محدود می‌شد.

1- Global Positioning System

جدول ۲- مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده برای سلول‌ها برای مدل‌سازی

پارامتر مورد نظر	مقدار
سرعت نفوذ اولیه (میلی‌متر بر دقیقه)	۱۸
سرعت نفوذ نهایی (میلی‌متر بر دقیقه)	۴
K	۰/۶۹
ضریب زبری مانینگ	۰/۰۳
Q	۲/۷
P	۱/۲
Tm	۴۵
Ne	۲۵۰

با توجه به معادله ۵ مقدار واقعی سرعت جریان در زمین‌های شیبدار به عمق آب و شیب سطح آب بستگی داشته و تغییرات آن قابل توجه است. بنابراین برقراری برابری بین سرعت جریان در شبیه‌سازی و سرعت واقعی جریان بسیار مشکل است. در این تحقیق به منظور ساده‌سازی فرآیند شبیه‌سازی، گام زمانی و مدت زمان تکرار مدل (N) برمبنای چند نکته در نظر گرفته شد. اول اینکه در تمام تکرارها، آب موجود در سلول‌های بالایی بعد از اتمام بارش می‌تواند از مرز باز سلول‌ها وارد شود. دوم اینکه، کل بارش ورودی شبیه‌سازی شده گام زمانی مدل برای همه تکرارها برابر مقدار بارش مؤثر در نظر گرفته شد. سوم اینکه انتخاب تعداد تکرار نباید افزایش قابل توجهی بر روند و پیچیدگی محاسبات داشته باشد. علاوه بر این، مدت زمان شبیه‌سازی در مدل (t_m) بر حسب ثانیه از طریق معادله زیر با مدت زمان واقعی (t_r) بر حسب ثانیه ارتباط داشت:

$$t_r = \frac{t_m}{t_s}.\frac{60T}{N_e} \qquad (۹)$$

که در آن، T مدت زمان واقعی تداوم بارش در آزمایش بر حسب دقیقه است (تینگ و همکاران، ۲۰۰۹). همچنین مقادیر تلفات ناشی از برگاب و ذخیره گودالی ثابت و به ترتیب برابر ۰/۱۲ و ۰/۱۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد که انتخاب این مقادیر بر اساس خصوصیات خاک و گیاه کشت شده در محدوده مورد بررسی صورت گرفت.

برای هر سلول در یک گام زمانی در مدل، ابتدا مقدار بارش دریافتی و مقدار نفوذ و تلفات ناشی از ذخیره گودالی و برگاب محاسبه و سپس با استفاده از معادله بیلان، عمق آب سطحی تعیین شد. آنگاه در سلول‌های مجاور، سلول با کمترین بار پتانسیل انتخاب و بر این اساس جهت جریان تعیین شد. سرانجام مقدار آب انتقال داده شده با استفاده از معادله ۶ و مقدار رسوب انتقالی از طریق معادله ۸ تعیین شد. با طی مراحل فوق برای هر سلول، مقدار کل رواناب و رسوبات انتقالی در خروجی تعیین شد. برای انتقال جریان و رسوب از سلولی به سلول دیگر، چنانچه چندین سلول با کمترین بار پتانسیل وجود داشته باشند، یکی از سلول‌ها به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. لذا با توجه به این که ماهیت روش اتوماتای سلولی، تصادفی است، به منظور بررسی و صحت اطمینان از روند شبیه‌سازی، مدل اتوماتای سلولی سه بار اجرا شد که پارامترهای مدل در کلیه اجراها یکسان بودند.

معیارهای ارزیابی روش‌های مورد استفاده

برای ارزیابی مدل مورد نظر، از نمایه‌های ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا بهره برده شد. با توجه به اینکه ضریب همبستگی (R)، نشان دهنده اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی و همچنین واریانس آن‌ها است و حساسیت زیادی به وجود داده‌های پرت دارد، لذا به کارگیری ضریب همبستگی به تنهایی کافی نبوده و علاوه بر آن جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) که شاخص مناسب‌تری برای ارزیابی خطای مدل است، مورد توجه قرار گرفت. ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا با استفاده از معادلات زیر محاسبه شدند:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \qquad (۱۰)$$

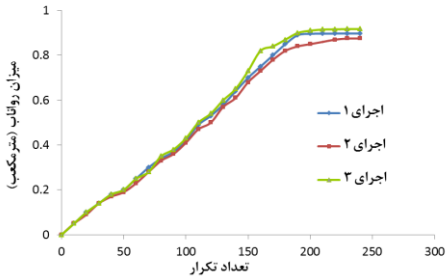
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-x_i\right)^2}{n}} \qquad (۱۱)$$

که در آن، R ضریب همبستگی، RMSE جذر میانگین مربعات خطا، x_i مقدار مشاهده شده در گام زمانی i ام، y_iمقدار شبیه‌سازی شده در همان گام زمانی، $\bar{x}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و $\bar{y}$ نیز میانگین مقادیر شبیه‌سازی هستند (لگتیس و مک کاب، ۱۹۹۹).

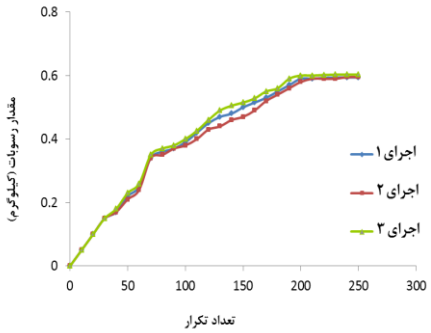
نتایج و بحث

نمودار تجمعی رواناب و رسوب تولید شده به ازای اجراهای مختلف مدل نسبت به تعداد تکرار (N) در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها، در شروع

بارش، مقدار جریان شبیه‌سازی شده در مدل اتوماتای سلولی حالت ناپایدار و نوسانی از خود نشان می‌دهد و با گذشت زمان حالت پایداری به خود می‌گیرد. با افزایش تعداد تکرار الگوی فرسایش خاک نیز حالت پایدارتری از خود نشان می‌دهد. مقدار رواناب و رسوبات به ازای اجراهای مختلف مدل، تغییرات نسبتاً کمی را نشان می‌دهد و مقدار نهایی رواناب و رسوبات در اجراهای مختلف تقریباً یکسان است. شاید علت این مسأله به دلیل یکسان بودن مشخصات هندسی سلول‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده در هر اجرا باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، تعداد تکرار مؤثر (N_e) برابر با ۲۰۰ به دست آمد. با توجه به نمودارها کاملاً مشخص است که بعد از ۲۰۰ تکرار مقدار رواناب و رسوب تولید شده مقدار ثابتی پیدا کرده و تغییرات آن‌ها تقریباً برابر صفر است.

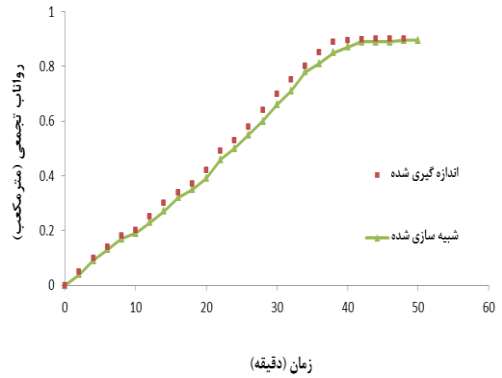


شکل ۱- مقادیر رواناب تجمعی به ازای اجراهای مختلف مدل

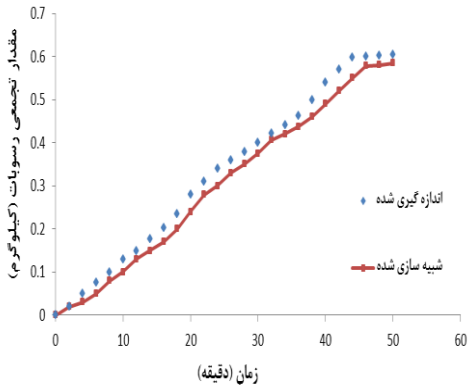


شکل ۲- مقادیر رسوبات تجمعی به ازای اجراهای مختلف مدل

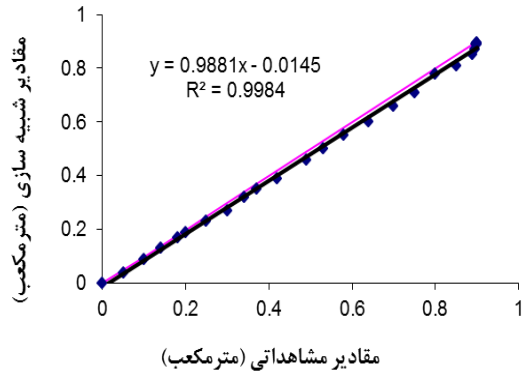
مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی توسط مدل اتوماتای سلولی و مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامترهای رواناب و رسوب تولید شده به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارایه شده است. همچنین نمودار پراکندگی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رواناب و رسوب تولید شده در شکل‌های ۵ و ۶ همراه با رابطه رگرسیونی و ضریب تعیین (R^2) نسبت به محور ۴۵ درجه نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل اتوماتای سلولی و مقادیر اندازه‌گیری شده، مشخص شد که مدل اتوماتای سلولی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده روند مشابهی را برای هر دو پارامتر رواناب و رسوب تولیده شده نشان می‌دهد. مقدار تجمعی رواناب و رسوبات اندازه‌گیری شده با افزایش مقدار بارش، افزایش قابل توجهی داشت. در پایان مدت زمان آزمایش، مقدار رواناب برابر ۰/۹ متر مکعب و مقدار رسوبات برابر ۰/۶ کیلوگرم به دست آمدند.



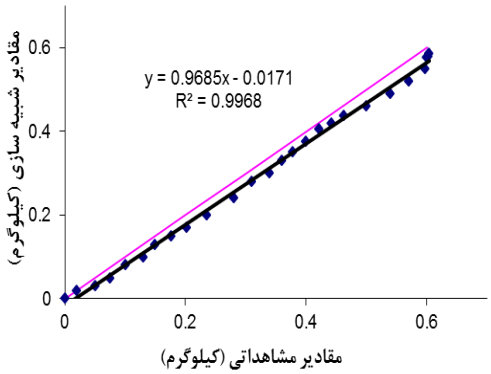
شکل ۳- مقادیر رواناب تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده



شکل ۴- مقادیر رسوبات تجمعی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده



شکل ۵- نمودار پراکندگی مقدار مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای رواناب



شکل ۶- نمودار پراکندگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای تولید رسوب

با توجه به نمودارهای پراکندگی مقادیر رواناب و رسوب تولید شده و با فرض رابطه رگرسیونی به شکل $y = a_0 + a_1 x$، هر چه مقدار ضرایب a_0 و a_1 به ترتیب به صفر و یک، نزدیکتر باشد، نشان از تطبیق بهتر مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است که این مسأله هم برای داده‌های رواناب و هم مقادیر رسوب تولید شده کاملاً مشهود است.

همچنین در آزمایش‌های انجام شده بین مقادیر رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مدل در زمان‌های پایانی اختلافاتی وجود داشت. این اختلاف ناشی از قوانین ناحیه‌ای در نظر گرفته شده برای سلول‌ها، تفاوت سرعت در مدل شبیه‌سازی و مقدار واقعی سرعت در آزمایش‌ها و همچنین استفاده از روش مقیاس زمانی خطی در مدل است. با توجه به فضای شبکه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق، فضای باز سلول‌ها همواره دارای کمترین بار پتانسیل در مقایسه با سلول‌های مجاور می‌باشند. بنابراین، هنگامی که مقدار شدت بارش دریافتی بزرگتر از مقدار سرعت نفوذ آب در خاک باشد، آب می‌تواند از طریق سلول‌های باز در شبکه جریان یابد. با توجه به اینکه مقدار رواناب در ابتدای آزمایش بسیار ناچیز بود، مقدار خاک فرسایش یافته در زمان‌های اولیه در مدل شبیه‌سازی نیز قابل توجه نبود. برای بررسی کارآیی روش گرفته شده در این تحقیق معیارهای مختلفی برای تعیین خطا به کار گرفته شد که در جدول ۳ ارایه شده است.

با توجه به مقادیر جدول ۳ مقدار رواناب و رسوبات اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده تطابق خوبی را با یکدیگر نشان دادند. با توجه به نتایج به دست آمده و معیاری در نظر گرفته شده برای بررسی خطای مدل، عملکرد مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی رواناب در مقایسه با شبیه‌سازی رسوبات اندکی بهتر بود که این تفاوت چندان محسوس نیست. به نظر می‌رسد، مهمترین پارامترهای تأثیرگذار در نتایج شبیه‌سازی مدل، ضریب زبری مانینگ و ظرفیت انتقال رسوبات هستند که تعیین کننده فرآیند تبادلات آب و رسوب بین سلول‌های مجاور می‌باشند. بر اساس تحقیقات تینگ و همکاران (۲۰۰۹) انتخاب پارامترهای متفاوت نتایج کاملاً متفاوتی را ارایه می‌دهد. در تحقیقات تینگ و همکاران (۲۰۰۹) در دو کرت آزمایشی به ازای بارش‌های با تداوم و شدت‌های متفاوت، مقدار عددی معیار جذر میانگین مربعات خطا برای رواناب و رسوب تولید شده به ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۰/۰۶۵ به دست آمد که این مقادیر نتایج به دست آمده در این تحقیق را تأیید می‌کند. به طور کلی به نظر می‌رسد که خطای ناشی از شبیه‌سازی درمدل، ناشی از اندازه سلول‌ها و همچنین پارامترهای هیدرولیکی فرض شده در مدل است. با توجه به یکسانی پارامترهای هیدرولیکی برای سلول‌ها در این تحقیق که ناشی از کوچکی ابعاد ناحیه مورد بررسی (کرت آزمایشی) و تغییرات مکانی ناچیز سلول‌ها است، می‌توان نتیجه گرفت که خطای شبیه‌سازی بیشتر تحت تأثیر اندازه سلول‌ها می‌باشد. هر چه اندازه سلول‌ها در مدل کوچکتر در نظر گرفته شود، دقت مدل بیشتر شده و نتایج دقیق‌تری حاصل می‌شود. البته لازم به ذکر است که با کوچکتر شدن اندازه سلول‌ها مدت زمان اجرای مدل نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۳- متغیرهای آماری بکار گرفته شده جهت تعیین دقت روش استفاده شده

متغیر موردنظر	ضریب همبستگی	جذر میانگین مربعات خطا
مقدار رواناب	۰/۹۸	۰/۰۳۴
مقدار رسوبات	۰/۹۷	۰/۰۴۵

نتیجه‌گیری

تعیین مقدار دقیق رواناب و رسوب تولید شده در حوضه‌ها به دلیل نحوه کارکرد پیچیده حاکم بر این پدیده‌ها همواره مشکل بوده و مورد توجه محققین است. در این تحقیق روش اتوماتای سلولی با توجه به قابلیت‌های بالای آن در مدل‌سازی دینامیک مکانی و زمانی، برای شبیه‌سازی رواناب و فرسایش ناشی از بارش در یک کرت آزمایشی با شیب تند به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که مقدار رواناب و رسوب تولید شده به ازای اجراهای مختلف مدل، تغییرات نسبتاً

کمی داشته و مقدار نهایی رواناب و رسوب تولید شده در اجراهای مختلف تقریباً یکسان بود که علت آن شاید به دلیل یکسان بودن مشخصات هندسی سلول‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده در هر اجرا باشد. با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل اتوماتای سلولی و مقادیر اندازه‌گیری شده، مشخص شد که این مدل در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده روند مشابهی را برای هر دو پارامتر رواناب و مقدار رسوبات نشان می‌دهد. مقدار تجمعی رواناب و رسوبات اندازه‌گیری شده با افزایش مقدار بارش، افزایش قابل توجهی داشت.

دقت شبیه‌سازی در این روش به شدت تحت تأثیر اندازه سلول‌ها، پارامترهای هیدرولیکی، اندازه گام زمانی انتخابی و تعداد تکرارها می‌باشد که البته لازم است مطالعات بیشتری درخصوص بررسی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای تأثیرگذار انجام گیرد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده حاکی از دقت و کارآیی بالای این مدل در پیش‌بینی مقادیر رواناب و فرسایش خاک ناشی از بارش بود و این مدل می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های فیزیکی در تعیین مقدار رواناب و رسوب تولید شده باشد.

بررسی کارآیی و دقت مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی میزان رواناب و تولید رسوب در مقیاس حوضه و همچنین بررسی عدم قطعیت متغیرهای هیدرولیکی، بافت خاک و شیب زمین روی عملکرد مدل، می تواند در تحقیقات آتی بررسی شود. همچنین در تحقیقات جدید استفاده از مدل‌های هیبرید و ترکیبی نظیر مدل ترکیبی اتوماتای سلولی و تئوری مارکوف مورد توجه محققان قرار گرفته است که این نیز می‌تواند در پژوهش‌های آتی در قالب کرت‌های آزمایش و یا در مقیاس حوضه بررسی شود.

منابع

1. Bastien C. Alexandre D. Alexandre M. and Pascal L. 2002. Cellular automata and lattice Boltzmann techniques: An approach to model and simulate complex systems. Advances Complex Systems. 5(2-3):103-246.
2. Beasley D. B. Huggins L. F. and Monke E. J. 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. Trans. American Society of Agricultural Engineers. 23:938-944.
3. Bhuyan S. J. Kalita P. K. Janssen K. A. and Barnes P. L. 2002. Soil loss predictions with three erosion simulation models. Environmental Modelling & Software. 17:137-146.
4. Coppola E. Tomassetti B. Mariotti L. Verdecchia M. and Visconti G. 2007. Cellular automata algorithms for drainage network extraction and rainfall data assimilation. Hydrological Sciences Journal. 52(3):579-592.
5. Favis-Mortlock D. Boardman J. Parsons J. and Lascelles B. 2000. Emergence and erosion: a model for rill initiation and development. Hydrological Processes. 14:2173-2205.
6. Knisel W. G. 1980. CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. USDA Conservation Research Report. No. 26.
7. Legates D. R. and McCabe G. J. 1999. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research. 35(1):233-241.
8. Luo W. 2001. LANDSAP: A coupled surface and subsurface cellular automata model for landform simulation. Computers and Geosciences. 27:363-367.
9. Maidment D. R. 1993. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill. 1423 pp.
10. Martinez-Mena M. Lopez J. Almagro M. Boix-Fayos C. and Albaladejo J. 2008. Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of South-East Spain. Soil and Tillage Research. 99(1):119-129.
11. Morgan C. Quinton N. Smith E. Govers G. Poesen A. Auerswald K. Chisci G. Torri D. and Styczen E. 1998. The European, Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. Earth Surface Processes and Landforms. 26(3):527-544.
12. Murray A. B. and Paola C. 1997. Properties of cellular braided-stream model. Earth Surface Processes and Landforms. 22:1001-1025.
13. Nearing M. A. Foster G. R. Lane L. J. and Finkner S. C. A. 1989. Process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. Trans. American Society of Agricultural Engineers. 32:1587-1593.
14. Pilotti M. and Menduni G. 1997. Application of lattice gas techniques to the study of sediment erosion and transport caused by laminar sheet flow. Earth Surface Processes and Landforms. 22(9):885-893.
15. Ravazzani G. Rametta D. and Mancini M. 2011. Macroscopic cellular automata for groundwater modelling: A first approach. Environmental Modelling & Software. 26:634-643.
16. Renard G. Foster R. Weesies A. McCool K. and Yoder C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Handbook No.703. USDA. 49 pp.
17. Rinaldi P. R. Dalponte D. D. Venere M. J. and Clausse A. 2007. Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains. Simulation Modelling Practice and Theory.

15:315-327.
18. Ting M. Cheng-Hu Z. and Ginag-Gu C. 2009. Modeling of hillslope runoff and soil erosion at rainfall events using cellular automata approaph. Pedosphere. 19(6):711-718.
19. Toffoli T. and Margolus N. 1987. Cellular Automata Mechanics: A New Environment for Modeling. MIT Press series in scientific computation. 200 pp.
20. Wischmeier W. H. and Smith D. D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses a Guide to conservation planning. Agriculture Handbook, USD. 67 pp.