

Cellular Automata Model for Simulating Surface Runoff


Iman Jomeh Beydokhti¹, Mahmoud Faghfour Maghrebi^{2*}, Mohammad Reza Jaefarzadeh³

1- PhD student in Civil Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

2-Professor of Civil Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

3- Professor of Civil Engineering Department, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

* maghrebi@um.ac.ir

Received: 31 January 2022, Accepted: 11 April 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Understanding hydrological phenomena is essential for the optimal use of water resources. Surface runoff is an important part of the hydrological cycle. Accurate runoff estimation can make a significant role in water engineering and the proper utilization of resources for the various uses of agriculture, drinking, hydropower and the environment. Therefore, the use and development of accurate and reliable methods for runoff modeling of the catchments is essential. One of the new methods of runoff calculations is cellular automata. Cellular automata is a fundamental method for simulating complex systems.

Methodology: In cellular automata, the lattice space is divided into a number of cells and create a cellular space (Fig2). A set of cells adjacent to the central cell is called a neighborhood (Fig1). In the runoff production process, the cell state is the water level, which is the sum of the cell height and water depth. The height of the cell is determined from the digital elevation model and the determination of water depth is controlled by the effective precipitation at the present time step and the balance between inlet and outlet flow at the last time step. The transition rules in the cellular automata model determine the behavior of cells at different time steps, and define the future state of the cell. The first transition rule determines that which neighboring cell can get water from central cell at each time step (Fig3). The second transition rule is used to calculate the amount of flow to neighboring cells, in which the Manning equation is used. The first and second transition rule apply to all cells at each time step and as a result the output flow from each central cell to its neighbors is calculated. In the general view, each central cell is a neighbor of other cells, as a result a third rule must be used for calculation the total flow for each cell. The evaluation of the cellular automata model is performed using the statistical indicators of correlation coefficient and root mean square error and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient.

Results and Discussion: First, the runoff is simulated on a uniform rectangular surface and the results of the cellular automata model are compared with the results of the Akan analytical solution. In order to evaluate the efficiency and accuracy of the cellular automata, the statistical parameters of the models calculated. The results showed that the cellular automata model has high accuracy and efficiency (Fig 5). Then runoff in the Con catchment is simulated. This catchment is located in the northwest of Spain. (Fig 6). The results showed that the cellular automata model has been able to simulate runoff well in the catchment surface (Fig 7). At the outlet, the discharge is calculated based on the cellular automata and compared with the observed discharge. The results of the cellular automata model are shown

with three different time steps (Fig 8). So far, various mathematical models for rainfall-runoff estimation have been proposed. In integrated models, the whole catchment is considered as a unit. These models have a simple structure and appropriate computation time, but are accompanied by many assumptions and the spatial distribution of variables is not considered. Therefore, integrated models are not suitable for large catchments. In semi-distributed models, the catchment is divided into a number of sub-catchments. In these models, important features of the catchment are shown, but for each sub-basin, moderate data is considered and the exact spatial distribution of data is not considered. In distribution models, spatial distribution data is considered, but the time required for computation and modeling is high. Therefore, it seems necessary to develop methods that have a simple structure and high accuracy at the same time. Due to the accuracy of the results and the ability to access the required information anywhere in the catchment, the cellular automata model can be used to predict runoff.

Conclusion: The results showed that the cellular automata model has a high accuracy compared to Akan analytical solution. Also, in simulating the runoff of the con catchment, the runoff network at the catchment surface was well simulated. Comparing the computational discharge results from the cellular automata model and observational data, the values of correlation coefficient, mean square root of error and Nash-Sutcliffe coefficient were 0.99, 0.11 and 0.97. As the result, due to the accuracy of the results and the ease of implementation, the cellular automation model can be used to predict runoff in catchment without data and reliable results can be achieved.

Keywords: Cellular automata, Runoff, Akan analytical solution, Hydrograph.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مدل سازی رواناب سطحی با استفاده از اتوماتای سلولی

ایمان جمعه بیدختی^۱، محمود فغفور مغربی^{۲*} و محمدرضا جعفرزاده^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.

* maghrebi@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۲ ☞ وبگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: رواناب سطحی از مهم‌ترین بخش‌های چرخه هیدرولوژیکی به شمار می‌رود و تخمین دقیق آن نقش مهمی در مدیریت حوضه آبریز و طراحی سازه‌های آبی دارد. از این‌رو استفاده و توسعه روش‌های دقیق و قابل اعتماد جهت مدل‌سازی رواناب حوضه‌ها ضروری است. اتوماتای سلولی یک روش بنیادی برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده است. برای مدل‌سازی رواناب سطحی با استفاده از اتوماتای سلولی، حوضه آبریز به صورت شبکه‌ای از سلول‌ها تعریف می‌شود. تراز آب به عنوان حالت سلول بیان می‌شود و با استفاده از قوانین انتقال، سلول‌ها از یک حالت به حالت دیگر با گذشت زمان بروزرسانی می‌شوند. در این مقاله رواناب حاصل از بارش به روش اتوماتای سلولی شبیه‌سازی شده است. ابتدا رواناب سطحی بر روی چند مدل مستطیلی با استفاده از روش اتوماتای سلولی مدل‌سازی شده و جهت صحت‌سنجی، نتایج مدل اتوماتای سلولی با روش‌های تحلیلی موجود مقایسه گردیده است. در ادامه با استفاده از مدل اتوماتای سلولی رواناب در حوضه آبریز Con واقع در کشور اسپانیا شبیه‌سازی شده و مقادیر دبی محاسباتی با مقادیر مشاهداتی مقایسه شده است. مقایسه نتایج مدل اتوماتای سلولی و روش‌های تحلیلی نشان می‌دهد که مدل اتوماتای سلولی از دقت بالایی برخوردار است. همچنین در مدل‌سازی رواناب حوضه آبریز Con مقادیر ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش-سانتکیف به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۱۱ و ۰/۹۷ می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش اتوماتای سلولی می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی و دقیق برای مدل‌سازی رواناب استفاده شود.

کلمات کلیدی: رواناب سطحی، اتوماتای سلولی، روش تحلیلی اکان، هیدروگراف.

۱- مقدمه

به‌منظور شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده به کار گرفته شد. پدیده‌های طبیعی را می‌توان با اتوماتای سلولی نشان داد و این نظریه پایه‌ای شد که اتوماتای سلولی را سامانه‌های پویای (دینامیکی) گسسته تعریف کنند (Wolfram, 1984). امروزه استفاده از مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی گسترش یافته است. به عنوان مثال Folino et al. (2006) با استفاده از مدل اتوماتای سلولی به مدل‌سازی جریان آب در خاک‌های غیر اشباع پرداختند. (Rinaldi et al. (2007) الگوریتمی بر مبنای مدل اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی جریان رواناب ارائه دادند. این محققان جریان سطحی را با در نظر گرفتن

شناخت پدیده‌های هیدرولوژیکی لازمی استفاده بهینه از منبع‌های آب است. رواناب سطحی بخش مهمی از چرخه هیدرولوژیکی به شمار می‌رود. برآورد دقیق رواناب می‌تواند نقش مهمی در مهندسی آب و بهره‌برداری بهینه از منابع‌ها برای بخش‌های مختلف داشته باشد. بنابراین توسعه روش‌های دقیق برای مدل‌سازی رواناب برای حوضه‌ها بسیار مهم است.

یکی از روش‌های نوین محاسبه رواناب، اتوماتای سلولی است. اتوماتای سلولی یک روش بنیادی برای شبیه‌سازی سامانه‌های پیچیده است. اتوماتای سلولی نخستین بار در اواخر سال ۱۹۴۰ توسط دو ریاضیدان Ulam و Neumann

نفوذ، تبخیر، تفرق و ذخیره سطحی به خوبی شبیه‌سازی کردند. این مدل کارکرد خوبی در شبیه‌سازی بارش‌های مختلف نشان داد. در این مدل از یک گام به گام پنج مرحله‌ای برای قانون‌های انتقال استفاده و سرعت جریان در کل حوضه یکنواخت در نظر گرفته شد. Parsons et al. (2007) مدل پیچیده‌تری از اتوماتای سلولی را که قادر به شبیه‌سازی شرایط جریان غیریکنواخت بود، توسعه دادند. در مدل آنان مسیر جریان به چهار جهت اصلی محدود می‌گشت. Ting et al. (2009) با استفاده از مدل اتوماتای سلولی رواناب و فرسایش خاک را مدل‌سازی کردند. در این تحقیق میزان‌های رواناب و رسوب برای دو آزمایش شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که اندازه سلول، فراسنجه‌های هیدرولیکی و گام زمانی تاثیر زیادی بر دقت مدل دارد. Cirbus et al. (2013) جریان رودخانه استراویکا در کشور چک را با اتوماتای سلولی شبیه‌سازی کردند. آنها استفاده از یک مدل اتوماتای سلولی را برای شبیه‌سازی گسترش آب با استفاده از قانون‌ها و شرایط به نسبت ساده شرح دادند. این محققان به بررسی سه روش بهینه‌سازی به منظور کاهش زمان محاسبه پرداختند. در این پژوهش جریان از سلول مرکزی تنها به سلول همسایه‌ای که کمترین ارتفاع را داشت منتقل می‌شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با میزان‌های مشاهده‌ای نشان داد که مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان دارد. Douvinet et al. (2015) ویژگی‌ها و احتمال رخداد تندآب را در ۱۴۸ حوضه فرانسه با ۱۶ حالت مختلف بارش با اتوماتای سلولی ارزیابی کردند. دبی‌های به دست آمده سازگاری کاملی با رخدادهای مشاهده‌ای داشت. Kumar et al. (2018) برای مدیریت سیلاب شهری و طراحی یک سامانه زهکشی از یک مدل اتوماتای سلولی استفاده کردند. در این پژوهش کارکرد سلول‌های مستطیلی در مقایسه با سلول‌های شش ضلعی نیز بررسی شد. Shao et al. (2015) نیز از اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی رواناب سطحی در مقیاس‌های مختلف استفاده کردند. مدل رواناب طراحی‌شده بر مبنای اتوماتای سلولی، برای شبیه‌سازی رواناب دو حوضه امریکا استفاده شد. Guidolin et al. (2016) از یک مدل اتوماتای سلولی

وزنی برای شبیه‌سازی سیلاب استفاده کردند. در این مدل یک سامانه وزنی جایگزین معادله‌های پیچیده آب‌های کم عمق شد. بررسی نتایج مدل اتوماتای سلولی نشان داد این مدل نیاز به زمان و حافظه کمتر در مقایسه با یک مدل تجاری دارد. Wu et al. (2006) از ترکیب اصول پایه مدل‌های هیدرولوژیکی و اتوماتای سلولی، یک سامانه شبیه‌سازی به نام HydroCA طراحی کردند. در این مدل جریان بین سلول مرکزی و سلول‌های همسایه به نسبت شیب بین سلول‌ها پراکنش شد. نتایج نشان داد این مدل دارای آسانگری بیشتری برای شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ها بوده و اتومای سلولی روشی مؤثر در تحقیقات مربوط به مدل‌های هیدرولوژیکی حوضه‌هاست. Cai et al. (2014) یک مدل ریاضی را برای مسیریابی سیلاب بر پایه اتوماتای سلولی به کار بردند. در این پژوهش برای انتقال جریان بین سلول‌ها از رابطه دبی سرریز لبه پهن استفاده شد. تجزیه و تحلیل آنان نشان داد مدل ارائه شده می‌تواند ابزاری ارزشمند برای مسیریابی سیلاب باشد. Ghimire et al. (2012) برای مدل‌سازی سیلاب شهری از مدل اتوماتای سلولی استفاده کردند. در این تحقیق از یک مدل دو بعدی استفاده و در یک منطقه شهری بررسی شد. مقایسه نتایج نشان داد نتایج مدل اتوماتای سلولی و مدل هیدرولیکی دارای سازگاری مناسبی است. Liu and Pender (2013) یک مدل جدید برای شبیه‌سازی سیلاب شهری با استفاده از مدل اتوماتای سلولی پیشنهاد دادند. در این پژوهش عمق آب و میزان سیلاب بررسی و برای درستی‌سنجی از داده‌های سیلاب شهر Carlisle استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده‌ی سازگاری مناسب بین نتایج مدل اتوماتای سلولی و داده‌های اندازه‌گیری شده بود. Li et al. (2013) با استفاده از مدل اتوماتای سلولی تحلیل ریسک شکست سد را بررسی کردند. در این پژوهش از ترکیب مدل اتوماتای سلولی و GIS استفاده شد و قابلیت مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی سیلاب مشخص شد. Antonio et al. (2017) با استفاده از روش اتوماتای سلولی جریان و رسوب در حوضه Soana را بررسی کردند. در این تحقیق با برنامه CAESAR که مبتنی بر اتوماتای سلولی است دبی جریان و دبی رسوب در حوضه برآورد

با توجه به اینکه در هر گام زمانی وضعیت همه سلول‌های شبکه همزمان به روزرسانی می‌شود، رواناب به صورت متغیر زمانی و مکانی توصیف می‌شود. با شبیه‌سازی رواناب در دو بعد در مقایسه با روش‌هایی مانند موج سینماتیک تغییرپذیری‌های مکانی رواناب بهتر نمایش داده می‌شود. از سوی دیگر با توجه به قانون‌های انتقال ساده، پیچیدگی محاسبه‌ها کاهش یافته و در مقایسه با روش‌های عددی نیازی به حل معادله‌های پیچیده نیست. همچنین در قانون‌های انتقال از ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه استفاده شده است که در مقایسه با الگوریتم‌های مسیریابی مبتنی بر DEM (پراکنش جریان تنها بر مبنای اختلاف سطح آب) به واقعیت نزدیک‌تر است.

در این پژوهش رواناب حاصل از بارش به روش اتوماتای سلولی شبیه‌سازی شده است. در آغاز رواناب سطحی بر روی چند مدل مستطیلی با استفاده از روش اتوماتای سلولی مدل‌سازی می‌شود. برای درستی‌سنجی روش، نتایج مدل اتوماتای سلولی با روش‌های تحلیلی موجود مقایسه می‌شود. در ادامه با استفاده از مدل اتوماتای سلولی رواناب در حوضه آبریز Con واقع در کشور اسپانیا شبیه‌سازی شده است. نتایج مدل اتوماتای سلولی با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌شود تا کارایی و قابلیت مدل ارزیابی شود.

۲- مدل اتوماتای سلولی در مدل‌سازی

رواناب سطحی

در این قسمت مدل اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی رواناب معرفی شود.

۲-۱- فضای شبکه و سلول‌ها

در اتوماتای سلولی، فضای مورد نظر به شماری سلول تقسیم می‌شود. مجموعه‌ای از سلول‌های مجاور با سلول مورد نظر همسایگی نامیده می‌شود. وضعیت سلول‌های همسایه در زمان قبل بر وضعیت کنونی و آتی سلول مرکزی تأثیرگذار است. نوع همسایگی به کاررفته، تعیین‌کننده شمار همسایگان شرکت‌کننده در قانون‌های انتقال است. نوع همسایگی بر نتایج مدل تأثیر شایان

شد. (Jozefik et al., 2015) با استفاده از مدل اتوماتای سلولی جریان سطحی را شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش از یک مدل اتوماتای سلولی در فضای دوبعدی استفاده و بارش و نفوذ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که مدل قابلیت مناسبی دارد. (Liu et al., 2015) از یک مدل دو بعدی اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی سیلاب استفاده کردند. در این مدل‌سازی از دو رخداد سیل در شهر Guangzhou استفاده شد. برای ارزیابی قابلیت مدل، نتایج مدل اتوماتای سلولی با نتایج مدل دو بعدی FloodMAP مقایسه شد. یک مدل اتوماتای سلولی از چهار بخش شامل فضای شبکه، نوع همسایگی، حالت سلول و قانون‌های انتقال تشکیل شده است. در پژوهش‌های یاد شده از روش اتوماتای سلولی استفاده شده است ولی مدل‌های اتوماتای سلولی مورد استفاده متفاوت بوده است. به عبارت دیگر این مدل‌ها دارای فضای شبکه، نوع همسایگی، حالت سلول و قانون‌های انتقال متفاوتی هستند.

تاکنون مدل‌های ریاضی گوناگونی برای برآورد بارش-رواناب ارائه شده است. در مدل‌های یکپارچه کل حوضه به صورت یک واحد در نظر گرفته می‌شود. این مدل‌ها دارای ساختار ساده و زمان محاسبه‌ها مناسب است ولی همراه با فرضیه‌های زیادی بوده و پراکنش مکانی متغیرها در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین مدل‌های یکپارچه برای حوضه‌های بزرگ مناسب نیست. در مدل‌های نیمه توزیعی حوضه به شماری زیرحوضه تقسیم می‌شود. در این مدل‌ها ویژگی‌های مهم حوضه نشان داده می‌شود ولی برای هر زیرحوضه داده‌های متوسطی در نظر گرفته می‌شود و پراکنش مکانی دقیق داده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در مدل‌های توزیعی پراکنش مکانی در داده‌های ورودی در نظر گرفته می‌شود ولی زمان لازم برای محاسبه‌ها و مدل‌سازی زیاد است (Sitterson et al., 2018). بنابراین توسعه روش‌هایی که همزمان دارای ساختار ساده و دقت بالا باشد ضروری به نظر می‌رسد. در مدل اتوماتای سلولی این پژوهش ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه و مدل رقومی ارتفاع به عنوان ورودی مستقیم مدل استفاده شده است که باعث می‌شود حوضه با دقت و به سادگی مدل‌سازی شده و قابلیت استفاده از مدل را افزایش می‌دهد.

هزینه، زمان و منابع‌های محاسبه‌ای برای اجرای مدل است.

۲-۲- تعیین حالت سلول در فرایند تولید رواناب

حالت سلول در فرایند رواناب، تراز آب است که مجموع ارتفاع سلول و عمق آب است. ارتفاع سلول از مدل رقومی ارتفاع حوضه تعیین می‌شود. تعیین عمق آب توسط بارش مؤثر در گام زمانی حاضر و تعادل بین ورودی و خروجی در آخرین گام زمانی پیشین کنترل می‌شود. بارش مؤثر (Re) با استفاده از معادله ۱ تعیین می‌شود:

$$Re = R_i - I \quad (1)$$

که در آن R_i بارش ورودی و I نفوذ است.

۲-۳- قانون‌های انتقال برای پراکنش رواناب

قانون‌های انتقال برای تغییر سلول‌ها از یک حالت به حالت دیگر با گذشت زمان می‌باشند. قانون‌های انتقال در مدل اتوماتای سلولی رفتار سلول‌ها را طی فرآیند تکامل، در مرحله‌های زمانی مختلف، مشخص کرده و وضعیت آینده سلول را تعریف می‌کنند (Wolfram, 1984). زمان در اتوماتای سلولی ناپیوسته است. قانون‌های انتقال به صورت یکسان در همه سلول‌ها به کار می‌روند و سلول‌ها به صورت همزمان به روز می‌شوند. در گام‌های زمانی متوالی حالت هر سلول با توجه به حالت‌های سلول‌های همسایه برابر قانون‌های انتقال تغییر می‌کند.

۲-۳-۱- قانون اول انتقال برای شناسایی جریان همسایه

قانون اول انتقال تعیین می‌کند در هر مرحله زمانی آب در سلول مرکزی به کدام سلول همسایه جریان خواهد داشت. این الگوریتم توسط Serra and Gregorio. (1999) پیشنهاد شد. برای به کمینه رساندن اختلاف ارتفاع در بین سلول‌ها برای رسیدن به شرایط تعادل، آب همیشه از سلول مرکزی به سلول‌های همسایه با ارتفاع کمتر جریان می‌یابد. شکل ۳ چگونگی انتقال جریان از سلول مرکزی به سلول‌های همسایه را نشان می‌دهد که در آن h عمق

توجهی دارد (Kocabas et al., 2007). از مهم‌ترین همسایگی‌ها در فضای دوبعدی، همسایگی ون نیومن است که در آن چهار سلول همسایه در سمت چپ، راست، بالا و پایین سلول مرکزی واقع می‌شوند. همچنین در همسایگی مور، هشت سلول مجاور، سلول مرکزی را احاطه می‌کنند. در شکل ۱ همسایگی ون نیومن و مور نشان داده شده است.

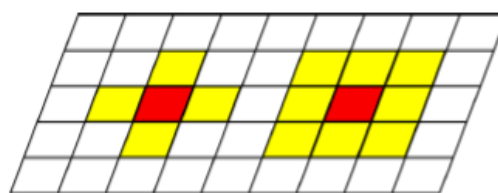


Fig. 1 Neighborhood of Von Neumann and Moore in the model of cellular automata (Cirbus et al., 2013)

شکل ۱ همسایگی ون نیومن و مور در مدل اتوماتای سلولی (Cirbus et al., 2013)

سلول‌های واقع در مرزهای شبکه مرزهای حوضه را شبیه‌سازی می‌کنند. سلول‌های واقع در خروجی به عنوان سلول‌های جذب‌کننده عمل می‌کنند و جریان آب به آن‌ها جذب و ذخیره می‌شود. این میزان‌های ذخیره شده برای محاسبه حجم آبی که از منطقه مورد بررسی خارج می‌شود، استفاده و در نتیجه میزان رواناب تعیین می‌شود (Shao et al., 2015). در شکل ۲ فضای شبکه نشان داده شده است.

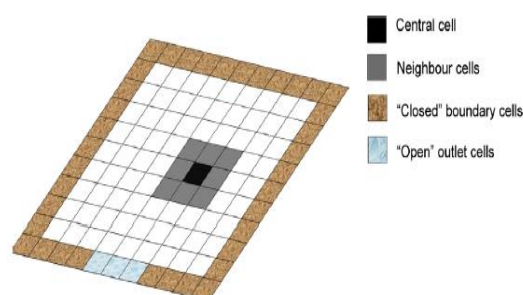


Fig. 2 Lattice space and spatial cells in the cellular automata model (Shao et al., 2015)

شکل ۲ فضای شبکه و سلول‌های فضایی در مدل اتوماتای سلولی (Shao et al., 2015)

اندازه سلول‌ها تاثیر زیادی در دقت شبیه‌سازی مدل دارد. به‌طور معمول دقت و درستی نتایج را می‌توان با کاهش اندازه سلول بهبود داد، که در پی آن، نیازمند افزایش

نمی‌تواند همسایه جریان باشد و از سلول مرکزی آب دریافت کند و از محاسبه‌ها حذف می‌شود. در ادامه میانگین تراز سلول مرکزی (۱۷) و همسایه‌های باقی مانده (۳ و ۷) برابر ۹ می‌باشد و مشاهده می‌شود که هیچ همسایه‌ای تراز بالاتر از میانگین نداشته و در نتیجه هیچ همسایه‌ای حذف نمی‌شود. بنابراین سلول‌های باقی مانده به عنوان همسایه جریان شناخته شده که از سلول مرکزی آب دریافت می‌کنند. به صورت مثال اگر عمق آب در سلول مرکزی برابر ۱۰ باشد ($z=7, h=10, H=17$)، جریان از سلول مرکزی به دو سلول همسایه جریان منتقل می‌شود تا وضعیت تعادل ایجاد شود. این محاسبه‌ها در هر گام زمانی و برای همه سلول‌های شبکه انجام می‌شود.

آب، z ارتفاع سلول و H تراز سطح آب سلول (حالت سلول) است که برابر مجموع ارتفاع و عمق آب سلول است ($H=z+h$) و میانگین تراز آب سلول مرکزی و همسایه‌هاست. در شکل ۳ تراز سطح آب در سلول مرکزی برابر ۱۷ و در سلول‌های همسایه ۳، ۷، ۱۳ و ۳۰ می‌باشد. در نتیجه میزان میانگین H در سلول مرکزی و همسایه‌ها برابر ۱۴ می‌شود. بنابراین سلول همسایه با تراز ۳۰ (بیشتر از میانگین ۱۴) نمی‌تواند همسایه جریان باشد و از سلول مرکزی آب دریافت کند و از محاسبه‌ها حذف می‌شود. در مرحله بعد میانگین H در سلول مرکزی (۱۷) و همسایه‌های باقی مانده (۳، ۷ و ۱۳) تعیین می‌شود که برابر ۱۰ می‌شود. در نتیجه سلول همسایه با تراز ۱۳

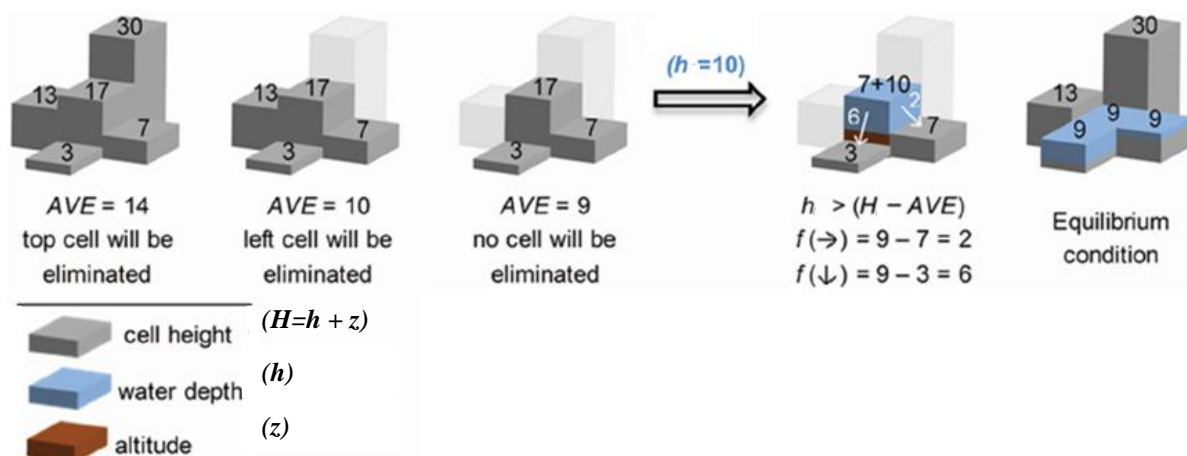


Fig. 3 Flow transfer algorithm from central cell to neighboring cells (Shao et al., 2014)
 شکل ۳ الگوریتم انتقال جریان از سلول مرکزی به سلول‌های همسایه (Shao et al., 2014)

می‌توان از تقسیم فاصله پیموده شده‌ی جریان بر سرعت جریان محاسبه کرد:

$$T = \frac{D}{V} \quad (3)$$

اگر l طول ضلع سلول باشد، D برای همسایه اصلی و همسایه مورب جریان به ترتیب برابر با l و $\sqrt{2}l$ است. میزان جریان واقعی f در هر لحظه توسط معادله (۴) تعیین می‌شود:

$$f = \begin{cases} f_p & t \geq T \\ f_p \frac{t}{T} & t < T \end{cases} \quad (4)$$

که در آن f_p میزان جریان بالقوه از یک سلول به سلول‌های همسایه است. این معادله توضیح می‌دهد، هنگامی که گام

۲-۳-۲- قانون دوم انتقال برای محاسبه میزان جریان ورودی به سلول‌های همسایه

از معادله مانینگ برای تعیین سرعت جریان خروجی از سلول مرکزی به هر یک از همسایه‌های جریان استفاده شده است:

$$V = \frac{h^{2/3} s^{1/2}}{n} \quad (2)$$

که در آن h عمق آب در سلول مرکزی، n ضریب زبری مانینگ و s شیب است که از تقسیم فاصله پیموده شده‌ی جریان D بر اختلاف تراز سطح آب بین سلول مرکزی و همسایه آن محاسبه شده است. سپس زمان T مورد نیاز برای حرکت آب از سلول مرکزی به سلول همسایه را

هر سلول مرکزی به هر یک از همسایگی‌های خود تعیین می‌شود. با این حال در دیدگاه کلی، هر سلول مرکزی یک همسایه از سلول‌های مجاور آن است، که نه تنها آب را خارج می‌کند، بلکه از سلول‌های پیرامون در همان زمان آب دریافت می‌کند (شکل ۴). در نتیجه برای محاسبه کل جریان (\bar{F}) برای هر سلول باید یک قانون سوم به کار گرفته شود. اگر i و j به ترتیب نشان دهنده شمار سطر و شمار ستون و فلش نشان‌دهنده جهت جریان باشد، کل جریان برای هر سلول (i, j) را می‌توان با معادله ۵ تعیین کرد (Shao et al., 2015).

$$F(i, j) = f(i-1, j-1) \left(\swarrow \right) + f(i-1, j) \left(\downarrow \right) + f(i-1, j+1) \left(\searrow \right) + f(i, j-1) \left(\leftarrow \right) + f(i, j+1) \left(\rightarrow \right) + f(i+1, j-1) \left(\nearrow \right) + f(i+1, j) \left(\uparrow \right) + f(i+1, j+1) \left(\nwarrow \right) - f_0(i, j) \quad (5)$$

۲- ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error) برابر با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (7)$$

۳- ضریب کارایی نش- ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) برابر با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (8)$$

که در رابطه‌های بالا O_i فراسنجه مشاهده شده ($Observed$)، P_i فراسنجه پیش‌بینی شده ($Predicted$)، \bar{O}_i میانگین فراسنجه مشاهده شده، \bar{P}_i میانگین فراسنجه پیش‌بینی شده و N شمار داده‌هاست (Asadi et al., 2013). در این پژوهش داده‌های مورد نظر دبی جریان در خروجی حوضه است.

۳- نتایج

۳-۱- درستی سنجی مدل با روش تحلیلی

Akan. (2003) برای محاسبه رواناب سطحی بر روی یک سطح نفوذناپذیر که تحت تاثیر بارش ثابت باشد، یک روش تحلیلی بر مبنای تقریب موج سینماتیک ارائه کرده

شبیه‌سازی t کوچک‌تر از T باشد، تنها بخشی از جریان که برابر است با نسبت بین t و T ، می‌تواند از یک سلول مرکزی به یک سلول همسایه جریان یابد. هنگامی که جریان خروجی بزرگ‌تر از عمق آب موجود در سلول مرکزی باشد، دریافتی هر یک از همسایه‌های جریان باید به نسبت خروجی و آب موجود اصلاح شود. در این مورد خروجی نهایی برابر عمق آب سلول مرکزی است (Shao et al., 2015).

۲-۳-۳- قانون سوم انتقال برای تعیین کل جریان

در هر گام زمانی قانون اول و دوم انتقال به همه سلول‌های فضای شبکه اعمال می‌شود و در نتیجه جریان خروجی از

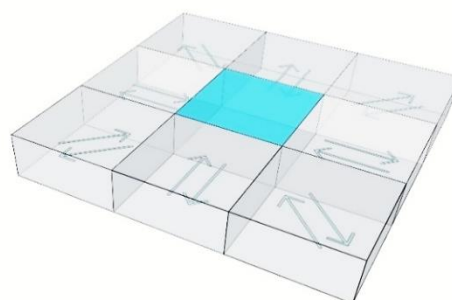


Fig. 4 Exchange of flow from the central cell to neighboring cells

شکل ۴ تبادل جریان از سلول مرکزی به سلول‌های همسایه

این میزان به عمق آب در گام زمانی کنونی اضافه می‌شود تا عمق جدید آب برای گام زمانی بعدی به روز شود. به روزرسانی به طور همزمان برای همه سلول‌ها انجام می‌شود.

۲-۴- ارزیابی مدل

ارزیابی مدل اتوماتای سلولی با استفاده از شاخص‌های آماری زیر انجام می‌شود:

۱- ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)

مطابق با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2}} \quad (6)$$

که t_p زمان آغاز شاخه نزولی آبنگار می‌باشد. در این قسمت رواناب بر روی یک سطح یکنواخت مستطیلی مدل‌سازی شده است و سپس نتایج مدل اتوماتای سلولی با نتایج روش تحلیلی اکان مقایسه شده است. مدل اتوماتای سلولی با برنامه‌نویسی در محیط نرم-افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. طول حوضه مورد نظر ۵۰۰ متر و عرض آن ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. طول و عرض هر سلول در مدل اتوماتای سلولی ۱ متر تعریف شده و سطح مورد نظر نفوذناپذیر در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های مدل‌های مورد استفاده برای درستی‌سنجی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ مدل‌های استفاده شده برای درستی‌سنجی مدل اتوماتای سلولی

Table 1 Validation models of cellular automata

Model	t_d (min)	i_0 (mm/hr)	n	s (%)
M ₁	25	100	0.01	5
M ₂	25	120	0.01	5
M ₃	25	150	0.01	5
M ₄	15	100	0.01	5

در شکل ۵ آبنگار خروجی در مدل‌ها با استفاده از روش تحلیلی و روش اتوماتای سلولی نشان داده شده است. برای بررسی کارایی و دقت روش اتوماتای سلولی، شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها محاسبه و بر روی نمودارها نشان داده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که نتایج مدل اتوماتای سلولی و نتایج روش تحلیلی دارای سازگاری مناسبی بوده و مدل اتوماتای سلولی دقت بالایی داشته است.

۳-۲- شبیه‌سازی رواناب در حوضه آبریز Con

در این بخش رواناب ناشی از بارش در حوضه آبریز Con شبیه‌سازی شده است. این حوضه در شمال غرب اسپانیا قرار گرفته است و گستره آن ۱۹/۶ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۶). تغییرپذیری‌های ارتفاع در این حوضه شایان ملاحظه است. شیب حوضه از میزان ۰/۲۵ متر بر متر در نقطه‌های مرتفع تا میزان ۰/۰۵ متر بر متر در نزدیکی خروجی حوضه متغیر است. این حوضه تحت تاثیر جبهه‌های کم فشار از سمت اقیانوس اطلس قرار می‌گیرد و بارش‌های شدید رخ می‌دهد (Fraga et al., 2019).

است. این روش برای حالتی که بارش موثر ثابت باشد، نیز معتبر است. در این روش زمان تعادل از رابطه‌ی (۹) تعیین می‌شود:

$$t_e = \frac{1}{(\alpha i_0^{m-1})^{1/m}} L \quad (9)$$

که در آن t_e زمان تعادل، L طول حوضه، i_0 بارش موثر می‌باشد. میزان m برابر 5/3 و ضریب α از رابطه‌ی (۱۰) مشخص می‌شود.

$$\alpha = \left(\frac{k}{n}\right) s^{1/2} \quad (10)$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ، s شیب و ضریب k برای سامانه بین المللی ابعاد SI برابر ۱ و برای سامانه ابعاد انگلیسی برابر ۱/۴۹ می‌باشد. برای ترسیم آبنگار (هیدروگراف) خروجی دو حالت وجود دارد که به شرح زیر است:

حالت اول: زمان بارش از زمان تعادل بزرگ‌تر است. ($t_e \leq t_d$)

در این حالت جهت ترسیم آبنگار خروجی از رابطه‌های (۱۱) تا (۱۳) استفاده می‌شود.

(۱۱) اگر $t \leq t_e$ آن‌گاه $q_L = \alpha(i_0 t)^m$

(۱۲) اگر $t_e < t \leq t_d$ آن‌گاه $q_L = i_0 L$

(۱۳) اگر $t > t_d$ آن‌گاه

$$t = t_d + \frac{\frac{L}{\alpha Y_L^{m-1}} - \frac{y_L}{i_0}}{m}, \quad y_L = \left(\frac{q_L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{m}}$$

که در رابطه‌های بالا q_L دبی در واحد عرض در خروجی و t_d زمان بارش می‌باشد.

حالت دوم: زمان بارش از زمان تعادل کمتر است.

($t_e > t_d$)

در این حالت برای ترسیم آبنگار خروجی از رابطه‌های (۱۴) تا (۱۶) استفاده می‌شود.

(۱۴) اگر $t \leq t_d$ آن‌گاه $q_L = \alpha(i_0 t)^m$

(۱۵) اگر $t_d < t \leq t_p$ آن‌گاه

$$q_L = \alpha(i_0 t_d)^m, \quad t_p = t_d - \left(\frac{t_d}{m}\right) + \frac{L}{m\alpha(i_0 t_d)^{m-1}}$$

(۱۶) اگر $t > t_p$ آن‌گاه

$$t = t_d + \frac{\frac{L}{\alpha Y_L^{m-1}} - \frac{y_L}{i_0}}{m}, \quad y_L = \left(\frac{q_L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{m}}$$

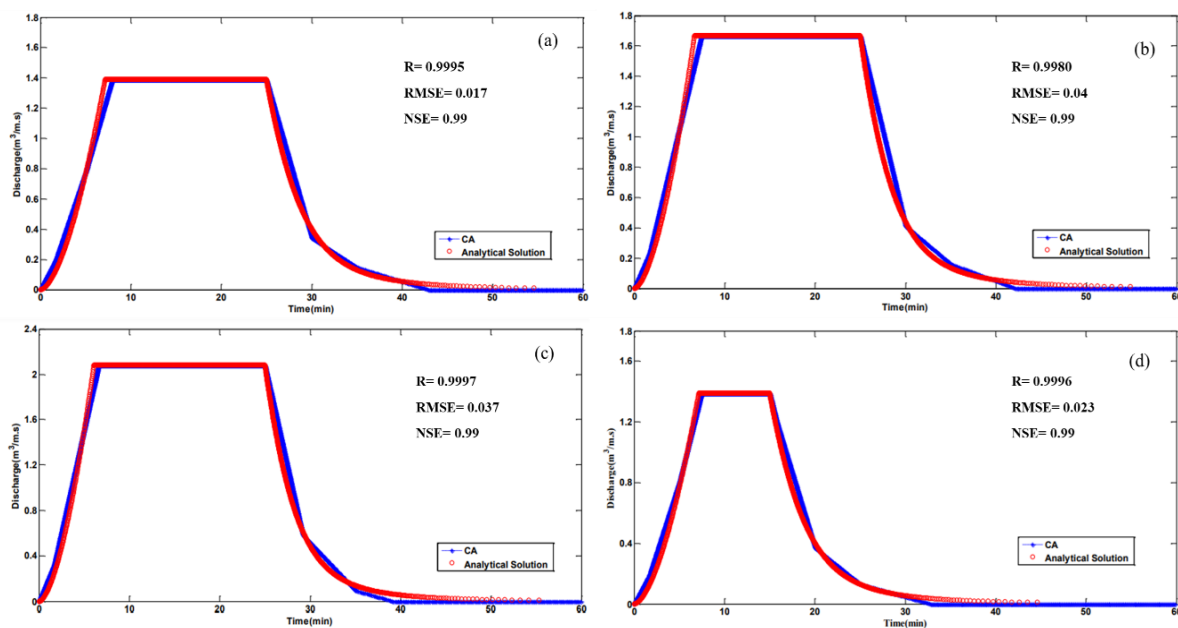


Fig. 5 Outflow hydrograph downstream of the rectangular surface (a) M₁, (b) M₂, (c) M₃, (d) M₄

شکل ۵ هیدروگراف خروجی در پایین دست سطح مستطیلی (a) M₁، (b) M₂، (c) M₃ و (d) M₄

صورت تابع زمان تعریف شده و قابل استفاده است. بدین صورت که در هر گام زمانی در هر سلول بارش و نفوذ محاسبه می شود و آنگاه بارش موثر تعیین می شود و براساس قانون های انتقال شبیه سازی انجام می شود. اما از سوی دیگر فراسنجه های نفوذ در حوضه مورد نظر در دسترس نبوده است و میزان های نفوذ در این حوضه به صورت میزان های ثابت ارایه شده است که در شبیه سازی استفاده شده است.

برای شبیه سازی از داده های بارش ایستگاه Coron که نزدیک ترین ایستگاه به حوضه می باشد، استفاده شده است. داده های یک رخداد بارش که برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته در جدول ۳ آمده است.

برای شبیه سازی رواناب حوضه از مدل رقومی ارتفاعی ۵ متری حوضه استفاده شده و تقسیم بندی سطح حوضه انجام می شود. مرزهای حوضه در مدل مشخص می شود و در ادامه ویژگی های هیدرولوژیکی ناحیه های مختلف با توجه به جدول ۲ تعریف می شود. مشخصات رخداد بارش نیز با توجه به جدول ۳ برای مدل اعمال می شود. با توجه به داده های ورودی و با استفاده از مدل اتوماتای سلولی، رواناب حوضه مدل سازی می شود. در این مدل سازی از همسایگی مور استفاده شده است.

آب نگار سیل مشاهده ای در انتهای آبراهه حوضه (به طول ۹/۶ کیلومتر) و ۱/۲ کیلومتر پیش از اتصال به دریا در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی مدل اتوماتای سلولی آب نگار سیل حاصل از شبیه سازی به روش اتوماتای سلولی با آب نگار سیل مشاهده ای در انتهای آبراهه حوضه مقایسه شده است. در صورتی که اطلاعات دقیق آبراهه به صورت کامل در اختیار باشد می توان بر روی فایل DEM حوضه سلول های مرتبط با آبراهه را مشخص کرد و ویژگی های آبراهه را در این سلول ها تعریف کرد و با استفاده از مدل اتوماتای سلولی شبیه سازی را انجام داد که به دلیل مسئله هایی در اندازه گیری و محدودیت داده ها بررسی نشده است.

ویژگی های مربوط به نفوذ این حوضه در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ ویژگی های نفوذ حوضه Con (Fraga et al., 2019)

Table 2 Infiltration in Con catchment (Fraga et al., 2019)

	Range	Units
Infiltration rate suburbs soil	0-10	mm/h
Infiltration rate forest soil	20-30	mm/h
Infiltration rate agricultural soil	2-20	mm/h

در مدل اتوماتای سلولی این پژوهش معادلات نفوذ به

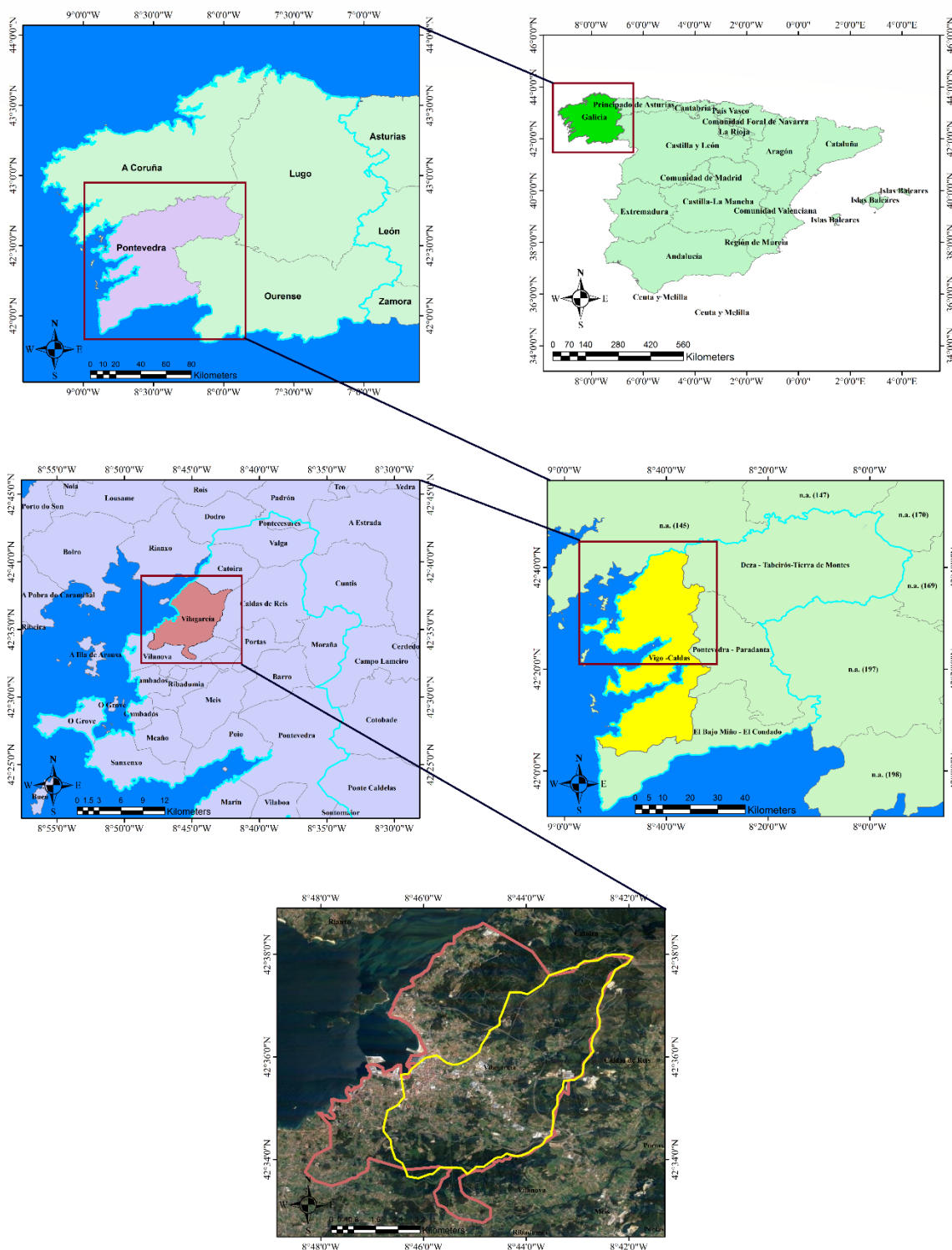


Fig. 6 Location of the Con catchment
 شکل ۶ موقعیت مکانی حوضه آبریز Con

در سطح حوضه گسترش می‌یابد. پس از پایان بارش و زمان تمرکز حوضه، رواناب در سطح حوضه کاهش پیدا می‌کند. شکل ۷ نشان می‌دهد که مدل اتوماتای سلولی به خوبی توانسته است رواناب را در سطح حوضه شبیه‌سازی کند.

در شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی رواناب در سطح حوضه در زمان‌های ۴۵، ۹۰، ۱۳۵ و ۱۸۰ دقیقه پس از آغاز بارش نشان داده شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که با آغاز بارش، رواناب در سطح حوضه جاری می‌شود و با گذشت زمان، شبکه رواناب

در این مدل اتوماتای سلولی دبی جریان را می‌توان در هر نقطه از حوضه آبریز مشخص کرد. در این بخش در خروجی حوضه آبریز، دبی بر مبنای مدل اتوماتای سلولی محاسبه شده و با دبی مشاهده‌ای حوضه مقایسه شده است. شبیه‌سازی با گام‌های زمانی متفاوت انجام شده است که در شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی با سه گام زمانی در کنار داده‌های اندازه‌گیری شده حوضه نشان داده شده است. دقت و کارایی مدل اتوماتای سلولی با ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف مشخص می‌شود.

ارزیابی نتایج در شکل ۸ نشان می‌دهد که بهترین مدل اتوماتای سلولی با گام زمانی ۵ ثانیه است که در این مدل مقادیر ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۱۱ و ۰/۹۷ می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روش

جدول ۳ داده‌های بارش در حوضه

Table 3 Precipitation data in the catchment			
Time	Rainfall intensity (mm/h)	Time	Rainfall intensity (mm/h)
06:00	0	09:20	0
06:10	0.2	09:30	1.8
06:20	0.2	09:40	0.2
06:30	0	09:50	0.2
06:40	0.2	10:00	0
06:50	0.4	10:10	0.4
07:00	0.6	10:20	1
07:10	0.6	10:30	0
07:20	1	10:40	0
07:30	0.6	10:50	0
07:40	0.8	11:00	0
07:50	1.8	11:10	0
08:00	4.2	11:20	0
08:10	7.8	11:30	0
08:20	1.2	11:40	0
08:30	0	11:50	0
08:40	0	12:00	0
08:50	0	12:10	0
09:00	0	12:20	0
09:10	0	12:30	0

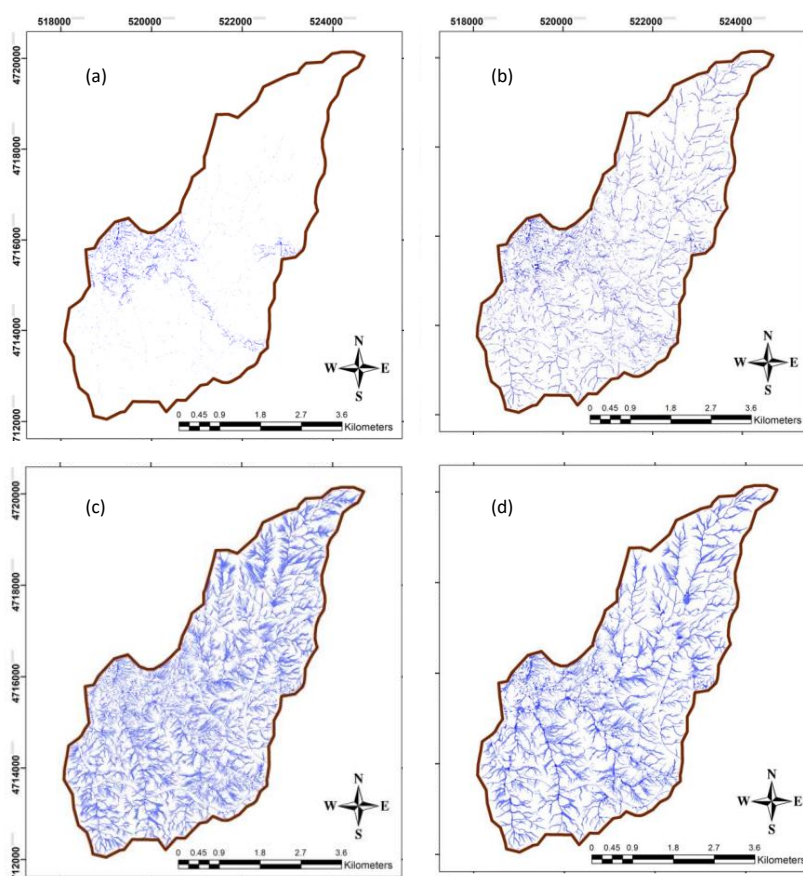


Fig.7 Runoff simulation in the con catchment (a) 45 minutes after the precipitation (b) 90 minutes after the precipitation (c) 135 minutes after the precipitation (d) 180 minutes after the precipitation

شکل ۷ شبیه‌سازی رواناب در حوضه con (a) ۴۵ دقیقه پس از آغاز بارش، (b) ۹۰ دقیقه پس از آغاز بارش، (c) ۱۳۵ دقیقه پس از آغاز بارش، (d) ۱۸۰ دقیقه پس از آغاز بارش

نتایج نشان داد که نتایج مدل اتوماتای سلولی در مقایسه با روش تحلیلی امکان از دقت بالایی برخوردار است. همچنین در مدل سازی رواناب حوضه آبریز Con شبکه رواناب در سطح حوضه به خوبی شبیه سازی گردید. در مقایسه نتایج دبی محاسباتی از مدل اتوماتای سلولی و دبی مشاهداتی حوضه مقادیر ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۱۱ و ۰/۹۷ به دست آمد. با توجه به دقت نتایج و نیاز در هر نقطه از حوضه آبریز، می توان از مدل اتوماتای سلولی برای پیش بینی رواناب در حوضه های آبریز بهره گرفت و نتایج قابل اعتمادی نیز به دست آورد.

۵- فهرست علائم

D	فاصله بین سلول ها (m)
f	جریان واقعی بین سلول ها (m)
f_p	جریان بالقوه بین سلول ها (m)
F	برایند جریان ورودی و خروجی در سلول (m)
h	عمق آب (m)
H	تراز سطح آب (m)
i_0	شدت بارش (m/hr)
I	نفوذ (m/hr)
l	طول ضلع سلول (m)
L	طول حوضه (m)
n	ضریب زبری مانینگ ($s.m^{-1/3}$)
NSE	ضریب نش-ساتکلیف
O_i	داده های مشاهده ای (m^3/s)
P_i	داده های برآوردی (m^3/s)
\bar{O}_i	میانگین داده های مشاهده ای (m^3/s)
\bar{P}_i	میانگین داده های برآوردی (m^3/s)
q_L	دبی در واحد عرض (m^2/s)
R_i	بارش (m/hr)
Re	بارش موثر (m/hr)
R	ضریب همبستگی
RMSE	ریشه میانگین مربعات خطا
s	شیب بین سلول ها
t	گام زمانی (s)

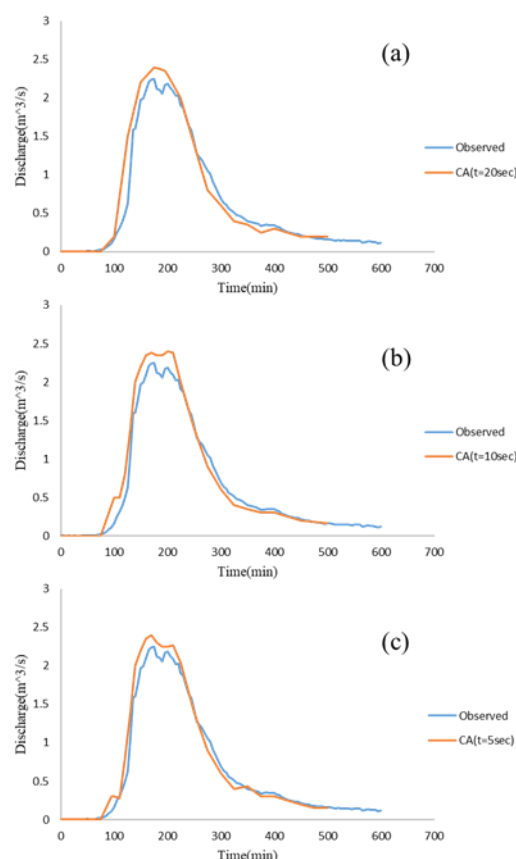


Fig. 8 Outlet hydrograph in downstream of Con catchment (a) Simulation time step 20 seconds (b) Simulation time step 10 seconds (c) Simulation time step 5 seconds

شکل ۸ هیدروگراف خروجی در حوضه con (a) گام زمانی شبیه سازی ۲۰ ثانیه، (b) گام زمانی شبیه سازی ۱۰ ثانیه، (c) گام زمانی شبیه سازی ۵ ثانیه

اتوماتای سلولی می تواند به عنوان یک روش کاربردی و دقیق برای مدل سازی رواناب سطحی به کار گرفته شود.

۴- بحث و نتیجه گیری

هدف اصلی از این مقاله بررسی قابلیت استفاده از روش اتوماتای سلولی جهت شبیه سازی رواناب بود. این تحقیق نشان می دهد که یک فرایند مهم و پیچیده نظیر رواناب را می توان با استفاده از مدل اتوماتای سلولی و با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و داده های متداول حوضه مدل سازی نمود. ابتدا رواناب بر روی یک سطح یکنواخت مستطیلی مدل سازی و نتایج مدل اتوماتای سلولی با نتایج روش تحلیلی مقایسه گردید. جهت بررسی دقت مدل اتوماتای سلولی مقادیر ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب نش-ساتکلیف برای مدل ها محاسبه شد.

Guidolin, M., Chen, A., Ghimire, B., Keedwell, C., Djordjevic, S. and Savic, D. (2016). A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis. *Environmental Modelling & Software*. 84, 378-394.

Gregorio, S.D. and Serra R. (1999). An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata. *Future Generation Computer Systems*. 16(2), 259-271.

Jozefik, Z., Frechen, N., Hinz, C. and Schmidt, H. (2015). A cellular automata approach for modeling surface water runoff. *EGU General Assembly Conference, Austria*.

Kumar, N., Agrawal, A. and Khan, R.A. (2018). A Novel Drainage System Using Cellular Automata to Avoid Urban Flood. *International Journal of Applied Evolutionary Computation (IJAEC)*. 9(2), 38-51.

Kocabas, V. and Dragiccevic, S. (2007). Enhancing a GIS Cellular Automata Model of Land Use Change: Bayesian Networks. *Influence Diagrams and Causality*. 11, 681-702.

Li, Y. and Pender, G. (2013). Spatiotemporal simulation and risk analysis of dam-break flooding based on cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*. 27(10), 2043-2059.

Liu, Y. and Pender, G. (2013). Carlisle 2005 urban flood event simulation using cellular automata-based rapid flood spreading model. *Soft Computing*. 17(1), 29-37.

Liu, L., Liu, Y., Yu, D., Liu, K., Huang, H. and Hu, G. (2015). Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata. *Natural hazards and earth system sciences*. 15(3), 381-391.

Parsons, J.A. and Fonstad, M.A. (2007). A cellular automata model of surface water flow. *Hydrological Processes*. 21(16), 2189-2195.

Rinaldi, P., Dalponte, D., Venere, M. and Clausse, A. (2007). Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 15(3), 315-327.

Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Avant, B. and Muche, M. (2018). An overview of rainfall-runoff model types. *9th International*

t_e زمان تعادل (s)
 t_d زمان بارش (s)
 T زمان پیمایش جریان بین سلول‌ها (s)
 V سرعت جریان (m/s)

۶-منبع‌ها

Akan, A.O. and Houghtalen, R.J. (2003). *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality: engineering applications and computer modeling*. John Wiley & Sons, 392p.

Antonio, P., Chiara, A. and Nicola, S. (2017). Water and Sediment Output Evaluation Using Cellular Automata on Alpine Catchment: Soana, Italy - Test Case. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 95(2), 022031.

Asadi, H., Shahedi, K., Jarihani, B. and Sidle, R.C. (2019). Rainfall-runoff modelling using hydrological connectivity index and artificial neural network approach. *Water*. 11(2), 212.

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. (2013). Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process. *Applied Mathematics & Information Sciences*. 7(6), 2149-2158.

Douvinet, J., Van De Wiel, M., Delahaye, D. and Cossart, E. (2015). A flash flood hazard assessment in dry valleys (northern France) by cellular automata modelling. *Natural Hazards*. 75(3), 2905-2929.

Folino, G., Mendicino, G., Senatore, A., Spezzano, G. and Straface, S. (2006). A model based on cellular automata for the parallel simulation of 3D unsaturated flow. *Parallel Computing*. 32(5-6), 357-376.

Fraga, I., Cea, L. and Puertas, J. (2019). Effect of rainfall uncertainty on the performance of physically based rainfall-runoff models. *Hydrological Processes*. 33(1), 160-173.

Ghimire, B., Chen, A., Guidolin, M., Keedwell, E., Djordjevic, S. and Savic, D. (2012). Formulation of a fast 2D urban pluvial flood model using a cellular automata approach. *Journal of Hydroinformatics*. 15(3), 676-686.

Rainfall Events Using Cellular Automata Approach. *Pedosphere*. 19(6), 711-718.

Wolfram, S. (1984). Computation theory of cellular automata. *J Communications in Mathematical Physics*. 96(1), 15-57.

Wu, H., Yi, Y. and Chen, X. (2006). HydroCA: a watershed routing model based on GIS and cellular automata. In: *Remote Sensing and Space Technology for Multidisciplinary Research and Applications*, 6199, 61990Q.

Congress on Environmental Modelling and Software, Colorado, USA.

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.

Shao, Q., Baumgartl, T., Huang, L. and Weatherley, D. (2014). A Cellular Automata-based Run-off Model and its Application in Mined Land Rehabilitation Designs. Conference: Life-of-Mine, Brisbane, Australia.

Ting, M.A.T., Zhou, C.H. and Cai, Q.G. (2009). Modeling of Hillslope Runoff and Soil Erosion at

