

Assessment of Cellular Automata Application in Urban Flood Modelling

Hossein Abbasizadeh ¹, Sara Nazif ², Seyed Abbas Hosseini ^{3*}

1- MSc., Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Associate professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

Received: 31 March 2019, Accepted: 25 September 2019



J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Increasing frequency and intensity of flooding due to urbanization and climate change have led to serious damages in urban areas. Flooding in urban catchments is different from other types of flooding in terms of intensity and volume. Due to the high percentage of impervious areas in these catchments, the flood peak is roughly 1.8-8 times and the volume is six times larger than flooding in non-urban catchments. One of the major challenges in urban flood analysis is the two-dimensional (2D) simulation of surface runoff caused by surcharged flows from urban drainage systems. Thus, development of an urban flood simulation model, which can rout the water flow on complex topography of urban catchments and determine flooded areas with acceptable computational time and accuracy is important. In this study, a flood simulation model based on Cellular Automata approach (CA) is developed to reduce time and computational effort compared with other 2D conventional hydraulic models. The developed model performance is compared with HEC-RAS, shallow water equations and TUFLOW models which simulate the water movement using conventional numerical schemes. Also, the stability of the model is assessed by considering different time steps and mesh sizes.

Methodology: Because of the complexity in both conventional hydraulic models and urban catchments topography, urban flood simulation using these hydraulic models is highly computational-intensive task. To overcome these drawbacks, in this study an urban flood simulation model based on CA was developed. In CA flood simulation, the study domain was discretized into regular grids which is called 'cell'. The flow direction in each cell is determined comparing the water level in the objective cell and its neighbors. Then, the inflow and outflow of each cell is computed in x and y directions at each time step. The volume and depth of water in each cell is calculated based on the discharge into and out of the cell and the considered time step length. The process of calculating flow depth and volume in the cells continues till the end of simulation period. The neighborhood condition which is used for developing the proposed hydraulic model is Von-Neumann type. In this type of neighboring condition, four neighbors are considered (up, down, right and left sides) at each side of the cell. The amount of water which flows into or out of the cells depends on the width of the cells sides that water passes through.

Results and Discussion: In this section, the performance of the model is evaluated in four different tests. In the first test, the model's performance is compared with HEC-RAS model in which the water flow is one-dimensionally simulated in a channel and the water level variation during simulation was compared with HEC-RAS simulation. In the second test, the proposed model's performance in 2D flow simulation was compared with shallow water equations. The third test was about evaluating the model's ability in simulating water movement on a complex topography, and comparing the results with TUFLOW simulation. In the last test, CA performance was tested by simulating the flood propagation on a hypothesis floodplain-like domain, and the water level variation was assessed at six points and compared with that of obtained by TUFLOW simulation. The obtained results show that the proposed model, using topographic and surface roughness data as inputs, can simulate water movement with acceptable accuracy one- and two-dimensionally. In addition, the computational time is reduced up to almost 60 times compared to the model which was based on shallow water equations in test 2.

Conclusion: In this study, an urban flood simulation model was developed and its performance was evaluated in four different tests. The obtained results showed that this model is capable of one and two dimensionally water movement simulation with acceptable computational time and accuracy.

This model was developed following two main goals: First, proposing a simple and efficient model which is able to simulate flood on complex urban catchments accurately with low computational cost. The second goal was to develop a model that could be applied as an open-source software that provides researchers with the availability of modifying and combining it with various hydrologic models.

In conclusion, based on obtained results, the proposed model could be considered as a valuable tool in determining flood-prone areas, managing urban runoff, designing flood warning systems and many other different applications.

Key words: Urban Flood, Cellular Automata, Hydraulic Modeling, Surface Runoff, 2D Simulation.

بررسی عملکرد مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری

حسین عباسی‌زاده^۱، سارا نظیف^۲، سید عباس حسینی^{۳*}

۱- کارشناسی ارشد گروه عمران آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
 ۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
 ۳- استادیار گروه مهندسی عمران آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

*abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۳، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در حوضه‌های شهری باعث ایجاد آسیب و زیان‌های جدی به شهرها می‌شود. یکی از چالش‌های مهم در تحلیل سیلاب‌های شهری، شبیه‌سازی دو بعدی جریان‌های سطحی ناشی از پس‌زدگی رواناب از سامانه زهکشی است. بنابراین توسعه یک مدل شبیه‌سازی سیلاب که بتواند سیلاب را با دقت و سرعت قابل قبول در حوضه‌های شهری با عوارض پیچیده شبیه‌سازی و بخش‌های متأثر از سیلاب را در این حوضه‌ها مشخص کند دارای اهمیت بالایی است. در این تحقیق یک مدل عددی شبیه‌سازی سیلاب بر پایه روش اتوماتای سلولی با هدف کاهش زمان و حجم محاسبات نسبت به روش‌های معمول تحلیل دو بعدی سیلاب، توسعه داده شده است. عملکرد مدل اتوماتای سلولی توسعه داده شده در این بررسی با مدل‌های هک راس^۱، مدلی بر پایه معادله‌های آب کم عمق^۲ و مدل تیوفلو^۳ که با روش‌های معمول شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان آب را روندیابی می‌کنند، در حالت‌های شبیه‌سازی یک و دو بعدی آزمون شده است. همچنین شرایط پایداری با توجه به ابعاد شبکه^۴ و اندازه گام^۵ زمانی بررسی شده است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که روش پیشنهادی با استفاده از داده‌های عوارض و زبری سطح به عنوان ورودی، با دقت قابل قبول جریان روان‌آب‌های سطحی را در حالت‌های یک بعدی و دو بعدی روندیابی می‌کند. همچنین زمان شبیه‌سازی جریان در این مدل حدود ۶۰ برابر کمتر از روش معادله‌های آب کم عمق است.

کلید واژگان: سیلاب شهری، اتوماتای سلولی، مدل‌سازی هیدرولیکی، رواناب سطحی، شبیه‌سازی دو بعدی

۱- مقدمه

منطقه‌های شهری بین ۱/۸ تا ۸ برابر و حجم این سیلاب‌ها بیش از ۶ برابر منطقه‌های غیر شهری است. بنابراین سیلاب در زمان کوتاه‌تر و با شدت بیشتری در این منطقه‌ها رخ می‌دهد (NDMA, 2010).

افزایش فراوانی رخداد سیلاب ناشی از اثرگذاری‌های تغییر اقلیم در بسیاری از منطقه‌های شهری جهان باعث ایجاد آسیب و زیان‌های جانی و مالی جدی در این منطقه‌ها شده‌است محققان را بر آن داشته که توجه بیشتری به مسئله مدیریت سیلاب‌های شهری داشته باشند (NDMA, 2010). در این میان تعیین عمق و محدوده آبگرفتگی^۶

فعالیت‌های بشری تاثیرگذاری‌های قابل توجهی بر چرخه هیدرولوژیکی دارند. این تاثیر گذاری‌ها در حوضه‌های شهری به دلیل ویژگی‌های خاص این حوضه‌ها مانند درصد بالای گستره بخش‌های نفوذناپذیر و خرده اقلیم‌ها، بسیار زیاد است به طوری که تغییر پذیری‌های جزئی در شدت و مدت بارش در حوضه‌های شهری می‌تواند باعث ایجاد سیلاب‌های شدید در این منطقه‌ها شود. سیلاب‌های شهری با سیلاب‌هایی که در منطقه‌های غیر شهری رخ می‌دهد بسیار متفاوت هستند. به طوری که اوج سیلاب در

⁴ Mesh

⁵ Time step

⁶ Inundation

¹ HEC-RAS

² Shallow water equations

³ TUFLOW

Seyoum et al. (2012) در بررسی‌های خود یک مدل رواناب سطحی دوبعدی را برای شبیه‌سازی آبگرفتگی و اندرکنش بین سامانه زهکشی و رواناب سطحی در حوضه شهری، با مدل مدیریت رواناب شهری^۶ ترکیب کردند. آنان مدل دوبعدی خود را بر پایه معادله‌های آب کم عمق با صرف نظر از نیروی اینرسی^۷ توسعه دادند. مدل پیشنهادی آنان برای یک منطقه مسکونی در شهر بانکک^۸ آزمایش شد. داده‌های ورودی شبیه‌سازی مدل ابداعی آنان شامل مشخصات هندسی شبکه زهکشی، مدل رقمی ارتفاعی^۹ با دقت ۵ متر، سری زمانی ۴ رخداد بارش و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده ناشی از این بارش‌ها بوده است. با وجود اینکه مدل آنان با دقت قابل قبولی آبگرفتگی‌های منطقه را شبیه‌سازی کرده است اما این مدل تنها برای بخش کوچکی از شهر با یک شبکه زهکشی ساده استفاده شده است. مدل‌های دو بعدی که در بررسی‌های یاد شده برای شبیه‌سازی آبگرفتگی استفاده شده است بیشتر بر پایه حل شکل دو بعدی معادله‌های آب کم عمق و با استفاده از روش‌های معمول حل عددی هستند که به کارگیری آن‌ها به ویژه برای سطح‌هایی با ابعاد و پیچیدگی حوضه‌های شهری، حجم و زمان محاسبات بسیار بالایی خواهد داشت. بنابراین توسعه مدلی که بتواند حجم و زمان محاسبات را با دقت قابل قبول کاهش دهد می‌تواند در شبیه‌سازی سیلاب‌های شهری بسیار مؤثر و سودمند باشد. در این تحقیق نیز با این هدف مدلی بر پایه روش اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی سیلاب توسعه داده شده است. اتوماتای سلولی سامانه‌های پویای گسسته‌ای هستند که رفتارشان به طور کامل بر اساس ارتباط محلی (همسایگی) استوار است. در این روش فضا به صورت شبکه‌های یک یا چند بعدی از سلول‌ها تعریف می‌شود و هر سلول دارای ویژگی‌هایی است که در طول زمان می‌تواند تغییر کند. میزان متغیرهای هر سلول در هر بازه زمانی حالت آن سلول را مشخص می‌کند و حالت همه سلول‌ها با هم در یک بازه زمانی حالت و رفتار کل سامانه را نشان می‌دهد. زمان به

آبگرفتگی نخستین گام در اعمال روش‌های مهار و مدیریت بهینه سیلاب‌های شهری است. مدل‌های مختلفی در شبیه‌سازی عمق و گستره سیلاب‌های شهری وجود دارد. این مدل‌های از مدل‌های ساده بر پایه سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ تا مدل‌های هیدرولیکی پیچیده سه بعدی گسترش می‌یابند و بسته به نوع مسئله مورد بررسی و داده‌های ورودی در دسترس، مدل یک بعدی، دو بعدی و یا سه بعدی ممکن است مناسب‌ترین گزینه برای شبیه‌سازی آبگرفتگی باشد (Hunter et al. 2007). Hus et al. (2000) در بررسی خود عملکرد ترکیب دو مدل هیدرولیکی یک بعدی و دو بعدی را برای شبیه‌سازی آبگرفتگی^۲ ناشی از سیلاب‌های شهری توسعه دادند. مدل دو بعدی آنان بر پایه حل صریح معادله‌های آب کم عمق با صرف نظر از نیروی اینرسی^۳ بوده است. نتایج به دست آمده از این مدل نشان داد که مدل ترکیبی برای تحلیل آبگرفتگی ناشی از جریان اضافی در شبکه زهکشی شهری مناسب بوده است. آنان همچنین در سال ۲۰۰۲ در مدل‌سازی خود اندرکنش جریان‌های سطحی و فاضلاب در دو جهت مختلف را نیز در نظر گرفتند و دقت شبیه‌سازی را نسبت به مدل پیشین افزایش دادند. اما آنان در بررسی‌های خود برای کاهش حجم محاسبات سطح حوضه را با شبکه‌هایی با ابعاد ۱۲۰×۱۲۰ متر مربع تقسیم‌بندی کرده‌اند که دقت قابل قبولی برای شبیه‌سازی سیلاب در حوضه‌های شهری نیست. در بررسی دیگری (Paz et al. 2011) مدلی را برای شبیه‌سازی آبگرفتگی‌های ناشی از بارندگی در منطقه‌های شهری متشکل از دو مدل یک بعدی و دو بعدی توسعه دادند. مدل دو بعدی توسعه داده شده توسط آنان یک مدل پایه اصلی رستر^۴ با تقریب موج جنبشی^۵ بوده است که آنان را قادر ساخت که آبگرفتگی را با دقت شبکه ۰/۴ متر شبیه‌سازی کنند. آنان نشان دادند که نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی با الگوهای رایج آبگرفتگی در منطقه شهری مورد بررسی همخوانی دارد.

⁶ SWMM (Storm Water Management Model)

⁷ 2D noninertia free-surface shallow water equations

⁸ Bangkok, Thailand

⁹ DEM

¹ Geographic Information System (GIS)

² Inundation

³ 2D diffusive overland-flow model

⁴ Raster-based

⁵ 2D kinematic approximation

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدل توسعه داده شده به خوبی توانایی شبیه‌سازی پویای جریان سیلاب را دارد. نتایج به دست آمده از بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد که مدل‌های توسعه داده شده بر پایه روش اتوماتای سلولی برای ترکیب با دیگر مدل‌ها بسیار انعطاف‌پذیر بوده و به خوبی قادر به شبیه‌سازی حرکت سیلاب و آبرگرفتنی هستند اما در بررسی‌های یاد شده عملکرد روش اتوماتای سلولی تنها بر روی سطح‌هایی ساده و حالتی خاص بررسی شده است که در این تحقیق عملکرد این مدل در چندین حالت مختلف ارزیابی و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل با مدل‌هایی که بر پایه حل عددی معادله‌های آب کم عمق است، مقایسه شده است. همچنین هدف اصلی استفاده از مدل اتوماتای سلولی، توسعه یک مدل کاربردی شبیه‌سازی سیلاب است که بتواند با کاهش زمان و حجم محاسبات و با دقت قابل قبول، سیلاب را در حوضه‌های شهری مدل‌سازی کند. این کار با در نظر گرفتن فرض‌های ساده‌کننده در معادله‌های حاکم بر جریان و استفاده از روش اتوماتای سلولی برای شبکه‌بندی و تعریف ارتباط بین سلول‌ها در محدوده شبیه‌سازی، به شکل یک بعدی و دو بعدی انجام شده است. همچنین سادگی مدل توسعه داده شده در این تحقیق باعث می‌شود که این مدل را بتوان به صورت یک مدل منبع باز^۶ استفاده کرد، به طوری که کاربر بتواند متناسب با نیاز خود مدل را اصلاح و یا با مدل‌های دیگر ترکیب کند.

۲- روش تحقیق

مدل‌های عددی زیادی برای شبیه‌سازی سیلاب وجود دارد. این روش‌ها اغلب بر پایه معادله‌های حاکم بر فیزیک جریان است که شامل معادله‌های ممنتوم و انرژی هستند. اما پیچیدگی و حجم بالای محاسبات در این روش‌ها و نیاز آن‌ها به داده‌های ورودی با دقت و جزئیات بالا، دامنه استفاده از این مدل‌ها را در بحث سیلاب‌های شهری محدود می‌کند. برای مدل‌سازی این جریان‌ها، می‌توان از مدل‌های هیدرولیکی تقریبی استفاده کرد. این تقریب می‌تواند هم در

صورت گسسته پیش می‌رود و قوانین آن به صورت سراسری است که با آن در هر مرحله هر سلول، وضعیت جدید خود را با در نظر گرفتن همسایه‌های مجاور خود به دست می‌آورد. به طور کلی اتوماتای سلولی را می‌توان به عنوان سامانه‌های محاسباتی نیز در نظر گرفت که اطلاعات کد شده در خودشان را پردازش می‌کنند (Alba and Troya, 2000).

بررسی‌های محدودی در استفاده از روش اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی سیلاب انجام شده است. (Dottori and Todini (2011 جزء نخستین محققانی بودند که مدلی بر پایه روش اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی سیلاب شهری توسعه دادند و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی این مدل را با حل تحلیلی و چندین مدل هیدرولیکی مقایسه کردند. آنان در نتایج بررسی‌های خود نشان دادند که مدل پیشنهادی ابزاری ارزشمند در شبیه‌سازی نواحی آبرگرفته در طی سیلاب‌های شهری است زیرا سادگی و سرعت بالای این روش به آنان اجازه داد که تا بتوانند از داده‌های سنجش از دور^۱ با دقت بالا مانند داده‌های آلتیمتری^۲ و سار^۳ در مدل خود استفاده کنند. همچنین (Liu and Pender (2013 یک مدل هیدرولیکی بر پایه روش اتوماتای سلولی برای پیش‌بینی عمق و پهنای آبرگرفتنی شهر کارلایل^۴ کشور انگلستان توسعه دادند. آنان توانستند سیلاب در محدوده مورد بررسی را با شبکه‌های به دقت ۱۵×۱۵ متر مربع شبیه‌سازی کنند و نشان دادند که نتایج به دست آمده از مدل پیشنهادی با داده‌های مشاهده شده همخوانی دارند. در بررسی دیگری (Cai et al. (2014 از یک روش شبیه‌سازی پویا بر پایه روش اتوماتای سلولی در دو حالت گام زمانی ثابت و متغیر برای شبیه‌سازی سیلاب استفاده کردند. آنان همچنین نشان دادند که این مدل انتشار سیلاب را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده و حجم و زمان محاسبات را نسبت به دیگر روش‌های هیدرولیکی کاهش داده است. (Liu et al. (2015 با در نظر گرفتن تأثیر نفوذ در مدل اتوماتای سلولی، مدلی را برای شبیه‌سازی رواناب سطحی و آبرگرفتنی در شهر کوانگژو^۵ چین، توسعه دادند.

⁴ Carlisle, England

⁵ Guangzhou, China

⁶ Open Source

¹ Remote Sensing

² Ariborn laser altimetry (or LiDAR)

³ Synthetic Aperture Radar (SAR)

روش اتوماتای سلولی یک روش صریح به شمار می‌آید (Cai et al. 2014)

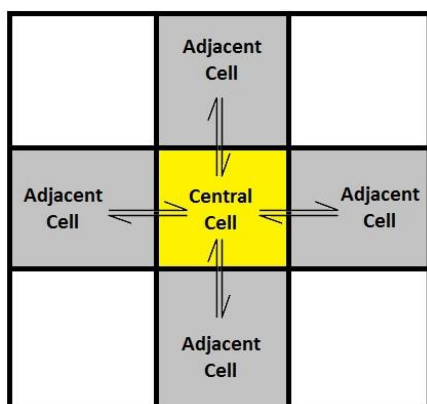


Fig. 2 Neumann neighborhood used in CA simulation

شکل ۲ شرایط همسایگی ون نیومن در شبیه‌سازی با روش اتوماتای سلولی

برای توسعه مدل در آغاز داده‌های ورودی و متغیرهای مدل تعریف می‌شود و در گام بعدی شرایط مرزی مانند مرزهایی که در آن‌ها تبادل جریان آب وجود دارد، شرایط اولیه مانند عمق اولیه آب تعریف و فضای حل شبکه‌بندی و ارتفاع مرکز هر سلول نسبت به سطح مبنا مشخص می‌شود. بعد از تعریف موارد بالا محاسبات جریان برای هر گام زمانی آغاز می‌شود که به ترتیب زیر است:

۱- تعیین جهت حرکت آب در هر سلول با محاسبه تراز سطح آب در سلول مورد نظر و سلول‌های همسایه و تعیین شیب جریان.

۲- محاسبه دبی ورودی و خروجی از هر سلول در جهت‌های X و Y.

۳- محاسبه حجم و ارتفاع آب در هر سلول برای گام زمانی بعدی پس از تبادل آب با سلول‌های مجاور با استفاده از دبی محاسبه شده در هر گام زمانی.

در این تحقیق از فرمول‌بندی پیشنهادی (Dottori and Todini, 2011) در روش اتوماتای سلولی استفاده شده‌است. دبی آبی که از سلول i به سلول همسایه‌اش j منتقل می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$Q_{i,j} = \frac{bh_m^{5/3}}{n} \left(\frac{H_i - H_j}{\Delta x} \right)^{1/2} \quad (1)$$

معادله‌های حاکم بر جریان و هم در روش حل عددی اعمال شود. در ضمن بررسی‌های اخیر نشان داده‌است که این کاهش پیچیدگی و ساده‌سازی در مدل‌ها به حتم دقت و اطمینان پذیری نتایج مدل‌ها را کاهش نمی‌دهد (Dottori and Todini, 2014). یکی از رویکردهای مورد استفاده در این راستا استفاده از روش اتوماتای سلولی است.

در این بررسی فضای شبیه‌سازی با استفاده از چندضلعی‌های منظم به شکل مربع، شبکه‌بندی شده‌است. در روش اتوماتای سلولی شرایط همسایگی مختلفی مانند شرایط همسایگی مور^۱، نیومن^۲، کول^۳ و اسمیت^۴ که در آن‌ها سلول مورد نظر به ترتیب با ۶، ۴، ۳ و ۲ سلول پیرامون خود ارتباط برقرار می‌کند، وجود دارد که برابر با نوع مسئله می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. در شکل ۱ شرایط مختلف همسایگی در این روش آورده شده‌است.

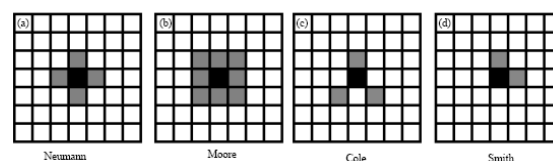


Fig.1 The most common types of neighborhood in cellular automata method (Jaberi et al. 2012)

شکل ۱ شرایط همسایگی معمول در روش اتوماتای سلولی (Jaberi et al., 2012)

در این تحقیق از شرایط همسایگی نیومن برای تعریف ارتباط سلول مورد نظر، با سلول‌های همسایه استفاده شده‌است. در شرایط همسایگی ون نیومن سلول مورد نظر با چهار سلول پیرامون خود (برابر شکل ۲) ارتباط برقرار می‌کند. به دلیل اینکه در شرایط همسایگی نیومن هر سلول با همسایه خود ضلع مشترک دارد، از این نوع همسایگی برای شبیه‌سازی سیلاب و محاسبه انتقال دبی بین سلول‌ها استفاده شده‌است. بنابراین حرکت آب تنها از مرز مشترک بین سلول‌ها امکان پذیر است. از آنجایی که در این روش حالت کل سامانه در هر گام زمانی به حالت سامانه در گام زمانی پیش وابسته است و ویژگی‌های جریان مانند عمق آب و دبی ورودی به هر سلول در هر گام زمانی به صورت گام به گام و جزء به جزء برای هر سلول محاسبه می‌شود،

³ Cole
⁴ Smith

¹ Moore
² Von Neumann

$$\Delta t = \frac{\Delta x^2}{4} \min\left(\frac{2n_{i,j}}{h_{m-i,j}^3} \left(\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x}\right)^{1/2}\right) \quad (5)$$

که در رابطه بالا Δt اندازه گام زمانی، Δx اندازه مش، n ضریب زبری مانینگ، h_m عمق میانگین آب در سلول مورد نظر و سلول همسایه و H_i تراز سطح آب نسب به سطح مینا است. این معادله بر پایه معادله مانینگ توسعه داده شده است و برای هر چهار سلول همسایه سلول مورد نظر (سلول i) گام زمانی شبیه سازی را محاسبه می کند و از بین این چهار عدد کوچک ترین عدد را به عنوان گام زمانی شبیه سازی در نظر می گیرد. بنابراین با در نظر گرفتن کوچک ترین گام زمانی، حل عددی در محدوده پایداری قرار می گیرد. اما از آنجایی که گام زمانی به دست آمده از رابطه (۵) بسیار کوچک است، حجم محاسبات برای یک دوره شبیه سازی طولانی بسیار افزایش می یابد از این رو بررسی های انجام شده در این تحقیق و همچنین نتایج تحقیقات (Dottori and Todini, 2011)، نشان داد که گام زمانی شبیه سازی را می توان بسته به شرایط مسئله و اندازه مش، بین ۱۰ تا ۱۰۰ برابر نسبت به گام زمانی محاسبه شده از رابطه (۵) افزایش داد به طوری که حل عددی ناپایدار نشود.

در این تحقیق برای بررسی عملکرد مدل اتوماتای سلولی در آزمون شماره ۲ از روشی بر پایه معادله های آب کم عمق که از بررسی (Bradford and Sanders 2002) استخراج شده، استفاده شده است. معادله های مورد استفاده در این روش به شکل رابطه های زیر است:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right) = 0 \quad (8)$$

در رابطه های بالا h : عمق آب، u : سرعت میانگین جریان در جهت x ، v : سرعت آب در جهت y و t : زمان است. معادله های بالا از رابطه های قانون بقای جرم و معادله ممنتوم (معادله های نویر استوکس) استخراج شده اند. این مدل، معادله های آب کم عمق را با استفاده از حل عددی احجام محدود به روش گودونوف^۱ با دقت مرتبه اول و تقریب رو^۲ که در نتایج و بررسی های (Bradford and Sanders

که در رابطه بالا H_i و H_j : تراز سطح آب در دو سلول مجاور، Δx : فاصله بین مرکز دو سلول مجاور، b : عرض مشترک دو سلول مجاور و h_m میانگین ارتفاع سطح آب دو سلول مجاور است. با محاسبه برآیند دبی های ورودی و خروجی به سلول i از m سلول همسایه اش، دبی تبدیلی کل سلول به دست می آید که به شکل رابطه زیر است. رابطه (۱) برای هر دو جهت های X و Y یکسان بوده و برای هر جهت به صورت جدا حل می شود.

$$Q_{total,t} = \sum_{j=1}^m Q_{i,j} \quad (2)$$

که در رابطه بالا $Q_{total,t}$ دبی کل تبدیلی سلول در گام زمانی t است. با داشتن دبی سلول تغییر پذیری هایی حجم و ارتفاع آب سلول در گام زمانی مورد نظر به دست می آید.

$$\Delta V_{i,t+\Delta t} = \Delta t \times Q_{total,t} \quad (3)$$

$$h_{i,t+\Delta t} = \frac{\Delta V_{t+\Delta t}}{dx.dy} + h_{i,t} \quad (4)$$

که در رابطه های بالا $\Delta V_{i,t+\Delta t}$ تغییر حجم آب درون سلول در گام زمان $t + \Delta t$ ، Δt اندازه گام زمانی، $dx.dy$ ابعاد شبکه در جهت های Y و X ، $h_{i,t}$ عمق آب در سلول i در گام زمانی t و $h_{i,t+\Delta t}$ تغییر عمق آب در سلول i در گام زمانی $t + \Delta t$ است.

۲-۱- پایداری روش اتوماتای سلولی

با توجه به بررسی های انجام شده در این بررسی بر روی پایداری مدل اتوماتای سلولی در حالت های مختلف نتیجه گرفته شده است که با کاهش زیاد ابعاد شبکه پایداری حل کاهش و همچنین حجم محاسبات افزایش می یابد. بخشی از ناپایداری و نوسانی شدن نتایج روش اتوماتای سلولی به علت استفاده از عمق میانگین (h_m) در رابطه (۱) و استفاده از شکل ساده شده رابطه ممنتوم برای محاسبه دبی تبدیلی بین سلول ها است. بنابراین باید ابعاد شبکه را در حوضه مورد بررسی طوری انتخاب کرد که هم شرایط پایداری حل تأمین شود و هم دقت شبیه سازی در حد قابل قبول باشد و همچنین حجم محاسبات بیش از حد زیاد نشود. برای محاسبه اندازه گام زمانی شبیه سازی که حل در محدوده پایداری قرار گیرد (Hunter et al. 2005) رابطه زیر را پیشنهاد دادند:

² Roe

¹ Godunov

گام زمانی شبیه‌سازی برابر ۱ ثانیه در نظر گرفته شده‌است. در شبیه‌سازی هر دو مدل اتوماتای سلولی و هک راس سطح آبراهه نفوذناپذیر در نظر گرفته شده‌است. برای شرایط مرزی در انتهای آبراهه نیز یک سرریز فرض شده‌است که دبی عبوری از روی آن برابر با رابطه ۹ تعیین می‌شود:

$$Q = \frac{2}{3} C_d L \sqrt{2g} H^{2/3} \quad (9)$$

در رابطه بالا Q : دبی عبوری از روی سرریز، C_d : ضریب دبی برای روزه و برابر با $0/3$ فرض شده است، L : عرض آبراهه، g : شتاب ثقل و H : عمق آب هستند. پس از انجام شبیه‌سازی نتایج به دست آمده از دو مدل در بخش میانی و انتهایی آبراهه در شکل ۳ مقایسه شده‌است.

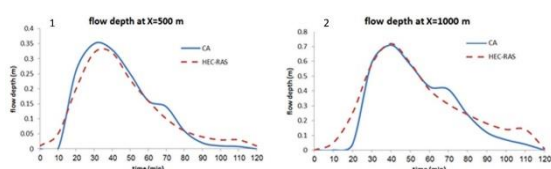


Fig. 3 The obtained depth variation from CA and HEC RAS simulations. 1) At the middle of channel
2) At the end of the channel

شکل ۳ تغییر پذیری‌های عمق آب بر حسب زمان بر مبنای نتایج روش اتوماتای سلولی و هک راس (۱) در مقطع میانی آبراهه، (۲) در مقطع انتهایی آبراهه

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود میزان‌های اوج جریان و زمان رسیدن به اوج برای دو روش در مقطع‌های میانی و انتهایی آبراهه به تقریب با یکدیگر برابر است. خطای جزر میانگین مربعات^۳ در بخش میانی آبراهه ۳ در صد و در انتهای آبراهه ۸ درصد در طول دوره شبیه‌سازی است. افزایش خطا در انتهای کانال به دلیل جمع شدن آب و افزایش نوسانات سطح آب در انتهای آبراهه رخ داده‌است. همچنین در بازوی پایین‌رونده آب‌نگار به دست آمده از روش اتوماتای سلولی در هر دو مقطع جهش مشاهده می‌شود که ناشی از پس‌زدگی جریان به علت وجود سرریز در انتهای آب‌نگار است که باعث اختلاف کمی با عمق به دست آمده از روش هک راس شده‌است. با توجه به نتایج به

(2002) پیشنهاد شده‌است حل کرده و حرکت آب را روی سطح موردنظر به شکل دوبعدی روندیابی می‌کند. در این بررسی از کدی که نویسندگان این نوشتار در اختیار کاربران قرار داده‌اند استفاده شده‌است.

۳- نتایج

در این بخش عملکرد مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی یک بعدی و دو بعدی سیلاب شهری در حالت‌های مختلف بررسی شده و نتایج آن بحث و بررسی قرار خواهد شد.

۳-۱- آزمون ۱: شبیه‌سازی یک بعدی جریان به روش اتوماتای سلولی و مقایسه نتایج آن با مدل هک راس
در این بخش عملکرد مدل توسعه داده شده اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان ارزیابی می‌شود، برای این منظور نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی یک‌بعدی مدل اتوماتای سلولی با مدل هک راس مقایسه می‌شود. مدل هک راس یک مدل یک‌بعدی هیدرولیکی برای روندیابی جریان است که توانایی شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان و رسوب را در آبراهه‌های^۱ طبیعی و مصنوعی دارد و از این رو یکی از مدل‌های پرکاربرد و شناخته شده در جهان است. به‌منظور مقایسه نتایج مدل اتوماتای سلولی در حالت یک‌بعدی با مدل هک راس، جریان آب در یک آبراهه که مشخصات آن در جدول ۱ آمده‌است، شبیه‌سازی شده‌است.

جدول ۱ مشخصات هندسی آبراهه

Table 1 Geometric properties of channels			
Bed Slope	0.002	Channel Shape	Rectangular
Channel Length	1000 m	Manning Roughness	0.015 m ^{1/3} /s
Channel Height	5 m	Channel Width	5 m

عمق اولیه آب در آبراهه صفر فرض شده‌است. آب‌نگار^۲ ورودی در بالادست آبراهه به شکل مثلثی در نظر گرفته شده‌است که طی ۳۰ دقیقه دبی از صفر به ۳ m³/s افزایش می‌یابد و در ۳۰ دقیقه بعد نیز دبی از ۳ m³/s به صفر کاهش می‌یابد. ابعاد شبکه در جهت طولی آبراهه ۵۰ متر و

³ RMSE

¹ Channels
² Hydrograph

روش اتوماتای سلولی (منحنی قرمز رنگ) و روش معادله‌های آب‌های کم‌عمق (منحنی آبی‌رنگ، خط‌چین) در زمان $t=10s$ ثانیه ترسیم شده‌است.

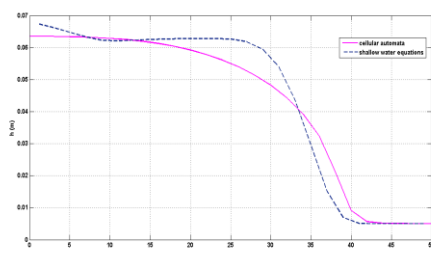


Fig. 5 Water level profile in shallow water equation (dashed blue line) and CA simulation (solid red line) at $t=10s$

شکل ۵ پروفیل سطح آب برای دو روش اتوماتای سلولی و معادله‌های آب‌های کم‌عمق (خط‌چین) از مقطع AA در زمان $t=10s$

در این حالت رخ‌نمای به دست آمده از دو روش به تقریب شبیه به یکدیگر هستند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بیشترین اختلاف دو عمق در دو روش به تقریب در فاصله ۲۷ متری از مبدأ رخ داده‌است و مقدار آن برابر با ۱ سانتی‌متر و همچنین میانگین خطا در طول کل رخ‌نما ۱۵ درصد است. میزان پیشروی جریان در دو مدل به تقریب با یکدیگر برابر است. با مقایسه رخ‌نماهای به دست آمده در این حالت می‌توان نتیجه گرفت که روش اتوماتای سلولی عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی جریان در این حالت داشته‌است. با توجه به این‌که روش اتوماتای سلولی برای شبیه‌سازی سیلاب‌ها در حوضه‌های شهری توسعه داده شده‌است، کاهش زمان محاسبات با دقتی قابل‌قبول یکی از مهم‌ترین هدف‌های توسعه این مدل است. با اندازه‌گیری زمان محاسبات برای یک دوره شبیه‌سازی به مدت ۱۰ ثانیه متوجه می‌شویم که در روش اتوماتای سلولی زمان شبیه‌سازی ۲ ثانیه و در روش معادله‌های آب کم‌عمق ۱۲۳ ثانیه به دست آمده‌است. در این روش زمان محاسبات بسیار کمتر (حدود ۱/۶ درصد) از روش معادله‌های آب کم‌عمق است (این شبیه‌سازی با رایانه‌ای با پردازش ۲ گرد ۲/۵۳ گیگاهرتز و حافظه ۴ گگابایت انجام شده‌است).

دست آمده از شبیه‌سازی یک‌بعدی جریان می‌توان نتیجه گرفت که مدل اتوماتای سلولی توانایی روندیابی جریان با دقت قابل‌قبول را دارد.

۲-۳-۲-۲: شبیه‌سازی دوبعدی جریان به روش اتوماتای سلولی و مقایسه نتایج به دست آمده با مدل آب کم‌عمق

برای بررسی نتایج مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی جریان دوبعدی، عملکرد آن با مدل شبیه‌سازی بر پایه معادله‌های آب کم‌عمق، روی یک سطح فرضی مقایسه شده‌است.

ابعاد سطح شبیه‌سازی 50×50 متر و شیب آن صفر است. برای هر دو روش اتوماتای سلولی و روش معادله‌های آب کم‌عمق، ابعاد شبکه 2×2 متر مربع و گام زمانی شبیه‌سازی 0.1 ثانیه در نظر گرفته شده‌است. عمق اولیه آب روی سطح 0.05 متر است.

شکل ۴ شرایط اولیه‌ای را که برای دو مدل تعریف شده‌است، نشان می‌دهد. در لحظه $t=0$ در سطحی به مساحت 2×50 متر مربع، آبی به ارتفاع ۱ متر در یک طرف صفحه قرار دارد. هنگام آغاز شبیه‌سازی آب از ضلع ابتدای صفحه سمت ضلع مقابل آغاز به حرکت می‌کند.

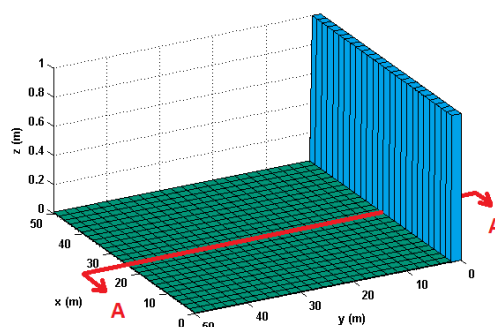


Fig. 4 The simulation domain and flow initial condition at $t=0s$

شکل ۴ سطح فرضی شبیه‌سازی و شرایط اولیه جریان در زمان $t=0s$

برای مقایسه نتایج دو روش در شکل ۵ رخ‌نمای^۱ سطح آب در مقطع AA که در شکل ۴ مشخص شده‌است، برای دو

³ RAM

¹ Profile

² CPU

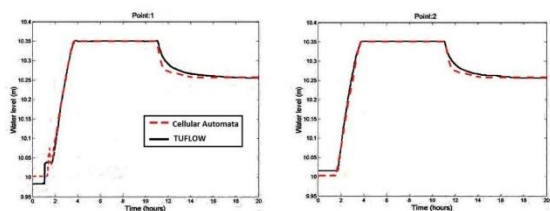


Fig. 8 The comparison of water level variation at points 1 and 2 between CA and TUFLOW models

شکل ۸ مقایسه نتایج شبیه‌سازی تغییرپذیری‌های تراز سطح آب در نقطه‌های ۱ و ۲ بین مدل اتوماتای سلولی و تیوفلو

تفاوت اصلی بین دو مدل اتوماتای سلولی و تیوفلو زمانی ایجاد می‌شود که سطح آب در نقطه A افزایش می‌یابد یعنی ۲ ساعت پس از آغاز شبیه‌سازی که در نقطه ۱ نوسان‌هایی در سطح آب دیده می‌شود. بیشترین اختلاف بین دو مدل در نقطه ۱ به تقریب برابر 0.02 متر است. همچنین ۱۱ ساعت پس از شبیه‌سازی یعنی زمانی که سطح آب در نقطه A کاهش می‌یابد، مشاهده می‌شود که سطح آب در مدل اتوماتای سلولی با سرعت بیشتری نسبت به مدل تیوفلو کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش، می‌توان نتیجه گرفت که مدل اتوماتای سلولی می‌تواند حرکت آب را روی سطح‌های ناهموار با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. همچنین عمق آب به دست آمده در ناحیه آبگرفته سطح شبیه‌سازی به درستی محاسبه شده‌است که این امر برای به کارگیری این مدل در شبیه‌سازی آبگرفتگی‌های ناشی از سیلاب در منطقه‌های شهری بسیار دارای اهمیت است.

۳-۴-۴: شبیه‌سازی انتشار سیلاب در دشت سیلابی

در این بخش مانند حالت پیش عملکرد مدل اتوماتای سلولی، با مقایسه نتایج آن با مدل هیدرولیکی تیوفلو بررسی می‌شود. شبیه‌سازی جریان در این بخش به شکل حالتی شبیه به سرریز جریان از روی یک خاکریز و انتشار موج روی یک سطح افقی به ابعاد 2000×1000 متر مربع است. مشخصات و جزئیات بیشتر این مدل‌سازی در کار Neelz and Pender (2010) آورده شده است. شکل ۹ سطح شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل

۳-۳-۳: شبیه‌سازی آبگرفتگی روی یک

سطح فرضی با پستی و بلندی به نسبت پیچیده در این بخش دقت مدل اتوماتای سلولی روی یک فرضی با مقایسه نتایج آن با مدل هیدرولیکی تیوفلو که در بررسی (Neelz and Pender, 2010) آورده شده مقایسه شده است. مدل تیوفلو یک مدل شبیه‌سازی هیدرولیکی است که جریان آب را بر پایه حل ضمنی معادله‌های دو بعدی آب کم عمق به روش تفاضل‌های محدود روندیابی می‌کند. این مدل برای شبیه‌سازی سیلاب در منطقه‌های شهری و غیر شهری به کار برده می‌شود (Neelz and Pender, 2010; Hunter et al. 2008). محدوده شبیه‌سازی شامل سطحی مستطیل شکل به ابعاد 700×100 متر مربع است که رخ‌نمای طولی آن در شکل ۶ آورده شده‌است. تغییرپذیری‌های سطح آب به صورت نمودار شکل ۷ در نقطه A به عنوان شرایط مرزی اعمال شده‌است. تغییرپذیری‌های سطح آب در نقطه‌های ۱ و ۲ در طول دوره شبیه‌سازی برای دو مدل ثبت شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده‌است.

در هر دو مدل تراز آب به سرعت در چهار ساعت اول افزایش می‌یابد و به بیشینه میزان خود یعنی $10/35$ متر می‌رسد و تراز آب به مدت ۱۰ ساعت ثابت باقی می‌ماند. سپس سطح آب از نقطه A کاهش می‌یابد و به تراز $9/7$ متر می‌رسد.

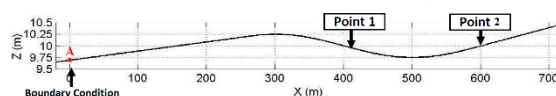


Fig. 6 The longitudinal simulation domain profile

شکل ۶ رخ‌نمای طولی سطح فرضی شبیه‌سازی

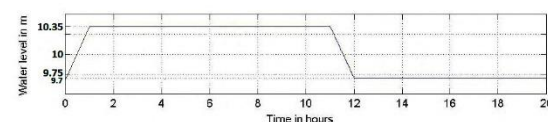


Fig. 7 Water level variations at point A

شکل ۷ تغییرپذیری‌های تراز سطح آب در نقطه A

شکل ۸ تغییرپذیری‌های سطح آب در نقطه‌های ۱ و ۲ که از شبیه‌سازی مدل‌های اتوماتای سلولی و تیوفلو به دست آمده است را نشان می‌دهد.

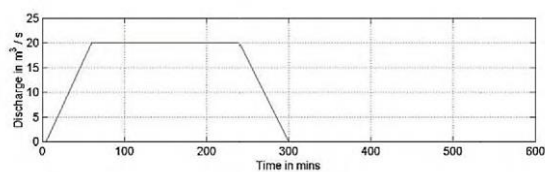


Fig. 10 The considered input hydrograph to the simulation domain as the initial condition
شکل ۱۰ آبنگار ورودی در نظر گرفته شده به سطح شبیه سازی به عنوان شرایط اولیه مدل

مشاهده می شود ۶ نقطه روی سطح در نظر گرفته شده است که تغییرپذیری های عمق آب در طول دوره شبیه سازی در محل این نقطه های اندازه گیری و ثبت می شود. در این شکل رنگ های مختلف، نمای کلی از تغییرپذیری های عمق آب روی سطح شبیه سازی را نشان می دهد. بازه بین رنگ نارنجی تا آبی به ترتیب از بیشترین عمق تا کمترین عمق آب را روی سطح شبیه سازی نشان می دهد، همچنین در منطقه های سفید رنگ سطح عمق آب صفر است.

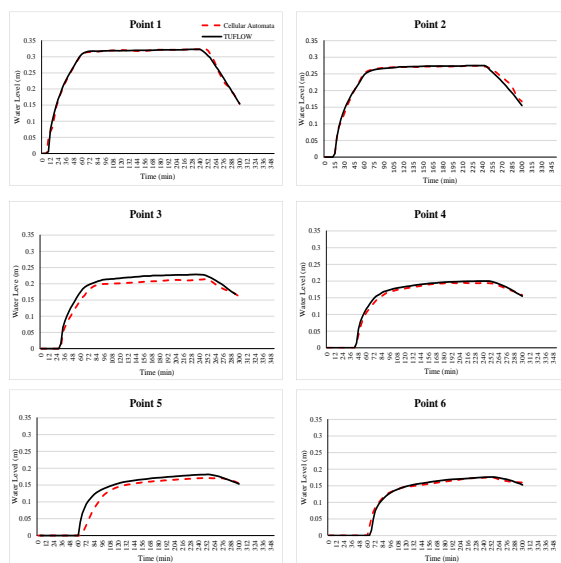


Fig. 11 Water level variations at points 1 to 6
شکل ۱۱ نمودار تغییرپذیری های عمق نسبت به زمان در نقطه های ۱ تا ۶

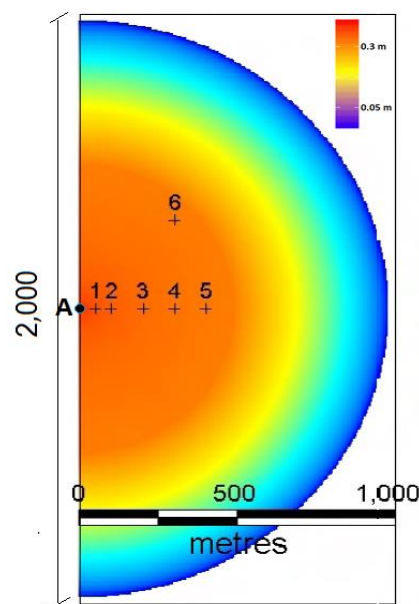


Fig. 9 Simulation domain and the position of benchmark points to determine water depth
شکل ۹ سطح شبیه سازی و موقعیت نقطه های مینا برای تعیین عمق جریان

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، مدل اتوماتای سلولی در همه نقطه ها بیشترین عمق آب و زمان رسیدن به عمق بیشینه را با دقت قابل قبولی نسبت مدل تیوفلو محاسبه کرده است. در نقطه های ۱، ۲، ۴، ۶ نمودارهای به دست آمده از دو مدل تا حدودی با یکدیگر منطبق هستند. اما بیشترین اختلاف بین دو مدل در نقطه های ۳ و ۵ رخ داده است. سیلاب در هر دو مدل تقریباً بعد از ۳۰ دقیقه به نقطه ۳ رسیده است. اما در ادامه شبیه سازی عمق آب در مدل اتوماتای سلولی تا دقیقه ۲۷۰ کمتر از مدل تیوفلو است. بیشترین اختلاف بین دو مدل در نقطه ۳ در دقیقه ۵۷ رخ داده که میزان آن برابر ۲/۶۱ سانتی متر است. در نقطه ۵ در بازوی بالارونده نمودار تغییرپذیری های ناگهانی در عمق رخ داده است و اختلاف دو مدل در این نقطه تا دقیقه ۷۲ زیاد شده و به بیشینه میزان خود یعنی ۶/۳۱

عمق اولیه آب روی سطح صفر و ضریب زبری مانینگ ۰/۰۵ و طول دوره شبیه سازی ۵ ساعت در نظر گرفته شده است. آبنگار جریان ورودی به شکل آبنگار شکل ۱۰ با دبی اوج $20 \text{ m}^3/\text{s}$ است و از محل نقطه A که در شکل ۱۰ مشخص شده از مقطعی به پهنای ۲۰ متر وارد سطح شبیه سازی می شود که به عنوان شرایط مرزی به مدل ها معرفی شده است. همچنین زمان کل شبیه سازی ۵ ساعت در نظر گرفته شده است. بعد از انجام شبیه سازی دو مدل، تغییرپذیری عمق در طول دوره شبیه سازی در ۶ نقطه مشخص شده روی سطح شبیه سازی در شکل ۱۱ آورده شده است.

همچنین با توجه به این نکته که ابعاد شبکه را در این مدل می‌توان به راحتی با توجه به دقت مورد نیاز تغییر داد، لذا این مدل را می‌توان به راحتی با داده‌های سنجش از دور یکپارچه کرد و در منطقه‌هایی که ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان وجود ندارد برای درست‌سنجی نقشه آبرفتگی به دست آمده استفاده کرد. در جدول ۳ خلاصه‌ای از بررسی‌هایی که بر روی عملکرد مدل اتوماتای سلولی در چهار حالت مختلف انجام شده آورده شده است.

۴- جمع‌بندی

در این تحقیق یک مدل شبیه‌سازی سیلاب بر پایه روش اتوماتای سلولی در حالت‌های شبیه‌سازی یک بعدی و دو بعدی توسعه داده شد و عملکرد آن در چندین حالت بررسی شد (یک مورد بررسی عملکرد شبیه‌سازی یک بعدی و سه مورد بررسی عملکرد شبیه‌سازی دوبعدی).

نتایج به دست آمده نشان داد که مدل اتوماتای سلولی می‌تواند با دقت قابل قبول ناحیه‌های آبرفته و حرکت سیلاب را شبیه‌سازی کند. همچنین زمان و حجم محاسبات در مدل اتوماتای سلولی بسیار کمتر از دیگر مدل‌های معمول شبیه‌سازی هیدرولیکی است.

در تکمیل و توسعه این مدل دو هدف اصلی مد نظر بوده است. هدف اول توسعه مدلی با سادگی و دقت قابل قبول بوده که بتواند با حجم محاسبات کم سیلاب را روندیابی کند. هدف دوم در دست داشتن مدلی است بتواند عملکردی همسان با یک نرم افزار منبع باز داشته باشد و بتوان آن را با مدل‌های دیگر مانند مدل‌های بارش-رواناب ترکیب کرد و هیچگونه محدودیتی برای تغییر در این مدل وجود نداشته باشد و کاربر بتواند مدل را برحسب نیاز خود اصلاح کند.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این مدل ابزاری ارزشمند برای شبیه‌سازی آبرفتگی در ناحیه‌های مستعد سیلاب است و استفاده از این مدل می‌تواند برای مدیریت رواناب سطحی، طراحی شبکه‌های زهکشی و توسعه سامانه‌های هشدار سیل در حوضه‌های شهری بسیار موثر و سودمند باشد.

سانتی‌متر می‌رسد. اما به تدریج با گذشت زمان این اختلاف کاهش می‌یابد و در دقیقه ۲۷۰ دو نمودار روی هم منطبق می‌شوند. بیشینه خطای جزر میانگین مربعات در این شبیه‌سازی مربوط به این نقطه است که برابر با ۱/۸ درصد است. همچنین بیشینه عمق اندازه‌گیری شده در نقطه ۵ در مدل اتوماتای سلولی برابر ۱۷ سانتی‌متر که به تقریب در دقیقه ۲۷۰ رخ داده است در حالی که بیشینه عمق در مدل تیوفلو برابر ۱۹ سانتی‌متر است که در دقیقه ۲۵۰ اتفاق افتاده است. خطای مدل اتوماتای سلولی در شبیه‌سازی حرکت موج به دلیل استفاده از شکل ساده شده معادله ممنوم است، اما با توجه به کاهش چشمگیر زمان و حجم محاسبات در مدل اتوماتای سلولی اختلاف بین دو مدل در نقطه ۵ را توجیه می‌کند. در جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش ۴ آورده شده است.

جدول ۲ نتایج به دست آمده از آزمایش شماره ۴

Point	Maximum Difference between TUFLOW and CA (cm)	Time of Maximum Difference Occurrence (min)	Maximum Mean Square Error (%)
1	4.34	9	0.65
2	2.20	282	0.61
3	2.61	57	1.53
4	1.79	48	0.61
5	6.31	72	1.80
6	3.71	66	0.54

با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مدل اتوماتای سلولی در این بخش می‌توان نتیجه گرفت که این مدل حداکثر عمق آبرفتگی و همچنین زمان رسیدن به اوج سیلاب را با دقت قابل قبولی محاسبه می‌کند. این ویژگی در مدل اتوماتای سلولی سبب شده که این مدل ابزار کارآمدی در شبیه‌سازی سیلاب در حوضه‌های شهری که دارای مساحت و پیچیدگی پستی و بلندها بالایی هستند باشد و حجم کم محاسبات و سادگی آن، امکان ترکیب کردن این مدل را با مدل‌های بارش رواناب فراهم می‌کند.

جدول ۳ خلاصه نتایج به دست آمده از حالت‌های مختلف شبیه‌سازی

Table 3 Summary of obtained results of tests 1 to 4

Test	Simulation Dimensions	Initial Conditions	Boundary Conditions	The Model Used for Validation	Results
Test 1: Flow Simulaion in a Prismatic Channel	1D	1) initial water depth in the channel is zero 2) a water column with 1 meter height and 2×50 m ² area is palced on the one side of the simulation domain	1) The inflow hydrogragh is applied at the begining of the channel 2) There is a spillway at the end of the channel	HEC-RAS	The obtained water profiles along the channels are approximately the same in both models
Test 2: Simulation of a Water Column Movement on One Side of the Simulation Domain	2D	1) initial water depth on the surface is zero	1) The four sides of the surface are blocked	Shallow Water Equations	The obtained water profiles are approximately the same in both models. The CA simulation time is much less than shallow water equation simulation.
Test 3: Flow Simulation on a Surface with Complex Topography	2D	1) initial water depth on the surface is zero	1) The inflow hydrogragh is applied at the begining of the channel 2) The four sides of the surface are blocked	TUFLOW	The obtained water profiles are approximately the same in both models. The CA model simulated the maximum depth and time to reach this depth accurately.
Test 4: Simulation of Flood Propagation on a Horizontal Floodplain	2D	1) initial water depth on the surface is zero	1) The inflow hydrograph is applied along a 20m line in the middle of the left side of the floodplain	TUFLOW	The obtained water profiles are approximately the same in both models. The flood peak level and innundation depth simulated with acceptable accuracy at different points.

Engineering. 7(2), 133-142

Dottori, F. and Todini, E. (2010). A 2D Flood Inundation Model based on Cellular Automata Approach. Proceedings of International Conference on Water Resources, Cimne Barcelona, Spain.

Dottori, F. and Todini, E. (2011). Developments of a Flood Inundation Model based on the Cellular Automata Approach: Testing Different Methods to Improve Model Performance. Physics and Chemistry of the Earth. 36, 266–280.

۵- منابع‌ها

Alba, E. and Troya, J. (2000). Cellular Evolutionary Algorithms: Evaluating the Influence of Ratio. Lecture Note in Computer Science, Springer, 1917, 29-38.

Bradford, S.F. and Sanders, B.F. (2002). Finite-Volume Model for Shallow-Water Flooding of Arbitrary Topography. Journal of hydraulic engineering. 128(3), 289-298.

Cai, X., Li, Y. Guo X. and Wu, W. (2014). Mathematical Model for Flood Routing based on Cellular Automaton. Water Science and

- 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., Wang, X., 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, 381-391.
- NDMA. (2010). National Disaster Management Guidelines: Management of Urban Flooding. National Disaster Management Authority, Government of India.
- Neelz, S. and Pender, G. (2010). Benchmarking of 2D hydraulic modelling packages. Science Report. SC080035/SR, Environment Agency, Bristol, U.K.
- Paz, A.R., Meller, A. and Silva, G.B.L. (2011). Coupled 1D-2D hydraulic simulation of urban drainage system: model development and preliminary results. International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
- Seyoum D.S., Vojinovic, Z., Price, R.K. and Weesakul. S. (2012). Coupled 1D and Noninertial 2D Flood Inundation Model for Simulation of Urban Flooding. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1). 23-34.
- Dottori, F., Grazzini, F., Lorenzo M., Spisni A. and Tomei F. (2014). Analysis of flash flood scenarios in an urbanized catchment using a tow-dimensional hydraulic model. *Evolving in Water Resources Systems*, 364, 198-203.
- Jaberi, A., Ayanzadeh, R. and Zavar Mousavi, A.S. (2012). Two-layer Cellular Automata Based Cryptography. *Trends in Applied Sciences Research*, 7, 68-77.
- Hus, M.H., Chen, S.H. and Chang, T.J. (2000). Inundation Simulation for Urban Drainage basin with Storm Sewer System. *Journal of hydrology*, 234(2), 21-34.
- Hus, M.H., Chen, S.H. and Chang, T.J. (2002). Dynamic Inundation Simulation of Storm Water Interaction Between Sewer System and Overland Flows. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. 25(2), 171-177.
- Hunter, N.M., Bates, P. D., Horritt, M. S, and Wilson, M.D. (2007). Simple Spatially Distributed Models for Predicting Flood Inundation a Review, *Geomorphology*. 90, 208-225.
- Hunter, N.M., Bates, P.D., Neelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wright, N.G., Liang, D., Falconer, R.A., Lin, B., Waller, S., Crossley, A.J. and Mason, D.C. (2008). Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 161(1). 13-30.