


# Flood Modeling in Bandsars Using Cell Model Technique

Hojjat Bina<sup>1</sup>, Mohammad Reza Jaefarzadeh<sup>2\*</sup>

1- Former Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Professor, Department of Civil Engineering, Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad

\* [jafarzarad@um.ac.ir](mailto:jafarzarad@um.ac.ir)

Received: 29 April 2021, Accepted: 17 September 2021        J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** Farmers in arid lands construct long levees along contour lines called bandsars adjacent to an ephemeral stream in floodplain areas to harvest floodwater and cultivate crops. The flood water stored in reservoirs behind the bandsars ensures soil moisture through flood harvesting. The use of bandsars contributes to the development of domestic agriculture. Thereby, seasonal and flush floods are prevented from being wasted into the desert. This method is common in the provinces of South Khorasan, Razavi Khorasan, Kerman and some other regions of Iran and as well as neighboring countries of Afghanistan and Pakistan. Bandsars can be directly constructed across the ephemeral streams or at their flood plains in a short distance. The purpose of this study is to model the flow in dry rivers and bandsars based on MODCEL algorithm to route the incoming flood and assess the amount of stored water in this traditional structure to evaluate its role in flood alleviation. Flow modeling is performed in two modes of controlled and uncontrolled inflow to bandsar and the importance of controlling the inflow is investigated. The program code is written in MATLAB software.

**Methodology:** The structure of the cell model (MODCEL) is based on the concept of flow cells, in which the study area is divided into a set of different cells that the surface or channel currents between them are expressed via hydraulic laws. This arrangement forms a quasi-two-dimensional hydrologic-hydraulic model, although all relationships are written in one dimension. The cellular model is based on the laws of conservation of mass, energy and momentum. Model cell types include river/ canal, normal surface, and reservoir cells. River / canal cells are used to model flow in open channels. Superficial cells are used for natural surfaces where runoff occurs. These cells are usually larger than the river cells. The reservoir cell is used to simulate a temporary pond or reservoir and is represented by an area-volume-height curve. The hydraulic relationship for surface flows is based on the St. Venant dynamic equations. The output flow from the reservoirs is calculated from the classical formula of wide-crested weirs. Cells are storage elements where the principle of mass conservation is applied to them. Therefore, at any time increment, the amount of water stored in a cell is related to the inflow-outflow rates from the adjacent cells plus the shares of rainfall and penetration. The volume of water inside each cell is a function of the water level in the cell center and the discharge between two adjacent cells at any given time.

**Results and Discussion:** The performance of bandsars in Akbarieh village (33°41'N, 59°06'E), in Qaen County of South Khorasan are studied in this research. An ephemeral stream is bifurcated into two channels at the apex of an alluvial fan in the region. The bandsars are constructed over the floodplains of the ephemeral stream, in alignment with the contours of

the alluvial fan. The maximum height of bandsars are 0.95 m above the bed with a 3. m wide spillway at 0.5m height. A five-year flood hydrograph was developed from the available climatological data using HEC-HMS and GIS tools and was given to the model as an upstream boundary condition. The inflow hydrograph was routed for the system of stream-bandsar using MODCEL model and the time history of water elevation was obtained for each bandsar, separately. The effects of infiltration and evaporation were added to the model as well. Computational results indicated that the volume of floods at stations R1 and R2 located at the downstream of each bifurcation decreased by 91 and 94 percents, respectively, when the bandsars were active. The peak discharge of hydrographs at the same stations were reduced by 81 and 89 percents as well. The bandsars were able to control a total of 92% of the volume of the incoming flood. This amount of flood penetrated into the soil surface layer, making the land suitable for cultivation. The high efficiency of bandsars in the region reduced the volume of floods in the village downstream of the bandsar complex. On the other hand, if the inflow to the earthen bandsars are not controlled, water level in some of the upstream dikes overflow the levees and breaking them, successively. Moreover, the downstream bandsars will not be able to draw water from the stream.

**Conclusions:** Inflow, outflow and the amount of water storage in traditional levees or bandsars were modeled using the MODCEL algorithm. These structures were able to control 92% of the total volume of an incoming 5-year flood. The bandsars had an effective role in reducing the peak and volume of flood flow and delay its lag time.

**Keywords:** Bandsar, floodwater harvesting, indigenous water conservation methods, MODCEL modeling.



© 2021 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 سیلاب در بندسار با استفاده از روش مدل سلولی

حجت بینا<sup>۱</sup>، محمدرضا جعفرزاده<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه فردوسی مشهد  
۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

\*jafarzad@um.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۶، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** کشاورزان منطقه‌های خشک برای بهره‌برداری از سیلاب و گسترش کشاورزی از سازه‌های خاکی در محدوده جریان سیلابی به نام بندسار استفاده می‌کنند. استفاده از بندسار موجب تامین رطوبت خاک از طریق استحصال سیلاب و آب باران می‌شود. در این پژوهش دبی سیلاب ورودی، خروجی و همچنین آب‌نگار جریان عبوری در خشک‌رود با استفاده از الگوریتم MODCEL که یک مدل هیدرولیکی است، برای منطقه مورد بررسی اکبری در قاینات مدل‌سازی می‌شود. مدل پیشنهادی برپایه مفهوم سلول‌های جریان می‌باشد به این صورت که منطقه مورد بررسی به مجموعه‌ای از سلول‌ها تقسیم می‌شود که ارتباط جریان بین آن‌ها از طریق قوانین هیدرولیکی مختلف مانند معادله سنت-ونانت و فرمول کلاسیک جریان برای سرریزهای لبه پهن بیان می‌شود. بندسارهای منطقه مورد بررسی از حاشیه رودخانه آبیگری می‌کنند. در صورت کنترل سیلاب ورودی به این سازه‌های خاکی همه بندهای محدوده مورد بررسی تغذیه آبی می‌شوند و تراز آب در آن‌ها نیز خطری را از لحاظ شکست ناشی از روگذری از بندخاکی به وجود نمی‌آورد. محاسبات نشان می‌دهد که ۹۲ درصد سیلاب ورودی پنج ساله توسط بندهای خاکی استحصال می‌یابد و در نتیجه از هدررفت جریان‌های فصلی جلوگیری می‌شود. در نتیجه کارکرد بندسارها دبی اوج آب‌نگار سیل عبوری از خشک‌رود بین ۸۰ تا ۹۰ درصد کاهش یافت. در صورتی که سیلاب ورودی به بندسار کنترل نشود بندهای خاکی پایین دست ناحیه مورد بررسی نمی‌توانند از جریان سیلابی استفاده کنند چراکه این جریان توسط بندهای بالادست به طور کامل استفاده می‌شود. افزون بر این، به سبب جریان اضافی ورودی به بندهای بالادست و بیشتر شدن تراز آب از تراز بند به دلیل روگذری این سازه خاکی تخریب می‌شود.

**کلیدواژگان:** بندسار، استحصال سیلاب، روش‌های بومی حفاظت از آب، مدل‌سازی با MODCEL.

## ۱- مقدمه

سطحی و جریان‌های سیلابی شناخته می‌شود و در این روش از هدر رفتن جریان‌های سیلابی فصلی و موقتی به درون کویر جلوگیری می‌شود. آبی که وارد بندسار می‌شود به تدریج در خاک نفوذ می‌کند و سبب تغذیه آب‌های زیرزمینی و ذخیره رطوبتی خاک می‌شود. با توجه به این که این سازه‌ها در منطقه‌های خشک و نیمه‌خشک با دمای بالا احداث می‌شوند میزان تبخیر از آن‌ها هم شایان توجه است در نتیجه از ذخیره رطوبتی خاک کم می‌شود (Arabkhedri and Kamali, 2017). اگر بندسارها در مسیر مستقیم جریان‌های سیلابی بر آبراهه‌ها احداث شوند ارتفاع خاکریز آن‌ها بیشتر و سرریز تعبیه شده بزرگ‌تر می‌شود و جریان در بندسار بالادست از طریق سرریز وارد بندسار

بخش عمده‌ای از ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. از مهم‌ترین مسئله‌های این اقلیم کم‌آبی است. عامل کم‌آبی منجر به محدود شدن و کاهش یافتن فعالیت‌های کشاورزی می‌شود. کشاورزان از گذشته با استفاده از روش‌های متعدد با تدبیر بر مسئله کم‌آبی چیرگی کرده و به گسترش کشاورزی پرداخته‌اند که یکی از آن‌ها احداث مجموعه خاکریزهای طولی بر خطوط تراز در برابر جریان آب به نام بندسار است. این روش در استان‌های خراسان جنوبی، خراسان رضوی، کرمان و بعضی منطقه‌های دیگر ایران و افغانستان و پاکستان مرسوم می‌باشد. بندسار به عنوان یک سازه سنتی برای استحصال آب باران، رواناب

زانوبتی و همکاران برای مدل سازی جریان سیلاب برحوزه رودخانه مکونگ، مدل سلولی (الگوریتم MODCEL) را معرفی کردند (Zanobetti et al., 1970).

مدل شبه دو بعدی سلولی برای مدل سازی جریان سیلابی در منطقه های شهری و روستایی استفاده شده است. این مدل برای شبیه سازی جریان های سیلابی دائمی و نادائمی متغیر تدریجی در دو بعد مکانی به کار می رود. تقسیم بندی رودخانه و دشت به سلول های جریان، یک شبکه جریان شبه دو بعدی را تشکیل می دهد که جریان در جهت های مختلف ناحیه غرقابی را شبیه سازی می کند. سطح آزاد آب در درون هر سلول به صورت افقی در نظر گرفته می شود. انواع سلول های تعریف شده شامل سلول های رودخانه، کانال، سطحی طبیعی و مخزن می باشند. این مدل از معادله های هیدرولیکی مختلف یک بعدی برای بیان جریان بین سلول ها استفاده می کند. برای مدل سازی نفوذ، تبخیر و تبدیل بارش به رواناب سطحی از معادلات هیدرولوژیکی استفاده می شود.

کونژ جریان در منطقه دلتای مکونگ را با استفاده از همین مدل شبه دو بعدی مدل سازی کرد. برای واسنجی مدل، ترازهای آب محاسبه شده در مرکزهای سلول های منطقه مورد بررسی با میزان های تراز آب واقعی ثبت شده توسط خط کش های اندازه گیری مقایسه شدند (Cunge, 1975). ماسکارنهاس و میگوئز مدل سازی سیلاب شهری را به وسیله مدل سلولی انجام دادند. آنان این مدل را برای روند سازی سیلاب شهر جوین ویل<sup>۱</sup> که یک شهر ساحلی در ایالت سانتاکاتارینا<sup>۲</sup> در جنوب برزیل است به کار بردند. نتایج حاصل از مدل سلولی با نتایج مشاهداتی مقایسه شد و نشان داده شد که روش پیشنهادی برای مدل سازی سیلاب شهری رضایت بخش بود (Mascarenhas and Miguez, 2002). میگوئز و همکاران میدان ادموندورگو<sup>۳</sup> در ریودوژانیرو را به عنوان یک حوضچه ذخیره سازی با در نظر گرفتن آب نگار سیل ۱۰ ساله با مدل سلولی هیدرودینامیکی، هیدرولیکی شبیه سازی کردند. نتیجه نهایی کاهش دبی پیک سیلاب خروجی از میدان بود (Miguez et al., 2005). میگوئز و

پایین دست می شود. افزون بر این، خاکریز باید پایداری کافی داشته باشد. نوع دیگری از بندسارها در کنار خشک رود یا با فاصله کمی از آن ساخته می شوند و جریان سیلابی به وسیله یک بند انحرافی و کانال آب رسان، به درون آنها هدایت می شود. بندسار در این نوع ممکن است دارای سرریز یا بدون سرریز باشد (Akbari et al., 2016). ساختار بندها شامل حوضچه ذخیره، خاکریزهایی در امتداد خطوط توپوگرافی و رودخانه خشک است (Nazari Samani et al., 2014). در مخروط افکنه ها بستر زمین توسط آبرفت های درشت دانه پوشیده شده است. تجمع رسوب های حمل شده توسط سیلاب سبب افزایش درصد رس، سیلت و مواد آلی خاک های فقیر ناحیه های بیابانی شده و بهبود ساختمان فیزیکی خاک را به دنبال دارد (Jafari et al., 2003).

شریفی کیا و مظفری ویژگی های فیزیکی بندسار و بستر جغرافیایی استقرار آن را به منظور سنجش کارایی این تکنیک در مدیریت بهره وری بهینه از منبع های آب و خاک بررسی کردند. بدین منظور مدل رقومی ناهمواری ها از داده راداری با دقت ارتفاعی پنج متر در نمونه انتخابی دشت بیرجند تولید شد. سپس ویژگی های فیزیکی (ارتفاع تاج یا دیواره، سطح آبگیر، شیب محل استقرار) این سازه سنتی به دست آمد. همچنین به کمک سری زمانی داده های سنجش از دور اپتیک، پارامترهای بافت، شوری و رطوبت خاک در پهنه های آبگیری بندسارها تعیین شد. یافته های به دست آمده به منظور سنجش کارایی این تکنیک با ناحیه های مجاور مقایسه شد و نتیجه گیری شد که بندسار تاثیر زیادی در تجمع خاک حاصلخیز و ایجاد عرصه های قابل کشت از طریق کاهش شیب و تسطیح اراضی، اصلاح بافت، رطوبت و شوری خاک دارد. احداث بندسار و استحصال سیلاب در آن و ته نشین شدن رسوب های ریزدانه بر بستر آن، خاک مناسبی را برای کشاورزی فراهم می کند و پوشش گیاهی کم منطقه های بیابانی به وسیله آن افزایش می یابد. بندسارها با ذخیره سازی آب و فرایند نفوذ باعث تغذیه آب های زیرزمینی می شوند (Sharifikia and Mazaffari, 2014).

<sup>3</sup> Edmundo Rego

<sup>1</sup> Joinville

<sup>2</sup> Santa Catarina

هدف از این پژوهش بررسی هیدرولیکی تاثیر بندسارها بر استحصال جریان سیلابی از طریق مدل‌سازی جریان در خشک‌رودها و بندسارها بر مبنای الگوریتم MODCEL می‌باشد. جریان‌های ورودی، خروجی و ذخیره آبی در بندسارها روندیابی شده و کارکرد این سازه‌های سنتی در کاهش حجم سیلاب، کاهش دبی اوج آب‌نگار و افزایش زمان رسیدن به دبی اوج بررسی می‌شود. از برتری‌های مدل شبه دو بعدی پیشنهادی، افزایش شایان‌توجه سرعت محاسباتی در مقایسه با مدل‌های دو بعدی مانند نرم‌افزار مایک ۲۱ می‌باشد به‌ویژه در مواردی که شمار بندها زیاد باشند. برنامه مدل‌سازی در نرم‌افزار متلب نوشته شده است.

## ۲- مدل سلولی

ساختار مدل سلولی<sup>۵</sup> (MODCEL) بر پایه مفهوم سلول‌های جریان است (Zanobetti et al., 1970). به این طریق که حوضه مورد بررسی به مجموعه‌ای از سلول‌ها تقسیم می‌شود که تبادل جریان بین آن‌ها با استفاده از قانون‌های هیدرولیکی مختلف بیان می‌شود. هر سلول می‌تواند یک تبدیل بارش-رواناب انجام دهد. مدل‌های ساده هیدرولوژیک برای انجام این کار در دسترس هستند. در یک نمایش مکانی، جریان می‌تواند به صورت سطحی، کانالی و سرریزی برقرار باشد. این آرایش یک مدل شبه دو بعدی، هیدرولیکی و هیدرولوژیک را تشکیل می‌دهد. هرچند که همه رابطه‌ها در یک بعد نوشته می‌شوند. مدل سلولی بر پایه قانون پایستگی جرم و مومنتوم استوار است. ارتباط هیدرولیکی برای جریان‌های سطحی بر مبنای معادله دینامیکی سنت-ونانت نوشته می‌شود. اصل بقای جرم برای هر سلول نوشته می‌شود. سلول‌ها به‌عنوان عنصرهای ذخیره‌سازی مدل عمل می‌کنند. توازن جرمی به همه سلول‌ها اعمال می‌شود. بنابراین در هر گام زمانی میزان ذخیره شده آب در هر یک از سلول‌ها به مبادله دبی بین هر سلول و سلول مجاور و سهم باران از طریق رواناب ارتباط دارد (Miguez et al., 2011). سطح آزاد آب در درون هر

همکاران ضمن معرفی الگوریتم MODCEL به‌عنوان یک مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان و یک ابزار مفید برای مدیریت سیستم‌های زهکشی به‌ویژه در سیلاب‌های شدید، با بررسی موردی حوضه رودخانه جوانا<sup>۱</sup> در شهر ریودوژانیرو در برزیل، مجموعه اقدام‌هایی را شامل مخزن‌های ذخیره آب در نزدیکی منطقه‌های شیب‌دار، میدان‌ها و بوستان‌ها برای کنترل سیل و کاهش دبی اوج سیلاب پیشنهاد دادند (Miguez et al., 2011). میگوئز و همکاران حوضه شهری ریودوژانیرو و در همسایگی جاکاریاگوا<sup>۲</sup> بود با کمک الگوریتم MODCEL ارزیابی کردند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بخش بزرگی از حوضه در معرض سیلاب‌هایی با عمق‌های ۰/۱۵ متر تا ۱/۵ متر می‌باشد. تراز سیل در منطقه‌های بحرانی از ۱/۵ متر هم فراتر رفت. بنابراین حوضه مورد بررسی نیازمند اقدام‌هایی برای میرایی سیل شناخته شد (Miguez et al., 2012). میگوئز و همکاران برای نشان دادن قابلیت‌ها و توانایی‌های الگوریتم MODCEL، این مدل را با معیارهای پیشنهاد شده توسط بنگاه محیط زیست بریتانیا محک زدند. در نتیجه اختلاف شایان‌توجهی بین مدل پیشنهادی و مدل‌های دو بعدی دیگر وجود نداشت. سپس آنان توانایی مدل را در نمایش جریان زهکشی شده در مقایسه با جریان مشاهداتی و مدل SWMM تایید کردند. هر دو مدل به‌خوبی اوج‌های سیلاب و شکل آب‌نگار را نشان دادند. اگرچه حجم جریان شبیه‌سازی کمی بزرگ‌تر از مقدار مشاهداتی بود. در نهایت آن‌ها، سیلاب شهر نواله<sup>۴</sup> و پیرامون آن در ونیز ایتالیا را شبیه‌سازی کردند (Miguez et al., 2017). بریتو و همکاران در مورد نفوذ و جریان آب زیرزمینی ایجاد شده در حوضه آبریز روستایی تحقیق کردند. این جریان سهم شایان‌توجهی از آب‌نگار را تشکیل می‌داد. هدف نمایش فرایندهای نفوذ و گنجاندن جریان آب زیرزمینی در ساختمان MODCEL بود در نتیجه استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی حوضه‌های روستایی ممکن شد (Brito et al., 2018).

<sup>4</sup> Noale

<sup>5</sup> Model of Cells

<sup>1</sup> Joana

<sup>2</sup> Guerenguê

<sup>3</sup> Jacarepaguá

پیوستگی به کار رفته برای سلول بیان می شود (Miguez et al., 2011).

$$A_{si} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (1)$$

که در آن  $Q_{i,k}$  دبی بین دو سلول  $i$  و  $k$  ترزاز سطح آب در مرکز سلول  $i$ ،  $A_{si}$  مساحت سطح آب برای سلول  $i$ ،  $P_i$  دبی مربوط به بارش بر سلول و  $t$  متغیر مستقل مربوط به زمان است.

با گسسته سازی معادله ۱ داریم:

$$A_{si} \Delta Z_i = P_i(\tau) \Delta t + \Delta t \sum_k Q_{i,k}(Z_i(\tau), Z_k(\tau)) \quad (2)$$

دبی  $Q_{i,k}(Z_i(\tau), Z_k(\tau))$  با فرض  $j.\Delta t \geq \tau \geq (j+1).\Delta t$  میانگین وزنی بین  $Q_{i,k}^t$  و  $Q_{i,k}^{t+1}$  است.

$$Q_{i,k}(Z_i(\tau), Z_k(\tau)) = \theta \cdot Q_{i,k}^{t+1} + (1-\theta) \cdot Q_{i,k}^t \quad (3)$$

که  $0 \leq \theta \leq 1$  است. با جایگذاری معادله ۳ در معادله ۲ داریم:

$$\Delta Z_i^{t+1} \cdot A_{si}^t = P_i \Delta t + \Delta t \left\{ \theta \sum_k Q_{i,k}^{t+1} + (1-\theta) \sum_k Q_{i,k}^t \right\} \quad (4)$$

در این معادله  $\Delta Z_i^{t+1} = Z_i^{t+1} - Z_i^t$  است. فاصله زمانی گسسته با پارامتر  $\Delta t$  نمایش داده می شود.  $Z_i^{t+1}$  و  $Q_{i,k}^{t+1}$  مجهول هستند و بسته به میزان  $\theta$  مدل عددی می تواند ضمنی یا صریح باشد. متغیرهای مجهول در زمان محاسباتی  $t+1$ ، در نظر گرفته می شوند. به عبارت دیگر در زمان  $t$ ، همه متغیرها معلوم هستند زیرا پیشتر محاسبه شده یا به صورت شرط اولیه داده شده اند. مساحت سطح آب،  $A_{si}$  تابعی از ترزاز سطح آب معلوم  $Z_i$  است. میزان بارندگی  $P_i$  برای تمام بازه های زمانی، مشخص است. به منظور حل این معادله، دبی های مجهول به عنوان تابعی از ترزازهای آب در سلول  $i$  و همه سلول های همسایه  $k$  در نظر گرفته می شوند. بنابراین برای حذف جمله غیرخطی در معادله ۴، از بسط سری تیلور با در نظر گرفتن جمله های مرتبه اول استفاده می شود (Cunge, 1975).

$$Q_{i,k}^{t+1} = Q_{i,k}^t + \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{t+1} + \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{t+1} \quad (5)$$

سلول به صورت افقی برابر ترزاز آب در مرکز آن سلول فرض می شود (Cunge, 1980). هر سلول برمبنای مدل توپولوژیکی منطقه با سلول های همسایه در ارتباط است. حجم آب داخل هر سلول، تابع ترزاز آب در مرکز است و دبی جریان بین دو سلول مجاور در هر زمان به ترزازهای آب در آن سلول ها ( $Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$ ) وابسته است. شکل ۱ نمایش شبه دوبعدی سلول های تعریف شده در مدل را نشان می دهد.

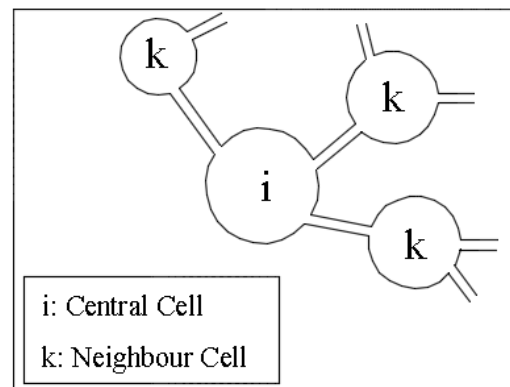


Fig. 1 Quasi 2D sketch of cells in MODCEL  
شکل ۱ نمایش شبه دوبعدی سلول ها در مدل MODCEL

## ۲-۱- انواع سلول های تعریف شده در مدل

۱- سلول رودخانه/کانال برای مدل سازی جریان در کانال های باز استفاده می شود. شکل مقطع عرضی آن مستطیلی است و ممکن است ساده یا مرکب باشد.  
۲- سلول سطحی طبیعی برای سطح های طبیعی که رواناب در آن رخ می دهد استفاده می شود. این سلول در مقایسه با سلول رودخانه بزرگ تر است.  
۳- سلول مخزن برای شبیه سازی یک حوضه یا مخزن استفاده می شود و به وسیله منحنی سطح- حجم- ارتفاع معرفی می شود. انواع ارتباط دبی بین سلول ها با قانون های هیدرولیکی بیان می شود. استفاده از قوانین هیدرولیکی این امکان را می دهد که توزیع سیل در منطقه های مختلف نشان داده شود (Miguez et al., 2017).

## ۲-۲- مدل هیدرودینامیکی

مدل هیدرودینامیکی از قانون بقای جرم و رابطه های هیدرولیکی به عنوان اجزای اصلی استفاده می کند. تغییرات ترزاز آب در یک سلول  $i$  در فاصله زمانی  $t$ ، با معادله

الف) اگر از معادله دینامیکی سنت-ونانت به صورت کامل استفاده شود. با در نظر گرفتن مقطع عرضی مستطیلی با کف ثابت و سلول  $i$  در بالادست نتیجه می شود (Miguez et al., 2017):

$$\frac{1}{A_{i,k}} \frac{\partial Q_{i,k}}{\partial t} - \frac{Q_{i,k}}{A_{i,k}^2} \frac{\partial A_{i,k}}{\partial t} + \frac{Q_{i,k}}{A_{i,k}^2} \frac{\partial Q_{i,k}}{\partial x} - S_f = 0 \quad (10)$$

که  $A_{i,k}$  سطح مقطع عرضی جریان بین سلول های  $i$  و  $k$ ،  $S_f$  شیب خط انرژی و  $x$  و  $t$  متغیرهای مستقل به ترتیب مکانی و زمانی هستند.

با ضرب معادله ۱۰ در  $A_{i,k}$  و با استفاده از معادله پیوستگی برای جایگزینی  $\frac{\partial Q_{i,k}}{\partial x}$  با  $-\frac{\partial A_{i,k}}{\partial t}$  معادله ۱۱ به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial Q_{i,k}}{\partial t} - 2 \frac{Q_{i,k}}{A_{i,k}} \frac{\partial A_{i,k}}{\partial t} - \frac{Q_{i,k}^2}{A_{i,k}^2} \frac{\partial A_{i,k}}{\partial x} + g A_{i,k} \frac{\partial Z}{\partial x} + g A_{i,k} S_f = 0 \quad (11)$$

جمله های معادله ۱۱ گسسته سازی می شود:

$$\frac{Q_{i,k}^t - Q_{i,k}^{t-1}}{\Delta t} - \frac{2Q_{i,k}^t A_{i,k}^t - A_{i,k}^{t-1}}{\Delta t} - \left(\frac{Q_{i,k}^t}{A_{i,k}^t}\right)^2 \frac{A_{i,k}^t - A_{i,k}^{t-1}}{\Delta x} + g A_{i,k}^t \left(\frac{Z_k^t - Z_i^t}{\Delta x}\right) + g A_{i,k}^t S_f = 0 \quad (12)$$

مقدار  $S_f$  به طور تقریبی به صورت زیر بیان می شود.

$$S_f = \frac{Q_{i,k}^2 n^2}{A_{i,k}^2 R_{i,k}^3} \quad (13)$$

که  $R_{i,k}$  شعاع هیدرولیکی مقطع عرضی جریان بین سلول های  $i$  و  $k$  می باشد.  $n$  ضریب زبری مانینگ برابر با ۰/۰۲۵ است (Chow et al., 1988). همه اطلاعات در زمان  $t-1$  در دسترس هستند و همه ترازهای آب در زمان  $t$  معلوم هستند. به منظور داشتن معادله ای صریح و حل مستقیم آن جمله های درجه دوم با خطی سازی بیان می شود.

$$(Q_{i,k}^t)^2 = Q_{i,k}^{t-1} \cdot Q_{i,k}^t \quad (14)$$

با ترکیب معادله ۱۲ و ۱۳ و استفاده از معادله ۱۴ داریم:

با جایگذاری معادله ۵ در معادله ۴ داریم:

$$A_{si}^t \frac{\Delta Z_i^{t+1}}{\Delta t} = P_i + \sum_k Q_{i,k}^t + \theta \left\{ \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{t+1} + \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{t+1} \right\} \quad (6)$$

اگر  $\theta = 0$  در معادله انتخاب شود، مدل تفاضل محدود صریح است و تراز  $Z_i^{t+1}$  در سلول  $i$  در زمان  $t+1 = (j+1) \cdot \Delta t$  از ترازهای معلوم در سلول های همسایه در زمان  $t = j \cdot \Delta t$  تعیین می شود. می توان نشان داد که  $\Delta t$  با یک شرط پایداری عددی محدود خواهد شد. به منظور جلوگیری از این محدودیت استفاده از روش ضمنی با فرض  $\theta = 1$  ترجیح داده می شود. در این صورت سیستم معادله های تفاضل محدود بدون قید و شرط پایدار است. با اعمال  $\theta = 1$  در معادله ۶ سیستم معادلات جبری خطی زیر حاصل می شود:

$$A_{si}^{t+1} \frac{\Delta Z_i^{t+1}}{\Delta t} = P_i^{t+1} + \sum_k Q_{i,k}^t + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_i} \Delta Z_i^{t+1} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_k} \Delta Z_k^{t+1} \quad (7)$$

برابر معادله (۷)، دبی ها در زمان  $t$  نوشته شده اند که همه متغیرها معلوم هستند. متغیرهای مجهول  $\Delta Z_k^{t+1}$  و  $\Delta Z_i^{t+1}$  وابسته به سلول های  $i$  و  $k$  به ترتیب با ارتفاع سطح آب در  $Z_i^{t+1}$  و  $Z_k^{t+1}$  مرتبط هستند. سلول ها در یک مدل توپولوژیکی سازماندهی می شوند (Miguez et al., 2017).

معادله ۷ برای حل مرتب می شود:

$$\Delta Z_i \left\{ -\frac{A_{si}}{\Delta t} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_i} \right\} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^t}{\partial Z_k} \Delta Z_k + L_i = 0 \quad (8)$$

که  $L_i$  تعریف می شود:

$$L_i = P_i + \sum_k Q_{i,k}^t \quad (9)$$

معادله ۸ با استفاده از روش های عددی حل می شود.

## ۲-۳- قانون های دبی بین سلول ها

برای ارتباط دبی بین سلول ها از قانون های هیدرولیکی به شرح زیر استفاده می شود.

- ۱- ارتباط رودخانه/کانال: این ارتباط با جریان های رودخانه و کانال مرتبط می باشد و با جریان سطح آزاد همخوانی دارد. این ارتباط به یکی از دو صورت می تواند تعریف شود.

$$Q_{i,k}^t = \frac{Q_{i,k}^{t-1} - gA_{i,k}^t \Delta t \frac{Z_k - Z_i}{\Delta x}}{1 - 2 \frac{(A_{i,k}^t - A_{i,k}^{t-1})}{A_{i,k}^t} - \frac{Q_{i,k}^{t-1}}{A_{i,k}^t A_{i,k}^t} \cdot \frac{(A_k - A_i)}{\Delta x} \cdot \Delta t + gA_{i,k}^t \frac{Q_{i,k}^{t-1} n^2}{A_{i,k}^t A_{i,k}^t (R_{i,k}^{t-1} R_{i,k}^t)^3} \Delta t} \quad (15)$$

b عرض موثر سرریز،  $Z_w$  تراز ارتفاعی سرریز،  $Z_i$  تراز آب مخزن بالادست و  $\mu$  ضریب دبی برابر با ۰/۳۸۴ می‌باشد (Chow et al., 1988).

۴- ارتباط روزنه: این ارتباط بیانگر فرمول کلاسیک جریان از طریق روزنه است.

$$Q(Z_i) = mA_0 \sqrt{2g} \sqrt{(Z_i - Z_r)} \quad (19)$$

$A_0$  سطح مقطع روزنه،  $Z_i$  تراز آب مخزن،  $Z_r$  تراز قرارگیری روزنه در مخزن و  $m$  ضریب ثابت تخلیه روزنه می‌باشد. ارتباط روزنه هنگامی تعریف می‌شود که از لوله پولیکا در بدنه خاکریز برای خروج جریان اضافی استفاده شده باشد. ۵- ارتباط مخزن: جریان از طریق روزنه یا سرریز بین مخزن‌ها برقرار می‌شود. کارکرد مخزن در ابعاد مختلف سرریز و روزنه و جانمایی متفاوت آن‌ها در شرایط طراحی بررسی می‌شود (Miguez et al., 2017).

### ۳- حوضه مورد بررسی

برای مدل‌سازی توزیع جریان سیلابی بر بندسار، منطقه اکبری در ۳۳ درجه و ۴۱ دقیقه شمالی و ۵۹ درجه و ۶ دقیقه شرقی و با میانگین ارتفاع حدود ۱۵۵۰ متر از سطح دریا برابر شکل ۲ از روستاهای شهر قاین در خراسان جنوبی در نظر گرفته شد. بندسارهای منطقه اکبری از ساحل رودخانه خشک آبرگیری می‌کنند. خشک‌رود در بالادست به دو شاخه تقسیم می‌شود در ساحل هر شاخه بندسارهایی برای آبرگیری احداث شده است. شیب میانگین خشک‌رود بر مخروط‌افکنه ۵ درصد می‌باشد. شمار ۴۸ بندسار واقع بر مخروط‌افکنه برابر شکل ۲ شماره‌گذاری و مدل‌سازی شدند. مدل ساماندهی سلولی منطقه در شکل ۳ ترسیم شده است.

### ۴- مدل هیدرولوژیکی

#### ۴-۱- آب‌نگار ورودی

آمار بارش منطقه از گزارش بررسی‌های سازمان هواشناسی

(ب) اگر از جمله‌های اینرسی در معادله سنت-ونانت صرف نظر شود از فرمول مانینگ-استریکلر استفاده می‌شود (Cunge, 1975):

$$\phi(\bar{Z}_{i,k}) = \frac{K(\bar{Z}_{i,k})}{\sqrt{\Delta x}} = \frac{A_{i,k} R_{i,k}^{2/3}}{n \sqrt{\Delta x}} \quad (16)$$

که  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $A_{i,k}$  مساحت مقطع عرضی جریان بین سلول‌های  $i$  و  $k$  شعاع هیدرولیکی مقطع جریان بین سلول‌های  $i$  و  $k$   $\bar{Z}_{i,k} = \alpha Z_i + (1-\alpha) Z_k$  میانگین وزنی تراز بین ترازهای دو سلول  $i$  و  $k$  است. تابع  $K = K(\bar{Z}_{i,k}) = K(Z_i, Z_k)$  به‌عنوان فاکتور انتقال مقطع جریان بین دو سلول  $i$  و  $k$  تعریف می‌شود. ضریب وزنی  $\alpha$  برای یک جفت معین از سلول‌ها ثابت می‌باشد.  $\bar{Z}_{i,k}$  نتیجه درونیابی خطی بین ترازهای  $Z_i$  و  $Z_k$  در مراکز سلول‌های  $i$  و  $k$  است. فرمول دبی به تابع علامت (قراردادی سازگار با توجه به جهت جریان) بستگی دارد (Cunge, 1975):

$$Q_{i,k} = \text{sign}(Z_i - Z_k) \cdot \phi \cdot \sqrt{|Z_i - Z_k|} \quad (17)$$

در عمل تفاوت چندانی در استفاده از معادله‌های ۱۵ یا ۱۷ ملاحظه نگردید.

۲- ارتباط جریان‌های سطحی: این ارتباط مربوط به جریان سطح آزاد و بر مبنای معادله سنت-ونانت بدون جمله‌های اینرسی است. در مدل سلولی از این ارتباط برای بیان جریان بین سلول‌های سطحی طبیعی استفاده می‌شود. برای مدل سازی این نوع جریان‌ها از فرمول ۱۷ استفاده می‌شود.

۳- ارتباط از نوع سرریزی: جاده‌ها یا خاکریزها یک مرز با افت بار شایان توجه بین دو سلول تشکیل می‌دهد. در این مورد از فرمول دبی کلاسیک برای سرریزهای لبه پهن استفاده می‌شود. جریان بر روی سرریز می‌تواند آزاد یا مستغرق باشد. برای مثال برای جریان خروجی از مخزن با فرض  $Z_i < Z_k$  (سلول بالادست) و شرایط جریان آزاد از سرریز از معادله زیر استفاده می‌شود (Cunge, 1975).

$$Q_{i,k} = \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot (Z_i - Z_w)^{3/2} \quad (18)$$



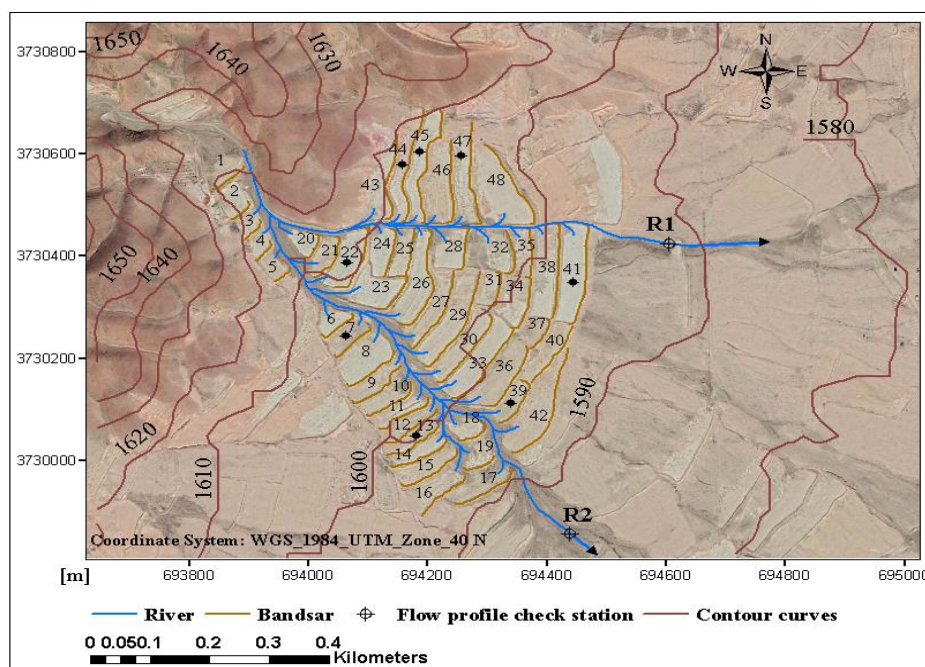


Fig. 2 Akbarieh catchment in Qaen city

شکل ۲ حوزه مورد بررسی اکبریه در شهر قاین

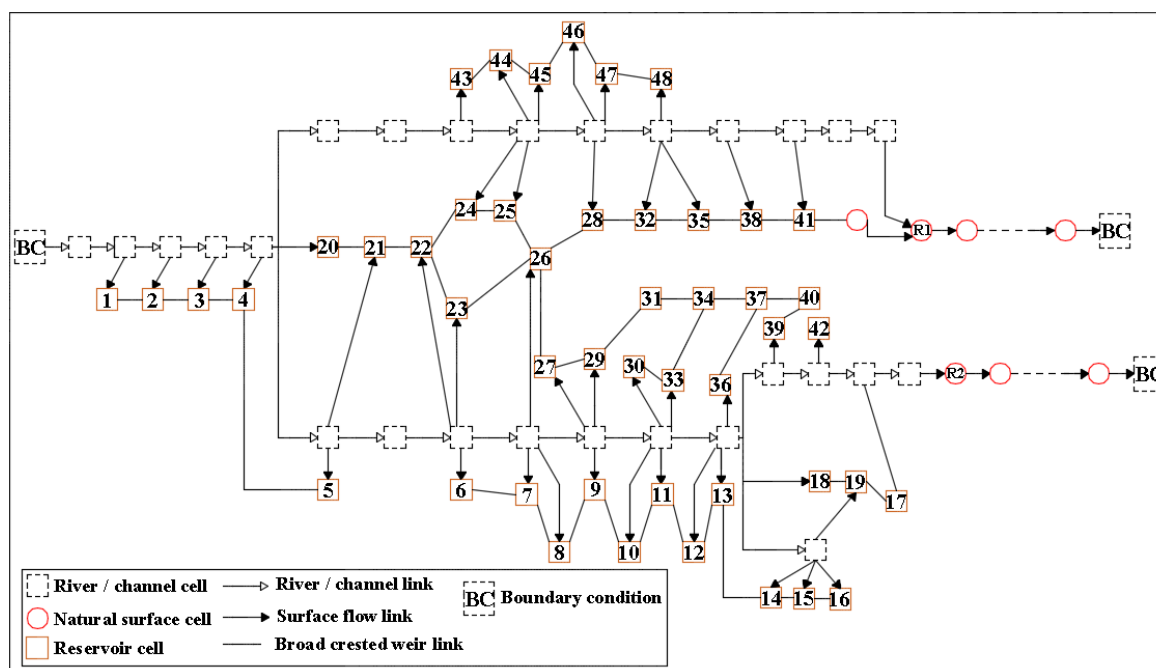


Fig. 3 topological model of Akbarieh in Qaen city

شکل ۳ مدل ساماندهی سلولی اکبریه در شهر قاین

شد (Chow et al., 1988).

$$f = f_c + (f_o - f_c) e^{-kt} \quad (20)$$

بافت خاک بستر بندسارها لوم‌لای است. بر همین مبنا سرعت نفوذ اولیه ( $f_o$ )  $210 \text{ mm/hr}$ ، سرعت نفوذ نهایی ( $f_c$ )  $21/3 \text{ mm/hr}$  و پارامتر ثابت کاهش سرعت نفوذ ( $k$ ).

استخراج شد (اداره هواشناسی خراسان جنوبی) و با استفاده از نرم افزارهای HEC-HMS و GIS آب‌نگارهای طرح ناحیه مورد بررسی (برابر شکل ۴) به دست آمد.

#### ۴-۲- مدل نفوذ

در این تحقیق از مدل هورتون برای مدل‌سازی نفوذ استفاده

بندسارها، در نظر گرفته شد و سیل ۵ ساله به عنوان شرط مرزی ورودی به آن با استفاده از مدل MODCEL بدون اثر نفوذ و نرم افزار استاندارد HEC-RAS روندیابی شد. به علت شیب زیاد منطقه و به جهت پایداری، در نرم افزار HEC-RAS از مدل به طور کامل ضمنی استفاده شد و گام زمانی در هر دو مدل ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد. در شکل ۵ آبنگار سیلاب در ایستگاه R2 با مدل های MODCEL و HEC-RAS ترسیم شده است.

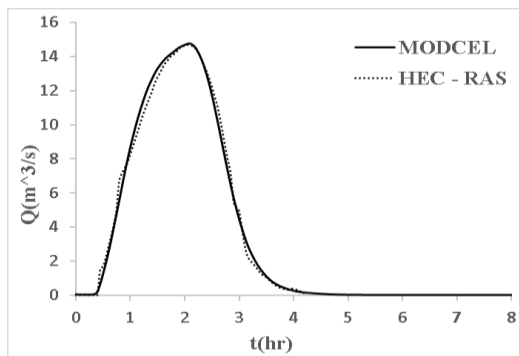


Fig. 5 Flood routing simulation at R2 station with MODCEL and HEC-RAS algorithms

شکل ۵ روندیابی سیلاب ۵ ساله در ایستگاه R2 با الگوریتم های MODCEL و HEC-RAS

نتایج روندیابی نشان می دهد دبی اوج و حجم سیلاب برای دو الگوریتم با کمتر از نیم درصد اختلاف بسیار نزدیک به هم هستند که نشان دهنده دقت مدل MODCEL می باشد.

## ۶- نتایج و بحث

جهت مدل سازی جریان در منطقه مطالعاتی هیدروگراف سیل پنج ساله به عنوان شرط مرزی ورودی به مدل داده شد. پس از برقراری جریان سیلاب در خشک رود، بندداران منطقه به آگیری محدود اقدام می کنند. به این صورت که با حضور در زمان آگیری بندسار، جریان ورودی به آن را کنترل می کنند. پس از آگیری به مقدار کافی، بنددار اقدام به بستن جریان ورودی می کند تا جریان اضافی سبب آسیب به بندسار نشود و همچنین بندداران پایین دست بتوانند از جریان سیلاب استفاده کرده بندهای خود را تغذیه کنند.

در این تحقیق براساس هیدروگراف سیل ورودی و مساحت هر بندسار مدیریت بهینه سیلاب به گونه ای انجام گرفت که

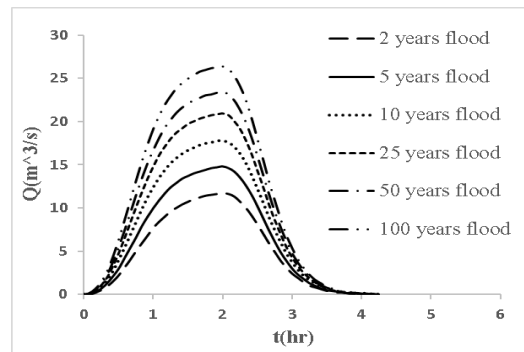


Fig. 4 Flood hydrographs of Akbarieh catchment with different return periods

شکل ۴ آبنگارهای سیل حوضه آبریز اکبری به با دوره های بازگشت مختلف

Arabkhedri and ) در نظر گرفته شد (  $0.33 \text{ sec}^{-1}$  (Kamali, 2017) و (Alizadeh, 2015). درصد رس و سیلت خاک بندها به دلیل تجمع رسوب های ریزدانه زیاد است (Akbari et al., 2016).

## ۴-۳- مدل تبخیر

برای مدل سازی تبخیر، فرمول تجربی زیر به کار گرفته شد (Alizadeh, 2015).

$$E = 0.35(e_s - e_d)(0.5 + U_2/100) \quad (21)$$

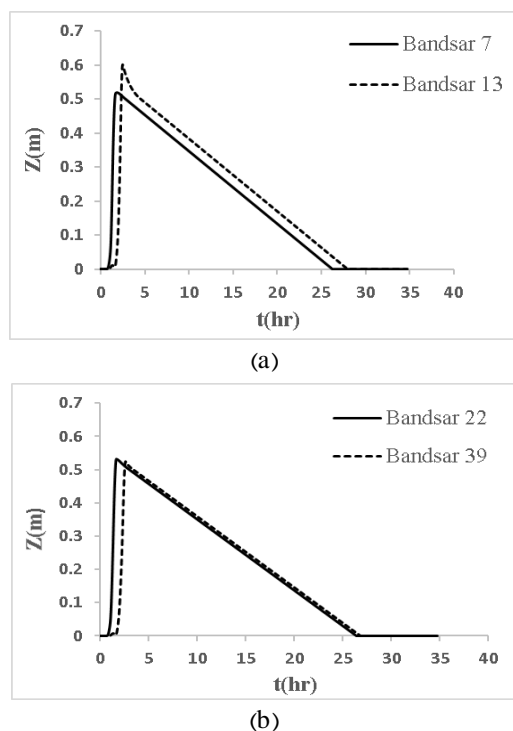
$e_s$  و  $e_d$  به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی (برحسب میلی متر جیوه) و اختلاف آن ها کمبود فشار بخار می باشد. بر مبنای گزارش بررسی های هواشناسی سرعت میانگین باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین،  $U_2$ ، در منطقه اکبری ۲۱۵ (مایل بر روز) در نظر گرفته شد. برای محاسبه  $(e_s - e_d)$  (برحسب کیلو پاسکال) از فرمول زیر استفاده شد.

$$e_s - e_d = \left[ \exp\left(\frac{16.78T - 116.9}{T + 237.3}\right) \right] \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (22)$$

بر مبنای گزارش مطالعات هواشناسی در منطقه اکبری  $T$  متوسط دمای روزانه برابر با ۴ درجه سانتی گراد و  $RH$  متوسط رطوبت نسبی برابر با ۷۵ درصد در نظر گرفته شدند (اداره هواشناسی خراسان جنوبی).

## ۵- صحت سنجی مدل سلولی

برای صحت سنجی مدل سلولی، شاخه اصلی خشک رود مخروط افکنه اکبری، منتهی به ایستگاه R2، پس از مجموعه



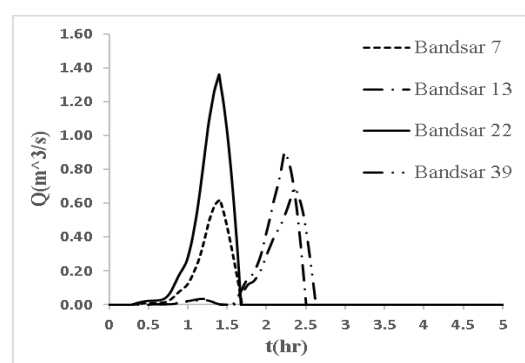
**Fig. 7** Water levels in a few bandsars including the effect of infiltration and evaporation

شکل ۷ تراز آب در چند نمونه از بندسارها با اثر نفوذ و تبخیر

نمونه ترسیم شده است. تراز آب در این بندسارها در مدت نسبتاً کوتاهی به حداکثر خود می‌رسند اما پس از آن به سبب نفوذ به تدریج و در مدت نسبتاً طولانی‌تری به طور تقریباً خطی با شیب ملایمی کاهش پیدا می‌کند و به صفر می‌رسد. مطابق شکل ۸ در صورت در نظر نگرفتن اثر نفوذ و تبخیر، پس از قطع کامل جریان ورودی به بندسار تراز آب در صورتی که بالاتر از تراز تاج سرریز (۵۰ سانتی‌متر) باشد به علت روگذری تا تراز سرریز کاهش می‌یابد و پس از آن ثابت باقی می‌ماند و در صورتی که کمتر از تراز تاج سرریز باشد تراز آب در بند تغییر نمی‌کند. حداکثر تراز آب در بندها در این حالت نسبت به حالت مدل‌سازی با اثر نفوذ و تبخیر تفاوت زیادی ندارد زیرا در فاصله کوتاه پرشدن بندسار آب هنوز فرصت نفوذ کافی پیدا نمی‌کند. در شکل ۹ هیدروگراف جریان عبوری از خشک‌رود در ایستگاه‌های R1 و R2 (واقع در پایین دست مجموعه بندسارهای شکل ۲) در حالت‌های با و بدون عملکرد بندسارها ترسیم شده است.

بندسارهای پایین دست برای استفاده از جریان سیل با مشکل مواجه نشوند. بنابراین فرض بر آن شد که جریان ورودی از خشک‌رود پس از رسیدن تراز آب در پشت هر بندسار به ۳۵ سانتی‌متر در یک بازه زمانی ۱۵ دقیقه‌ای کاملاً متوقف شود. ورود جریان سیلابی به بندخاکی تا مسدود شدن کامل عرض ورودی ادامه دارد، پس در عمل تراز نهایی آب در بندها بیش‌تر از ۳۵ سانتی‌متر می‌شود. ارتفاع بندسارها ۰/۹۵ متر می‌باشد و در هر یک از آنها سرریزی در ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر با عرض ۳ متر در نظر گرفته شده است به طوری که اگر تراز آب پشت بندسار، بالاتر از تراز سرریز شود آب مازاد به بندسار بعدی هدایت شود تا از مخاطرات تخریب ناشی از روگذری بندخاکی جلوگیری شود.

در شکل ۶ هیدروگراف جریان از خشک‌رود به بندسارهای ۷، ۱۳، ۲۲، ۳۹ به عنوان نمونه ترسیم شده است.



**Fig. 6** Hydrograph of the incoming flood from dry river to typical bandsars

شکل ۶ هیدروگراف سیل ورودی از خشک‌رود به چند نمونه از بندسارها

بندسارهای پایین دست (۱۳ و ۳۹) نسبت به بندهای بالادست (۷ و ۲۲) در زمان دیرتری آبیگری میشوند. سطح زیر منحنی هیدروگراف‌های سیل ورودی از خشک‌رود به هر بندسار حجم سیلاب ورودی به آن را بدست می‌دهد. بر همین اساس مطابق شکل ۶ حجم سیلاب ورودی به بندسارهای ۷، ۱۳، ۲۲ و ۳۹ به ترتیب برابر با ۹۸۰، ۱۴۲۴، ۲۱۶۹ و ۱۲۶۷ مترمکعب می‌باشد. در نتیجه هر کدام از بندسارهای مذکور به ترتیب ۰/۹۸، ۱/۴۳، ۲/۱۸ و ۱/۲۷ درصد سیلاب ورودی به منطقه را استحصال می‌کنند. در شکل ۷ تراز آب بندسارهای ۷، ۱۳، ۲۲ و ۳۹ به عنوان

۹۹۵۷۰ مترمکعب برآورد می‌شود. از این مقدار جمعاً ۹۲ درصد توسط بندسارها ذخیره می‌شود. این میزان سیلاب با نفوذ به داخل خاک، زمین را مستعد کشت دیم می‌کند. برای بررسی اهمیت کنترل سیلاب توسط بندداران، مدل سازی جریان در صورت عدم کنترل سیلاب ورودی به بندسارهای منطقه (برابر شکل ۱۰) صورت گرفت. بر مبنای نتایج به دست آمده تراز آب بندسارهای (۴۴، ۴۵ و ۴۷) در بالادست از تراز تاج سازه خاکی (۹۵ سانتی‌متر) بالاتر رفته و به سبب روگذری موجب تخریب آن می‌شود. در نتیجه بندسارهای پایین دست آن‌ها نیز تخریب می‌شوند. همچنین بندسار ۴۱ در پایین دست به سبب پایان جریان سیلابی توسط بندهای بالادست تغذیه نمی‌شود.

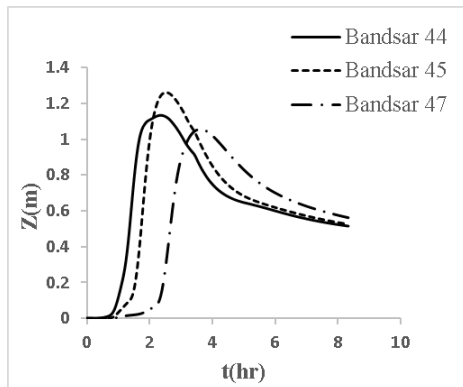


Fig. 10 Water levels in a few bandsars without flood control

شکل ۱۰ تراز آب در چند نمونه از بندسارها بدون کنترل سیلاب ورودی

شکل ۱۱ تراز آب در چند نمونه از بندسارها در حالت کنترل سیلاب را نشان می‌دهد.

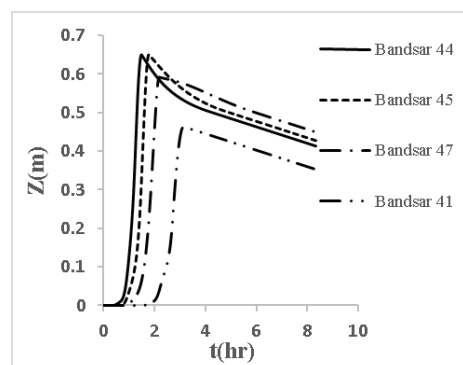
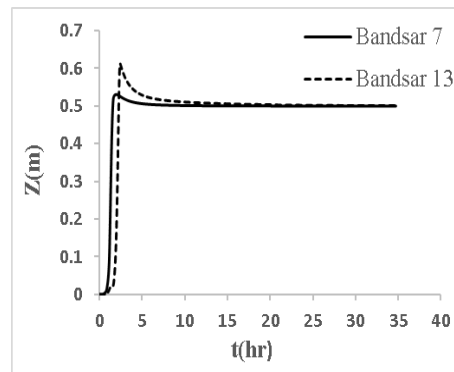
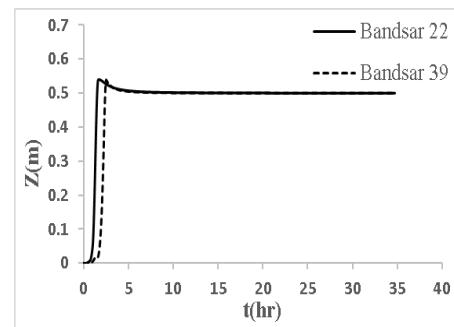


Fig. 11 Water levels in a few bandsars with flood control

شکل ۱۱ تراز آب در چند نمونه از بندسارها در حالت کنترل سیلاب ورودی



(a)



(b)

Fig. 8 Water levels in a few bandsars excluding the effect of infiltration and evaporation

شکل ۸ تراز آب در چند نمونه از بندسارها بدون اثر نفوذ و تبخیر

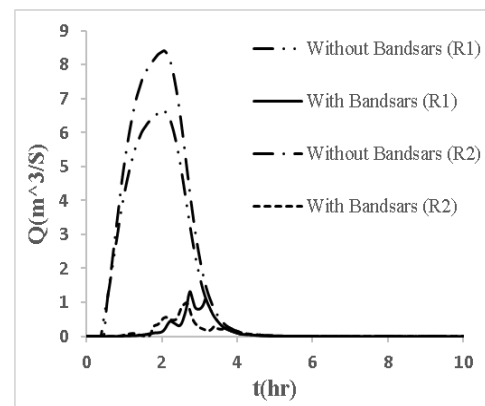


Fig. 9 Flood hydrograph at stations R1 and R2 in the presence and absence of the bandsars

شکل ۹ هیدروگراف سیل در ایستگاه‌های R1 و R2 در حضور و عدم حضور بندسار

کارایی بندسارهای منطقه اکبریه در استحصال سیلاب باعث کاهش چشمگیر حجم سیلاب در ایستگاه‌های R1 و R2 می‌شود. برابر شکل ۹ حجم سیلاب در ایستگاه‌های R1 و R2 به ترتیب ۹۱ و ۹۴ درصد و دبی اوج آب‌نگار ۸۱ و ۸۹ درصد در حضور بندسار کاهش پیدا می‌کند. حجم کل سیلاب ورودی به منطقه اکبریه از آب‌نگار شکل ۴ معادل

زمین نفوذ می‌کند و محیط مناسبی را برای کشت دیم فراهم می‌سازد.

### ۸- فهرست نشانه‌ها

$A_i$	سطح مقطع عرضی مرطوب شده سلول $i$ ( $m^2$ )
$A_{i,k}$	مساحت مقطع عرضی جریان بین سلول‌های $i$ و $k$ ( $m^2$ )
$A_k$	سطح مقطع عرضی مرطوب شده سلول $k$ ( $m^2$ )
$A_{si}$	مساحت سطح آب سلول $i$ ( $m^2$ )
$A_o$	سطح مقطع روزنه ( $m$ )
$b$	عرض موثر سرریز
$E$	تبخیر از سطح آزاد آب ( $mm/day$ )
$e$	عدد نپر
$e_d$	فشار بخار واقعی ( $mmHg$ )
$e_s$	فشار بخار اشباع ( $mmHg$ )
$f$	سرعت نفوذ در هر لحظه ( $mm/hr$ )
$f_c$	سرعت نفوذ نهایی ( $mm/hr$ )
$f_o$	سرعت نفوذ اولیه ( $mm/hr$ )
$g$	شتاب گرانش زمین ( $m/sec^2$ )
$j$	ضریب گام زمانی
$k$	ثابت کاهش سرعت نفوذ ( $sec^{-1}$ )
$K$	فاکتور انتقال مقطع جریان
$m$	ضریب ثابت تخلیه روزنه
$n$	ضریب زبری مانینگ
$P_i$	دبی مربوط به بارش بر سلول ( $m^3/sec$ )
$Q_{i,k}$	جریان مبادله شده بین سلول‌های $i$ و $k$ ( $m^3/sec$ )
$RH$	میانگین رطوبت نسبی (%)
$R_{i,k}$	شعاع هیدرولیکی مقطع عرضی جریان بین سلول‌های $i$ و $k$
$S_f$	شیب خط انرژی
$t$	متغیر مستقل زمان ( $s$ )
$T$	میانگین دمای روزانه ( $^{\circ}C$ )
$U_2$	سرعت میانگین باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $mile/day$ )
$x$	متغیر مستقل مکان

در صورت کنترل سیلاب ورودی به بندسار (برابر شکل ۱۱) تراز آب بندهای بالادست از تراز تاج سازه خاکی بالاتر نمی‌رود و روگذری رخ نمی‌دهد. بندسار ۴۱ در پایین‌دست نیز از جریان سیلابی استفاده می‌کند و آب در آن ذخیره می‌شود.

### ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش کاربرد مدل شبه دوبعدی MODCEL در بررسی نقش بندسارها به‌عنوان سازه‌های سنتی در پخش و نگهداری سیلاب خشک‌رودها بررسی و ارزیابی شد. نتایج این مدل در مقایسه با HEC-RAS به‌طور کامل رضایت بخش است و سرعت محاسباتی آن به‌ویژه در منطقه‌های با شمار زیاد بندسار در مقایسه با مدل‌های دو بعدی بیشتر است هرچندکه جزئیات کمتری دارد. مدل پیشنهادی در شیب‌های تند بستر، شبکه‌های نامنظم ریز و درشت و بسترهای تر و خشک پایدار است، قابلیت در نظرگرفتن اثرات نفوذ و تبخیر را دارد و آب‌نگار جریان‌های ورودی، خروجی و ذخیره آبی در بندسارها با استفاده از آن محاسبه می‌شود. کارکرد بندسارهای منطقه اکبری قاین در سیلاب پنج ساله بررسی شد. در صورت کنترل سیلاب ورودی، همه بندهای خاکی ناحیه مورد بررسی می‌توانند از جریان سیلابی استفاده کرده و تغذیه آبی شوند. به‌دلیل کنترل سیلاب ورودی ارتفاع آب داخل بندها از تراز تاج آنها بالاتر نمی‌رود و در نتیجه از شکست این سازه خاکی جلوگیری می‌شود. در صورتی‌که سیلاب ورودی کنترل نشود بندهای خاکی پایین‌دست ناحیه مورد بررسی نمی‌توانند از جریان سیلابی استفاده کنند چراکه این جریان توسط بندهای بالادست به‌طور کامل استفاده می‌شود. افزون بر این، به‌سبب آب اضافی ورودی به بندهای بالادست، تراز آب از تراز تاج بند بیش‌تر شده امکان دارد که سازه خاکی به‌دلیل روگذری تخریب شود. بر مبنای نتایج به‌دست آمده ۹۲ درصد از حجم کل سیلاب ورودی به منطقه اکبری در مجموعه بندسارها ذخیره می‌شود. در این تحقیق نشان داده شد که بندسارهای خاکی در مدیریت بهره‌برداری از سیلاب با کاهش حجم و دبی اوج و افزایش زمان رسیدن به دبی اوج نقش موثری دارند. آب ذخیره شده در بندسار به‌تدریج در

- Pitman Publishing. London, 420p.
- Meteorological Organization of South Khorasan (2021). Internal report of Research Group, Iran, oral communication, Iran.
- Jafari, M., Ashorinejad, A.M.S., Arabkhedri, M. and Azarnivand, H. (2003). Effects of flood collection in Bandsars on soil physical and chemical properties. *Iranian J. Natural Res.* 55(4). 465-477. (In Persian)
- Mascarenhas, F.C.B. and Miguez, M.G. (2002). Urban flood control through a mathematical cell model. *International water resources.* 27(2), 208-218.
- Miguez, M.G., Mascarenhas, F.C.B. and Magalhães, L.P.C. (2005). Multifunctional landscapes for urban flood control in developing countries. *J. Sustainable Development and Planning.* 2, 1579-1588.
- Miguez, M.G., Battemarco, B.P., Sousa, M.M.D., Rezende, O.M., Verol, A.P. and Gusmaroli, G. (2017). Urban flood simulation using MODCEL-An alternative quasi-2D conceptual model. *Journal of Water.* 9(445), 1-28.
- Miguez, M.G., Mascarenhas, F.C.B. and Verol, A.P. (2011). MODCEL: A mathematical model for urban flood simulation and integrated flood control design. *Convegno Nazionale Di Idraulica Urbana, Venezia, Italy.*
- Miguez, M.G., Verol, A.P., Mascarenhas, F.C.B., Santos, R.B. and Martingil.M.C. (2012). Compensatory techniques on urban drainage for flood control with the aid of mathematical modelling: a case study in Rio de Janeiro city. *J. Urban Water.* 122, 227-238.
- Nazari Samani, A.A., Khalighi, S., Arabkhedri, M. and Farzadmehr, J. (2014). Indigenous knowledge and techniques of runoff harvesting (Bandsar and Khooshab) in arid and semi arid regions of iran, *Journal of Water Resource and Protection,* 6, 784-792.
- Sharifikia, M. and Mazaffari, Z. (2014). Extraction of physical properties and explanation of the efficiency of Bandsars in the management of water and soil resources of arid areas based on telemetry techniques. *Geographical Studies of Arid Regions,* 4(16), 1-14. (In Persian)
- Zanobetti, D., Lorgeré, H., Preissman, A. and Cunge, J.A. (1970). Mekong Delta Mathematical Program construction. *Journal of the Waterways and Harbors and Coastal Engineering Division,* 96(2), 181-199
- $Z_i$  تراز ارتفاعی آب در سلول  $i$  (m)
- $\bar{Z}_{i,k}$  میانگین وزنی تراز بین سلول‌های  $i$  و  $k$  (m)
- $Z_k$  تراز ارتفاعی آب در سلول  $k$  (m)
- $Z_r$  تراز قرارگیری روزنه (m)
- $Z_w$  تراز ارتفاعی سرریز (m)
- $\alpha$  ضریب وزنی
- $\Delta t$  گام زمانی
- $\Delta x$  فاصله بین مرکزهای سلول‌ها
- $\tau$  متغیر زمانی
- $\theta$  ضریب وزنی
- $\mu$  ضریب دبی سرریز
- ### ۹- منابع
- Akbari, M., Dastorani, M.T. and Abbasi, A.A. (2016). Evaluation of the effects of traditional rainwater harvesting structures on soil conditions improvement (Case study: Bandsars in south Sabzevar). *Iranian J. Rainwater Catchment Systems.* 4, 33-42. (In Persian)
- Akbari, M., Dastorani, M.T. and Abbasi, A.A. (2016). Investigating the structure of Bandsars as traditional structures for rainwater harvesting in arid and semi-arid regions(Case study: south Sabzevar region). *4<sup>th</sup> National Congress on Rainwater Catchment Systems. Mashhad, Iran.* (In Persian)
- Alizadeh, A. (2015). Principles of Applied Hydrology. Emam Reza University. Mashhad, 942p. (In Persian)
- Arabkhedri, M. and Kamali, k. (2017). Bandsar: Traditional soil and water conservation methods for flood farming. *Publication of Agricultural Education. Tehran,* 70p. (In Persian)
- Brito, P.L.C., Miguez, M.G. and Azevedo, J.P.S. (2018). Baseflow representation module on MOD-CEL. *J. Water Res.* 23, 1-12.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology,* McGraw-Hill Book Company . New York, 588p.
- Cunge, J.A. (1975). Two-Dimensional modeling of flood plains, In: Mahmood, K. and Yevjevich, V. (editor) , *Unsteady Flow In Open Channels.* Water Resources Publications. U.S.A.
- Cunge, J.A., Holly, F.M. and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics.*