




## Direct-tangible costs in flood zones simulated using the HEC-RAS 2-D hydraulic model – the Arazkuseh River, Golestan Province

Shahnaz Mirzaei<sup>1</sup> , Amir Sadoddin<sup>2\*</sup> , Abdolreza Bahremand<sup>2</sup> , Majid Ownegh<sup>3</sup> , Raof Mostafazadeh<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Former Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>2</sup> Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Arid Zone Management, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction

Flood events are the most complex natural hazards that endanger human and animal lives, social and economic structures, and environmental resources more than any other natural disaster. This phenomenon is caused by water flow exceeding the river's channel capacity. The expansion of flood zones along riverbanks in recent years due to climate change and inappropriate use of natural resources is associated with irreparable socio-economic and environmental damages. The simulation of potential flood zones is crucial for managing flood-prone areas. Hydraulic models have proved to be useful in simulating flood zones, identifying hotspot areas, and thus, estimating potential damages. The Arazkuseh River is situated downstream of three watersheds, namely Minodasht, Narmab, and Nodeh Khandooz. It is prone to flooding during periods of heavy rainfall in the watersheds. This research aims to assess the performance of the HEC-RAS 2-D hydraulic model in simulating the flood zone for the March 17, 2019, event and to estimate the direct and tangible damages incurred along a 9-km river reach of the Arazkuseh River due to floods with different return periods.

#### Materials and Methods

The HEC-RAS software can calculate water levels in rivers while considering hydraulic structures. To estimate velocity vectors, the two-dimensional diffusion wave method was used, which provides more stable numerical solutions and reduces the calculation time. A digital elevation model (DEM) map with a resolution of one meter was used to create input terrain data for this model. The flood event hydrograph from March 17, 2019, with a peak discharge of 355 m<sup>3</sup>/s, was recorded at the Arazkuseh hydrometric station located at the joint outlet of the upstream watersheds. Manning's roughness coefficient values estimated based on field observations in the channel and flood plain were also calibrated with the F-index during the evaluation of the model's performance. To evaluate the performance of the HEC-RAS 2-D model, the model's outputs for the flood event on March 17, 2019, were compared with the flood zones identified by Sentinel-2 satellite images on two different days (March 23 and April 2, 2019). The Pilgrim's computational method was used to identify the temporal distribution model of the design rainfalls in the Arazkuseh watershed for different return periods. Additionally, the Co-Kriging geostatistical method was used to estimate the spatial pattern of the design rainfalls. Thus, the hydrographs simulated by the HEC-HMS hydrological model for the design rainfalls were considered as inputs to the HEC-RAS software. Following the identification of the elements exposed to flooding, direct and tangible damages caused by the simulated floods on different land uses were estimated by collecting information from different sources along with field observations.

#### Results and Discussion

The F-index values (79% and 71% for March 23, 2019 and April 2, 2019, respectively) indicate that the HEC-RAS 2-D model has an acceptable performance in simulating flood zones in the Arazkuseh River. However, the

simulated flood zone was overestimated compared to the flood zone observed in the Sentinel-2 images. The overestimation of the flood zone by the HEC-RAS 2-D model can be related to the accuracy of the DEM map and Manning's roughness coefficient estimation. Analysis of the flood zone for the 100-year return period, as a base flood, reveals that crops, trees, dirt roads, residential areas, and asphalt roads are the most likely to experience inundation, in that order. Even in a 10-year return period, croplands are likely to be included in the flood zone due to the gentle slope and their proximity to the river bank. The highest amount of direct-tangible costs for the 100-year flood is associated with croplands, residential areas, trees, dirt roads, and asphalt roads, with values of 20889, 8650, 7503, 2250, and 1750 million Iranian rials, respectively.

### Conclusion

The use of DEM data with appropriate spatial resolution is crucial in creating terrain data and simulating flood zones in two-dimensional models. Damages to agricultural products and costs attributed to the removal of sediments and cleaning in croplands will be significant due to flood water spreading across this land use. The high damage incurred in the residential areas is due to costly repairs required after flooding and the price of household contents. The total area of land use exposed to a 100-year flood is about 23 ha, and the total damage incurred is approximately 41042 million Iranian rials. Therefore, due to the expansion of residential areas along the river, it is necessary to mitigate flood hazards, enhance adaptive and coping capacities, and reduce the level of exposure.

**Keywords:** Flood exposure, HEC-HMS hydrological model, Manning's roughness coefficient, Sentinel-2 image

**Article Type:** Research Article

### Acknowledgement

We are very grateful to the Regional Water Company of Golestan Province for providing data and the Provincial Office of Natural Resources and Watershed Management, along with their colleagues in Gonbad, for their assistance in data collection. The authors appreciate Tahereh Mohammadi, Sorayya Yaghobi, and Sajjad Ahmadyosefi for their assistance in field data collection. This research was financially supported by Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources as part of a PhD thesis grant.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

### Data availability statement

All information and results are presented in the manuscript.

### Authors' contribution

**Shahnaz Mirzaei:** Software/statistical analysis, Visualization, Results interpretation, First draft preparation; **Amir Sadoddin:** Supervision, Results interpretation, Final editing; **Abdolreza Bahremand:** Supervision, Conceptualization, Final editing; **Majid Ownegh:** Supervision, Conceptualization; **Raof Mostafazadeh:** Conceptualization, Data analysis, Final editing.

\*Corresponding Author, E-mail: amir.sadoddin@gau.ac.ir

**Citation:** Mirzaei, Sh., Sadoddin, A., Bahremand, A., Ownegh, M., & Mostafazadeh, R. (2025). Direct-tangible costs in flood zones simulated using the HEC-RAS 2-D hydraulic model – the Arazkuseh River, Golestan Province, *Water and Soil Management and Modeling*, 5(1), 57-74.  
doi:10.22098/MMWS.2024.14501.1410

Received: 26 January 2024, Received in revised form: 12 March 2024, Accepted: 14 March 2024,  
Published online: 21 March 2025

*Water and Soil Management and Modeling*, Year 2025, Vol. 5, No. 1, pp. 57-74

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





## هزینه‌های مستقیم-ملموس در پهنه‌های سیلابی شبیه‌سازی شده با مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS- رودخانه‌ی آراز کوسه استان گلستان

شهناز میرزایی<sup>۱</sup>، امیر سعدالدین<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۳</sup>، اونق، مجید<sup>۴</sup>، رئوف مصطفی‌زاده<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۲</sup> استاد، گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۳</sup> استاد، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
<sup>۴</sup> دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

شبیه‌سازی پهنه سیل‌های احتمالی از مسائل مهم در مدیریت مناطق در معرض سیل جهت کاهش خطرات آن است. گسترش پهنه سیل در حاشیه رودخانه‌ها و سواحل می‌تواند خسارت‌های اجتماعی-اقتصادی و محیطی فراوانی را بر منابع طبیعی و انسانی در بر داشته باشد. استفاده از مدل‌های هیدرولیکی در شبیه‌سازی پهنه سیل، تعیین مناطق پرخطر و در نتیجه برآورد خسارت‌های احتمالی قابل توجه است. رودخانه‌ی آراز کوسه در پایین‌دست سه آبخیز کوهستانی مینودشت، نرماب و نوده‌خاندوز قرار دارد که در مواقع بارش شدید مستعد سیلابی شدن است. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه سیل رخداد مورخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ و برآورد خسارت‌های مالی مستقیم-ملموس در بازه‌ای به طول نه کیلومتر از رودخانه‌ی آراز کوسه در دوره‌های بازگشت مختلف است. در اجرای مدل دو بعدی HEC-RAS، از نقشه‌ی مدل رقمی ارتفاعی یک متری استفاده شد. عملکرد مدل در شبیه‌سازی پهنه سیل، با استفاده از تصاویر ثبت شده ماهواره‌ی سنتینل-۲ در دو زمان مختلف (۳ و ۱۳ فروردین ۱۳۹۸) از رخداد سیل مورخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ از طریق واسنجی مقادیر ضریب زبری مانینگ برآوردی بر اساس مشاهدات میدانی بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل دو بعدی HEC-RAS بر اساس شاخص F (۷۹ و ۷۱ درصد به ترتیب برای مورخ ۳ و ۱۳ فروردین ۱۳۹۸) عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی پهنه سیل رودخانه‌ی آراز کوسه دارد. سپس هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در دوره‌های بازگشت مختلف به‌عنوان ورودی نرم‌افزار HEC-RAS به‌منظور تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه سیل در دوره‌های بازگشت مختلف در نظر گرفته شد. نتایج پهنه‌بندی سیل در دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال به‌عنوان سیل مبنا نشان داد که به‌ترتیب کاربری‌های زراعی، باغ غیرمثمر، جاده خاکی، مناطق مسکونی و جاده آسفالت بیش‌تر در معرض غرقابی شدن قرار دارند. بیش‌ترین مقدار خسارت نیز مربوط به اراضی زراعی و مناطق مسکونی در دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال به‌ترتیب برابر با ۲۰۸۸۹ و ۸۶۵۰ میلیون ریال است. با توجه به مجموع مساحت کاربری‌های در معرض خطر سیل (حدود ۲۳ هکتار) و مجموع خسارت وارده بر آن‌ها (حدود ۴۱۰۴۲ میلیون ریال)، برنامه‌ریزی و مدیریت در حاشیه رودخانه به‌منظور کاهش ریسک سیل از موارد ضروری است.

**واژه‌های کلیدی:** ضریب زبری مانینگ، در معرض سیل، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، تصویر سنتینل-۲.

### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amir.sadoddin@gau.ac.ir

**استناد:** میرزایی، شهناز، سعدالدین، امیر، بهره‌مند، عبدالرضا، اونق، مجید، و مصطفی‌زاده، رئوف (۱۴۰۴). هزینه‌های مستقیم-ملموس در پهنه‌های سیلابی شبیه‌سازی شده با مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS-رودخانه‌ی آراز کوسه استان گلستان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵۷(۱)، ۵۷-۷۴. doi:10.22098/MMWS.2024.14501.1410

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱



مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۱، صفحه ۵۷ تا ۷۴  
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

## ۱- مقدمه

مخاطرات طبیعی، رویدادهایی هستند که به شکل معناداری محیط‌های طبیعی و انسانی را تخریب می‌کنند (Sideng et al., 2023). رویداد سیل یکی از مخاطرات طبیعی است که به دلیل افزایش جریان آب بیش از ظرفیت زهکشی رودخانه، مازاد آن به شکل رواناب در سطح زمین جاری می‌شود (Raghunath, 2006). در طی تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، شهرسازی و سایر فعالیت‌های اجتماعی و اقتصادی، بزرگی و فراوانی رخداد‌های سیل بزرگ در کل جهان نسبت به دهه‌های قبل افزایش یافته است (Bhusal et al., 2022; Moshashaie et al., 2022). رویداد سیل ممکن است در اثر بارش‌های کوتاه‌مدت (شدید) و یا بلندمدت رخ دهد. با افزایش فراوانی رویداد بارش و بزرگی آن، خسارت‌های سنگین جانی و مالی نیز افزایش خواهد یافت (Shaikh Baikloo, 2023; Islam, 2021; Tufano et al., 2023). بنابراین، نیازمند تعریف روش مناسب به منظور پیش‌بینی سیل‌های بزرگ در مناطق در معرض سیل است (Abdessamed and Abderrazak, 2019). اگر چه پیش‌بینی بزرگی و فراوانی سیل‌های آینده که ناشی از سازوکارهای پیچیده پیش‌ران هستند، دشوار است، اما بدیهی است که با رشد جوامع و اقتصاد، خسارت‌های سیل افزایش خواهد یافت (Shustikova et al., 2019; Donyari et al., 2022). از این‌رو، ارائه اطلاعات در مورد توزیع مکانی احتمالی سیل‌هایی که انتظار می‌رود در یک منطقه رخ دهد، به مدیران و برنامه‌ریزان در جهت کاهش اثرات مخرب سیل، تلفات جانی و خسارت‌های مالی کمک خواهد کرد (Sideng et al., 2023).

در حوضه‌های رودخانه‌ای، رویداد سیل اغلب ناشی از بارش باران سنگین بر روی سطح وسیع و ایجاد رواناب است؛ بنابراین، استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی و کاربری اراضی می‌تواند حائز اهمیت باشد (Tufano et al., 2023). داده‌های هیدرولوژیکی معمولاً به شکل هیدروگراف رواناب ارائه می‌شوند که در مناطق فاقد ایستگاه، بر اساس روش‌های مختلف هیدروگراف واحد مصنوعی توسعه داده می‌شود (Salami et al., 2017). این در حالی است که مدل‌های هیدرولوژیکی در پهنه‌بندی سیل نیز، مقدار دبی اوج و شکل هیدروگراف را در نظر می‌گیرند (Bomers et al., 2019). مطالعات اخیر، استفاده از مدل‌های دوبعدی با قابلیت ارائه جزئیات بیشتر را جهت تهیه مناطق در معرض سیل با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی پیشنهاد می‌کنند. مدل‌های دوبعدی عدم‌قطعیت و محدودیت‌های ناشی از تفسیر نامناسب پویایی سیل و بازتولید توپوگرافی زمین را کاهش می‌دهند (Morsy et al., 2018). مدل‌های تک بعدی ارائه شده تنها قادر به ارائه فرآیندهای داخل کانال هستند، در حالی که مدل‌های دوبعدی فرآیندهای کانال و دشت سیلابی را همزمان شبیه‌سازی

می‌کنند (Shustikova et al., 2019). با این حال استفاده از مدل‌های دوبعدی در مناطقی که داده زمینی با قدرت تفکیک مناسب در دسترس نیست، دارای عدم‌قطعیت خواهد بود.

مدل هیدرولوژیکی <sup>1</sup> HEC-RAS، توسط بخش مهندسی ارتش ایالات متحده<sup>2</sup> به منظور مدیریت دشت‌های سیلابی طراحی شده است (USDA, 2023). این مدل قابلیت اندازه‌گیری تغییرات سطح آب در رودخانه به صورت جریان پایدار و ناپایدار، حمل رسوب و کیفیت آب در سیستم‌های رودخانه‌ای را دارد (Sayyad et al., 2021; Ansori et al., 2023). در تحلیل جریان، این مدل نیم‌رخ سطح آب در شرایط فوق بحرانی و زیربحرانی را ارائه کرده و می‌تواند ساختارهای هیدرولوژیکی از جمله پل و بنادر را مدل‌سازی کند (Donyari et al., 2022; Sideng et al., 2023). مدل دوبعدی HEC-RAS، با پردازش داده‌های مکانی، ایجاد اطلاعات هندسی برای کاربر را ساده کرده و از لایه پروفیل سطح آب تشکیل شده می‌توان عمق و وسعت سیلاب را تخمین زد (Ahmad et al., 2022; Vafaei et al., 2023). نرم‌افزار HEC-RAS، به عنوان یکی از ابزارهای مدل‌سازی پرکاربرد در مهندسی هیدرولیک، در نسخه‌های اخیر قادر به حل معادلات کاملاً دوبعدی است (Shustikova et al., 2019). این مدل با لحاظ تغییرات درون سلولی<sup>3</sup>، مدت زمان و حجم بالای محاسبات در مدل‌سازی‌های پیچیده را کاهش می‌دهد (Zia et al., 2022; Akiyanova et al., 2023).

در راستای ارزیابی مدل هیدرولوژیکی دوبعدی HEC-RAS و پهنه‌بندی خطر سیل مطالعات متعددی انجام شده است. در خارج از کشور، (Shustikova et al., 2019) دو مدل دوبعدی LISFLOOD-FP و HEC-RAS را در رودخانه سسچیا<sup>4</sup> ایتالیا در اندازه‌های مختلف شبکه (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ متر) مقایسه کردند. نتایج آن‌ها بر اساس شاخص ارزیابی F نشان‌دهنده عملکرد مناسب دو مدل است. آن‌ها بیان کردند که مدل دوبعدی HEC-RAS در ارائه جزئیات توزیع مکانی عملکرد بهتری دارد. در ارزیابی مکانی خطر سیل در زیرحوضه متالو<sup>5</sup> اندونزی، (Sideng et al., 2023) به منظور برآورد دبی اوج در دوره‌های بازگشت مختلف از هیدروگراف واحد مصنوعی<sup>6</sup> (HSU) استفاده کردند. سپس با استفاده از مدل دوبعدی HEC-RAS و شبیه‌سازی پهنه سیل بیان کردند که در طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد، سطح منطقه غرقاب حدود ۲۵ هکتار است که نیازمند توجه ویژه در جهت کاهش

<sup>1</sup> Hydrologic Engineering Center-River Analysis System

<sup>2</sup> United States Army Engineering Division

<sup>3</sup> Subgrid variability

<sup>4</sup> Secchia

<sup>5</sup> Mata Allo

<sup>6</sup> Hydrograph Synthetic Unit

دوره بازگشت ۱۰ سال برابر ۸۶ درصد است. در پهنه‌بندی سیل ناشی از شکست سد بارون در شهرستان ماکو استان آذربایجان غربی، Saeidifarzad et al. (2023)، از مدل‌های دوبعدی HEC-RAS و CCHE<sup>3</sup> استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که مدل دوبعدی HEC-RAS به تغییرات شیب و ضریب زبری مانینگ حساسیت بیش‌تری دارد و در مقاطع پرشیب بهتر است اندازه شبکه کوچک‌تر و تعداد مقاطع بیش‌تر باشد.

وقوع رخداد‌های سیل بزرگ در مواقعی قابل کنترل نیست، اما با مدیریت صحیح می‌توان ریسک سیل و خسارت‌های ناشی از آن را کاهش داد (Rangari et al., 2019). رودخانه آرازکوسه به دلیل قرار گرفتن در پایین‌دست سه زیرحوضه کوهستانی مینودشت (چهل‌چای)، نرماب و نوده‌خاندوز مستعد سیلابی شدن است؛ و با توجه به موقعیت مکانی آن در حاشیه شهر گنبدکاووس و قرار گرفتن دو روستا (چای‌بوین و قلندرآباد بالا) در انتهای بازه رودخانه این مسئله بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد. رویداد سیل مورخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ به‌عنوان یک سیل نادر در دبی اوج با دوره بازگشت ۱۲۰ سال رخ داد که خسارت‌های زیادی را به‌همراه داشت. بنابراین، تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل و عمق آب در دوره‌های بازگشت مختلف، اولین قدم در معرفی مکان‌های در معرض سیل است (Tufano et al., 2023). در این راستا، مطالعاتی نیز درخصوص پهنه‌بندی سیل در این رودخانه انجام شده است. Rahimzadeh et al. (2019)، در بازه ۱۰ کیلومتری از رودخانه آرازکوسه عملکرد مدل تک‌بعدی HEC-RAS و مدل دوبعدی LISFLOOD-FP را در پهنه‌بندی سیل برای رویداد مورخ خرداد ۱۳۹۳ ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی آن‌ها بر اساس شاخص F برای مدل دوبعدی LISFLOOD-FP برابر با ۶۹ درصد و برای مدل تک‌بعدی HEC-RAS برابر با ۶۷ درصد برآورد شد. در مقطع یک کیلومتری از رودخانه آرازکوسه، Bahremand et al. (2020)، با استفاده از مدل Nays 2D Flood پهنه سیل مربوط به رویداد سیل اسفند ۱۳۹۷ را شبیه‌سازی کردند و عملکرد مدل در شبیه‌سازی پهنه سیل بر اساس شاخص F برابر با ۷۸ درصد ارزیابی شد. Tamaskani et al. (2022)، Zahedi et al. نیز در بازه هفت کیلومتری از رودخانه آرازکوسه، عملکرد مدل LISFLOOD-FP را در پهنه‌بندی یک رویداد سیل بر اساس مقدار شاخص F (۷۱ درصد) قابل قبول بیان کردند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد مدل دوبعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه سیل مربوط به رخداد ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ در بازه نه کیلومتری از رودخانه آرازکوسه (از محل ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه تا محل اتصال آن به

خسارت است. در سیاریز<sup>۱</sup> ایتالیا، Tufano et al. (2023)، با استفاده از رابطه SCS-CN، هیدروگراف سیل را در دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه و پهنه سیل آن را در نرم‌افزار HEC-RAS شبیه‌سازی کردند. ایشان با استفاده از نتایج پهنه سیل با دوره‌های بازگشت مختلف و هم‌پوشانی آن‌ها، نقشه خطر سیل را بازسازی کردند. در بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی رواناب و سیل‌خیزی آبخیز ن<sup>۲</sup> کشور تایلند، Satriagasa et al. (2023)، از مدل SWAT برای برآورد جریان و نرم‌افزار HEC-RAS برای پهنه سیل استفاده کردند. نتایج آن‌ها بر اساس نرم‌افزار HEC-RAS در دوره اقلیمی ۲۰۴۱-۲۰۶۰ نشان داد پهنه سیل مشابه با منطقه غرقاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله است. Fassoni- Andrade et al. (2023)، هیدرودینامیک هشت بازه سیلاب‌دستی رودخانه آمازون را با استفاده از مدل دوبعدی HEC-RAS ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که ارتفاع سطح آب با صحت ۷۷ سانتی‌متر و وسعت سیل در دوره پرآبی و کم‌آبی به‌ترتیب با صحت حدود ۸۰ و ۵۲ درصد شبیه‌سازی شده است.

در داخل کشور نیز، Ghaderi et al. (2019) در ارزیابی عمق آبستگی پایه‌های پل سیمینه‌رود در میاندوآب در دوره‌های بازگشت ۵ تا ۱۰۰۰ سال با استفاده از روابط تجربی و نیز مدل عددی HEC-RAS بیان کردند که در مدل عددی مذکور با افزایش دبی، میزان آبستگی در پایه‌های میانی و جانبی افزایش می‌یابد. در شبیه‌سازی پهنه سیلابی بازه‌ای از رودخانه قوشقراي آذرشهر استان آذربایجان شرقی، Mohammadi et al. (2022)، با استفاده از مدل تک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS نتیجه گرفتند که عمق جریان در مدل دوبعدی خطای کم‌تری نسبت به مدل تک‌بعدی دارد و سطح پهنه سیل‌گیر در مدل دوبعدی با سطح پهنه مشاهداتی در تصاویر ماهواره‌ای تطبیق بیش‌تری دارد. Arash and Yasi (2022)، عملکرد مدل تک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS و مدل‌های رقومی ارتفاع مختلف سنجده‌های ALOS، SRTM و ASTER را در تهیه نقشه پهنه سیل رودخانه‌های سجاس استان زنجان، طالقان استان البرز، گرگان‌رود استان گلستان و رودخانه سرباز استان سیستان و بلوچستان بررسی کردند. نتایج آن‌ها بر اساس شاخص ارزیابی F نشان داد که مدل دوبعدی HEC-RAS در رودخانه‌های پیچان‌رود و با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر ALOS عملکرد مناسبی دارد. Parizi and Hosseini (2023)، در بازه‌ای از رودخانه اترک در بالادست شهر مراوه‌تپه، مدل دوبعدی HEC-RAS را در دوره‌های بازگشت مختلف اجرا کردند. آن‌ها از تصاویر ماهواره‌لندست ۸ در ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی پهنه سیل استفاده کردند. نتایج ارزیابی مدل بر اساس شاخص F برای پهنه سیل با

<sup>1</sup> Sybaris<sup>2</sup> Nan<sup>3</sup> Center Computational for Hydrosience and Engineering

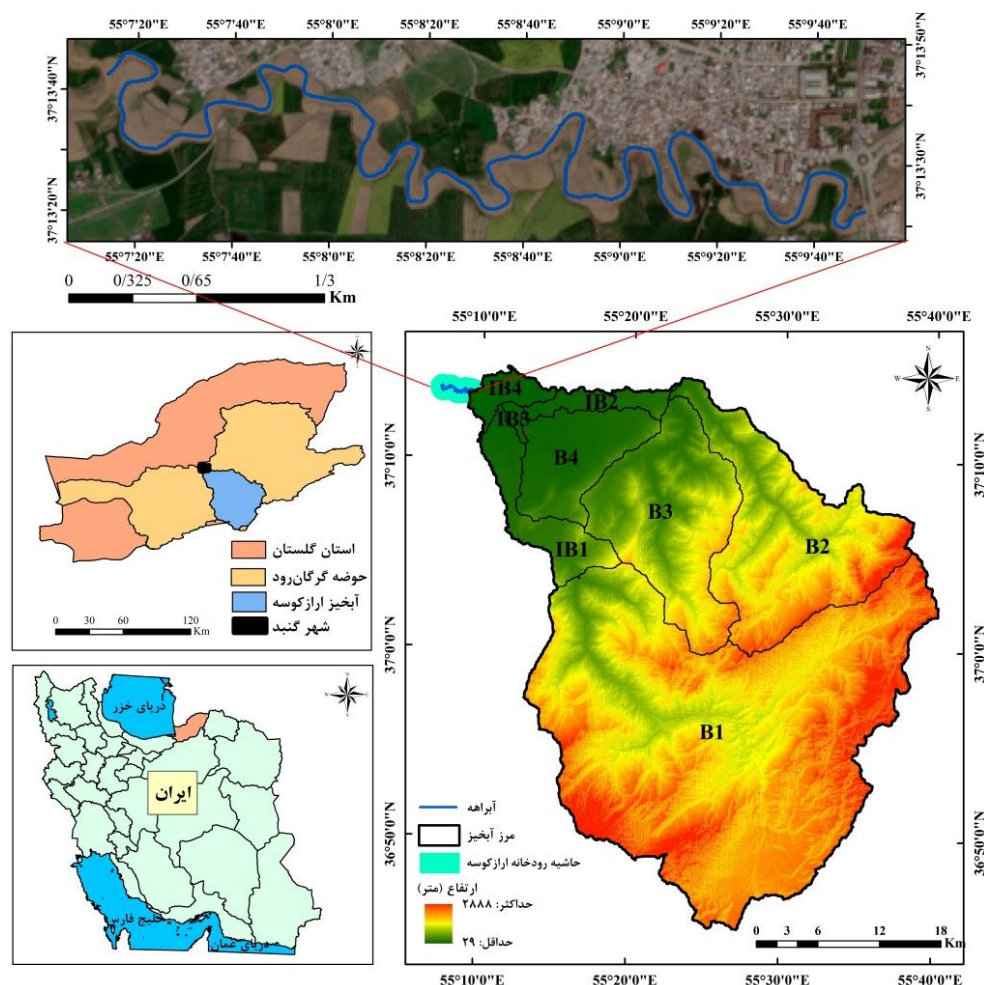
می‌شود و بر اساس تقسیمات سیاسی در محدوده شهرستان‌های آزادشهر، مینودشت و گنبدکاووس قرار گرفته است. رودخانه آرازکوسه با طول نه کیلومتر در انتهای آبخیز آرازکوسه از محل ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه تا محل اتصال آن به شاخه اصلی گرگان‌رود قرار دارد. این رودخانه با موقعیت جغرافیایی  $55^{\circ} 09' 55''$  تا  $55^{\circ} 40' 55''$  طول شرقی و  $36^{\circ} 45' 36''$  تا  $37^{\circ} 15' 37''$  عرض شمالی به دلیل وجود شاخه‌های رودخانه‌های چهل‌چای، نرماب و خرمالو در بالادست همواره در طی بارش‌های شدید در معرض خطر سیل است. شکل ۱ موقعیت آبخیز و رودخانه آرازکوسه در استان گلستان را ارائه می‌دهد.

شاخه اصلی گرگان‌رود) و برآورد خسارت‌های مستقیم-ملموس سیل در دوره‌های بازگشت مختلف انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

آبخیز آرازکوسه بخشی از حوضه اصلی و مهم حوضه گرگان‌رود است که با مساحتی در حدود ۱۵۴۰۰۰ هکتار در محدوده جغرافیایی  $55^{\circ} 09' 55''$  تا  $55^{\circ} 40' 55''$  طول شرقی و  $36^{\circ} 45' 36''$  تا  $37^{\circ} 15' 37''$  عرض شمالی در استان گلستان قرار دارد. این حوضه از جنوب به حوضه شاهرود و از شمال، شرق و غرب به بخشی از حوضه بزرگ گرگان‌رود محدود



شکل ۱- موقعیت رودخانه آرازکوسه در استان گلستان و ایران  
Figure 1- Arazkush River Location in Golestan province, Iran

در مقاطع و موانع مختلف مانند پل را محاسبه می‌کند (Kumar et al., 2019; Akiyanova et al., 2023). جهت اجرای مدل دویبعدی HEC-RAS، داده مدل رقمی ارتفاعی، ضریب زبری مانینگ و هیدروگراف جریان مورد نیاز است (Rangari et al., 2019; Satriagasa et al., 2023).

### ۲-۲- مدل هیدرولیکی HEC-RAS

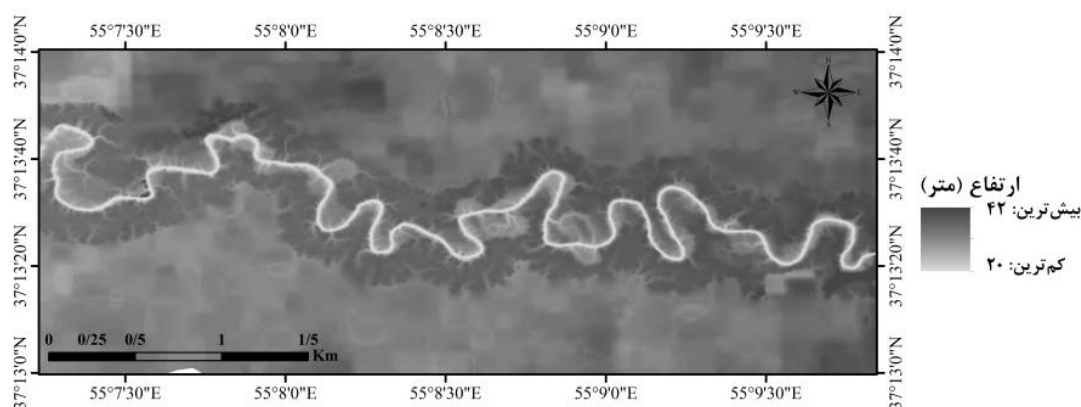
اولین نسخه از نرم‌افزار HEC-RAS در سال ۱۹۹۵ میلادی و با به‌کارگیری مدل هیدرولیکی تک‌بعدی در آن ارائه شد. در سال ۲۰۱۶ نسخه با مدل هیدرولیکی دویبعدی این نرم‌افزار تحت نسخه HEC-RAS 5.0.1 عرضه شد (Mohammadi et al., 2022). این مدل اتلاف انرژی ناشی از انقباض و انبساط ناگهانی

ArcGIS به نقشه مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی یک متر تبدیل شد. نقشه مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده در شکل ۲ ارائه شده است.

### ۱-۲-۲- داده‌های مورد نیاز مدل دوبرعی HEC-RAS

الف) مدل رقومی ارتفاعی (DEM)

جهت تهیه مدل رقومی ارتفاعی بازه مورد مطالعه، از نقشه توپوگرافی تهیه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان با مقیاس ۱:۲۰۰۰ استفاده شد. نقشه توپوگرافی در محیط نرم‌افزار



شکل ۲- نقشه مدل رقومی ارتفاعی رودخانه ارازکوسه

Figure 2- Digital elevation model of the Arazkuseh River

برآورد آن در کانال رودخانه و دشت سیلابی متفاوت است. با توجه به اینکه رابطه ارائه شده توسط کووان<sup>۱</sup> جزئیات مؤثر در ارزیابی ضریب زبری را در نظر دارد، از این روش در برآورد ضریب زبری منطقه مطالعاتی استفاده شد. رابطه کووان (۱)، هم برای کانال و هم برای دشت سیلابی کاربرد دارد، با این تفاوت که ویژگی‌های تعریف شده برخی از ضرایب در کانال و دشت سیلابی متفاوت است (Arcement and Schneider, 1989).

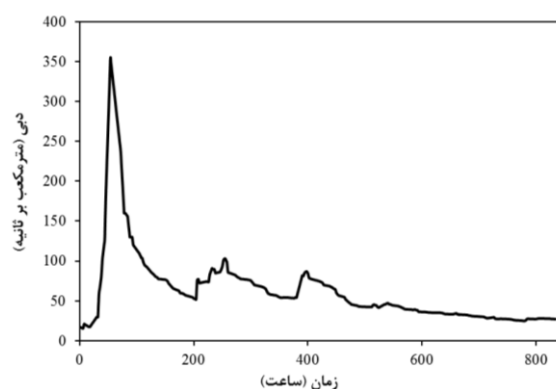
$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (1)$$

که در آن،  $n_0$  ضریب زبری پایه مربوط به جنس بستر کانال یا دشت سیلابی،  $n_1$  درجه نامنظمی سطح مقطع کانال و دشت سیلابی،  $n_2$  چگونگی تغییرات سائز و شکل سطح مقطع کانال (مقدار آن در دشت سیلابی صفر است)،  $n_3$  وجود موانع در مسیر کانال و دشت سیلابی،  $n_4$  پوشش گیاهی کانال و دشت سیلابی و  $n_5$  درجه مماندری بودن رودخانه است. این ضرایب بر اساس جداول ارائه شده مجزا مربوط به کانال و دشت سیلابی امتیازدهی می‌شوند. از این رو بر اساس بازبینی‌ها و مشاهدات میدانی مقادیر ضریب زبری مانینگ مربوط به کانال (هشت بازه همگن) و دشت سیلابی (کاربری‌های مختلف اراضی) برآورد شد (Chiang et al., 2022; Aqnouy et al., 2023).

در فاصله ۷۴۰۰ متری از ابتدای رودخانه (محل ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه)، در حاشیه روستای قلندرآباد بالا یک پل

ب) هیدروگراف جریان سیل

هیدروگراف وارد شده به مدل جهت پهنه‌بندی جریان، مربوط به وقوع سیلاب در مورخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ است که جریان سیل تا تاریخ ۳۱ فروردین ۱۳۹۸ ادامه یافته است. این هیدروگراف در ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه با دبی اوج ۳۵۵ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده است. شکل ۳، هیدروگراف جریان سیل مورخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ را نشان می‌دهد.



شکل ۳- هیدروگراف سیل مشاهداتی ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ در

ایستگاه هیدرومتری ارازکوسه

Figure 3- Flood hydrograph on March 17, 2019 recorded at the Arazkuseh Gauge Station

ج) ضریب زبری مانینگ

ضریب زبری مانینگ یکی از داده‌های مورد نیاز برای پهنه‌بندی سیلاب در نرم‌افزار HEC-RAS است. مقدار این ضریب و روش

<sup>۱</sup> Cowan

انتهای بازه رودخانه تا قبل از اتصال به شاخه اصلی گرگان‌رود است از روش عمق نرمال (شیب بستر رودخانه) استفاده شد (Arash and Yasi, 2022). در ادامه، اطلاعات مربوط به عرشه و ستون‌های پل در موقعیت مکانی مربوطه وارد شد و برای هر دو روش برآورد جریان کم و جریان تحت فشار از روش انرژی استفاده شد.

نرم‌افزار HEC-RAS 6.2 به منظور انجام معادلات کاملاً دوبعدی توسعه یافته است. این نسخه از نرم‌افزار، معادلات دوبعدی سنت و نانت<sup>۲</sup> و موج انتشار<sup>۳</sup> را از طریق حل حجم محدود ضمنی<sup>۴</sup> حل می‌کند (USDA, 2023). در پژوهش حاضر از معادله دوبعدی موج انتشار (رابطه ۲) که راه‌حل‌های عددی پایدارتری را در نظر می‌گیرد و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد استفاده شد (Shustikova et al., 2019; Ansori et al., 2023).

$$\frac{n^2 |V| V}{(R(H))^{4/3}} = -\nabla H \quad (2)$$

که با تقسیم دو طرف رابطه بر ریشه دوم آن‌ها رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3} \nabla H}{n |\nabla H|^{1/2}} \quad (3)$$

که در آن،  $V$ ، بردار سرعت،  $R$ ، شعاع هیدرولیکی،  $H$ ، ارتفاع سطح آب،  $\nabla H$ ، شیب ارتفاعی سطح و  $n$ ، ضریب زبری مانینگ است.

### ۲-۲-۳- ارزیابی مدل دوبعدی HEC-RAS

برای ارزیابی مدل در تهیه پهنه سیل منطقه مورد مطالعه، از تصاویر ثبت شده ماهواره سنتینل-۲ استفاده شد (Bahremand et al., 2020). تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در تاریخ‌های ۲۳ مارس ۲۰۱۹ (۳ فروردین ۱۳۹۸) ساعت ۶:۵۷ صبح و ۲ آوریل ۲۰۱۹ (۱۳ فروردین ۱۳۹۸) ساعت ۶:۵۶ صبح با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر است (شکل ۵).

ارزیابی مدل در پهنه‌بندی سیل با استفاده از نتایج ثبت شده مدل در گام زمانی مشابه با زمان ثبت تصاویر ماهواره‌ای و با استفاده از معیار  $F$  (رابطه ۴) صورت گرفت (Shustikova et al., 2019; Ongdas et al., 2020; Parizi and Hosseini, 2023).

$$F = \frac{A}{A + B + C} * 100 \quad (4)$$

که در آن،  $A$ ، مساحت پهنه‌ای که هم در مشاهداتی و هم در شبیه‌سازی خیس است،  $B$ ، مساحت پهنه‌ای که در مشاهداتی خشک و در شبیه‌سازی خیس است و  $C$ ، مساحت پهنه‌ای که در مشاهداتی خیس و در شبیه‌سازی خشک است. مقدار ۱۰۰ درصد

قرار دارد (شکل ۴). اطلاعات مورد نیاز این پل از شرکت آب منطقه‌ای و طی بازدیدهای میدانی برداشت شد.



شکل ۴- پل احداث شده بر روی رودخانه آرازکوسه در محل روستای قلندرآباد بالا

Figure 4- The bridge built on the Arazkuseh River in the Qalandarabad Bala village

### ۲-۲-۲- اجرای مدل دوبعدی HEC-RAS

مدل دوبعدی HEC-RAS، از نقشه مدل رقومی ارتفاعی به‌عنوان ورودی در تهیه داده‌های زمینی<sup>۱</sup> استفاده می‌کند (Satriagasa et al., 2023). داده زمینی، یک مجموعه داده برداری است که همه ویژگی‌های توپوگرافی زمین از جمله خطوط شکست و برآمدگی‌ها را در بر می‌گیرد (Hirt, 2014). این داده زمینی در مدل دوبعدی HEC-RAS هندسه زمین را تشکیل می‌دهد. سپس یک لایه به‌شکل شبکه‌ای از سلول‌ها بر اساس داده زمینی ایجاد می‌شود. یک محیط شبکه، سطح زمین را به‌صورت شبکه‌ای پیوسته از سلول‌ها در نظر می‌گیرد که آب از طریق آن می‌تواند در جهات مختلف طولی و جانبی جریان یابد (Satriagasa et al., 2023). محاسبات شبکه‌ها به‌طور خودکار در نواحی جریان دوبعدی انجام می‌شود. شبکه‌ها می‌توانند به‌صورت ساختاری (منظم) یا بدون ساختار (نامنظم) به یکدیگر متصل شوند که به توپوگرافی زمین بستگی دارد. این مدل با تشکیل یک شبکه بزرگ‌تر با جزئیات توپوگرافی دقیق‌تر و با استفاده از رویکرد عمق‌سنجی زیرشبکه‌ای زمان محاسبات را کاهش می‌دهد (Samadi and Azizian, 2020; Shustikova et al., 2019; USDA, 2023). در طی یک مرحله پیش‌پردازش، داده‌های شعاع هیدرولیک، حجم و مقطع هر سلول شبکه با استفاده از داده‌های مدل رقومی ارتفاعی با وضوح بالاتر جمع‌آوری شده و در جدول خصوصیات آن سلول ذخیره می‌شود (Ongdas et al., 2020; Zia et al., 2022).

پس از ساخت شبکه سلولی، برای شرایط مرزی بالادست که در محل ایستگاه هیدرومتری آرازکوسه در نظر گرفته شد، از روش هیدروگراف سیل و برای شرایط مرزی پایین‌دست که

<sup>2</sup> St Venant

<sup>3</sup> Diffusion wave

<sup>4</sup> Implicit finite-volume solution

<sup>1</sup> Terrain



$$T_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S_r^{0.385}} \quad (۵)$$

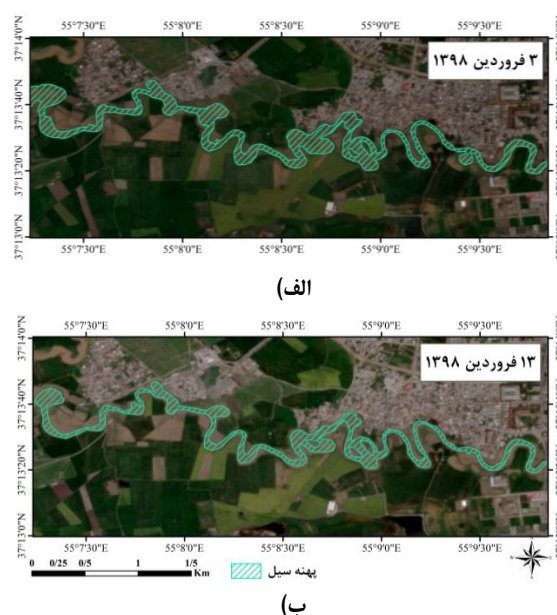
که در آن،  $L$ ، طول آبراهه اصلی (کیلومتر) و  $S_r$ ، شیب آبراهه (متر بر متر) است. مقدار بارش طرح در زمان تمرکز آبخیز با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از رابطه وزیری برآورد شد. از این‌رو، آمار حداکثر بارش ۲۴ ساعته<sup>۲</sup> ایستگاه ارازکوسه استخراج و با استفاده از رابطه (۶)، بارش با تداوم یک‌ساعته و دوره بازگشت ۱۰ ساله  $P(10Y, 1H)$  محاسبه شد. سپس برای تبدیل این بارش خاص به بارش‌هایی با زمان تداوم و دوره بازگشت دلخواه ( $P$ ) بر حسب میلی‌متر از رابطه (۷) برای شرایط تداوم ۲ تا ۱۲ ساعت استفاده شد.

$$P(10Y, 1H) = (1.3352 - 0.1964 \times LN(PDmax)) \times PDmax \quad (۶)$$

$$P = (0.4847 + 0.2251LN(Tr - 0.4112)) \times (-0.0158 + 1.0197T^{0.3753}) \times P(10Y, 1H) \quad (۷)$$

که در آن‌ها،  $PDmax$ ، متوسط حداکثر بارش ۲۴ ساعته در یک دوره مشاهدات،  $Tr$ ، دوره بازگشت و  $T$ ، تداوم مورد نظر است (Vaziri, 1993). در تهیه الگوی توزیع زمانی باران از روش محاسباتی Pilgrim که کم‌ترین اختلاف را با الگوی متوسط ایستگاه ارازکوسه دارد استفاده شد. در این روش ابتدا رگبارهای انتخابی بر اساس مقدار بارش به ترتیب نزولی مرتب می‌شود و سپس مقدار بارش در چارک‌های اول، دوم، سوم و چهارم تقسیم می‌شوند. در ادامه مقدار بارندگی در چارک‌ها بر اساس مقدار بارش رتبه‌بندی می‌شوند. بیش‌ترین بارندگی با رتبه یک و کم‌ترین با رتبه چهار مشخص می‌شود. با توجه به این‌که مجموع رتبه‌ها باید ۱۰ باشد، در صورتی‌که در چند چارک بارندگی مساوی باشد، رتبه باقی‌مانده از ۱۰ به نسبت مساوی بین آن چارک‌ها تقسیم شده و به‌عنوان رتبه چارک ثبت می‌شود. درصد بارش در هر چارک نسبت به کل بارش رگبار محاسبه و به ترتیب رتبه یک تا چهار از صعودی به نزولی مرتب می‌شود. در نهایت الگوی نهایی توزیع زمانی بارش بر اساس مقدار میانگین بارندگی در رتبه شاخص مشخص شده برآورد می‌شود (Pilgrim and Cordery, 1975; Mollaie and Telvari, 2009; Liao et al., 2021). در برآورد تغییرات مکانی بارش از روش زمین‌آماری کوکریجینگ<sup>۳</sup> استفاده شد. این روش با استفاده از رابطه مکانی بین متغیر اصلی و کمکی، صحت تخمین‌ها را افزایش می‌دهد. متغیر کمکی نیز باید دارای پیوستگی مکانی

این شاخص بیانگر هم‌پوشانی کامل پهنه مشاهداتی و شبیه‌سازی است (Horritt and Bates, 2002).



شکل ۵- تصویر ماهواره سنتینل-۲ در تاریخ (الف) ۳ فروردین و (ب) ۱۳ فروردین ۱۳۹۸ و پهنه سیل ثبت شده

Figure 5- Sentinel-2 satellite image on (a) March 23, 2019, (b) April 2, 2019, and the observed flood zone

#### ۴-۲-۲- اجرای مدل دوبعدی HEC-RAS با هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در دوره‌های بازگشت مختلف

به‌منظور شبیه‌سازی پهنه سیل در دوره‌های بازگشت مختلف، ابتدا بارش طرح بر اساس اطلاعات آبخیز ارازکوسه و ایستگاه‌های واقع در محدوده آبخیز برآورد شد. سپس هیدروگراف جریان خروجی از آبخیز در دوره‌های بازگشت مختلف با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS شبیه‌سازی شد.

#### ۳-۲-۳- برآورد بارش طرح در دوره‌های بازگشت مختلف

انتخاب بارش طرح گام مهم در برآورد سیلاب طرح یک آبخیز است. بارش طرح معمولاً با مشخصه‌های تداوم بارش، مقدار بارش، توزیع زمانی و توزیع مکانی بارش معرفی می‌شود (Hejam and Malekifard, 2002). در طراحی پهنه که رواناب حاصل از کلیه قسمت‌های آبخیز را در نظر دارد، بایستی مدت رگباری که باعث دبی اوج می‌شود مساوی یا بزرگتر از زمان تمرکز حوضه باشد (FAO, 2001; Alizadeh, 2012; Bezak et al., 2017). در پژوهش حاضر، مقدار زمان تمرکز حوضه ( $T_c$ ) بر اساس رابطه کریچ<sup>۱</sup> (رابطه ۵) برآورد شد (USDA, 2007).

<sup>۲</sup> Precipitation Daily Maximum (PDmax)

<sup>۳</sup> CoKriging

<sup>۱</sup> Kirpich

Giupponi et al. (2015) خسارت‌های مستقیم-ملموس وارده بر کاربری‌ها در مواقع سیلابی برآورد شد (Mirzaei and Sadoddin, 2020). جدول ۱، روش برآورد ارزش مالی هر یک از عناصر در معرض سیل و محتویات آن همراه با هزینه‌های بازسازی و ترمیم در هر کاربری را در حاشیه رودخانه آرازکوسه ارائه می‌دهد.

### ۳- نتایج و بحث

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی مورد نیاز، به‌منظور واسنجی مدل دوبعدی HEC-RAS در پهنه‌بندی سیل رودخانه آرازکوسه، بر اساس پهنه سیل مشاهده شده در ۲۶ اسفند ۱۳۹۷، پارامتر ضریب زبری مانینگ در دشت سیلابی و کانال به‌صورت دستی واسنجی شد. جدول‌های ۲ و ۳ به‌ترتیب مقادیر ضریب زبری مانینگ اولیه و واسنجی در دشت سیلابی و کانال رودخانه را ارائه می‌دهد.

در طی چند بار واسنجی پارامتر ضریب زبری مانینگ با ترکیب‌های مختلف، برای دشت سیلابی در کاربری‌های مختلف کاهش مقدار ضریب زبری و برای کانال آبراهه افزایش مقدار آن نتیجه بهینه را ارائه داد. شکل ۶ نقشه عمق و سرعت آب شبیه‌سازی شده توسط مدل در گام زمانی مشابه با تصاویر مشاهداتی سنتینل-۲ بعد از واسنجی پارامتر ضریب زبری مانینگ را نشان می‌دهند.

در نقشه شبیه‌سازی شده عمق سیل مورخ ۳ فروردین ۱۳۹۸ حداکثر عمق برابر با ۱۰/۵۲ متر است که این حداکثر عمق آب در بستر رودخانه جریان دارد. به مدت ۱۰ روز بعد، مورخ ۱۳ فروردین ۱۳۹۸، حداکثر عمق آب برابر با ۸/۵ متر است. این مسئله نشان‌دهنده تداوم بارش در طی روزهای متوالی است که باعث تداوم شرایط سیلابی در طی چند روز در رودخانه آرازکوسه شده است. بر اساس شواهد میدانی در حاشیه رودخانه و مصاحبه با ساکنان محلی که تجربه سیل ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ را داشتند، در سه نقطه ارتفاع آب روی سطح زمین در حدود ۱، ۱ و ۱/۵ متر گزارش شد که مقادیر شبیه‌سازی شده آن‌ها به‌ترتیب در همان نقاط برابر با ۱/۲، ۱/۵ و ۱/۸ متر است. این مقدار خطا می‌تواند ناشی از اطلاعات نامناسب فرد شاهد، صحت نقشه مدل رقومی ارتفاعی، مدل و کاربر باشد. در جدول ۴ مقادیر شاخص F بر اساس مساحت پهنه سیل مشاهداتی تصویر سنتینل-۲ و شبیه‌سازی شده مدل دوبعدی HEC-RAS ارائه شده است.

باشد. مقدار متغیر مکانی برآورد شده در این روش به شکل رابطه (۸) استفاده شد:

$$Z^*(x_i) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot Z(x_i) \sum_{k=1}^n \omega_k \cdot U(x_k) \quad (8)$$

که در آن،  $\omega_k$ ، وزن آماری نسبت داده شده به متغیر کمکی  $U$  در نقطه  $x_k$  و  $U(x_k)$ ، مقدار مشاهده شده متغیر کمکی در نقطه  $x_k$  است (Vicente-Serrano, 2003; Saghafian et al., 2011).

### ۴-۲- شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با مدل HEC-HMS

به‌منظور شبیه‌سازی هیدروگراف جریان ناشی از بارش طرح در خروجی آبخیز آرازکوسه، از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. این مدل با روش‌های شماره منحنی SCS، هیدروگراف واحد SCS و ماسکینگام کانز به‌ترتیب در برآورد تلفات و رواناب، روندیابی حوزه آبخیز و روندیابی رودخانه اجرا شد. پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تأخیر و ضریب زبری مانینگ در ایستگاه‌های آرازکوسه، لزوره و نوده واسنجی شد. سپس از میانگین پارامترهای واسنجی شده، برای اعتبارسنجی مدل در ایستگاه‌های مورد بررسی استفاده شد. نتایج شاخص‌های آماری  $R^2$ ، NSE و KGE مربوط به رویدادهای اعتبارسنجی در ایستگاه آرازکوسه به‌ترتیب برابر با ۰/۸۹، ۰/۶۷ و ۰/۶۲، در ایستگاه نوده به‌ترتیب برابر با ۰/۸۵، ۰/۹۱ و ۰/۷۴ و در ایستگاه لزوره به‌ترتیب برابر با ۰/۷۲، ۰/۶۲ و ۰/۶۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد قابل‌قبول مدل است. نتایج اجرای مدل، واسنجی و اعتبارسنجی آن در مطالعه (Mirzaei et al. (2023) ارائه شده است. با توجه به عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان برای آبخیز آرازکوسه، مدل با بارش طرح در دوره‌های بازگشت مختلف اجرا و هیدروگراف‌های جریان تهیه شد.

### ۵-۲- برآورد خسارت‌های مستقیم-ملموس

با استفاده از نقشه پهنه سیل تهیه شده برای بارش طرح در دوره‌های بازگشت مختلف، کاربری‌های اراضی که در معرض خطر سیل هستند شناسایی شد. به‌منظور برآورد ارزش مالی عناصر در معرض سیل، بر حسب نیاز از داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده میدانی، پرسش‌نامه، مصاحبه با جوامع محلی، بازدید میدانی و گزارش‌های تهیه شده توسط اداره‌ها و سازمان‌های مرتبط از جمله اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان، جهاد کشاورزی استان گلستان، اداره مدیریت بحران، اداره کل راه و شهرسازی استان گلستان و شهرداری گرگان استفاده شد. سپس بر اساس منابع اطلاعاتی جمع‌آوری شده مختلف برای سال ۱۴۰۲ و چارچوب ارائه شده توسط

جدول ۱- برآورد ارزش عناصر کاربری‌های در معرض خطر سیل با احتساب محتویات آن‌ها و اقدامات مرمت و بازسازی (ریال در مترمربع)

عناصر	روش برآورد	ارزش مالی (میلیون ریال)
زراعی	محصول	0.09
	تخلیه آب	0.0005
	تخلیه آورد و رسوب‌برداری	0.001
مسکونی	محتویات	8.85
	مرمت و بازسازی	3
	باغ غیرمثمر	3
جاده	تولید چوب	0.0012
	تخلیه آب	2.5
	آسفالتنه خاکی	1.5

جدول ۲- مقادیر اولیه و واسنجی شده پارامتر ضریب زبری

مانینگ در دشت سیلابی رودخانه آراز کوسه

Table 2- The initial and calibrated values of Manning's roughness coefficient parameter for the floodplain of the Arazkuseh River

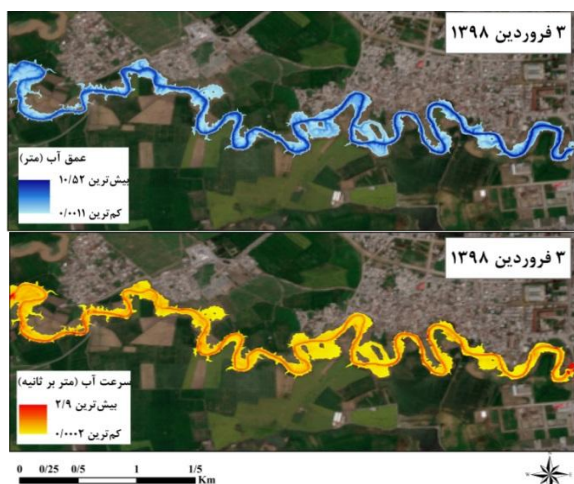
مقدار واسنجی	مقدار اولیه	کاربری
0.021	0.024	خاک لخت
0.047	0.05	اراضی زراعی
0.193	0.196	جاده
0.094	0.097	مناطق مسکونی
0.062	0.065	پوشش گیاهی کنار رودخانه

جدول ۳- مقادیر اولیه و واسنجی شده پارامتر ضریب زبری

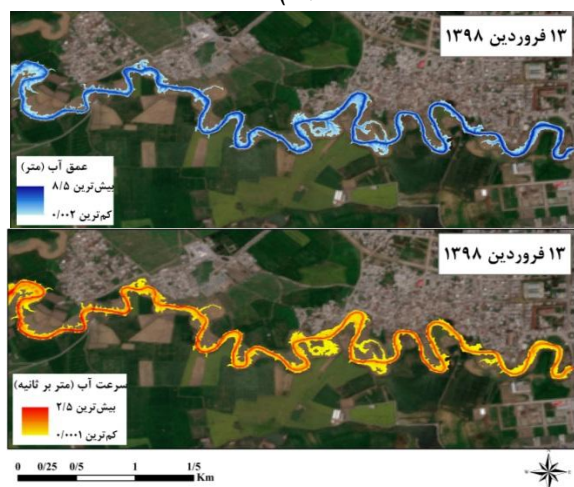
مانینگ در کانال رودخانه آراز کوسه

Table 3- The initial and calibrated values of Manning's roughness coefficient parameter for the channel of the Arazkuseh River

مقدار واسنجی	مقدار اولیه	بازه رودخانه
0.016	0.010	بازه ۱
0.033	0.027	بازه ۲
0.031	0.025	بازه ۳
0.034	0.028	بازه ۴
0.048	0.042	بازه ۵
0.042	0.036	بازه ۶
0.033	0.027	بازه ۷
0.036	0.028	بازه ۸

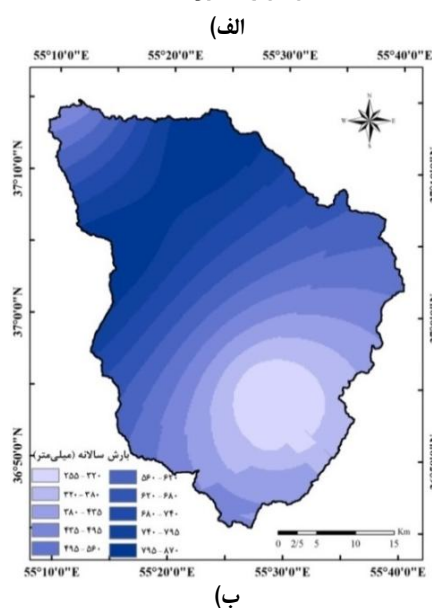
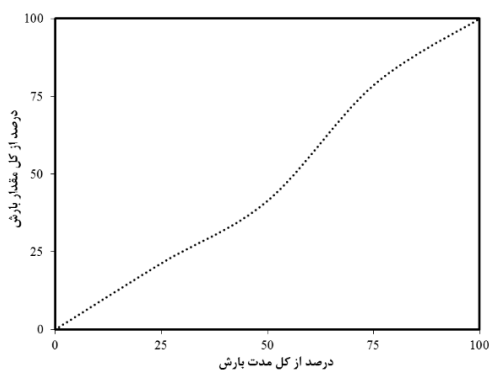


(الف)



(ب)

شکل ۶- نقشه عمق و سرعت جریان شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل دوبعدی HEC-RAS برای رویداد سیل ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ در مورخ (الف) ۳ و (ب) ۱۳ فروردین ۱۳۹۸ رودخانه آراز کوسه



شکل ۷- (الف) منحنی تجمعی الگوی زمانی بارش به روش پیلگریم و (ب) نقشه توزیع مکانی بارش سالانه به روش کوکریجینگ در آبخیز اراز کوسه

Figure 7- (a) Cumulative curve of precipitation temporal pattern identified by the Pilgrim method and (b) spatial distribution map of annual precipitation created by CoKriging method for the Arazkuseh Watershed

جدول ۵- مقادیر بارش طرح (میلی متر) با دوره های بازگشت مختلف در آبخیز اراز کوسه

Table 5- Design rainfalls (mm) in different return periods for the Arazkuseh Watershed

دوره بازگشت	2	5	10	25	50	100
مقدار بارش	33.08	45.82	60.85	85.99	111.65	144.94

Figure 6- Map of depth and flow velocity simulated using HEC-RAS 2-D model for March 17, 2019 flood event on (a) March 23, 2019, and (b) April 2, 2019 for the Arazkuseh River

جدول ۴- مقادیر شاخص F برای پهنه سیل شبیه سازی شده با مدل دوبعدی HEC-RAS رودخانه اراز کوسه

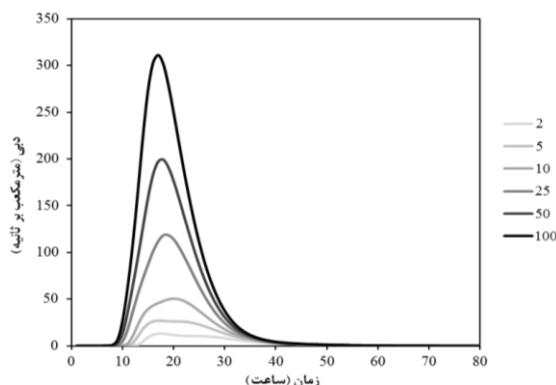
Table 4- F- index values of the flood zone simulated with HEC-RAS 2-D model for the Arazkuseh River

تاریخ رویداد	مساحت پهنه سیل مشاهده‌ای تصویر سنتینل-۲ (هکتار)	مساحت پهنه سیل شبیه‌سازی شده مدل دوبعدی HEC-RAS (هکتار)	شاخص F (درصد)
۳ فروردین ۱۳۹۸	49.56	54.02	79
۱۳ فروردین ۱۳۹۸	36.89	45.13	71

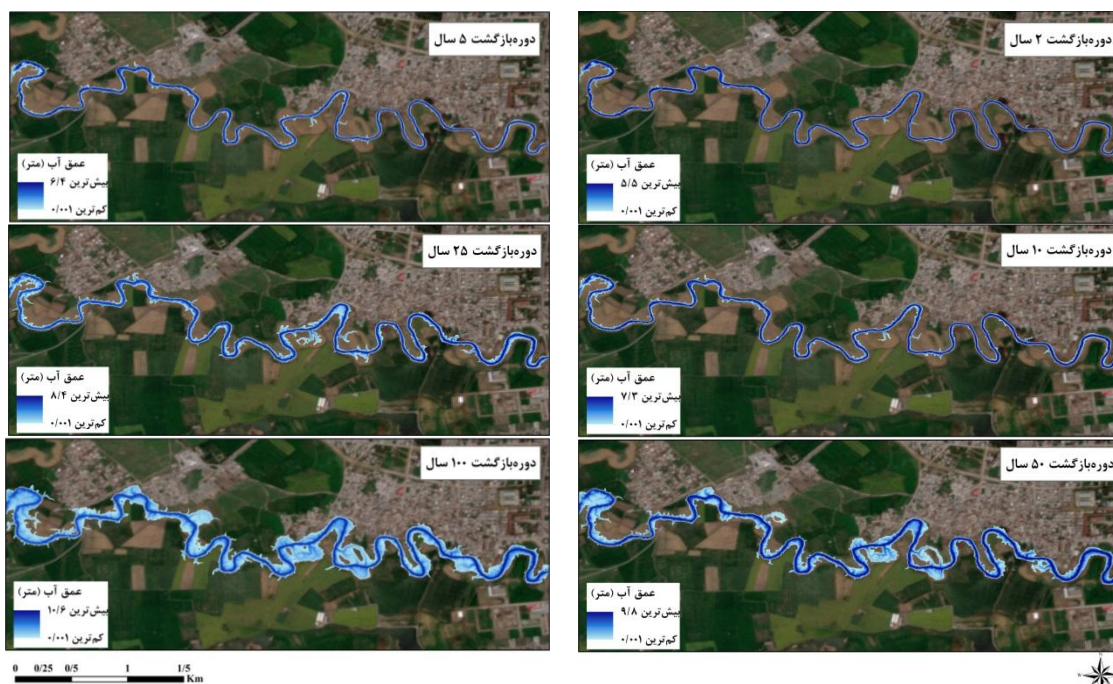
بر اساس نتایج جدول ۴، مقادیر مساحت پهنه سیل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دو تاریخ ثبت شده نشان می‌دهد که مدل دارای بیش تخمینی است. این مسئله عمدتاً ناشی از بزرگ مقیاس بودن نقشه مدل رقمی ارتفاعی است که در مطالعات (Sideng et al. (2023), Shustikova et al. (2019) و (Saeidifarzad et al. (2023) نیز به بیش تخمینی پهنه سیلابی در مدل دوبعدی HEC-RAS اشاره شده است. از طرفی، نتایج شاخص F، بیان‌کننده عملکرد قابل قبول مدل هیدرولیکی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه سیل است. در مطالعات (Arash and Yasi (2022), Shustikova et al. (2019) Parizi and Hosseini و Fassoni-Andrade et al. (2023) (2023) با مقادیر شاخص F به ترتیب برابر با ۰/۷۸، ۰/۸۶، ۰/۸۲ و ۰/۷۶ بیان کردند که مدل هیدرولیکی HEC-RAS عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی پهنه سیل مشاهده‌ای داشته است.

نتایج مربوط به الگوی توزیع زمانی تهیه شده به روش محاسباتی پیلگریم و الگوی توزیع مکانی تهیه شده به روش زمین‌آماري کوکریجینگ مربوط به بارش طرح آبخیز اراز کوسه در شکل ۷ ارائه شده است. جدول ۵ مقادیر بارش طرح در دوره‌های بازگشت مختلف را ارائه می‌دهد. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده جریان در بارش طرح با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شکل ۸ ارائه شده است.

پس از تهیه بارش طرح و شبیه‌سازی هیدروگراف جریان ناشی از آن با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده در دوره‌های بازگشت مختلف وارد مدل هیدرولیکی HEC-RAS شد و پهنه سیل آن‌ها تهیه شد. شکل ۹ پهنه سیل شبیه‌سازی شده در دوره‌های بازگشت مختلف رودخانه اراز کوسه را ارائه می‌دهد.



شکل ۸- هیدروگرافهای جریان شبیه‌سازی شده در دوره‌های بازگشت مختلف آبخیز ارازکوسه  
Figure 8- Flow hydrographs simulated in different return periods for the Arazkuseh Watershed



شکل ۹- نقشه عمق جریان شبیه‌سازی شده با دوره‌های بازگشت مختلف در رودخانه ارازکوسه  
Figure 9- Flow depth simulated in different return periods for the Arazkuseh River

خسارت‌های مستقیم-ملموس وارده بر عناصر در معرض سیل رودخانه ارازکوسه در دوره‌های بازگشت مختلف بر اساس مساحت در معرض سیل را نشان می‌دهد.

جدول ۶- مساحت کاربری‌های اراضی (هکتار) در معرض سیل با دوره‌های بازگشت مختلف در رودخانه ارازکوسه

Table 6- The areas of land uses (in ha) exposed to floods in different return periods for the Arazkuseh River

دوره بازگشت	مسکونی	زراعی	باغ	جاده آسفالت	جاده خاکی	کل
2	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
10	-	2.1	-	-	-	2.1
25	-	4.62	0.19	-	-	4.81
50	0.042	8.19	0.21	0.044	0.05	8.54
100	0.073	22.83	0.25	0.07	0.15	23.37

بر اساس نقشه پهنه سیل تهیه شده در دوره‌های بازگشت مختلف، مساحت کاربری‌های در معرض خطر سیل در جدول ۶ ارائه شده است. مساحت کاربری‌های مسکونی، باغ، جاده آسفالت و خاکی در معرض سیل مربوط به ساحل راست رودخانه و کاربری زراعی در معرض سیل مربوط به ساحل چپ و راست رودخانه است. نتایج نشان داد که در دوره‌های بازگشت ۲ و ۵ سال کاربری‌های اراضی در محدوده مورد مطالعه در معرض خطر سیل نیستند.

بر اساس نتایج جدول ۶، بیش‌ترین مساحت کاربری در معرض خطر مربوط به اراضی زراعی به دلیل شیب کم این اراضی و کاربری باغ واقع در فاصله ۲۰ متری از بستر رودخانه است. در این راستا، Saber et al. (2023) نیز بیان کردند که کاربری شهری و کشاورزی بیش‌ترین مساحت در معرض خطر سیل در منطقه مورد مطالعه داشته است. شکل ۱۰ مقادیر

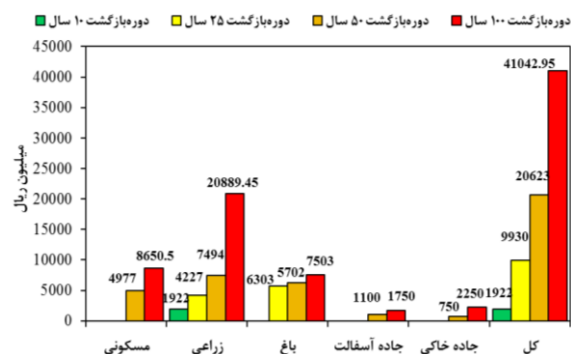
دوبعدی HEC-RAS، تهیه داده، پردازش تصاویر ماهواره سنتینل در تهیه پهنه سیل و نیز کاربری اراضی توجه شود. نتایج شبیه‌سازی پهنه سیل در رودخانه آرازکوسه نشان می‌دهد که بیش‌ترین عمق آب در ابتدای مسیر جریان (با مقدار حدود ۱۰ متر در دوره بازگشت ۱۰۰ سال) رخ داده است. همچنین پهنه سیل در مناطق کم‌شیب گسترش بیش‌تری دارد؛ این مورد در اراضی زراعی که نسبت به مناطق مسکونی (مناطق مسکونی در حاشیه شهر گنبدکاووس در ارتفاع بالاتر از اراضی زراعی مجاور رودخانه قرار دارند) در اراضی کم‌شیب قرار دارند قابل توجه است.

نتایج شبیه‌سازی پهنه سیل در دوره‌های بازگشت مختلف نشان می‌دهد که اراضی زراعی در دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال در معرض خطر سیل قرار دارد که مساحت غرقابی آن در دوره بازگشت ۱۰۰ سال و میزان خسارت‌های مستقیم-ملموس وارده قابل توجه است. قرار گرفتن باغ غیرمثمر (درخت چنار) در حاشیه رودخانه در دوره‌های بازگشت ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال با خسارت‌هایی در تولید چوب و پاکسازی باغ همراه است. در دوره‌های بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال سکونت‌گاه‌های شهری در معرض خطر سیل قرار می‌گیرند که میزان خسارت در این بخش با توجه به ارزش ریالی بالای دارائی‌های آن قابل توجه است. خسارت در بخش زیرساخت‌ها (جاده آسفالت و خاکی) نیز با توجه به گسترش آن در طول رودخانه و همچنین حفظ تردد جوامع نیازمند توجه است.

در مجموع، نتایج شبیه‌سازی پهنه سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS در رودخانه آرازکوسه نشان می‌دهد که مدل عملکرد قابل قبولی در تهیه پهنه سیل دارد. بنابراین می‌توان از نتایج آن در شناسایی مناطق پر خطر حاشیه رودخانه، شناسایی عناصر در معرض خطر سیل و تعیین حد بستر رودخانه استفاده کرد. با توجه به گسترش مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه و تمرکز جوامع انسانی لازم است مدیریت در این مناطق به‌منظور کاهش خطر سیل و در معرض بودن باشد. همچنین با توجه به این‌که اراضی زراعی بیش‌ترین مساحت پهنه سیل و خسارت را در دوره‌های بازگشت مختلف دربرمی‌گیرد ضروری است که مدیران و برنامه‌ریزان با تدابیری از جمله در نظر داشتن بیمه خسارت‌های ناشی از سیلاب و یا معرفی گونه‌های مقاوم در برابر شرایط غرقابی، میزان آسیب‌پذیری و در نتیجه خسارت در این کاربری را کاهش دهند.

### سپاسگزاری

نویسندگان مقاله صمیمانه از داوران محترم برای مطالعه دقیق مقاله حاضر و ارائه نظرات و پیشنهادات سازنده تشکر می‌کنند. همچنین از



شکل ۱۰- مقادیر خسارت‌های مستقیم-ملموس کاربری‌های در معرض رویدادهای سیل با دوره‌های بازگشت مختلف در رودخانه آرازکوسه

Figure 10- Amounts of direct and tangible flood costs of land uses exposed to flood events at different return periods in the Arazkuseh River

با توجه به نتایج مقادیر خسارت‌های مستقیم-ملموس برآورد شده، اراضی زراعی بیش‌ترین خسارت را در دوره‌های بازگشت مختلف به‌دلیل مساحت زیاد پهنه سیل در این کاربری دارد. بعد از اراضی زراعی در دوره بازگشت ۱۰۰ سال، کاربری مسکونی به‌دلیل بالا بودن ارزش ریالی دارائی‌های منزل مسکونی و مرمت و بازسازی آن و سپس باغ به‌دلیل کاهش تولید چوب بیش‌ترین خسارت را شامل می‌شوند.

### ۴- نتیجه‌گیری

در شبیه‌سازی پهنه سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی HEC-RAS، استفاده از داده مدل رقمی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی مناسب در تهیه داده زمینی که جزئیات هندسه زمین را ارائه می‌دهد بسیار حائز اهمیت است. از طرفی، در مدل دو بعدی HEC-RAS که قابلیت شبیه‌سازی جریان در بستر و حاشیه رودخانه را دارد، برآورد مقدار ضریب زبری مانینگ از مسائل مورد توجه در پهنه‌بندی سیل است. در پژوهش حاضر از نقشه مدل رقمی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی یک متر استفاده شد و مقادیر ضریب زبری مانینگ برای بستر و حاشیه رودخانه بر اساس مشاهدات میدانی تهیه شد. در ارزیابی عملکرد مدل دوبعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه سیل از تصاویر ثبت شده ماهواره سنتینل-۲ در رویداد مورخ ۲۶ اسفند ۱۳۹۷ رودخانه آرازکوسه در دو زمان مختلف استفاده شد. نتایج شاخص F نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی پهنه سیل است. نکته قابل توجه در بررسی عملکرد مدل، بیش‌تخمینی پهنه سیل در مدل دوبعدی HEC-RAS است که می‌تواند ناشی از مقیاس نقشه مدل رقمی ارتفاعی و مقادیر ضریب زبری مانینگ باشد. در این راستا، لازم است به عدم قطعیت‌های ناشی از مدل

(مطالعه موردی: استان فارس)، مهندسی منابع آب، ۴، ۳۸-۲۹.  
doi:20.1001.1.20086377.1390.4.9.3.1  
حجام، سهراب، و مالکی فرد، فاطمه (۱۳۸۱). تعیین الگوی توزیع زمانی بارندگی در ایستگاه‌های منتخب استان خراسان. فیزیک زمین و فضا، ۲۸(۲)، ۳۵-۴۴.

doi:20.1001.1.2538371.1381.28.2.5.5  
دنیاری، محمدصادق، وحیدنیا، محمدحسن، و بیک‌پور، شهرام (۱۴۰۰). بررسی سیلاب شهری اهواز با استفاده از تلفیق تحلیل‌های مکانی و هیدرولوژیک در GIS و افزونه HEC-RAS. اکوهیدرولوژی، ۸(۴)، ۹۸۹-۱۰۰۶.

doi:10.22059/IJE.2022.328320.1532  
سعیدی فرزند، بهرام، کاردان، نازیلا، و سلمانی، مصطفی (۱۴۰۲). ارزیابی کارایی دو نرم‌افزار HEC-RAS 2D و CCE 2D در پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد و مدیریت ریسک سیلاب در پایین‌دست (مطالعه موردی: سد بارون). دریا فنون، ۱۰(۱)، ۳۷-۶۳.  
doi:10.22034/ijmt.2022.543650.1744

شیخ بیکلو اسلام، بابک (۱۴۰۰). شواهد و پیامدهای رویداد سیل در ایران از پیش از تاریخ تا کنون. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۱(۱)، ۴۰-۲۴.  
doi:10.22098/MMWS.2021.1173

صمدی، امیر، و عزیزیان، اصغر (۱۳۹۹). تاثیر مفهوم تغییرات درون سلولی، ابعاد شبکه محاسباتی و مقیاس نقشه توپوگرافی بر عملکرد مدل دوبعدی HEC-RAS در شبیه‌سازی پهنه‌های سیلاب رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه سرباز). حفاظت منابع آب و خاک، ۹(۳)، ۱۱-۲.  
doi:20.1001.1.22517480.1399.9.3.1.3

صیاد، دانیال، قضاوی، رضا، و امیدوار، ابراهیم (۱۴۰۰). تهیه و تحلیل نقشه خطر سیلاب با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS و RAS MAPPER (مطالعه موردی: رودخانه سوک چم کاشان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۰(۳)، ۳۷-۱۹.  
doi:10.22067/geoeh.2021.69554.1038  
علیزاده، امین (۱۳۹۰). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات بنیاد فرهنگی رضوی. ۸۰۰ صفحه.

محمدی، میرعلی، ابراهیم نژادیان، حمزه، عسگرخان مسکن، محسن، و وزیری، ونوس (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی HEC-RAS در تعیین پهنه سیلابی رودخانه‌ها. علوم آب و خاک، ۲۶(۲)، ۱۸۷-۲۰۱.  
doi:10.47176/jwss.26.2.43941

مشعشی، سید میثم، پناهی، رویا، و مشعشی، میترا (۱۴۰۱). تحلیل دینامیکی مخاطره سیلاب با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه شاهین‌شهر، استان اصفهان). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۱)، ۹۷-۷۷.  
doi:10.22067/geoeh.2021.71679.1093

مالانی، علی، و تلوری، عبدالرسول (۱۳۸۸). بررسی و تعیین الگوی توزیع زمانی بارش در استان کهگیلویه و بویراحمد با استفاده از روش محاسباتی پیل‌گریم. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱(۲)، ۷۰-۷۷.  
doi:20.1001.1.22519300.1388.1.2.1.3

میرزایی، شهناز، سعدالدین، امیر، بهره‌مند، عبدالرضا، اونیق، مجید، و مصطفی‌زاده، رئوف (۱۴۰۲). کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-

شرکت آب و منطقه‌ای استان گلستان جهت در اختیار قرار دادن داده و اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان گلستان و همکارانشان در شهرستان گنبدکاووس جهت همراهی در جمع‌آوری اطلاعات نهایت تشکر را دارند. نویسندگان از همراهی طاهره محمدی، ثریا یعقوبی و سجاد احمدیوسفی در جمع‌آوری داده‌های میدانی تشکر می‌کنند. این تحقیق توسط دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در قالب گرنت رساله دکتری حمایت مالی شده است.

## تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

## دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

## مشارکت نویسندگان

شهناز میرزایی: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، مفهوم‌سازی، تفسیر نتایج، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ امیر سعدالدین: راهنمایی، تفسیر نتایج، ویرایش و بازبینی مقاله؛ عبدالرضا بهره‌مند: مشاوره، مفهوم‌سازی، بازبینی متن مقاله؛ مجید اونیق: مشاوره، مفهوم‌سازی، بازبینی متن مقاله؛ رئوف مصطفی‌زاده: مفهوم‌سازی، تحلیل داده، بازبینی متن مقاله.

## منابع

بهره‌مند، عبدالرضا، جمالی، فاطمه، و کمکی، چوقی‌بایرام (۱۳۹۹). شبیه‌سازی دوبعدی سیل با استفاده از مدل Nays 2D Flood و مقایسه آن با تصویر ماهواره سنتینل-۲ (مطالعه موردی: سیل اسفند ۱۳۹۷ در بازه انتهایی رودخانه آرازکوسه، استان گلستان). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۷(۲)، ۲۳۶-۲۲۳.  
doi:10.22069/jwsc.2020.17618.3325

پاریزی، اسماعیل، و حسینی، سید موسی (۱۴۰۲). برآورد میزان دقت مدل رقومی ارتفاعی TanDEM-X در شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی سیلاب (مطالعه موردی: حوضه رودخانه اترک). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۴(۲)، ۱۳۴-۱۱۳.  
doi:10.22108/GEP.2022.134293.1533

تمسکنی زاهدی، علی، بارانی، حسین، مختاری، شهره، و بهره‌مند، عبدالرضا (۱۴۰۰). تهیه نقشه خطر و خسارت سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی دوبعدی LISFLOOD-FP (مطالعه موردی: حوزه آرازکوسه). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۸(۴)، ۲۵-۲۸.  
doi:10.22069/jwsc.2022.19717.3516

تقیان، بهرام، رزمخواه، هما، و قرمزچشمه، باقر (۱۳۹۰). بررسی تغییرات منطقه‌ای بارش سالانه با کاربرد روش‌های زمین‌آمار

وزیری، فریبرز ۱۳۷۱. تعیین روابط منطقه‌ای بارندگی‌های کوتاه مدت در ایران. طرح پژوهشی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. ۲۸ صفحه.

وفایی، مسعود، دستورانی، محمدتقی، و رستمی خلج، محمد (۱۴۰۲). ارزیابی خطر سیلاب در پردیس دانشگاه فردوسی مشهد و ارائه سناریوهای مدیریتی با استفاده از مدل HEC-RAS. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۲۳۹-۲۲۵. doi:10.22098/mmws.2022.11815.1173

## References

- Abdessamed, D., & Abderrazak, B. (2019). Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 78(586), 1-17. doi:10.1007/s12665-019-8604-6
- Ahmad, I., Wang, X., Waseem, M., Zaman, M., Aziz, F., Nabi Khan, R.Z., & Ashraf, M. (2022). Flood management, characterization and vulnerability analysis using an integrated RS-GIS and 2D hydrodynamic modelling approach: The Case of Deg Nullah, Pakistan. *Remote Sensing*, 14(2138), 1-19. doi:10.3390/rs14092138
- Akiyanova, F., Ongdas, N., Zinabdin, N., Karakulov, Y., Nazhbiyev, A., Mussagaliyeva, Z., & Atalikhova, A. (2023). Operation of gate-controlled irrigation system using HEC-RAS 2D for spring flood hazard reduction. *Computation*, 11(27), 1-23. doi:10.3390/computation11020027
- Alizadeh, A. (2012). *Principles of applied Hydrology*. Razavi Cultural Bonyad Publications, 800 pages. [In Persian].
- Ansori, M.B., Lasminto, U., & Kartika, A.A.G. (2023). Flood hydrograph analysis using Synthetic Unit Hydrograph, HEC-HMS, and HEC-RAS 2d unsteady flow precipitation on-grid model for disaster risk mitigation. *International Journal of GEOMATE*, 25(107), 50-58. doi:10.21660/2023.107.3719
- Aqnouy, M., Ahmed, M., Ayele, G.T., Bouizrou, I., Bouadila, A., & El Messari, J.E.S. (2023). Comparison of hydrological platforms in assessing rainfall-runoff behavior in a Mediterranean watershed of Northern Morocco. *Water*, 15(447), 1-18. doi:10.3390/w15030447
- Arash, A.M., & Yasi, M. (2022). The assessment for selection and correction of RS-based DEMs and 1D and 2D HEC-RAS models for flood mapping in different river types. *Flood Risk Management*, 16(1), 1-15. doi:10.1111/jfr3.12871
- HMS در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در آبخیزهای بالادست شهر گنبد. *اکوهیدرولوژی*، ۱۰(۳)، ۳۷۷-۳۵۵. doi:10.22059/IJE.2023.359860.1734
- میرزایی، شهناز، و سعدالدین، امیر (۱۳۹۸). چارچوب ارزیابی جامع خسارت‌های اقتصادی سیل (مستقیم، غیرمستقیم، ملموس و ناملموس): رخداد سیل ۲۹ فروردین ۱۳۹۵ نوده‌خاندوز، حوضه رودخانه گرگان‌رود. *دانش پیشگیری و مدیریت بحران*، ۹(۴)، ۳۸۳-۳۹۲. doi:20.1001.1.23225955.1398.9.4.5.0
- Arcement, G.J., & Schneider, V.R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. United States Geological Survey, *Water Supply*, 2339, 38p. doi:10.3133/wsp2339
- Bahreman, A., Jamali, F., & Komaki, Ch.B. (2020). 2D flood simulation using the Nays 2D flood model and comparison with the Sentinel 2 Satellite Image (Case study: flood of March 2019 at the end of Arazkuse River, Golestan Province). *Water and Soil Conservation*, 27(2), 223-236. doi:10.22069/jwsc.2020.17618.3325 [In Persian].
- Bezak, N., Šraj, M., & Mikoš, M. (2017). Design rainfall in engineering applications with focus on the design discharge. Engineering and mathematical topics in rainfall, Chapter 1, 1-15. doi:10.5772/intechopen.70319
- Bhusal, A., Parajuli, U., Regmi, S., & Kalra, A. (2022). Application of machine learning and process-based models for Rainfall-Runoff simulation in DuPage River Basin, Illinois. *Hydrology*, 9(7), 1-20. doi:10.3390/hydrology9070117
- Bomers, A., van der Meulen, B., Schielen, R.M.J., & Hulscher, S.J.M.H. (2019). Historic flood reconstruction with the use of an Artificial Neural Network. *Water Resources Research*, 55, 9673-9688. doi:10.1029/2019WR025656
- Chiang, S., Chang, C.H., & Chen, B. (2022). Comparison of rainfall-runoff simulation between support vector regression and HEC-HMS for a rural watershed in Taiwan. *Water*, 14(2), 1-18. doi:10.3390/w14020191
- Donyari, S., Vahidnia, M. H., & Baikpour, S. (2022). Investigation of urban flooding in Ahvaz using the combination of spatial and hydrological analysis in GIS and HEC-RAS plugin. *Ecohydrology*, 8(4), 989-1006. doi:10.22059/ije.2022.328320.1532 [In Persian].
- FAO. (2001). Small dams and weirs in earth and gabion materials. Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Land and Water Development Division*, 171 pages.
- Fassoni-Andrade, A.C., Paiva, R., Wongchuig, S., Barbosa, C., & Durand, F. (2023). Expressive fluxes over Amazon floodplain units revealed by high resolution 2D modelling. *EGU*



- General Assembly*, 23(439). doi:10.5194/egusphere-egu23-439
- Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., & Dasineh, M. (2019). Evaluation and prediction of the scour depth of bridge foundations with HEC-RAS numerical model and empirical equations (Case study: Bridge of Simineh Rood Miandoab, Iran). *Engineering Journal*, 23(6), 279-295. doi:10.4186/ej.2019.23.6.279
- Giupponi, C., Mojtahed, V., Gain, Z.K., Biscaro, C., & Balbi, S. (2015). Integrated risk assessment of water-related disasters. Pp. 163-200, In: Shroder, J.F., Paron, P & Di Baldassarre, G (eds), *Hazards and disasters series: Hydro-meteorological hazards, risks, and disasters*, Elsevier.
- Hejam, S., & Malekifard, F. (2002). Determining the time distribution pattern of rainfall in selected stations of Khorasan province. *Earth and Space Physics*, 28(2), 35-44. doi:20.1001.1.2538371.1381.28.2.5.5 [In Persian].
- Hirt, C. 2014. Digital terrain models. *Encyclopedia of Geodesy*, 1-6. doi:10.1007/978-3-319-02370-0\_31-1
- Horritt, M.S., & Bates, P.D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Hydrology*, 268, 87-99. doi:10.1016/S0022-1694(02)00121-X
- Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Suryavanshi, S., Ahmad, A., & Lal, D. (2019). Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: a case study of Sangam area, Prayagraj, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 397-405. doi:10.1007/s40808-019-00687-8
- Liao, D., Zhang, Q., Wang, Y., Zhu, H., & Sun, J. (2021). Study of four rainstorm design methods in Chongqing. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 1-9. doi:10.3389/fenvs.2021.639931
- Mirzaei, S., & Sadoddin, A. (2020). Comprehensive flood financial losses assessment framework (direct, indirect, tangible and intangible): Flood incident on 17 April 2016, Nodeh Khandooz, the Gorganrood River Basin, Iran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 9(4), 383-392. doi:20.1001.1.23225955.1398.9.4.5.0 [In Persian].
- Mirzaei, S., Sadoddin, A., Bahremand, A., Ownegh, M., & Mostafazadeh, R. (2023). The HEC-HMS hydrological model performance in the rainfall-runoff process simulation for the upstream watersheds of Gonbad, Iran. *Ecohydrology*, 10(3), 355-377. doi:10.22059/ije.2023.359860.1734 [In Persian].
- Mohammadi, M., Ebrahimzadian, H., Asgarkhan maskan, M., Vaziri, V. (2022). Evaluation of the one and two-dimensional HEC-RAS models' performance in determining flood zone of rivers. *Water and Soil Science*, 26(2), 187-201. doi:10.47176/jwss.26.2.43941 [In Persian].
- Mollaie, A., & Telvari, A.R. (2009). Determination of rainfall temporal pattern in Kohkiluyeh and Boyerahmad province by Pilgrim method. *Watershed Engineering and Management*, 1(2), 70-77. doi:20.1001.1.22519300.1388.1.2.1.3 [In Persian].
- Morsy, M.M., Goodall, J.L., O'Neil, G.L., Sadler, J.M., Voce, D., Hassan, G., & Huxley, C. (2018). A cloud-based flood warning system for forecasting impacts to transportation infrastructure systems. *Environmental Modelling & Software*, 107, 231-244. doi:10.1016/j.envsoft.2018.05.007
- Moshashaie, S.M., Panahi, R., & Moshashaie, M. (2022). Dynamic analysis of flood risk using HEC-RAS hydraulic model (Case study: Shahinshahr River, Isfahan Province). *Geography and Environmental Hazards*, 11(1), 77-97. doi:10.22067/geoh.2021.71679.1093 [In Persian].
- Ongdas, A., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. *Water*, 12(2672), 1-20. doi:10.3390/w12102672
- Parizi, E., & Hosseini, S.M. (2023). Estimation of Tandem-X Digital Elevation Model precision in Simulation of Flood Hydraulic Characteristics (Case Study: Atrak River Basin). *Geography and Environmental Planning*, 34 (2), 113-134. doi:10.22108/GEP.2022.134293.1533 [In Persian].
- Pilgrim, D.H., & Cordery, I. (1975). Rainfall temporal patterns for design floods. *Hydraulics Division*. 101(1), 81-95. doi:10.1061/JYCEAJ.0004197
- Raghunath, H.M. (2006). *Hydrology, Principles Analysis Design*. New Age International (P) Limited, Publishers. 463 pages.
- Rahimzadeh, O., Bahremand, A., Noura, N., & Mukolwe, M. (2019). Evaluating flood extent mapping of two hydraulic models, 1D HEC-RAS and 2D LISFLOOD-FP in comparison with aerial imagery observation in Gorgan flood plain, Iran. *Natural Resource Modeling*, 32(40), 1-12. doi:10.1111/nrm.12214
- Rangari, V.A., Umamahesh, N.V., & Bhatt, C.M. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 1839-1851. doi:10.1007/s40808-019-00641-8
- Saber, M., Boulmaiz, T., Guermoui, M., Abdrabo, I.E., Kantoush, S.A., Sumi, T., Boutaghane, H., Hori, T., Binh, D.V., Nguyen, B.Q., Bui, T.T.P., Vo, N.D., Habib, E., & Mabrouk, E. (2023). Enhancing flood risk assessment through

- integration of ensemble learning approaches and physical-based hydrological modeling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 38p. doi:10.1080/19475705.2023.2203798
- Saeidifarzad, B., Kardan, N., & Salmani, M. (2023). Evaluation of performance of HEC-RAS 2D and CCHE2D softwares in flood zoning due to dam break and risk management of its flood (Case study: Baron dam). *Marine Technology Journal*, 10(1), 47-63. doi:10.22034/ijmt.2022.543650.1744 [In Persian].
- Saghafian, B., Razmkhah, H., & Ghermez Cheshmeh, B. (2011). Investigating regional changes in annual rainfall using geostatistical methods (Case study: Fars province). *Water Resources Engineering*, 4(9), 29-38. doi:10.1001.1.20086377.1390.4.9.3.1 [In Persian].
- Salami, A.W., Bilewu, S.O., Ibitoye, A.B., & Ayanshola, A.M. (2017). Runoff hydrographs using Snyder and SCS synthetic unit hydrograph methods: A case study of selected rivers in South West Nigeria. *Ecological Engineering*, 18(1), 25-34. doi:10.12911/22998993/66258
- Samadi, A., & Azizian, A. (2020). Influence of the concept of subgrid variability and computational mesh dimensions on the performance of HEC-RAS 2D model in simulating river floodplains (Case study: Sarbaz River). *Water and Soil Resources Conservation*, 9(3), 1-12. doi:10.1001.1.22517480.1399.9.3.1.3 [In Persian].
- Satriagasa, M.C., Tongdeenok, P., & Kaewjampa, N. (2023). Assessing the implication of climate change to forecast future flood using SWAT and HEC-RAS model under CMIP5 climate projection in upper Nan Watershed, Thailand. *Sustainability*, 15(5276), doi:10.3390/su15065276
- Sayyad, D., Ghazavi, R., & Omidvar, E. (2021). Preparation and analysis of flood risk map using HEC RAS and RAS MAPPER hydraulic model (Case study: Sok Cham river of Kashan). *Geography and Environmental Hazards*, 10(3), 19-37. doi:10.22067/geoh.2021.69554.1038 [In Persian].
- Shaikh Baikloo Islam, B. (2021). Evidence and consequences of the flood in Iran from prehistory to the present. *Water and Soil Management and Modeling*, 1(1), 24-40. doi:10.22098/MMWS.2021.1173 [In Persian].
- Shustikova, I., Domeneghetti, A., Neal, J.C., Bates, P., & Castellarin, A. (2019). Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. *Hydrological Sciences*, 64(14), 1769-1782. doi:10.1080/02626667.2019.1671982
- Sideng, U., Upu, H., Haris, N.A., & Rahmayana, D. (2023). 2D simulation of design discharge in flood hazard spatial analysis using HEC-RAS, (Case study: Mata Allo Sub-Watershed, Enrekang, Indonesia). *Geographia Technica*, 18(2), 1-13. doi: 10.21163/GT\_2023.182.01
- Tamaskani Zahedi, A., Barani, H., Mokhtari, Sh., Bahremand, A. (2022). Flood hazard and Risk maps using two-dimensional hydraulic model LISFLOOD-FP (Case study: Araz Kooseh region). *Water and Soil Conservation*, 28(4), 1-25. doi:10.22069/jwsc.2022.19717.3516 [In Persian].
- Tufano, R., Guerriero, L., Corona, M.A., Cianflone, G., Martire, D.D., Ietto, F., Novellino, A., Rispoli, C., Zito, C., & Calcaterra, D. (2023). Multiscenario flood hazard assessment using probabilistic runoff hydrograph estimation and 2D hydrodynamic modelling. *Natural Hazards*, 116, 1029-1051. doi:10.1007/s11069-022-05710-3
- USDA, (2023). *HEC-RAS, River Analysis System, User's Manual*. US Army Corps of Engineers, 732 pages.
- USDA, Natural Resources Conservation Service. (2007). *Hydrographs*. Chapter 16. Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. 50p.
- Vafaei, M., Dastorani, M.T., & Rostami Khalaj, M. (2023). Flood risk assessment on the campus of Ferdowsi University of Mashhad and presentation management scenarios using the HEC-RAS model. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 225-239. doi:10.22098/mmws.2022.11815.1173 [In Persian].
- Vaziri, F. (1993). Determining regional relationships of short-term rainfall in Iran. Research project of Khajeh Nasir al-Din Toosi University of Technology, 28 pages. [In Persian].
- Vicente-Serrano, S.M., Saz-Sánchez, M.A., & Cuadrat, J.M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24, 161-180. doi:10.3354/cr024161
- Zia, S.B., Al Womera, S., & Rahman, M.D.A. (2022). Hydrological assessment and flood inundation mapping for flood plain of Padma river using HEC-RAS 2D. *6<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD)*, 1-10. doi:10.1063/5.0129938