

Research Article

Dam Break Modelling, Flood Simulation and Floodplain Mapping (A case study: Bafra Earth Dam)

Y Hassanzadeh^{1,2*}, A Abdi Kordani³, M Hassanzadeh^{4,5}, M Shafiei Najd⁶

Received: May 30, 2022

Accepted: November 19, 2022

Received in Revised: October 18, 2022

Published online: September 23, 2023

1-Prof., Water Engin. Dept., Center of Excellence in Hydrionfarmatics, Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

2-Farazab Consulting Engineers, PMO, Tabriz, Iran

3-Postdoctoral Researcher, Water Engin. Dept., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

4-Graduated Ph.D. Student, Geotechnical Engin. Dept., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

5-Farazab Consulting Engineers, Dam Department, Tabriz, Iran

6-Graduated M.Sc. Student, Civil Engin. Dept., Pardis Campus, Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir

Background and Objectives

Although a dam's structure has an important role in suppressing floods and providing water for activities such as agriculture, human consumption, industrial use, electricity generation and pisciculture, its break has an immense damage and loss of life when it occurs. In order to reduce the damaging effects of the dam break on the downstream places, it is necessary to provide the flood hazard map.

There are few studies on applying HEC-RAS two-dimensional model in the field of dam break analysis. For example, Hassanzadeh et al. (2019b) computed the output breach hydrograph of the Alavian dam by the BREACH model under the overtopping scenario. Also, the breach hydrograph was routed through the downstream of the river by using HEC-RAS two-dimensional model. Finally, the ArcGIS software was utilized to prepare the flood mapping. The results of their study illustrated that the Alavian dam is breached with the time of failure of 46 min and the peak discharge of about $66000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Furthermore, according to the flood hazard map, most of the downstream inundation zones due to Alavian failure dam have been considered as the high hazard area.

Methodology

Two-dimensional (2D) numerical simulation proved to be an important tool for understanding flood events. The HEC-RAS model is one of the most popular hydraulic models. In 2016 a new version of HEC-RAS (HEC-RAS-v5) was released including 2D capabilities. HEC-RAS software supports special capability to correct waterway and computing necessary ground-related operations. The capabilities of HEC-RAS are: 1) Developing a 2D unsteady flow model; 2) Modeling the 2D shallow water equations or the 2D diffusion wave equations; 3) Solving implicit finite volume algorithm; 4) Developing a terrain model and geospatial layers. The HEC-RAS software also enjoys connect-ability to ArcGIS software via an adaptor called HEC-GeoRAS to perform pre- and post-processing in geographical information system (GIS).

The threat to personal safety and to gross structural damage caused by floods depends largely upon the speed and depth of floodwaters. The greater these factors become, the greater the danger to people and property. The depth-velocity hazard classification diagram considered in this study is based on the Garcia and Lopez (2005), in which hazard categories are broken down into high, medium and low hazard for each hydraulic category. These can be defined as: 1) High hazard: possible danger to personal safety; evacuation by trucks difficult; able-bodied adults would have difficulty in wading to safety, potential significant structural damage to buildings; 2) Low hazard: should it be necessary, truck can evacuate people and their possessions; able-bodied adults would have little difficulty in wading to safety; 3) Medium hazard: In the transition zone



highlight by the median color, the degree of hazard is dependent on site conditions and the nature of the proposed development.

Findings

In this research, the dam break problem has been presented from the viewpoints of importance, mechanism, spatial and temporal analyses as well as governing mathematical equations. For this purpose, the output hydrographs of the Bafrajard dam site have been computed by breach model under a fictitious dam break scenario (overtopping) as the first step. In the next step, the output hydrographs have been routed through the downstream river by using HEC-RAS model. Then water levels and wave front arrival times have been computed at all cross sections. Finally, the obtained results have been imposed to Geographic Information Systems in order to obtain the presentation of the results to develop floodplain maps.

Conclusion

The results of the present study demonstrated that the Bafrajard dam is breached with the time of failure of 80 min after the upstream erosion and the peak discharge of about $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Also, Khanghah-e Bafrajard village, Aznav tourist area and Khalkhal city are affected by floods with inundation percentages of about 35, 10 and 20%, respectively. Furthermore, the wave front arrival time at the mentioned areas is about 10, 30 and 40 minutes, respectively, so there will be very short time available for various emergency actions.

Keywords: Bafrajard dam, Dam break phenomenon, Flood simulation, Floodplain mapping, Overtopping scenario

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی شکست سد، شبیه‌سازی جریان و پهنه‌بندی دشت سیلابی

(مطالعه موردی: سد خاکی بفرآجرده)

یوسف حسن‌زاده^{۱*}، امین عبدی کردانی^۲، مهران حسن‌زاده^{۳،۴}، مریم شفیعی نجدی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸

تاریخ دریافت ویرایش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۶

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۷/۱

- ۱- استاد، گروه مهندسی عمران آب، قطب علمی هیدرو انفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
- ۲- شرکت مهندسین مشاور فرازآب، دفتر برنامه‌ریزی و مدیریت طرح‌ها، تبریز
- ۳- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
- ۴- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز
- ۵- شرکت مهندسین مشاور فرازآب، بخش مهندسی سدسازی، تبریز
- ۶- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، پردیس خودگردان تبریز، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، شکست سد خاکی بفرآجرده تحت سناریوی روگذری جریان، به عنوان مهمترین عامل ایجاد پدیده شکست سد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای انجام این منظور، جهت تعیین مشخصات شکست و هیدروگراف خروجی از مقطع شکسته‌شده، از مدل BREACH استفاده گردید. در ادامه جهت روندیابی و شبیه‌سازی جریان حاصله در پایین‌دست، از مدل دوبعدی نرم‌افزار HEC-RAS بهره گرفته شد و در نهایت جهت پهنه‌بندی سیلاب از نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. نتایج حاصل از تحقیق حاضر، نشان داد که سد بفرآجرده در مدت زمان ۸۰ دقیقه پس از فرسایش وجه بالادست و با دبی حداکثر در حدود ۴۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به‌طور کامل می‌شکند. همچنین روستای خانقاه بفرآجرده، منطقه گردشگری ازناو و شهر خلخال به ترتیب با درصدهای استغراق در حدود ۳۵، ۱۰ و ۲۰ درصد تحت تاثیر سیلاب قرار می‌گیرند. بعلاوه، زمان رسیدن پیشانی سیل به مناطق ذکرشده، به ترتیب حدود ۱۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه می‌باشد، که فرصت بسیار اندکی برای اقدامات اضطراری مختلف وجود خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: پدیده شکست سد، پهنه‌بندی سیلاب، سد خاکی بفرآجرده، سناریوی روگذری جریان، شبیه‌سازی جریان

مقدمه

در کنار منافع قابل توجه ساخت سدها، شکست سد به عنوان یک حادثه با مخاطرات فوق‌العاده تلقی می‌گردد که بررسی آن در طرح‌های تحقیقاتی، برنامه‌ریزی‌های دولت و سرمایه‌گذاری‌های در پایاب سدها از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشد. سیلاب حاصل از شکست سد، چه به لحاظ ابعاد آن و چه به لحاظ اثرات دینامیکی موج سیلاب، قابل مقایسه با سیلاب‌های طبیعی حوضه آبریز مربوطه نبوده و از قدرت تخریب بالایی برخوردار هستند. علاوه بر آن در اغلب موارد، کانال رودخانه در پایاب سد چنین سیلابی را تجربه نکرده و لذا قادر به مهار آن در کانال اصلی خود نمی‌باشد. از این رو انجام تحلیل شکست سد و ارزیابی تبعات ناشی از آن برای همه سدها ضروری به نظر می‌رسد. این تحلیل علاوه بر ارزیابی خسارت و میزان خطر موجود در پایین‌دست سد، امکان برنامه‌ریزی عملیات نجات و کاهش تاثیرات ناشی از شکست سد را نیز فراهم می‌نماید (ارزنلو و همکاران ۲۰۱۷).

دانستن تغییرات پارامترهای هیدرولیکی ناشی از شکست سد نظیر عمق، سرعت، دبی، ابعاد نهایی شکستگی و زمان رسیدن پیشانی موج به پایاب و بالاخره تعیین حریم و ترسیم نقشه پهنه گسترش سیلاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا با در دست داشتن مشخصات سیلاب ناشی از شکست سد، می‌توان اقدامات ایمنی و پیشگیری کننده را به منظور کاهش و یا از بین بردن خسارات جانی و مالی ناشی از آن قبل از وقوع حادثه در پایاب سد انجام داد (حسن‌زاده و همکاران ۲۰۱۵). از با اهمیت‌ترین داده‌ها در شکستگی‌های از نوع فرسایشی سدهای خاکی، می‌توان به ابعاد نهایی شکستگی، شکل مقطع شکست، زمان موردنیاز جهت توسعه شکستگی و رقوم سطح آب مخزن به‌هنگام شکستگی اشاره نمود. شکست فرسایشی در سدهای خاکی ممکن است ناشی از روگذری جریان از سد، نشت آب و یا پدیده رگاب باشد.

شکست سدهای خاکی تدریجی بوده و در آنالیز مربوطه باید پارامتر زمان و عوامل موثر در مدت زمان شکستگی نظیر جنس مصالح، دانه‌بندی، تراکم، چسبندگی و ابعاد خاکریز مد نظر قرار گیرند (حسن‌زاده ۲۰۰۵). در زمینه مدل‌سازی شکست سد، تحقیقات مختلفی در سال‌های اخیر در کشور ایران صورت گرفته است، که به چند مورد از آن‌ها می‌توان اشاره نمود. سیفی‌زاده و همکاران (۲۰۱۴) شکست سد پلرود واقع در بخش شرقی استان گیلان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که هیدروگراف سیلاب ناشی از شکست سد، دارای دبی اوج ۴۷۲۵۳ مترمکعب بر ثانیه بوده که ۲۷ ساعت پس از شروع سیلاب و یک ساعت پس از آغاز روگذری جریان از سد رخ می‌دهد. حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۵) مسئله شکست سد و نیار را از نقطه نظرهای اهمیت، مکانیسم، تجزیه و تحلیل مکانی و زمانی و معادلات حاکم، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در سناریوی روگذری جریان، هیدروگراف خروجی دارای شیب ملایم بوده و بدلیل شرایط پایین‌دست، قسمت اعظم توان هیدرولیکی سیلاب بدون ایجاد خسارت‌های قابل توجه مالی کاهش می‌یابد. ارزنلو و همکاران (۲۰۱۷) روش‌های تحلیل معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی با استفاده از مدل‌های ریاضی را در اثر شکست سد شهرچای واقع در بالادست شهر ارومیه مورد بررسی قرار دادند. نتیجه این مطالعه نشان داد که با توجه به وضعیت ژئومورفولوژیکی و توپوگرافی دره میزبان در پایین‌دست سد، قسمت اعظم روستاها و اراضی کشاورزی در معرض استغراق کامل قرار می‌گیرند. حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۹b) شکست سد خاکی قلعه‌چای را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که سازه سد، تحت تاثیر حداکثر سیلاب محتمل^۱ (PMF) در مدت زمان ۲۰ دقیقه می‌کند. همچنین

¹ Probable maximum flood

شکستگی سدهای خاکی، خواه ناشی از روگذری^۱ و یا رگاب^۲ انجام بگیرد، جریان از داخل سد ابتدا به صورت نشت آغاز و با ایجاد لوله جریان در داخل سد و گسترش تدریجی ابعاد آن باعث ریزش سقف و دیواره های مجرا شده و بالاخره به جریان روگذر از سد منجر می شود (حسن زاده ۲۰۰۵).

مشاهدات شکستگی سدهای خاکی نشان داده است که مقطع شکست سد در ابتدا معمولاً به صورت مثلثی شکل بوده و جریان روگذر به تدریج عرض و ارتفاع آنرا گسترش داده و بالاخره به زمین طبیعی که از خاصیت فرسایش پذیری کمتری برخوردار است منتهی می شود و توسعه عرضی مقطع شکستگی در نهایت به شکل نوزنقه در می آید. گفتنی است که برعکس شکست ناگهانی سدهای بتنی ناشی از وقوع زمین لرزه و یا بمباران، شکست فرسایشی سدهای خاکی به طور تدریجی انجام می گیرد. مطالعات بسیار زیادی وجود دارد که تقریباً در طول یک و نیم قرن، در مورد حرکت امواج سیلاب ناشی از شکست سد، انجام شده است. در دو دهه اخیر، علاقه عمومی به ایمنی سدها، به میزان قابل توجهی افزایش یافته است که به نوبه خود، تحقیقات در زمینه های مختلف شکست سد را توسعه داده است. از میان مدل های ریاضی که مربوط به شکست سد خاکی هستند، در اینجا به طور خلاصه مدل BREACH مورد بحث قرار می گیرد (سینگ ۱۹۹۶).

مدل BREACH، یک مدل ریاضی مبتنی بر قوانین فیزیکی می باشد که توسط فرد (۱۹۸۸)، برای تخمین هیدروگراف خروجی از شکاف سدهای خاکی توسعه داده شد. از این مدل می توان برای بررسی شکاف و تعیین هیدروگراف خروجی از شکاف برای سدهای همگن یا سدهای خاکی غیرهمگن هسته دار استفاده نمود. همچنین این مدل که ساختار ساده ای دارد، قابلیت شبیه سازی شکست ناشی از پدیده روگذری جریان و

حداکثر دبی خروجی از مقطع شکست در حدود ۱۳۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه محاسبه گردید. حسن زاده و همکاران (۲۰۱۹a) به مطالعه شکست سد خاکی علویان تحت سناریوی روگذری جریان پرداختند و چنین نتیجه گرفتند که سد علویان، در مدت زمان ۴۶ دقیقه و با حداکثر دبی خروجی در حدود ۶۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به طور کامل می شکند. همچنین آنها بر اساس نقشه خطرپذیری سیلاب، مناطق پر خطر تحت تاثیر سیلاب ناشی از شکست سد علویان را مشخص نمودند. لازم به ذکر است که در تمامی تحقیقات اشاره شده، از مدل پرکاربرد BREACH جهت تحلیل شکست سد استفاده نموده اند. با توجه به اهمیت بررسی شکست سدها، در این تحقیق، شکست سد خاکی بفراگرد تحت سناریوی روگذری جریان، به عنوان مهمترین و پراسیب ترین عامل ایجاد پدیده شکست سد مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. برای انجام این منظور، جهت تعیین مشخصات شکست همچون ابعاد شکاف و هیدروگراف خروجی از مقطع شکسته شده، از مدل BREACH استفاده گردید. در ادامه جهت روندیابی و شبیه سازی جریان حاصله در پایین دست، از مدل دوبعدی نرم افزار HEC-RAS، بهره گرفته شد و در نهایت جهت پهنه بندی سیلاب و استخراج نقشه مناطق سیلگیر پایاب از نرم افزار ArcGIS استفاده گردید.

مواد و روشها

مدل سازی شکست سد

علت شکست سدهای خاکی را می توان علاوه بر ناکافی بودن ابعاد سرریز جهت تخلیه سیلاب های طغیانی، نشست سد، شکست فونداسیون، ایجاد ترک، لغزش بدنه سد و لغزش کوهپایه ها به داخل سد را نام برد که وقوع بسیاری از این حوادث را می توان ناشی از وقوع زلزله به همراه اثرات امواج آب مخزن دانست.

¹ Overtopping

² Piping

این فرسایش تا زمانی که مقطع A-A به مقطع B-B برسد ادامه یافته و بعد از این مرحله، گسترش شکاف در جهت قائم و به طرف بستر سد شروع می‌شود. در رابطه بالا، V سرعت جریان، q دبی در واحد عرض و y عمق جریان می‌باشند. مقادیر q و y توسط روابط زیر مشخص می‌گردند (فرد ۱۹۸۸):

$$q = 3(H - H_c)^{1.5} \quad [۳]$$

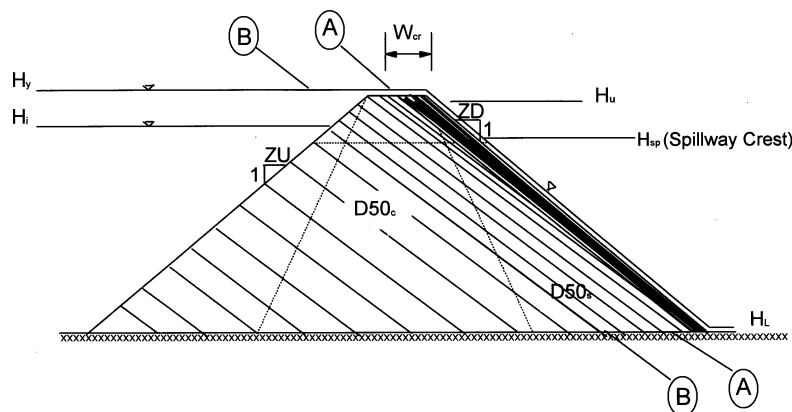
$$y = \left[\frac{q n'}{1.49(1/ZD)^{0.5}} \right]^{0.6} \quad [۴]$$

که در آن n' ضریب مانینگ و ZD شیب شیروانی پایین دست سد می‌باشد.

رگاب را دارا می‌باشد. در شکاف نوع روگذری، ارتفاع آب از ارتفاع سد بیشتر شده و آب از روی سد سرریز و روی شیروانی پایین دست سد جریان یافته (مقطع A-A در شکل ۱) و باعث فرسایش آن می‌شود. با ازدیاد این فرسایش یک آبراهه کانالی شکل کوچک تقریباً مستطیلی ایجاد می‌شود که دبی ورودی به این کانال از رابطه سرریزهای لبه پهن محاسبه می‌گردد (فرد ۱۹۸۸):

$$Q_b = 3B_0 (H - H_c)^{1.5} \quad [۱]$$

که Q_b جریان ورودی به کانال شکاف، B_0 عرض اولیه کانال مستطیلی شکل، H تراز آب مخزن و H_c تراز کف شکاف می‌باشد.



شکل ۱- مقطع سد در گسترش شکاف پدیده روگذری.

استفاده از روندیابی سیل چگونگی طغیان و یا فروکش سیل و یا صعود و نزول هیدروگراف رودخانه در نقطه‌ای از مسیر جریان تحلیل می‌گردد. روندیابی جریان در مهندسی هیدرولیک و کارهای آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور مثال، با ورود هیدروگراف مشخص یک سیلاب به‌داخل مخزن یک سد که پر از آب است، دانستن اینکه هیدروگراف خروجی از سرریز آن سد چگونه خواهد بود و نیز با دانستن هیدروگراف خروجی از سرریز، هیدروگراف سیل در رودخانه پایین دست سد چگونه خواهد بود، از ضروریات طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد (حسن‌زاده ۲۰۰۵). روندیابی جریان غیردائمی یکی از

فرسایش در کف و دیواره‌ها، به‌جز در مواقع ریزش دیواره‌ها، یکسان فرض می‌شود و وقتی دیواره ریزش می‌کند، مصالح آن توسط جریان شسته شده و سپس دوباره فرسایش کف آغاز می‌شود. در نهایت وقتی کف کانال فرسایش به بستر می‌رسد، فرسایش در جهت قائم خاتمه یافته، لیکن فرسایش دیواره‌ها ادامه پیدا می‌کند (حسن‌زاده ۲۰۰۵).

روندیابی جریان

در روندیابی جریان، با در دست داشتن هیدروگراف ورودی در بالادست، هیدروگراف خروجی در پایین دست تعیین می‌شود. یا به‌عبارت دیگر با

پایاب، ضروری می‌باشد. در این راستا، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) جهت تهیه نمودن نمودار اطلاعات شامل عمق جریان، سرعت جریان، زمان رسیدن پیشانی موج و نقشه‌های پهنه‌بندی می‌تواند کارساز باشد. با استفاده از اطلاعات حاصل از این نقشه‌ها که با توجه به ریسک‌پذیری هر منطقه با رنگ‌های مختلف از یکدیگر متمایز خواهند شد، می‌توان نسبت به تهیه برنامه اقدامات اضطراری^۱ (EAP) اقدام نمود.

به‌منظور تلفیق دو متغیر سرعت جریان و عمق آب-گرفتگی در بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، شاخص مخاطره در جدول ۱ ارائه شده است (بی‌نام ۱۹۸۸) که برای محاسبه مقدار آن از مقادیر حداکثر عمق (h) و سرعت (v) جریان ارائه شده در جدول ۲ استفاده می‌گردد (گارسیا و لویز ۲۰۰۵).

منطقه مورد مطالعه

محل احداث سد مخزنی بر روی رودخانه بفرآجرده‌چای در یک کیلومتری بالادست روستای خانقاه و ۱۵ کیلومتری جنوب خلخال قرار دارد. این طرح با هدف جمع‌آوری و ذخیره سالانه حدود ۶ میلیون مترمکعب آب رودخانه بفرآجرده‌چای و استفاده از آن برای آب شرب شهرستان خلخال احداث گردیده است. سد بفرآجرده از نوع خاکی با هسته رسی قائم مرکزی طراحی شده که ارتفاع ماکزیمم سد ۳۰ متر از پی، طول تاج سد ۴۱۰ متر و عرض تاج سد ۷ متر می‌باشد. کل حجم بدنه سد ۶۶۰ هزار متر مکعب شامل مصالح پوسته، هسته، فیلتر و زهکش ریپرپ و بالادست و پائین‌دست می‌باشد. برای تخلیه ایمن سیلاب ورودی به مخزن سد یک سرریز از نوع اوجی آزاد به طول ۶ متر در جناح چپ سد پیش‌بینی شده است. نمای کلی سد بفرآجرده در شکل ۲ نشان داده شده است.

مسائل مطرح در مبحث مرتبط با جنبه‌های عملی هیدرولیک محاسباتی رودخانه‌ها می‌باشد. این نوع از جریان‌ها، در اثر وقوع پدیده‌هایی نظیر سیلاب‌های حاصل از بارندگی‌های شدید، شکست سدها، امواج ناشی از جزر و مد دریاها و یا باز و بسته‌شدن سریع دریچه‌ها مطرح می‌گردد که طی آن کمیت‌های هیدرولیکی نظیر عمق، سرعت و دبی جریان به‌صورت تابعی از مکان و زمان قابل بررسی می‌باشند. معادلات حاکم بر مساله را معادلات پیوستگی و اندازه حرکت در جریان‌های متغیر غیردائمی تشکیل می‌دهند که در فرم دوبعدی آنها در ادامه بیان می‌شوند. با فرض این که جریان تراکم‌ناپذیر است، معادله پیوستگی در حالت برداری به‌صورت زیر می‌باشد (هک رس ۲۰۱۶):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q' = 0 \quad [5]$$

که در آن، H تراز سطح آب، t زمان، h عمق آب، $V = (u, v)$ بردار سرعت با المان‌های سرعت u و v به ترتیب در راستای x و y بوده و q' شار چشمه یا چاه می‌باشد. در این رابطه عملگر دیفرانسیلی ∇ ، بردار عملگر مشتق جزئی است که به‌صورت $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ به‌دست می‌آید.

همچنین فرم دیفرانسیلی معادله اندازه حرکت در حالت برداری به‌صورت زیر ارائه می‌گردد.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + fk \times V \quad [6]$$

که در آن، g شتاب گرانشی، v_t ضریب ویسکوزیته گردابی افقی، C_f ضریب اصطکاک کف، f پارامتر کوریولیس و k یک بردار واحد در جهت عمودی می‌باشد (ژنگ و همکاران ۲۰۱۶).

پهنه‌بندی سیلاب

به‌منظور محاسبه و پیش‌بینی سرعت و ارتفاع انتشار امواج سیلابی ایجاد شده، تعیین مختصات مکانی و زمانی پیشروی امواج و تعیین حدود مناطق سیل‌گیر

¹ Emergency Action Plan

جدول ۱- تعریف شاخص مخاطره بر اساس دسته‌بندی انجام شده

شاخص مخاطره	رنگ اختصاص یافته	تعریف
زیاد	قرمز	افراد چه در داخل و چه در خارج از مناطق مسکونی در خطر می‌باشند. تأسیسات مسکونی در معرض تخریب قرار دارند.
متوسط	نارنجی	افراد در خارج از مناطق مسکونی در خطر می‌باشند. تأسیسات مسکونی بسته به ساختار آنها در معرض آسیب قرار دارند.
کم	زرد	افراد و تأسیسات چندان در معرض خطر نمی‌باشند. در صورتی که داخل ساختمان‌ها تحت تاثیر سیلاب و رسوب قرار دارند.

جدول ۲- دسته‌بندی شاخص مخاطره

شاخص مخاطره	حداکثر عمق جریان (متر)	شرط	حاصل ضرب حداکثر عمق جریان (متر) در حداکثر سرعت جریان (متر بر ثانیه)
زیاد	$h < 1/5$ متر	یا	$v \times h < 1/5$ متر مربع بر ثانیه
متوسط	$1/5 < h < 0/5$ متر	یا	$0/5 < v \times h < 1/5$ متر مربع بر ثانیه
کم	$0/5 < h < 0/1$ متر	و	$0/1 < v \times h < 0/5$ متر مربع بر ثانیه

شروع به فرسایش نموده و در نهایت در لحظه ۱۵/۱۰ مدل‌سازی خاتمه پیدا می‌کند. نتایج تکمیلی حاصل از مدل BREACH در جدول ۳ ارائه شده‌است. مراحل پیشرفت روگذری جریان نسبت به زمان‌های مختلف، در شکل ۳ نمایش داده شده‌است.

جدول ۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی شکست سد بفرآورد.

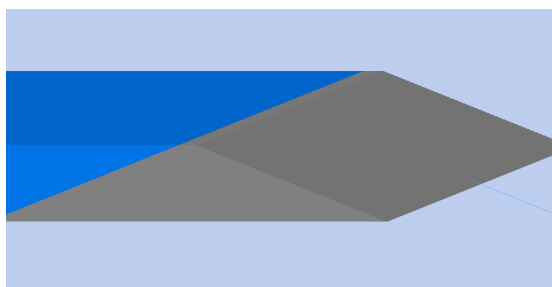
عنوان	واحد	مقدار
حداکثر دبی خروجی از مقطع شکست	m^3s^{-1}	۳۹۴۲
زمان مربوط به حداکثر دبی خروجی	hr	۱۲/۸۶
عمق نهایی شکست	m	۲۸/۵۰
عرض بالای شکست	m	۳۳
عرض کف شکست	m	۱۰
شیب دیواره شکست (۱ قائم: Z افقی)	-	۰/۴۹
مدت زمان شکست سد	min	۷۹/۳۰



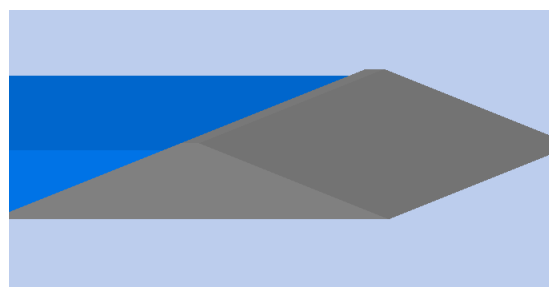
شکل ۲- نمای کلی سد خاکی بفرآورد.

نتایج و بحث

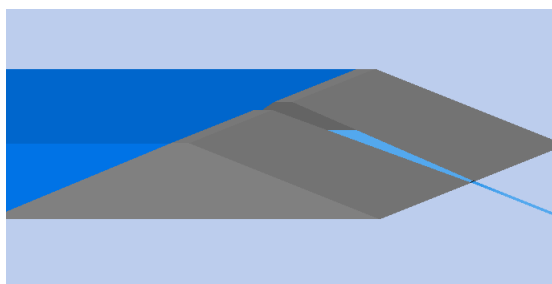
در این بخش، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار BREACH، شکست سد بفرآورد تحت مکانیسم روگذری جریان تجزیه و تحلیل می‌گردد. در مدل BREACH ابتدا سد در شرایط عادی (یعنی تراز آب نرمال) در نظر گرفته شده و سپس تحت تاثیر سیلاب PMF قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل BREACH نشان می‌دهد که وجه پایین دست و بالادست سد بفرآورد به ترتیب در لحظه‌های ۱۰/۵۲ و ۱۲/۷۸ ساعت



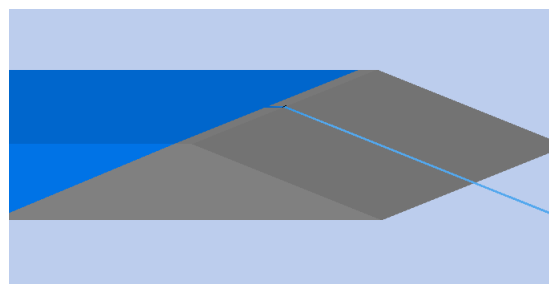
(ب) فرسایش وجه پایین دست سد (زمان ۱۰/۵۲ ساعت)



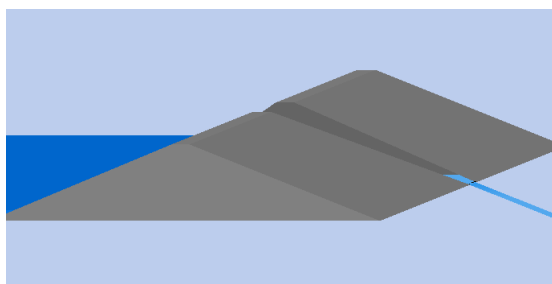
(الف) وضعیت سد در تراز نرمال (زمان ۰ ساعت)



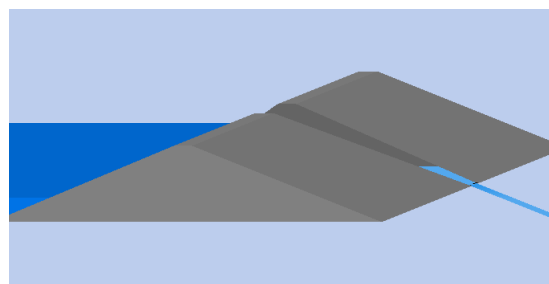
(د) تخلیه مخزن سد با حداکثر دبی (زمان ۱۳/۴۶ ساعت)



(ج) فرسایش وجه بالادست سد (زمان ۱۳/۷۸ ساعت)

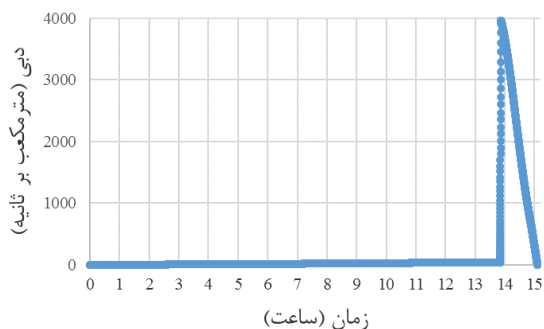


(و) پایان مدل سازی شکست سد (زمان ۱۵/۱۰ ساعت)



(ه) فرسایش کامل مصالح سد (زمان ۱۴/۸۹ ساعت)

شکل ۳- نمایش سه بعدی مراحل شکست سد بفرآورد در زمان های مختلف.



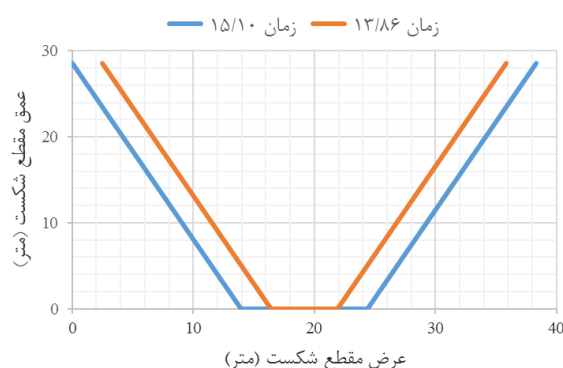
شکل ۴- هیدروگراف خروجی ناشی از شکست سد.

مطابق جدول ۳، شکست سد بفرآورد در مدت زمان ۸۰ دقیقه اتفاق می افتد و مقدار حداکثر دبی خروجی از مقطع شکست در حدود ۴۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه می باشد. هیدروگراف خروجی پس از شکست سد بفرآورد در شکل ۴ نشان داده شده است. همچنین تغییرات ابعاد ناحیه شکست نسبت به زمان، در شکل ۵ نمایش داده می شود.

نقشه‌برداری کشور تهیه شده‌اند و همچنین نقشه‌های رودخانه بفرآجردچای با مقیاس ۱/۲۰۰۰ که توسط شرکت آب منطقه‌ای اردبیل تهیه شده‌اند، استفاده گردیدند. با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-GeoRAS و ArcGIS، فایل مربوط به داده‌های هندسی^۲ مورد استفاده در نرم‌افزار HEC-RAS ایجاد گردید. همچنین بر اساس هیدروگراف خروجی از مدل BREACH، داده‌های جریان^۳ مورد استفاده در نرم‌افزار HEC-RAS ایجاد گردید. برای این منظور، با وارد نمودن هیدروگراف جریان^۴ برای شرط مرزی بالادست و عمق نرمال^۵ برای شرط مرزی پایین‌دست در قسمت شبیه‌سازی جریان^۶ و در نظر گرفتن ابعاد سلولی شبکه ۵۰۳۵۰ مترمربع و گام زمانی ۲ ثانیه برای محاسبات، اقدام به مدل‌سازی گردید.

پس از روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد بفرآجرد توسط نرم‌افزار HEC-RAS و پهنه‌بندی آن با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، نقشه حداکثر عمق سیلاب در پایین‌دست سد، در شکل ۶ نمایش داده شده‌است.

مطابق این شکل، درصد استغراق روستای خانقاه بفرآجرد، منطقه گردشگری ازناو و شهر خلخال به ترتیب در حدود ۳۵، ۱۰ و ۲۰ درصد می‌باشد. با استفاده از نقشه شهر خلخال، مشاهده می‌شود که محله‌های تحت‌تأثیر واقع شده در ساحل راست رودخانه هیروچای شامل قسمت‌هایی از شهرک آزادگان، شهرک امام، شهرک جانبازان و شهرک باهنر بوده و محله‌های تحت‌تأثیر واقع شده در ساحل چپ رودخانه هیروچای شامل قسمت‌هایی از حمزه آباد، نصیری‌یری، نوعی‌یری و قاضی‌ار می‌باشد. همچنین زمان رسیدن پیشانی سیل



شکل ۵- تغییرات ابعاد ناحیه شکست نسبت به زمان.

با توجه به مقدار ناچیز دبی قبل از فرسایش وجه بالادست سد (زمان ۱۳/۷۸ ساعت) بوده، اهمیت بیشتر مساله شکست بعد از فرسایش وجه بالادست سد و کاهش زمان محاسبات جهت روندیابی سیلاب، زمان پایه هیدروگراف خروجی از مقطع شکست سد از لحظه ۱۳/۷۸ ساعت تا پایان زمان مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد، از انتهای مخزن سد بفرآجرد تا انتهای منطقه مورد مطالعه (در حدود ۲۶ کیلومتر) لازم است که مدت زمان مربوط به محاسبات، در حدود ۵ ساعت در نظر گرفته شود.

در ادامه این بخش، نتایج حاصل از روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد بفرآجرد و همچنین پهنه‌بندی سیلاب در مناطق مختلف پایین‌دست سد ارائه می‌گردد. برای انجام این کار، لایه مربوط به ضریب زبری در محدوده مطالعاتی (مقدار ضریب زبری برای کانال اصلی رودخانه برابر ۰/۰۳۵، برای مناطق شهری و روستایی برابر ۰/۰۸، برای اراضی باغی و کشاورزی برابر ۰/۰۶، علفزارها ۰/۰۵ و برای سایر نواحی سیلاب‌دشت برابر ۰/۰۴) در نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید.

در ادامه از مدل رقومی ارتفاعی^۱ (DEM) ۱۰ متری منطقه مورد مطالعه که توسط سازمان

² Geometric Data

³ Flow Data

⁴ Flow Hydrograph

⁵ Normal Depth

⁶ Flow Analysis

¹ Digital Elevation Model

نتایج حاصل از بررسی شکست سد بفراجرد نشان می‌دهد که این سد تحت سناریوی روگذری جریان و در مدت زمان ۸۰ دقیقه پس از فرسایش وجه بالادست و با حداکثر دبی خروجی در حدود ۴۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه، به‌طور کامل می‌شکند. در اثر شکستن سد بفراجرد، روستای خانقاه بفراجرد، منطقه گردشگری ازناو و شهر خلخال به ترتیب در حدود ۳۵، ۱۰ و ۲۰ درصد تحت تاثیر سیلاب قرار می‌گیرند. همچنین زمان رسیدن پیشانی سیل به مناطق ذکر شده به ترتیب حدود ۱۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه می‌باشد.

با توجه به اینکه سد بفراجرد در مدت زمان کم می‌شکند، بنابراین فرصت بسیار اندکی برای اقدامات پیشگیرانه مختلف وجود خواهد داشت. در این راستا، تهیه برنامه اقدامات اضطراری سد بفراجرد حائز اهمیت می‌باشد که باید به‌طور جدی پیگیری شود. برای انجام این کار و کاهش خسارت‌های ناشی از شکست سد بفراجرد، برگزاری جلسات متعدد بین مسئولین ارگان‌های ذیربط و تقسیم‌بندی وظایف هر مجموعه، پیش‌بینی مکان‌هایی به‌عنوان پناهگاه جهت اسکان موقت افراد و امدادسانی، جلوگیری از ساخت و سازهای غیرمجاز در محدوده پهنه سیلاب، نصب علائم هشدار دهنده در مکان‌های پرخطر با توجه به نقشه مناطق سیلگیر پایین‌دست، ارائه آموزش‌های لازم به کاربران و ساکنین مناطق پایین‌دست در صورت مواجهه با پدیده شکست سد و ... از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد.

به روستای خانقاه بفراجرد، منطقه گردشگری ازناو و شهر خلخال به ترتیب حدود ۱۰، ۳۰ و ۴۰ دقیقه می‌باشد، که در صورت رخداد شکست سد بفراجرد، فرصت بسیار اندکی برای اقدامات پیشگیرانه مختلف وجود خواهد داشت.

همچنین برای تعیین مناطق پر مخاطره در اثر شکست سد و تقسیم‌بندی آنها به سه بخش (کم، متوسط و زیاد) از لحاظ میزان خطر، عمق و سرعت جریان در هر نقطه از محدوده مورد مطالعه، از شاخص مخاطره استفاده می‌شود. بر این اساس، نقشه مناطق پر مخاطره در منطقه مورد مطالعه در اثر شکست سد بفراجرد، در شکل ۷ نشان داده می‌شود که در آن سه رنگ قرمز، نارنجی و زرد به ترتیب نشان دهنده مناطق با خطر زیاد، متوسط و کم می‌باشند.

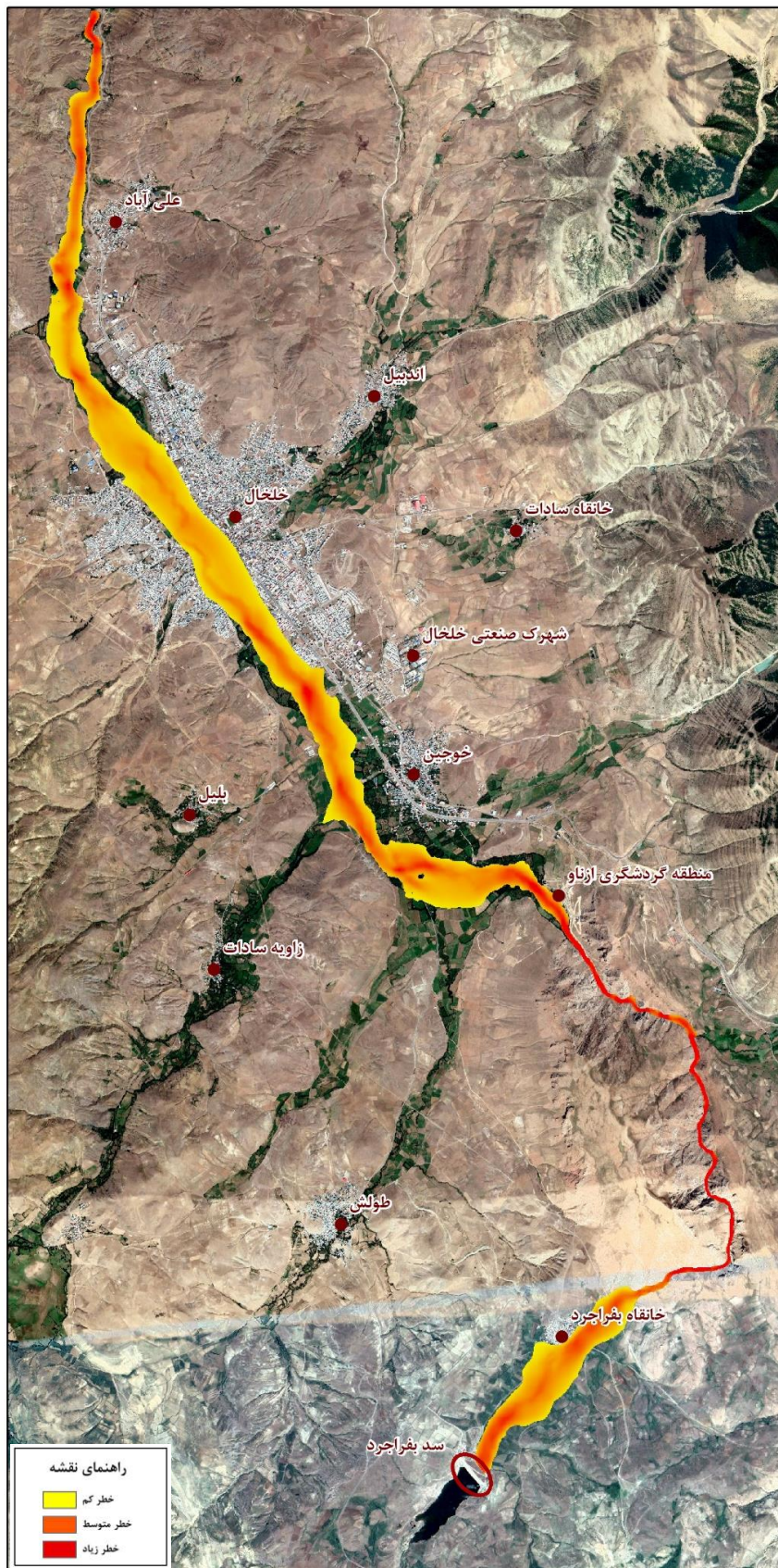
از مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با سایر تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی شکست سدهای خاکی، همچون سیفی‌زاده و همکاران (۲۰۱۴)، حسن‌زاده و همکاران (۲۰۱۵ و ۲۰۱۹a,b) و ارزنلو و همکاران (۲۰۱۷)، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که از ترکیب مدل‌های مختلف Breach، HEC-RAS و ArcGIS می‌توان تحلیل کاملی از تاثیرات احتمالی رخداد پدیده شکست سد در یک منطقه را بدست آورد.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، شکست احتمالی سد بفراجرد تحت سناریوی روگذری جریان که مهمترین و پرآسیب‌ترین عامل ایجاد پدیده شکست سد می‌باشد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶- نقشه حداکثر عمق سیلاب در پایین دست سد بفرآچرد.



شکل ۷- نقشه مناطق پرخطر در پایین دست سد بفرآچرد.

سیاسگزاری

این پروژه تحقیقاتی با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای اردبیل تحت قرارداد شماره ۹۵/۲/۸۲۰۵/۹۰۰ مورخ ۹۵/۰۸/۰۵ با کد ۱۳۷۴۸-۱۳۲۴۶۵ به انجام رسیده است. بدین‌وسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز و

گروه محترم تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای اردبیل و داوران محترم، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید. همچنین از همکاری‌های کارشناسان و مدیریت محترم امور سدسازی شرکت مهندسين مشاور فرازآب، در ارائه آمار و اطلاعات لازم، صمیمانه تشکر می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- Anonymous, 1988. Downstream Hazard Classification Guidelines. ACER Technical Memorandum No. 11, Assistant Commissioner - Engineering and Research, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Arzanlou A, Hassanzadeh Y and Kardan N, 2017. Numerical simulation of dam failur and flood mapping in order to plan a rapid response (Case study: Orumiyeh Shahrchay dam). Iranian Journal of Marine Technology 3(2):83-98. (In Persian with English abstract)
- Fread DL, 1988. Breach: An Erosion Models to for Earthen Dam-Failures. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service. NOAA, Silver Spring, Maryland 20910:1-39.
- Garcia R and Lopez JL, 2005. Debris flows of December 1999 in Venezuela. Pp. 519-538. In: Jakob M and Hungr O, (Eds.), Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. Springer, Berlin.
- Hassanzadeh Y, 2005. Dam-Break Hydraulics. Iranian National Commission on Large Dams. Tehran.
- Hassanzadeh Y, Abdi Kordani A and Hassanzadeh M, 2019a. Ghale Chay dam-break flood routing and inundation mapping under the overtopping scenario. National Conference on Flood of 1397-1398 if repeated. 12-14 November, Ahvaz, Iran. (In Persian with English abstract)
- Hassanzadeh Y, Abdi Kordani A, Hassanzadeh M and Shafiei Najd M, 2019b. Earthen dams break analysis, flood routing and mapping using mathematical models and geographic information system (A case study: Alavian dam). Water and Soil Science 29(3):121-134. (In Persian with English abstract)
- Hassanzadeh Y, Nourani V, Sepehri V, Delafrouz H, Hassanzadeh M and Almaspoor F, 2015. Dam-break flood waves analysis and the floodplain mapping using mathematical model (Case study: Vanyar Dam). Water and Soil Science 25:1-15. (In Persian with English abstract)
- HEC-RAS, 2016. Hydraulic Reference Manual (Version 5.0). US Army Crops of Engineers, California.
- Seyfizadeh M, Emadi A and Fazlola R, 2014. Investigation of Polrood dam break due to overtopping and its resulted flood routing in the downstream. Journal of Watershed Management Research 5(10):15-29. (In Persian with English abstract)
- Singh VP, 1996. Dam Breach Modeling Technology. Water Science and Technology Library, Vol. 17, Springer, Dordrecht.
- Zhang L, Peng M, Chang D and Xu Y, 2016. Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment. John Wiley and Sons, London.