

بررسی شکست سدهای خاکی، روندیابی و پهنه‌بندی سیلاب با اعمال مدل‌های ریاضی

و سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: سد علویان)

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

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۰۵

۱- استاد، گروه مهندسی عمران آب، قطب علمی هیدرو انفورماتیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران خاک و پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، پردیس خودگردان تبریز، دانشگاه تبریز

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

چکیده

اگر چه سازه سد نقش مهمی در مهار سیلاب و تامین آب برای کشاورزی، مصرف انسانی، استفاده صنعتی، تولید برق و پرورش ماهی دارد، در صورت شکست آن، تلفات جانی و خسارات بسیاری را ایجاد می‌نماید. برای کاهش اثرات مخرب شکست سد در مناطق سیل‌گیر پایاب، ارائه نقشه خطرپذیری سیلاب بسیار ضروری می‌باشد. بدین منظور در مرحله اول، هیدروگراف شکست خروجی از سد علویان با استفاده از مدل BREACH و تحت سناریوی روگذری جریان محاسبه گردید. در مرحله بعد، با استفاده از مدل HEC-RAS سیلاب ناشی از شکست سد در پایین‌دست رودخانه روندیابی گردید. در نهایت از نرم افزار ArcGIS جهت پهنه‌بندی سیلاب استفاده گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که سد علویان، در مدت زمان ۴۶ دقیقه و با حداکثر دبی خروجی در حدود ۶۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه به‌طور کامل می‌شکند. همچنین، بر اساس نقشه خطرپذیری سیلاب، بیشتر نقاطی که در منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر سیلاب ناشی از شکست سد علویان واقع شده‌اند، جزو مناطق پر خطر محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی سیلاب، سد علویان، سیستم اطلاعات جغرافیایی، شکست سد، نقشه خطرپذیری سیلاب

Earthen Dams Break Analysis, Flood Routing and Mapping using Mathematical Models and Geographic Information System (A Case Study: Alavian Dam)

Y Hassanzadeh^{1*}, A Abdi Kordani², M Hassanzadeh³, M Shafiei Najd⁴

Received: March 25, 2018

Accepted: May 26, 2019

¹ Prof., Water Engin. Dept., center of excellence in hydriofarmatics, Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

² Postdoctoral Researcher, Water Engin. Dept., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

³ Former Ph.D. Student, Geotechnical Engin. Dept., Faculty of Civil Engin., Univ. of Tabriz, Iran

⁴ Former M.Sc. Student, Civil Engin. Dept., Tabriz Campus, Univ. of Tabriz, Iran

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

Abstract

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. For this purpose, in the first step, the output breach hydrograph of the Alavian dam was computed by the BREACH model under the overtopping scenario. In the next step, the breach hydrograph was routed through the downstream of the river by using HEC-RAS model. Finally, the ArcGIS software was utilized to prepare the flood mapping. The results of the present study illustrated that the Alavian dam is breached with the time of failure of 46 min and the peak discharge of about 66000 m³/s. 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.

Keywords: Alavian dam, Dam break, Flood hazard map, Flood mapping, Geographic information system

مقدمه

می‌کند و مسئولان و متخصصان امر را بر این داشته است که در پی انجام مطالعاتی در ارتباط با شکست سدها باشند، تا در حد امکان سازه‌هایی مقاوم و با عمر بیشتر بسازند و یا در صورت بروز شکستگی در سدها، حداقل تلفات را دربرداشته باشند (حسن‌زاده و همکاران، ۱۳۹۴).

یکی از مسائل مطرح در مباحث مرتبط با جنبه‌های عملی هیدرولیک محاسباتی رودخانه‌ها، روندیابی جریان‌های غیردائمی می‌باشد. این نوع از جریان‌ها، در اثر وقوع پدیده‌هایی نظیر سیلاب‌های حاصل از بارندگی‌های شدید، شکست سدها، امواج

سد سازه‌ای است که به منظور ایجاد مخزن جهت ذخیره آب مازاد در فصول مرطوب، کنترل سیل‌های ویرانگر، تأمین آب شرب و آب مورد نیاز کشاورزی، تولید برق و موارد دیگر ساخته می‌شود و فواید بسیاری برای جامعه بشری دارد. اما شکست سد به رهاسازی حجم زیادی از آب منجر می‌شود که موجب پیدایش امواج سیلابی عظیمی در پایین‌دست سد می‌گردد و می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی بسیاری را نیز بر جای گذارد. بنابراین بررسی مسأله شکست سد و امواج ناشی از آن بسیار حیاتی و مهم جلوه

در زمینه تحلیل شکست سدهای خاکی، از دقت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد. همچنین تحقیقات مختلفی در زمینه روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد در سال‌های اخیر صورت گرفته است، که به چند مورد از آن‌ها می‌توان اشاره نمود. جیا و همکاران (۲۰۱۵) با تلفیق مکانیزم شکست فیزیکی - تجربی مدل WinDAM و شبیه‌سازی جریان سیلابی مدل CCHE2D، به مدل‌سازی شکست سد به صورت دوبعدی پرداختند و در انتها به این نتیجه رسیدند که مدل توسعه‌یافته می‌تواند فرآیند فیزیکی شکست سد را به خوبی پیش‌بینی کند. دردوس و همکاران (۲۰۱۵) برای ارزیابی خطرات ناشی از شکست احتمالی سد بتنی زردزاس واقع در شمال‌شرق الجزایر، از یک رویکرد مبتنی بر تلفیق مدل‌سازی هیدرولیکی و GIS استفاده نمودند. برای استخراج اطلاعات هندسی، از HEC-GeoRAS در محیط GIS بهره بردند. شبیه‌سازی جریان حاصل از شکست سد با استفاده از HEC-RAS انجام شد و سپس نتایج با استفاده از نرم‌افزار GIS پهنه‌بندی شدند. در نهایت، یک نقشه میزان خطر سیلاب بر اساس نقشه عمق آب و سرعت جریان در محیط GIS ایجاد شد. با توجه به این نقشه، در اثر شکست سد زردزاس، تعداد زیادی از افراد تحت تاثیر قرار خواهند گرفت. همچنین این تحقیق نشان داد که استفاده از تکنیک‌های اطلاعات جغرافیایی در ادغام با مدل‌سازی هیدرولیکی، می‌تواند به طور قابل توجهی در بهبود مدیریت سیلاب نقش ایفا کند. هاجری و همکاران (۲۰۱۶) به پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد نیراساگر کشور هند با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS پرداختند. آنها برای انجام اینکار، ویژگی‌های رودخانه و سایر مشخصات هندسی مخزن و حوضه را در نرم‌افزار HEC-GeoRAS ساخته و سپس جهت مدل‌سازی هیدرولیکی به نرم‌افزار HEC-RAS منتقل نمودند. در نهایت برای شناسایی ناحیه سیلابی، نتایج در Google Earth نمایش داده شد. مویا قیروگا و همکاران (۲۰۱۶) جهت مدل‌سازی دوبعدی رویداد

ناشی از جزر و مد دریاها و یا باز و بسته شدن سریع دریچه‌ها مطرح می‌گردد که طی آن کمیت‌های هیدرولیکی نظیر عمق، سرعت و دبی جریان بصورت تابعی از مکان و زمان قابل بررسی می‌باشند. به عنوان مثال، علی‌رغم لحاظ نمودن ضرایب اطمینان کافی در طراحی سدهای بزرگ و اعمال دقت لازم در ساخت آنها، اغلب محتمل است که بر اثر پدیده‌هایی نظیر روگذری جریان، پدیده رگاب، ضعف پی، وقوع زلزله و بمباران، بدنه آنها دچار شکستگی گردد. متعاقباً وقوع جریان‌های ناشی از شکست سدها، می‌تواند تلفات جانی و مالی فراوانی نیز به همراه داشته باشد (حسن‌زاده، ۱۳۸۳). بدین منظور برای کاهش صدمات احتمالی، محاسبه و پیش‌بینی سرعت و ارتفاع انتشار امواج سیلابی ایجاد شده، تعیین مختصات مکانی و زمانی پیشروی امواج و تعیین حدود مناطق سیل‌گیر پایاب، ضروری می‌باشد. از طرفی تهیه نمودن نمودار اطلاعات شامل عمق جریان، زمان رسیدن پیشانی موج و نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب در محیط ArcGIS می‌تواند کارساز باشد. این نقشه‌ها که با توجه به ریسک‌پذیری هر منطقه با رنگ‌های مختلف از یکدیگر متمایز خواهند شد، این امکان را به مسئولین می‌دهد تا نسبت به تهیه برنامه اقدامات اضطراری^۱ (EAP) اقدام نمایند (ارزنلو و همکاران، ۱۳۹۵).

در زمینه مدل‌سازی شکست سد، مدل BREACH به‌عنوان یکی از مدل‌های کارآمد جهت تخمین ابعاد شکست و هیدروگراف خروجی ناشی از مقطع شکست، تاکنون به‌طور گسترده توسط محققین مختلفی همچون فرانکا و آلمیدا (۲۰۰۴)، هانکس و همکاران (۲۰۰۵)، سنستی و همکاران (۲۰۰۶)، سین و همکاران (۲۰۰۸)، لی و همکاران (۲۰۱۱)، جاکوب و همکاران (۲۰۱۳)، یانگ و همکاران (۲۰۱۲) و خانال و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شده است. نتایج حاصل از تحقیقات فوق نشان می‌دهد که مدل BREACH، به عنوان یکی از کامل‌ترین مدل‌ها

¹ Emergency action plan

افزار ArcGIS و در نهایت بررسی کارائی ترکیب مدل های فوق مدنظر می باشد که می تواند در تصمیم گیری- های پیشگیرانه و مقابله ای مسؤولان و کاربران زیربند تاثیرگذار باشد که بتوانند با دقت و سرعت بیشتری نسبت به برنامه ریزی عملیات امداد و نجات و ارسال هشدارهای مناسب در فرصت زمان کوتاهی اقدام نمایند.

مواد و روش ها

در این بخش، روش های مورد نیاز جهت حل مسأله شکست سد مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد. برای انجام این منظور، پنج زیربخش در نظر گرفته شده است: (الف) مدل سازی مکانیسم شکست سد، (ب) معادلات هیدرولیکی حاکم بر جریان های غیردائمی دو بعدی، (ج) پهنه بندی سیلاب، و (د) منطقه مورد مطالعه.

مدل سازی مکانیسم شکست سد

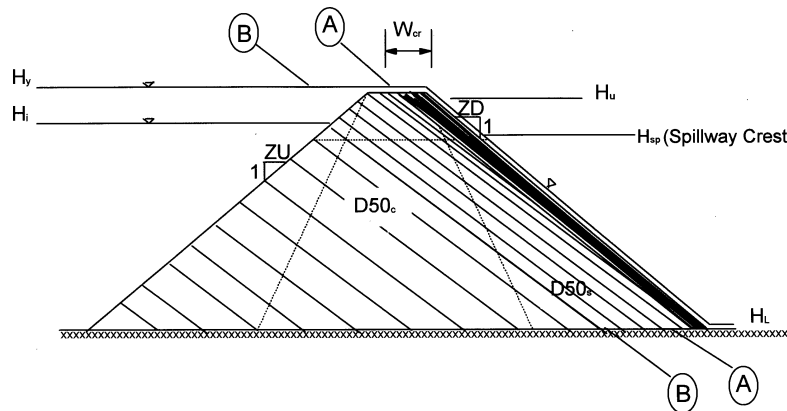
از میان مدل های مختلف تحلیل شکست سد، مدل BREACH، یک مدل ریاضی مبتنی بر قوانین فیزیکی می باشد که توسط فرد (۱۹۸۸)، برای تخمین هیدروگراف خروجی از شکاف سدهای خاکی توسعه داده شد. این مدل مبتنی بر اصول هیدرولیک، حمل رسوب، مکانیک خاک، خصوصیات هندسی سد و مشخصات مخزن مانند حجم ذخیره، ویژگی های سرریز و دبی جریان ورودی به مخزن می باشد. مدل BREACH هفت جزء اصلی دارد: (۱) تشکیل شکاف، (۲) عرض شکاف، (۳) تراز آب مخزن، (۴) هیدرولیک کانال شکاف، (۵) انتقال رسوب، (۶) توسعه شکاف در اثر فروریختن سد و (۷) الگوریتم محاسباتی. این مدل قابلیت شبیه سازی شکست ناشی از پدیده روگذری جریان و رگاب را دارا می باشد.

همچنین این مدل قادر به مدل سازی سدهای همگن و یا غیرهمگن متشکل از دو نوع مصالح (قسمت بیرونی و هسته داخلی) می باشد. در یک شکست ناشی از روگذری جریان، قبل از اینکه هرگونه فرسایشی رخ

سیلاب به وقوع پیوسته در ماه فوریه سال ۲۰۱۴ در یک دشت سیلابی وسیع واقع در کشور بولیوی، از نسخه پنج (V5) نرم افزار HEC-RAS استفاده نمودند. آنها نتایج حاصل از مدل عددی را با تصاویر ماهواره ای از رویداد سیل مقایسه نمودند و مشاهده کردند که شبیه سازی هیدرولیکی توسط مدل HEC-RAS 2D عملکرد خوبی را در مقایسه با سیلاب مشاهداتی حاصل از تصاویر ماهواره ای نشان می دهد. علاوه بر این، شبیه سازی عددی، اطلاعاتی از قبیل عمق آب، سرعت جریان و تغییرات زمانی سیلاب را فراهم می کند. در نهایت نرم افزار HEC-RAS 2D به عنوان یک ابزار مهم در مطالعه و درک رخداد سیلاب می باشد که می تواند در تجزیه و تحلیل استراتژی های مدیریت سیلاب بسیار مفید باشد. کومار و همکاران (۲۰۱۷) با توجه به اهمیت پدیده شکست سد و انتخاب روش مناسب جهت تحلیل آن و همچنین تهیه برنامه اقدامات اضطراری برای تخلیه افراد تحت تاثیر واقع در پایین دست و به حداقل رساندن ضرر و زیان احتمالی، به بررسی و مقایسه مطالعات انجام شده در این زمینه پرداختند. از این رو در این مقاله، پیشینه تحقیق در زمینه شکست سد (۲۱ مورد) که با استفاده از مدل های عددی مختلف از قبیل HEC-RAS 1D، MIKE21، MIKE11، TELEMAC-2D و HEC-RAS 2D انجام شده بود، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. آنها از بررسی مطالعات انجام شده، به این نتیجه رسیدند که مدل HEC-RAS، به دلیل ارائه نتایج قابل اعتمادتر در مبحث مربوط به شکست سد، به عنوان یک ابزار با کارایی بالا می تواند مورد استفاده قرار گیرد. کمبود تحقیقات کاربردی در زمینه مدل- سازی شکست سد، نیاز به بررسی و تحلیل در این زمینه را بیش از پیش نمایان می سازد. بنابراین، در این تحقیق، تجزیه و تحلیل شکست احتمالی سد خاکی علویان با استفاده از مدل BREACH، روندیابی سیلاب ناشی از آن با استفاده از مدل HEC-RAS، پهنه بندی سیلاب و تهیه نقشه خطرپذیری سیل با استفاده از نرم

پایین دست سد رخ می‌دهد، که در شکل (۱) توسط خط A-A نشان داده شده است.

دهد، تراز آب مخزن (H) باید بیش از ارتفاع سد باشد. در ابتدا، فرض می‌شود که فرسایش تنها در وجه



شکل ۱- نمای جانبی سد در پیشرفت شکست سد به دلیل روگذری جریان

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad [2]$$

که در آن، t زمان، h عمق آب، H تراز سطح آب، u و v به ترتیب المان‌های سرعت در راستای x و y می‌باشند و q عبارت شار چشمه یا چاه^۱ می‌باشد. همچنین در حالت برداری، معادله پیوستگی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0 \quad [3]$$

در رابطه بالا $V = (u, v)$ بردار سرعت بوده و عملگر دیفرانسیلی ∇ بردار عملگر مشتق جزئی است که به صورت $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ می‌باشد (هک رس، ۲۰۱۶). زمانی که مقیاس طول افقی بسیار بزرگتر از مقیاس طول عمودی باشد، در این حالت، معادله اندازه حرکت ناویه- استوکس^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد و فشار به صورت هیدرواستاتیک می‌باشد. در غیاب گرادیان فشار باروکلینیکی^۳ (چگالی متغیر)، فشار قوی باد و فشار غیر هیدرواستاتیک، استفاده از نسخه

پس از ایجاد یک شیار مستطیلی کوچکی در وجه پایین دست، به تدریج عرض و عمق کانال شکست افزایش می‌یابد. جریانی که وارد کانال می‌شود توسط فرمول سرریز لبه پهن محاسبه می‌شود (سینگ، ۱۹۹۶):

$$Q_b = 3B_0 (H - H_c)^{1.5} \quad [1]$$

که Q_b جریان ورودی به کانال شکاف، B_0 عرض اولیه کانال مستطیلی شکل و H_c تراز کف شکاف می‌باشد. زمانی که شکاف به وجه پایین دست سد گسترش می‌یابد، تراز کف شکاف (H_c) در قسمت بالای سد باقی می‌ماند (H_u) و نقاط بالادست کانال شکاف از طرف تاج سد به طرف قسمت پایین دست حرکت می‌کند. پس از این که کف کانال فرسایشی به موقعیت خط B-B می‌رسد، کف شکاف (H_c) به صورت قائم و به سمت پایین شروع به فرسایش می‌کند. کف شکاف تا تراز کف سد (H_c) و یا تراز مشخص پایین تر از کف سد (H_m) می‌تواند فرسایش داشته باشد.

معادلات هیدرولیکی حاکم بر جریان‌های غیردائمی دو

بعدی

با فرض این که جریان تراکم‌ناپذیر است، فرم

دیفرانسیلی معادله پیوستگی به صورت زیر می‌باشد:

¹ Source/Sink flux

² Navier-Stokes equation

³ Baroclinic pressure gradient

می‌باشد که دستیابی به این نتایج، بدون تحلیل هیدرولیکی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در این راستا، مدل‌های عددی نقش بسیار مهمی را در تحلیل‌های مربوطه ایفا می‌کنند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان پروفیل‌ها و پهنه‌های سیلاب را در طول مسیر رودخانه که هر یک مربوط به شدت جریان خاصی می‌باشند را به‌سادگی تعیین نمود. بنابراین با استفاده از اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی عددی و پهنه‌بندی سیلاب، می‌توان به تهیه برنامه واکنش فوری اقدام نمود. به‌منظور تلفیق دو متغیر سرعت جریان و عمق آب‌گرفتگی در بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، USBR (۱۹۸۸) شاخص مخاطره را ارائه نموده‌است که برای محاسبه مقدار آن از مقادیر حداکثر عمق (h) و سرعت (v) جریان استفاده می‌گردد (گارسیا و لویز، ۲۰۰۵).

منطقه مورد مطالعه

سد خاکی علویان بر روی رودخانه صوفی‌چای در ۳/۵ کیلومتری شمال‌غربی شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی احداث گردیده است. رودخانه صوفی‌چای که از ارتفاعات سهند سرچشمه می‌گیرد، پس از عبور از غرب شهرستان مراغه و جنوب شهرستان بناب به دریاچه ارومیه می‌ریزد. هدف از احداث سد علویان جمع‌آوری و کنترل جریان‌های سطحی صوفی‌چای جهت تامین آب شرب شهرستان مراغه، جبران قسمتی از کمبود نیازهای آبیاری و کشاورزی دشت مراغه و باغات اطراف آن و همچنین تولید انرژی برقایی می‌باشد.

سد علویان از نوع خاکی غیرهمگن می‌باشد که نوع حفاظت شیب بالادست ریپرپ سنگی و شیب پایین‌دست پوشش گیاهی با مصالح سنگی می‌باشد. عملیات احداث این سد از سال ۱۳۶۹ آغاز شده و در سال ۱۳۷۴ به بهره‌برداری رسیده‌است. نمای کلی سد علویان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در شکل (۲) نشان داده شده‌است.

متوسط- عمودی^۱ معادله اندازه حرکت مناسب‌تر می‌باشد. بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} \quad [4]$$

$$+ v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} \quad [5]$$

$$+ v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

که در آن، u و v نشان‌دهنده مقدار سرعت در دستگاه مختصات دکارتی می‌باشد، g شتاب گرانشی، v_t ضریب ویسکوزیته گردابی افقی، c_f ضریب اصطکاک کف، R شعاع هیدرولیکی و f پارامتر کوریولیس می‌باشد.

سمت چپ دو معادله فوق، شامل جملات شتاب است. سمت راست نشان دهنده نیروهای داخلی یا خارجی است که بر روی سیال تاثیر می‌گذارند. جملات سمت چپ و راست به‌طور معمول با توجه به قانون دوم نیوتون به‌گونه‌ای مرتب می‌شود که از آن در نهایت، معادلات اندازه حرکت حاصل می‌گردد. معادلات اندازه حرکت می‌تواند به‌صورت یک معادله برداری نیز ارائه گردد (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۶).

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

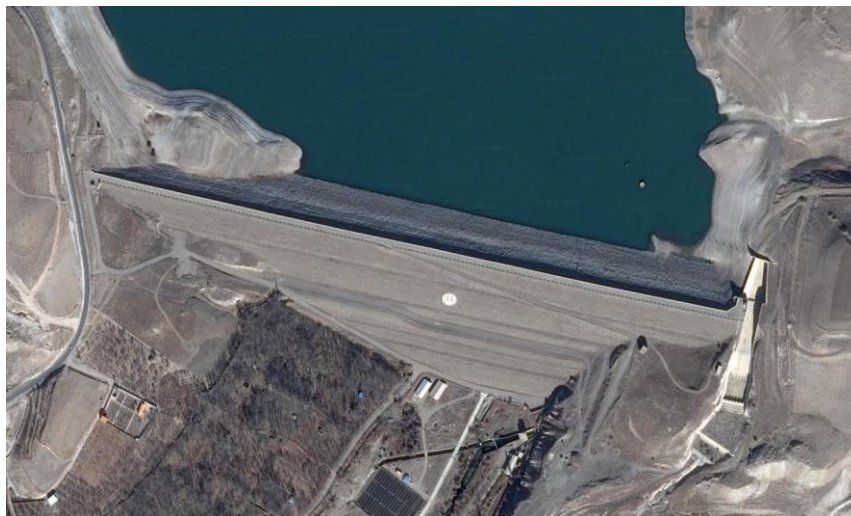
$$+ f k \times V$$

در رابطه بالا، k یک بردار واحد در جهت عمودی می‌باشد. عبارت‌های معادله فوق به‌ترتیب از سمت چپ به راست برابر است با: شتاب غیردائمی، شتاب جابجایی، فشار باروتروپیک، پخشیدگی گردابی، اصطکاک کف و عبارت کوریولیس.

پهنه‌بندی سیلاب

از اساسی‌ترین گام‌ها در پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد، کنترل سیلاب، تخمین خسارات سیل، تعیین حق بیمه سیل و تعیین دقیق مرزهای سیلاب

¹ Vertically-averaged version



شکل ۲- نمای کلی سد علویان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

نتایج و بحث

در این بخش، به نتایج حاصل از شکافت سد با استفاده از نرم‌افزار BRAECH، روندیابی سیلاب ناشی از آن با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS و در نهایت پهنه‌بندی سیلاب و تعیین مناطق پرمخاطره با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که از میان عوامل متعدد شکست سدهای خاکی، مکانیسم روگذری جریان، به دلایل زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد (حسن‌زاده، ۱۳۸۳؛ ژنگ و همکاران، ۲۰۱۶): (۱) مطابق آمار و اطلاعات سدهای خاکی شکسته شده، مکانیسم روگذری جریان، مهمترین عامل شکست در سدهای خاکی هسته‌دار می‌باشد. (۲) یکی دیگر از مکانیسم‌های مهم شکست سدهای خاکی، پدیده رگاب بوده که این پدیده ابتدا به صورت نشت آغاز و با ایجاد لوله جریان در داخل سد و گسترش تدریجی ابعاد آن، باعث ریزش سقف و دیواره‌های مجرا شده و در نهایت منجر به عبور جریان از روی سد می‌گردد. (۳) دبی حداکثر خروجی از مقطع شکست ناشی از مکانیسم روگذری جریان، از شدت و قدرت تخریب بسیار زیادی در قیاس با سایر مکانیسم‌های شکست برخوردار می‌باشد. بنابراین در این بخش، ابتدا به تحلیل نتایج

همچنین مشخصات اصلی سد و خصوصیات

مصالح بدنه سد خاکی علویان، به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) ارائه گردیده‌اند.

جدول ۱- مشخصات اصلی سد علویان

عنوان	واحد	مقدار
ارتفاع سد از پی	m	۷۶
ارتفاع سد از بستر رودخانه	m	۷۰
عرض متوسط تاج	m	۱۰
طول تاج	m	۹۳۵
حجم کل مخزن	10^6 m^3	۵۷/۷
طول سرریز آزاد	m	۶۰
ظرفیت تخلیه	m^3/s	۱۱۸۰
حداکثر سیلاب طراحی	m^3/s	۱۴۰۰

جدول ۲- خصوصیات مصالح بدنه سد علویان

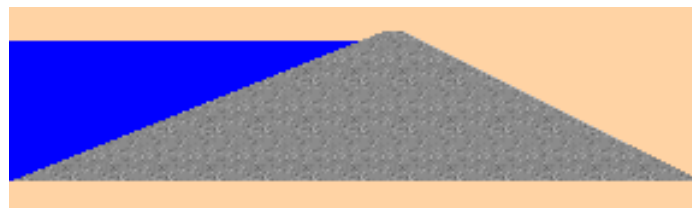
عنوان	واحد	نوع مصالح بدنه سد	
		پوسته	هسته
قطر متوسط ذرات (D_{50})	mm	۲۰	۰/۰۱۵
نسبت پوکی (n)	-	۰/۲۲	۰/۳۶
وزن مخصوص (γ)	gr/cm^3	۲/۱	۱/۸
ضریب چسبندگی (c)	kg/cm^2	۰	۰/۵
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	degree	۳۵	۱۵

رودخانه صوفی‌چای به دریاچه ارومیه (در حدود ۳۶ کیلومتر)، مدت زمان لازم جهت انجام محاسبات، ۵ ساعت در نظر گرفته شد. در ادامه این بخش، نتایج حاصل از روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد علویان، از محل شکافت تا دریاچه ارومیه و همچنین پهنه‌بندی سیلاب در مناطق مختلف پایین‌دست سد ارائه می‌گردد. برای انجام این کار، ابتدا توسط بازدید مکانی و تصاویر ماهواره‌ای حاصل از نرم‌افزار Google Earth، مناطق مختلف به لحاظ ضریب زبری مانینگ (مقدار ضریب برای کانال اصلی رودخانه برابر ۰/۰۳۵، برای مناطق شهری و روستایی برابر ۰/۰۸، برای اراضی باغی و کشاورزی برابر ۰/۰۶ و برای سایر نواحی سیلاب‌دشت برابر ۰/۰۴) در نرم‌افزار ArcGIS تفکیک شدند و سپس لایه مربوط به ضریب زبری در محدوده مطالعاتی استخراج گردید.

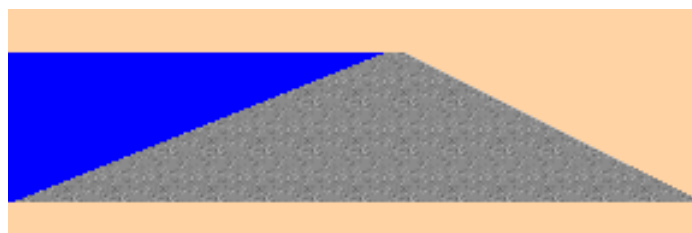
جدول ۳- نتایج حاصل از مدل‌سازی شکست سد علویان

عنوان	واحد	مقدار
حداکثر دبی خروجی از مقطع شکست	m ³ /s	۶۶۴۴۰
زمان مربوط به حداکثر دبی خروجی	hr	۹/۸۰۰۲
عمق نهایی شکست	m	۷۰
عرض بالای شکست	m	۱۶۱
عرض کف شکست	m	۹
شیب دیواره شکست (۱ قائم : Z افقی)	-	۱/۰۴
مدت زمان شکست سد	min	۴۵/۵۰

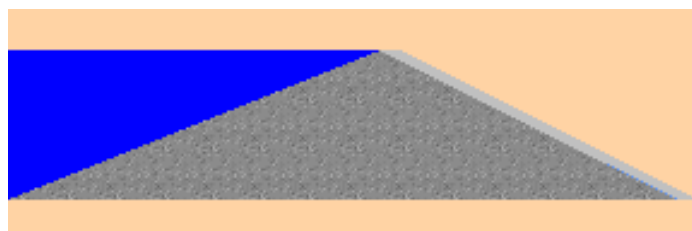
حاصل از مدل BREACH بر اثر پدیده روگذری جریان از سد علویان پرداخته می‌شود که جهت تخمین ابعاد شکست و هیدروگراف خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای انجام این کار، با اعمال مشخصات سد علویان و همچنین سیلاب PMF، شکافت ایجاد و گسترش می‌یابد. مراحل پیشرفت روگذری جریان نسبت به زمان‌های مختلف و در نهایت تخریب سد، به صورت دو بعدی در شکل (۳) نمایش داده شده است. همان‌طوری‌که در این شکل مشاهده می‌گردد، وجه پایین‌دست و بالادست سد علویان به ترتیب در لحظه‌های ۸/۶۱۵۰ و ۹/۷۲۵۷ ساعت شروع به فرسایش نموده و در نهایت در لحظه ۱۰/۴۴۴۶ مدل‌سازی خاتمه پیدا می‌کند. نتایج تکمیلی حاصل از مدل BREACH در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق جدول (۳)، شکست سد علویان در مدت زمان ۴۶ دقیقه اتفاق می‌افتد. همچنین مقدار حداکثر دبی خروجی از مقطع شکست در حدود ۶۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که در لحظه ۹/۸ ساعت رخ می‌دهد. هیدروگراف خروجی پس از شکست سد علویان در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به مقدار ناچیز دبی قبل از فرسایش وجه پایین‌دست سد (زمان ۸/۶۱۵۰ ساعت)، اهمیت بیشتر مساله شکست بعد از فرسایش وجه پایین‌دست سد و کاهش زمان محاسبات جهت روندیابی سیلاب، زمان پایه هیدروگراف خروجی از مقطع شکست سد از لحظه ۸/۶۱۵۰ ساعت تا پایان زمان مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود. همچنین برای روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد، از انتهای مخزن سد علویان تا محل اتصال



(الف) وضعیت سد علویان در تراز نرمال و قبل از رسیدن سیلاب (زمان ۰ ساعت)



(ب) فرسایش وجه پایین دست سد علویان (زمان ۸/۶۱۵۰ ساعت)



(ج) فرسایش وجه بالادست سد علویان (زمان ۹/۷۲۵۷ ساعت)



(د) تخلیه مخزن سد علویان با حداکثر دبی و ابعاد شکست (زمان ۹/۸۰۰۲ ساعت)

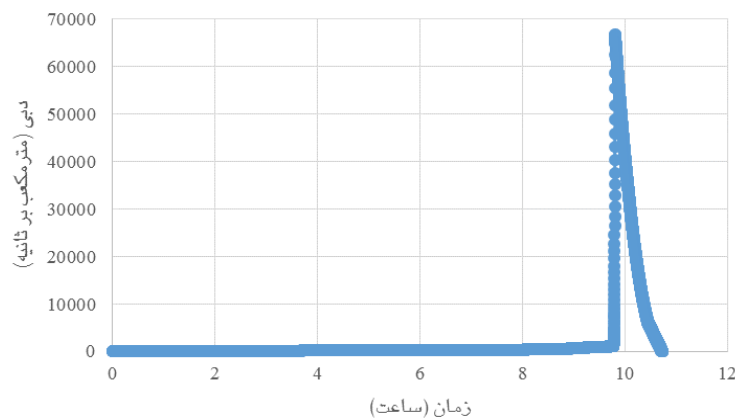


(ه) فرسایش کامل مصالح سد علویان (زمان ۱۰/۰۳۸۵ ساعت)



(و) پایان مدل سازی شکست سد علویان (زمان ۱۰/۴۴۴۶ ساعت)

شکل ۳- نمایش دو بعدی مراحل شکست سد علویان در زمان‌های مختلف



شکل ۴- هیدروگراف خروجی ناشی از شکست سد علویان

یک از آن‌ها در جدول (۴) ارائه شده‌است. لازم به یادآوری می‌باشد که مدت زمان ذکر شده در جدول فوق، از لحظه فرسایش وجه پایین دست سد علویان تحت تأثیر سیلاب PMF می‌باشد.

جدول ۴- درصد استغراق و زمان رسیدن پیشانی سیل به مناطق واقع در محدوده گسترش سیلاب

ردیف	عنوان	زمان (hr)	درصد استغراق
۱	شهرستان مراغه	۱:۰۸	۱۳
۲	روستای قلعه خالصه	۱:۲۵	۲۷
۳	روستای نرج آباد	۱:۲۷	۱۰۰
۴	روستای خوشه مهر	۱:۴۰	۹۰
۵	روستای دیزج پروانه	۱:۴۰	۹۷
۶	روستای چیلغار	۱:۵۰	۵۷
۷	روستای تازه‌کند خوشه‌مهر	۲:۰۰	۶۹
۸	روستای کوتاه‌مهر	۲:۰۲	۹۳
۹	شهرستان بناب	۲:۱۵	۸۱
۱۰	روستای خانه‌برق جدید	۲:۲۴	۸۳
۱۱	روستای خانه‌برق قدیم	۲:۳۰	۵۹
۱۲	روستای قره چپق	۲:۵۰	۵۲
۱۳	روستای آخوندقشلاق	۳:۳۸	۱۰۰

همچنین مدل رقومی ارتفاعی^۱ (DEM) از منطقه مورد مطالعه، بر اساس لایه نقاط ارتفاعی^۲ و لایه خطوط منحنی میزان^۳ با مقیاس‌های ۱:۲۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰ در محیط نرم‌افزار ArcGIS ساخته شد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-GeoRAS و ArcGIS، فایل مربوط به داده‌های هندسی^۴ مورد استفاده در نرم‌افزار HEC-RAS ایجاد گردید. همچنین بر اساس هیدروگراف خروجی از مدل BREACH، داده‌های جریان^۵ مورد استفاده در نرم‌افزار HEC-RAS ایجاد گردید. در نهایت با وارد نمودن داده‌های هندسی و جریان در قسمت شبیه‌سازی جریان^۶ و در نظر گرفتن گام زمانی ۱۰ ثانیه برای محاسبات، اقدام به مدل‌سازی گردید.

پس از روندیابی سیلاب ناشی از شکست سد علویان توسط نرم‌افزار HEC-RAS و پهنه‌بندی آن با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، نقشه حداکثر عمق سیلاب در پایین دست سد، در شکل (۵) نمایش داده شده‌است.

همچنین در مسیر حرکت سیلاب از انتهای مخزن سد علویان تا محل اتصال رودخانه صوفی‌چای به دریاچه ارومیه، زمان رسیدن پیشانی سیل به مناطق واقع در محدوده گسترش سیلاب و درصد استغراق هر

¹ Digital Elevation Model

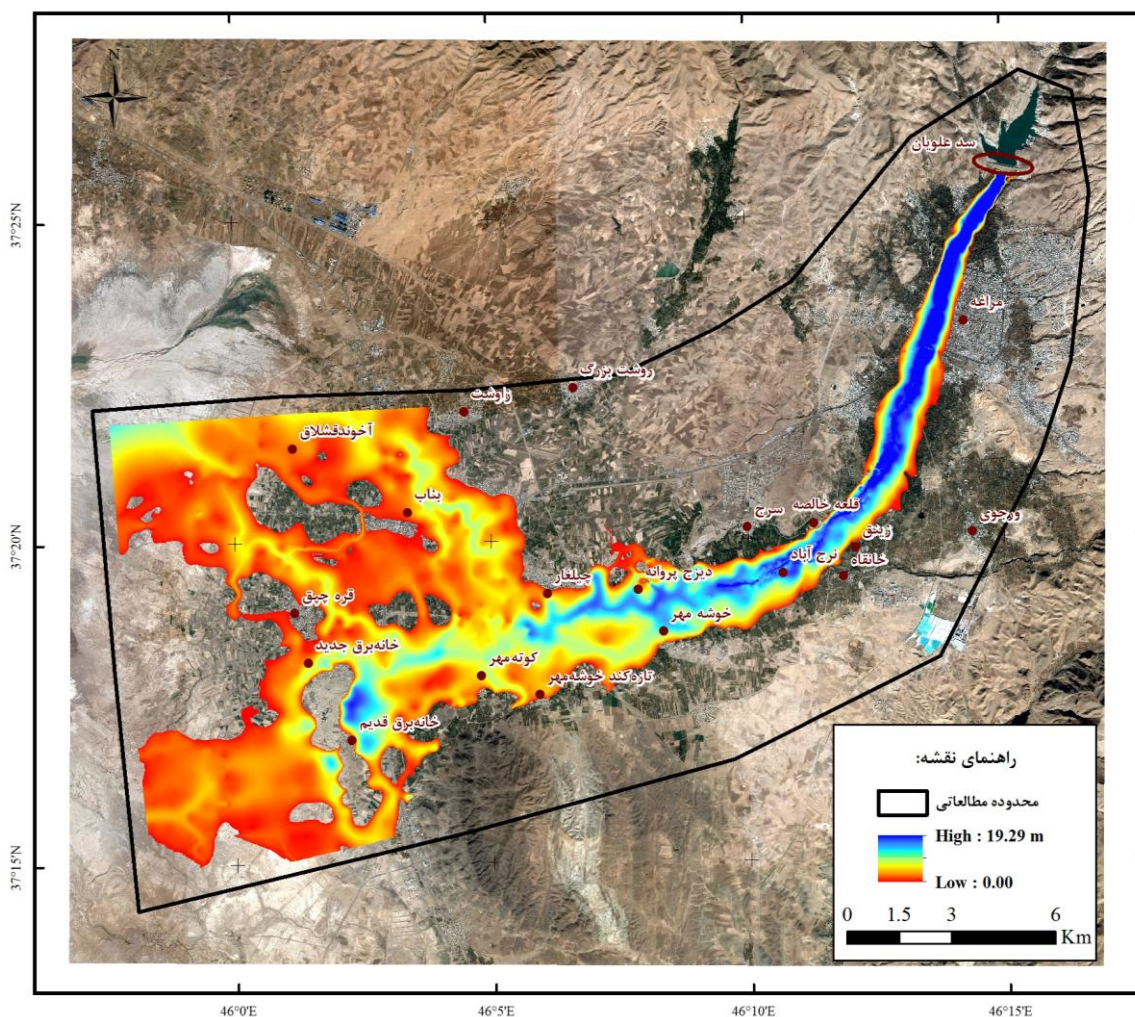
² Point Elevation

³ Contour

⁴ Geometric Data

⁵ Flow Data

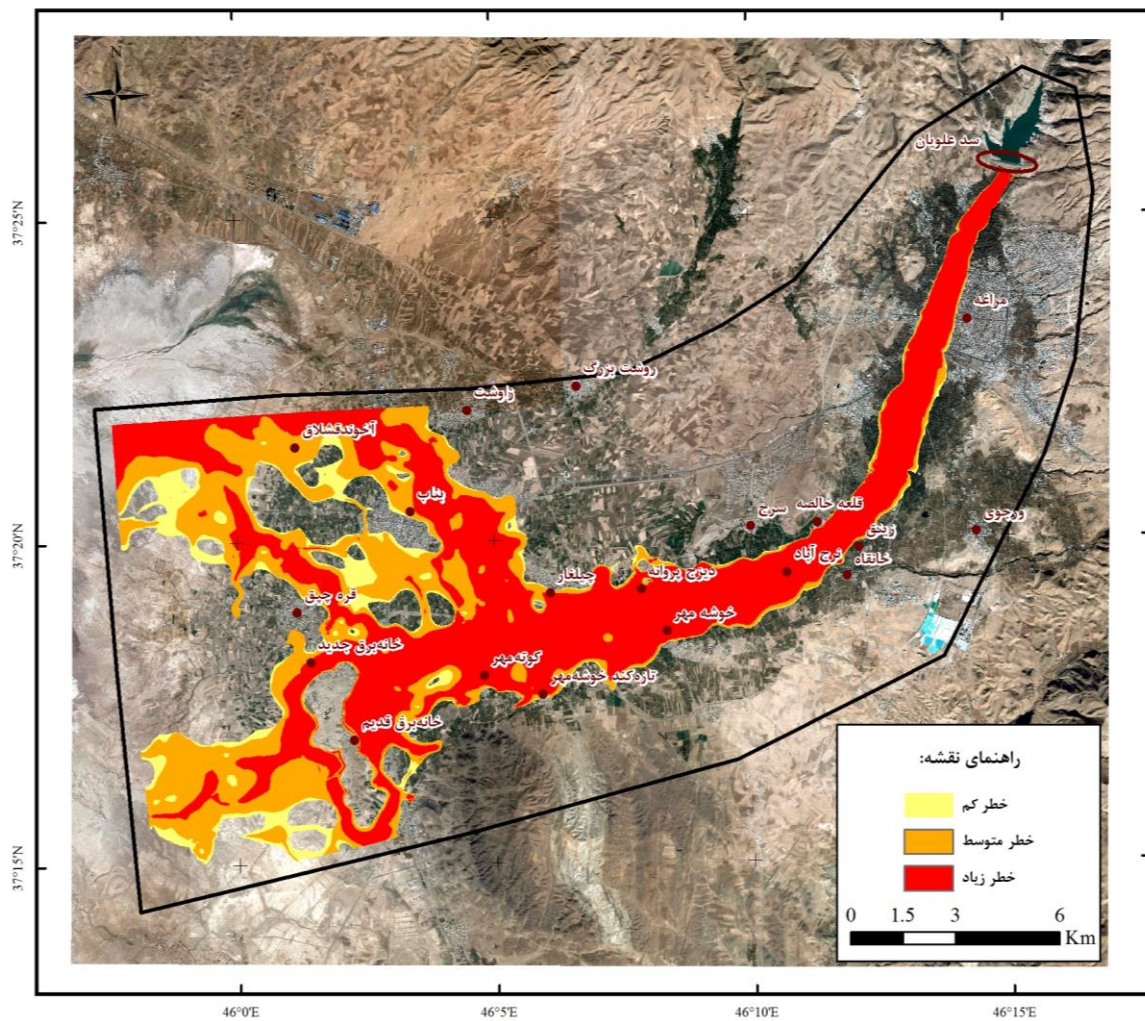
⁶ Flow Analysis



شکل ۵- نقشه حداکثر عمق سیلاب در پایین دست سد علویان

نتایج حاصل از سایر تحقیقات انجام شده در زمینه مدل‌سازی شکست سدهای خاکی در کشور ایران، همچون سیفی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳)، حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) و ارزنلو و همکاران (۱۳۹۵) به ترتیب جهت مدل‌سازی شکست سدهای خاکی پلرود واقع در استان گیلان، و نیار در آذربایجان شرقی و شهرچای واقع در آذربایجان غربی، بیانگر توانایی مدل‌های مختلف جهت به دست آوردن مشخصات هیدروگراف سیلاب ناشی از شکست سد (مخصوصاً دبی اوج سیلاب و زمان رخداد آن)، روندیابی سیلاب، تهیه نقشه مناطق سیلگیر پایاب و تعیین مقادیر آب‌گرفتگی به منظور تعیین اثرات شکست سد می‌باشد.

با توجه به گستردگی شهرستان مراغه در قسمت شرقی (مخصوصاً شهرک‌های ولیعصر، سهند، امام علی (ع)، گلشهر، گلر و امیرکبیر که فاصله قابل توجهی از رودخانه صوفی‌چای را دارا می‌باشند) و همچنین قسمت غربی (کوی رصد، محله گلشن و پهرآباد)، سبب گردیده است که درصد استغراق مراغه در قیاس با سایر مناطق موجود در منطقه مورد مطالعه عدد کوچکی بدست آید. در نهایت، مطابق شکل (۶) که نشان‌دهنده نقشه مناطق پرمخاطره می‌باشد، بیشتر نقاطی که در منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر سیلاب ناشی از شکست سد علویان واقع شده‌اند، جزو مناطق پر خطر محسوب می‌شوند.



شکل ۶- نقشه مناطق پرمخاطره در پایین دست سد علویان

نتیجه گیری کلی

در این تحقیق، شکست احتمالی سد خاکی علویان تحت سناریوی روگذری جریان که مهمترین و پراسیبترین عامل ایجاد پدیده شکست سد می باشد، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی را می توان به صورت زیر ارائه نمود:

- سد علویان، تحت سناریوی روگذری جریان و با سیلاب PMF و در مدت زمان ۶۶ دقیقه پس از فرسایش وجه پایین دست، به طور کامل می شکند.
- حداکثر دبی خروجی از مقطع شکست سد در حدود ۶۶۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه می باشد که پس از

گذشت زمان ۷ دقیقه پس از فرسایش وجه پایین دست رخ می دهد.

- در فاصله ساختگاه سد علویان تا محل اتصال رودخانه صوفی چای به دریاچه ارومیه (حدود ۳۶ کیلومتر)، شهرستان های مراغه و بناب و همچنین ۱۱ روستا تحت تاثیر سیلاب ناشی از شکست سد قرار می گیرند.
- اولین منطقه واقع در پایین دست سد، شهرستان مراغه می باشد که پس از گذشت مدت زمان ۱ ساعت و ۸ دقیقه پس از فرسایش وجه پایین دست، تحت تاثیر سیلاب قرار می گیرد و درصد استغراق آن برابر ۱۳ درصد می باشد. گستردگی شهرستان

نزدیکی رودخانه صوفی‌چای و یا در قسمت‌های کم شیب واقع در نزدیکی دریاچه ارومیه، مقدار آن تغییر می‌کند.

- بر اساس شاخص مخاطره، بیشتر نقاطی که در منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر سیلاب ناشی از شکست سد علویان واقع شده‌اند، جزو مناطق پر خطر محسوب می‌شوند.
- پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد علویان و به تبع آن تعیین مناطق پرخطر در پایین‌دست سد، با استفاده از ترکیب مدل‌های HEC-BREACH، ArcGIS و RAS، از دقت و کارایی بسیار بالایی برخوردار می‌باشد که می‌تواند برای سایر سدهای خاکی نیز به کار رود.

مراغه در قسمت‌های شرقی و غربی، سبب گردیده است که درصد استغراق مراغه در قیاس با سایر مناطق موجود در منطقه مورد مطالعه، کوچک باشد.

- مدت زمان رسیدن پیشانی سیل به شهرستان بناب، ۲ ساعت و ۱۵ دقیقه می‌باشد که در آن ۸۱ درصد شهر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. تغییرات کم ارتفاع زمین و عریض شدن آبراهه در نزدیکی دریاچه ارومیه، سبب شده است که وسعت بیشتری از شهرستان بناب تحت تاثیر سیلاب قرار گیرد.
- درصد استغراق ۱۱ روستایی که در پایین‌دست سد علویان قرار گرفته‌اند، برابر ۲۷ درصد الی ۱۰۰ درصد می‌باشد که بسته به محل قرارگیری آن در

منابع مورد استفاده

- ارزنلو، حسن‌زاده ی و کاردان ن، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی عددی شکست سد و پهنه‌بندی سیلاب به منظور استفاده در تهیه برنامه واکنش سریع (مطالعه موردی: سد شهرچای ارومیه). نشریه دریا فنون، جلد ۳، شماره ۲، صفحه‌های ۸۳ تا ۹۸.
- حسن‌زاده ی، ۱۳۸۳. هیدرولیک شکست سد. انتشارات وزارت نیرو، کمیته ملی سدهای بزرگ، تهران.
- حسن‌زاده ی، نورانی و، سپهری و، دل‌افروز ه، حسن‌زاده م و الماس‌پور ف، ۱۳۹۴. تحلیل امواج ناشی از شکست سد و پهنه‌بندی دشت سیلابی با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: سد ونیار). نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، صفحه‌های ۱ تا ۱۵.
- سیفی‌زاده م، عمادی ع و فضل‌اولی ر، ۱۳۹۳. بررسی شکست سد پلرود در اثر روگذری و روندیابی سیلاب ناشی از آن در پایین‌دست. پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، جلد ۵، شماره ۱۰، صفحه‌های ۱۵ تا ۲۹.
- Cencetti C, Fredduzzi A, Marchesini I, Naccini M and Tacconi P, 2006. Some considerations about the simulation of breach channel erosion on landslide dams. *Computational Geosciences* 10(2): 201-219.
- Derdous O, Djemili L, Bouchehed H and Tachi S, 2015. A GIS based approach for the prediction of the dam break flood hazard – A case study of Zardezas reservoir “Skikda, Algeria”. *Journal of Water and Land Development* 27(1): 15-20.
- Franca MJ and Almeida AB, 2004. A computational model of rockfill dam breaching caused by overtopping (RoDaB). *Journal of Hydraulic Research* 42(2): 197-206.
- Fread DL, 1988. Breach: An erosion models 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. In: Jakob M, Hungr O (Eds.), *Debris-flow hazards and related phenomena*. Springer, Berlin. pp. 519-538.
- Hajeri S, Shivapur AV and Venkatesh B, 2016. Flood plain mapping and dam break analysis for Neerasagar reservoir. *International Research Journal of Engineering and Technology* 3(6): 1279-1285.
- Hancox GT, McSaveney MJ, Manville VR and Davies TR, 2005. The October 1999 Mt Adams rock avalanche and subsequent landslide dam-break flood and effects in Poerua river, Westland, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 48(4): 683-705.
- HEC-RAS, 2016. Hydraulic Reference Manual (Version 5.0). US Army Corps of Engineers, California.

- Jakob M, Holm K, Weatherly H, Liu S and Ripley N, 2013. Debris flood risk assessment for Mosquito Creek, British Columbia, Canada. *Natural Hazards* 65(3): 1653-1681.
- Jia Y, Zhang Y and Hunt S, 2015. Development and validation of a 2D dam break process model. *World Environmental and Water Resources Congress: Floods, Droughts, and Ecosystems*. Austin, USA, May 17-21.
- Khanal NR, Mool PK, Shrestha AB, Rasul G, Ghimire PK, Shrestha RB and Joshi SP, 2015. A comprehensive approach and methods for glacial lake outburst flood risk assessment, with examples from Nepal and the transboundary area. *International Journal of Water Resources Development* 31(2): 219-237.
- Kumar S, Jaswal A, Pandey A and Sharma N, 2017. Literature review of dam break studies and inundation mapping using hydraulic models and GIS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 4(5): 55-61.
- Li MH, Sung RT, Dong JJ, Lee CT and Chen CC, 2011. The formation and breaching of a short-lived landslide dam at Hsiaolin Village, Taiwan - Part II: Simulation of debris flow with landslide dam breach. *Engineering Geology* 123(1-2): 60-71.
- Moya Quiroga V, Kure S, Udo K and Mano A, 2016. Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *RIBAGUA* 3: 25-33.
- Singh VP, 1996. Dam breach modeling technology. *Water Science and Technology Library*, Vol. 17. Springer, Dordrecht.
- USBR, 1988. Downstream hazard classification guidelines. ACER Technical Memorandum No. 11, Assistant Commissioner - Engineering and Research, Denver, Colorado.
- Xin W, Shiyin L, Wanqin G and Junli X, 2008. Assessment and simulation of glacier lake outburst floods for Longbasaba and Pida Lakes, China. *Mountain Research and Development* 28(3): 310-317.
- Yang SH, Pan YW, Dong JJ, Yeh KC and Liao JJ, 2013. A systematic approach for the assessment of flooding hazard and risk associated with a landslide dam. *Natural Hazards* 65(1): 41-62.
- Zhang L, Peng M, Chang D and Xu Y, 2016. Dam failure mechanisms and risk assessment. John Wiley and Sons, London.