

شبیه‌سازی عددی شکست سد و پهنه‌بندی سیلاب به منظور استفاده در تهیه برنامه واکنش سریع (مطالعه موردی: سد شهرچای ارومیه)

ابوالفضل ارزنلو^۱، یوسف حسن زاده^۲، نازیلا کاردان^۳

n.kardan@azaruniv.edu

۱- دانش آموخته کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

۲-استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

چکیده

در کنار منافع قابل توجه ساخت سدها، شکست سد به عنوان یک حادثه با مخاطرات فوق‌العاده تلقی شده و مطالعه آن در تحقیقات دانشگاهی، برنامه‌ریزی دولت و سرمایه‌گذاری در پایاب سدها اهمیت به‌سزایی دارد. در پژوهش حاضر ضمن تبیین اهمیت مساله، مکانیسم و علل شکست سدها، تحلیل حوادث نسبت به مناطق جغرافیائی بر حسب سن و نوع سد، روش‌های تحلیل معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی با استفاده از مدل‌های ریاضی ارائه شده است. بدین منظور، در ابتدا هیدروگراف خروجی از ساختگاه سد شهرچای با استفاده از مدل Breach و تحت سناریوی شکست فرضی روگذری جریان استخراج شده و سپس نسبت به تدوین، توسعه و کالیبره نمودن مدل ریاضی HEC-RAS جهت تحلیل مساله شکست سد به کمک سیستم‌های پردازشی قوی اقدام گردیده است. متعاقب آن با استفاده از امکانات و ابزار GIS، پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد در اثر پدیده روگذری که از عوامل اصلی ایجاد شکاف و شکست در سدهای حاکی محسوب می‌شود، استخراج و نقشه مناطق سیل‌گیر پایاب مشخص گردیده است. نتیجه مطالعات حاکی از آن است که با توجه به جنس سد و مکانیسم شکست بررسی شده در سناریوی شکست فرسایشی تحت اثر روگذری، با توجه به وضعیت ژئومورفولوژیکی و توپو-گرافی دره میزبان در پایین‌دست سد، قسمت اعظم روستاها و اراضی کشاورزی در معرض استغراق کامل قرار می‌گیرند.

واژگان کلیدی: شکست سد، پهنه‌بندی سیلاب، روگذری، شکاف، مدل HEC-RAS.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۵/۰۱/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۵/۰۲/۲۶

۱- مقدمه

شکست سد یک مسأله هیدرولیکی است که در پی آن حجم زیاد آب انباشته شده در مخزن در زمان کوتاهی به صورت ناگهانی تخلیه و سیلاب عظیمی در پایاب جریان می‌یابد که در این حالت امواج بزرگ سیلاب زیان‌های عظیمی در پایاب به وجود می‌آورد. 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 پایین دست سد، امکان برنامه‌ریزی عملیات نجات و تسکین فاجعه ناشی از شکست سد را نیز فراهم می‌نماید [۱]. 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 [۲].

متعاقب شکسته شدن چند سد بزرگ و پر اهمیت جهان نظیر سدهای بالدوین (۱۹۶۳)، تتون (۱۹۷۶) و سد زیزون (۲۰۰۲) مساله شکست سد و اثرات انتشار امواج در پایاب، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۳]. بدین منظور در چند دهه اخیر، مطالعات عدیده‌ای از دیدگاه‌های نظری و تجربی با هدف تبیین مکانیسم شکست سد و روند تغییرات پارامترهای هیدرولیکی به صورت تابعی از زمان و مکان توسط محققان مختلف انجام پذیرفته است [۱].

در خصوص شناخت مکانیسم شکست سد و انتشار امواج، آزمایش‌های بسیاری بر روی مدل‌های هیدرولیکی انجام یافته است اما ری اولین کسی بود که در سال ۱۹۴۶ با استفاده از روش ترسیمی محاسبه جریان‌های متغیر

غیردائمی کرایا (۱۹۴۶)، مدل هیدرولیکی شکست سد را ارائه نموده و تغییرات کمیت‌های هیدرولیکی عمق، سرعت و دبی جریان را در پایین دست سد نسبت به متغیرهای مکان و زمان ارائه کرده است [۴]. در ادامه در سال ۱۹۵۲، درس‌لر جریان یک‌بعدی ناشی از شکست را در یک کانال مستطیلی افقی زبر مورد مطالعه قرار داده است [۵]. هانت (۱۹۸۴) مساله شکست سد را با استفاده از روش تحلیلی بررسی نموده است [۶]. گارسیا و ساویرون (۱۹۸۶) شکست سد را با استفاده از روش کاهش مجموع تغییرات (TVD) گام‌های پیشگویی و اصلاح مک کورمک شبیه‌سازی کرده است [۷]. رحمان و چودهری (۱۹۸۷) هم‌زمان دو مدل مک کورمک و بیم و وارمینگ را برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و دوبعدی جریان ناشی از شکست سد مورد استفاده قرار داده‌اند [۸]. ماچیلو و سیرانجیلو (۱۹۸۸) با تحلیل مدل ریاضی شکست تدریجی یک سد خاکی ناشی از روگذری جریان، هیدروگراف خروجی را استخراج و با داده‌های تجربی بنوا و نیکوله (۱۹۸۳) ارزیابی و مقایسه کرده‌اند [۹]. بل و همکاران (۱۹۹۲) جریان‌های دوبعدی ناشی از شکست سد را به‌طور تجربی در کانال‌های مستقیم و قوس-دار مطالعه نموده و تغییرات تراز آب را در نقاط مختلف پایاب و درون مخزن ارائه داده‌اند [۱۰]. زانگ و همکاران (۱۹۹۲) با استفاده از روش‌های عددی و تجربی جریان‌های یک‌بعدی ناشی از شکست سد را در یک مدل هیدرولیکی افقی مطالعه نموده و تأثیر زبری بستر در سرعت انتشار پیشانی موج را ارائه کرده‌اند [۱۱]. جریان یک‌بعدی ناشی از شکست سد در یک کانال افقی و شیب‌دار با لحاظ کردن زبری بستر در سال ۱۹۹۸ توسط لوبر و هاگر بررسی شده است [۱۲]. وو (۱۹۹۹) انتشار شوک را به روش انتگرال گیری از معادلات حاکم تحلیل کرده است [۱۳]. وانگ (۲۰۰۰) روش تفاضل محدود را برای مدل‌سازی عددی شکست سد به کار برده است [۱۴]. مهندسان ارتش آمریکا به‌طور تجربی مساله شکست سد را در قالب یک مدل هیدرولیکی شیب‌دار صاف و زبر مورد بررسی قرار داده و تغییرات نیمرخ سطح آب نسبت به زمان و مکان ارائه گردیده است [۱۵]. ژائو و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از مدل عددی گودانو، مساله شکست سد را در هندسه طبیعی با توپوگرافی بستر پیچیده شبیه‌سازی نموده‌اند [۱۶].

تأثیر شکل هندسی مخزن بر جریان‌های ناشی از شکست پرداخته‌اند [۲۵].

حسن زاده و همکاران (۱۳۸۲) و حسن زاده و رنجینه خجسته (۱۳۸۹) به ترتیب تأثیر شیب و زبری بستر را در روند تحلیل مساله شکست ناگهانی سد مطالعه نموده و تغییرات سرعت انتشار موج مثبت و خشک‌کننده را نسبت به زمان و مکان به شکل بی‌بعد تبیین و ارائه داده‌اند [۲۶] و [۲۷]. جوزدانی و کبیری سامانی (۱۳۸۹) ضمن بررسی تجربی پدیده شکست سد، مشخصات هیدرولیکی سیلاب ناشی از شکست سد را به روش پردازش تصاویر مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۸]. محمد نژاد و همکاران (۱۳۹۳) به صورت عددی انتشار موج ناشی از شکست سد را به صورت دو بعدی قائم شبیه‌سازی نمودند [۲۹]. در این مطالعه، تحلیل امواج با استفاده از نرم افزار فلونت انجام گرفته و در آن انواع مدل‌های آشفتگی مورد بررسی قرار گرفته است. از بررسی چهار مدل آشفتگی $k - \varepsilon$, $RNG k - \varepsilon$, RSM , $Realizable k - \varepsilon$ و $k - \omega$ نتیجه گرفته است که مدل $k - \varepsilon$ Standard به لحاظ دارا بودن کمترین خطای نسبی مناسب‌ترین مدل در شبیه‌سازی تلاطم‌های جریان می‌باشد. حسن زاده و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل امواج ناشی از شکست سد و پهنه‌بندی دشت سیلابی پایین دست سد و نیار پرداخته‌اند [۳۰].

در این پژوهش سعی بر آن بوده تا پهنه گسترش سیلاب و زمان رسیدن پیشانی امواج سیلاب ناشی از شکست سد بر اثر پدیده روگذری جریان در سد شهرچای ارومیه، به کمک مدل‌سازی هیدرولیکی Breach در شرایط جریان غیر دائمی و در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تعیین و بررسی گردد. در این تحقیق برای اولین بار شاخص مخاطره برای پهنه‌بندی دشت سیلابی محدوده مورد مطالعه به کار برده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی سد و محدوده مطالعاتی

رودخانه شهرچای از ارتفاعات شمال غرب کشور در مرز ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از شهر ارومیه و طی مسافتی در حدود ۵۰ کیلومتر به دریاچه ارومیه می‌ریزد. این رودخانه منبع اصلی تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه می‌باشد. عبور رودخانه از وسط شهر

مامبتی و همکاران (۲۰۰۸) بر پایه معادلات یک‌بعدی سنت ونانت یک مدل عددی برای پیش‌بینی حرکت سیلاب و جریان گل آلود توسعه داده‌اند [۱۷]. این مدل برای تعیین نحوه انتشار موج جریان دو فازی گل آلود ناشی از شکست کامل و آبی یک سد مخزنی مورد استفاده قرار گرفته است. چانسون (۲۰۰۸) با اعمال روش تحلیلی امواج لایه‌ای، شکست سد را شبیه‌سازی نموده است [۱۸].

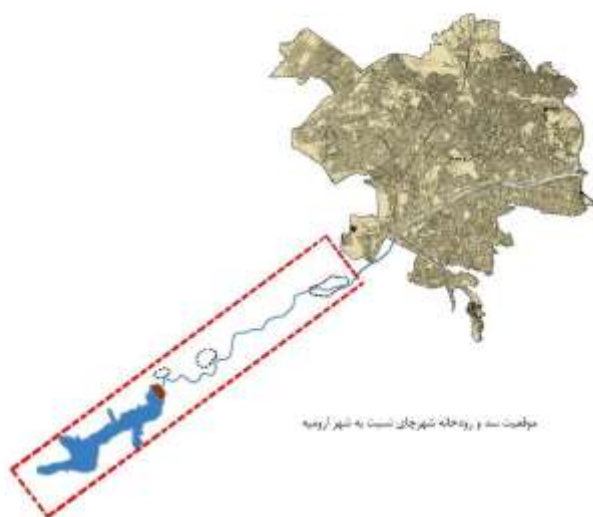
فرانسیسکو و همکاران (۲۰۰۹) دو روش نگرش آب کم‌عمق (SW) و شبیه‌سازی کامل سه‌بعدی را مورد مقایسه قرار داده‌اند. روش عددی آب کم‌عمق (SW) بر مبنای هیدرودینامیک جریان متوسط‌گیری شده در عمق و شبیه‌سازی سه‌بعدی بر اساس حل کامل معادلات ناویراستوکس با روش حجم سیال (VOF) می‌باشد [۱۹]. روشن دل و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روش حجم محدود شبیه‌سازی شکست سد بر روی بستر خشک و مرطوب را با حل عددی معادلات آب کم‌عمق انجام داده و به منظور حل مساله ریمان از حل کننده تقریبی استفاده نموده‌اند [۲۰]. بیسکارنی و همکاران (۲۰۱۰) شبیه‌سازی عددی جریان با سطح آزاد ناشی از شکست سد را با دو روش حل معادلات آب کم عمق و معادلات کامل سه‌بعدی ناویراستوکس مورد مقایسه قرار داده‌اند [۲۱]. سینگ و همکاران (۲۰۱۱) برای شبیه‌سازی جریان‌های ناشی از شکست سد، یک مدل عددی دو بعدی بر مبنای حل معادلات آب کم عمق ارائه نموده و نتایج عددی را با نتایج مدل تجربی صحت‌سنجی نموده‌اند [۲۲].

مقایسه‌ها نشان داده است تطابق خوبی بین نتایج عددی و داده‌های تجربی وجود دارد. چانگ و همکاران (۲۰۱۱) برای بررسی شکست سد، یک مدل عددی بدون شبکه را توسط معادلات آب کم عمق در کانال‌های باز با بستر خشک و مرطوب تبیین نموده‌اند [۲۲]. در این مدل عددی معادلات آب کم عمق بر مبنای روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) حل شده است. بلوس و همکاران (۲۰۱۱) به شبیه‌سازی عددی موج سیلاب ناشی از شکست یک سد بتنی پرداخته‌اند [۲۳]. چن و همکاران (۲۰۱۱) یک مدل سه‌بعدی بر پایه معادلات رینولدز غیرماندگار را برای شبیه‌سازی جریان شکست سد و نیروی ضربه‌ای وارد شده بر موانع موجود در مسیر جریان بررسی کرده‌اند [۲۴]. خانکندی و همکاران (۲۰۱۲) به طور تجربی به بررسی

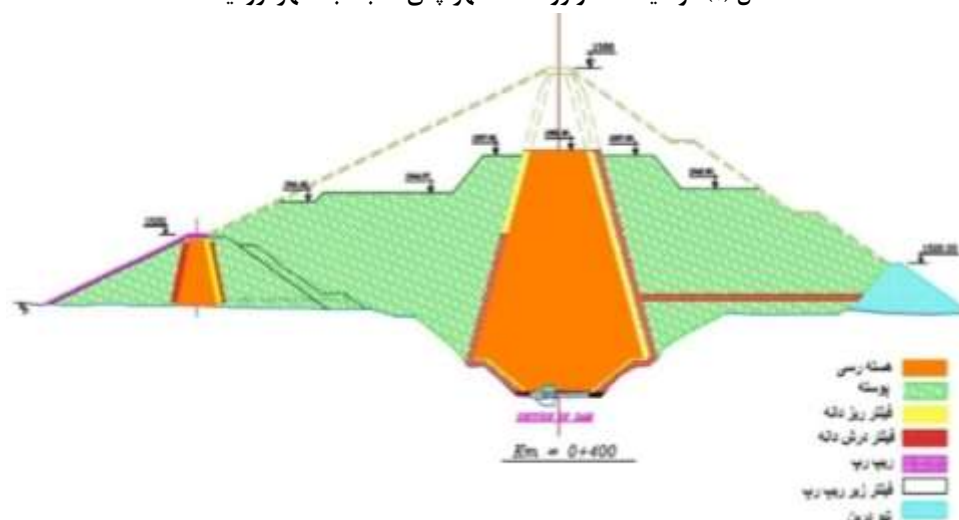
محدوده در شکل (۱) نشان داده شده است. سد مخزنی شهرچای در تراز نرمال بهره‌برداری با حجم حدود ۲۲۰ میلیون متر مکعب از نوع سنگریزه‌ای با هسته آب‌بند رسی و با مقطع ذوزنقه‌ای مطابق شکل (۲) احداث شده است. این سد بر روی رودخانه شهرچای، در ۱۲ کیلومتری جنوب باختری شهر ارومیه به منظور تأمین آب شرب و صنعت به مقدار سالانه ۶۷ میلیون متر مکعب، تأمین آب کشاورزی به مقدار سالانه حداکثر ۱۳۲ میلیون متر مکعب، و نیز کاهش نیاز برداشت از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه جلوگیری از شوری‌زدگی خاک و بهبود وضعیت اراضی زیر کشت [۳۱] قرار دارد.

ارومیه و مجاورت آن با روستاهای متعدد، تاسیسات، مراکز شهری، صنعتی آموزشی و موقعیت استراتژیکی که با قرار گرفتن در منطقه مرزی دارد، لزوم و اهمیت تعیین پهنه سیل‌گیر به هنگام وقوع سیلاب را به‌منظور ارائه راهکارهای مناسب و انجام اقدامات موثر در جهت پیش‌گیری و مقابله با این پدیده روشن می‌سازد.

سد شهرچای بر روی رودخانه شهرچای و در محلی با مختصات جغرافیایی $45^{\circ} 44'$ طول شرقی و $28^{\circ} 37'$ عرض شمالی در بالادست شهر ارومیه به فاصله تقریبی ۱۲ کیلومتر از این شهر واقع شده است [۳۱]. محدوده مورد مطالعه رودخانه شهرچای از محل سد شهرچای تا ورودی شهر ارومیه به طول تقریبی ۱۲ کیلومتر می‌باشد که این



شکل (۱) موقعیت سد و رودخانه شهرچای نسبت به شهر ارومیه.



شکل (۲) مقطع عمومی بدنه سد شهرچای.

۲-۲- مکانیسم شکست فرسایشی سدهای خاکی

که $B_c(ft)$ عرض شکاف، $H(ft)$ ارتفاع آب در بلافاصله بالادست شکاف و $H_c(ft)$ کد ارتفاعی کف شکاف است. این فرسایش تا زمانی که مقطع فرسایش به لبه بالادست تاج سد برسد ادامه یافته و بعد از این مرحله، گسترش شکاف در جهت قائم و به طرف بستر سد شروع می‌شود [۳۰].

سرعت جریان در شیروانی پایین‌دست سد، از رابطه مانینگ محاسبه شده و فرسایش روی شیروانی موقعی شروع می‌شود که سرعت جریان از سرعت بحرانی که بر اساس خواص فیزیکی پوسته تعیین می‌شود بیشتر گردد [۳۳]:

$$V = Q_b / y \rightarrow y = \left[\frac{qn'}{1.49(ZD)^{1.5}} \right]^{1/6} \quad (2)$$

که در آن q دبی در واحد عرض، y عمق جریان و n' ضریب مانینگ مربوطه است. در این حالت عرض اولیه شکاف (مطابق شکل (۳)) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۴]:

$$B_c = 2h_c \quad (3)$$

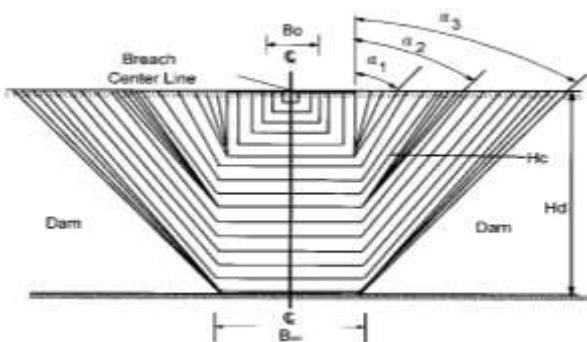
که در آن h_c بیانگر عمق بحرانی است. عمق بحرانی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$h_c = \frac{2}{3}(H - H_c) \quad (4)$$

در زمان‌های بعدی، شکاف مستطیلی اولیه با ریزش دیواره‌ها می‌تواند به فرم دوزنقه‌ای درآید (شکل (۳)). ریزش دیواره‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که عمق کانال شکاف از عمق بحرانی، H_k ، بیشتر گردد [۳۳]:

$$H_k = \frac{4 \cos \phi \sin \theta}{\gamma [1 - C(\theta - \phi)]} \quad (5)$$

که در آن C و ϕ و γ مشخصات فیزیکی مواد سد و θ زاویه دیواره کانال با افق می‌باشند.



شکل (۳) گسترش شکاف در پدیده روگذری.

شکست فرسایشی در سدهای خاکی و سنگریزه ای ممکن است ناشی از روگذری جریان از تاج سد، نشت آب و یا پدیده رگاب به وقوع بپیوندد. شکست سدهای خاکی و سنگریزه‌ای تدریجی بوده و در تحلیل‌های مربوطه باید پارامتر زمان و عوامل موثر در مدت زمان شکستگی نظیر جنس مصالح، دانه‌بندی، تراکم، چسبندگی و ابعاد خاکریز مد نظر قرار گیرند. شکست سدهای خاکی می‌تواند علاوه بر ناکافی بودن ابعاد سرریز جهت تخلیه سیلاب‌های طغیانی، ناشی از نشست سد، شکست فونداسیون، ایجاد ترک، لغزش بدنه سد و لغزش کوهپایه‌ها به داخل سد باشد. اولین گام در تحلیل مساله شکست سد شهرچای، بررسی نحوه ایجاد و گسترش شکاف در بدنه سد و به تبع آن تعیین هیدروگراف سیلاب خروجی از ساختگاه سد در زمان شکست آن می‌باشد. این هیدروگراف می‌بایست در پایین‌دست سد رونمایی گردد تا میزان تهدید مناطق پایین‌دست مورد تحلیل قرار گیرد. از بین عوامل اصلی ایجاد شکاف و شکست در سدهای خاکی دو مورد سرریز جریان از روی سد^۱ و همین‌طور پدیده رگاب^۲ از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند. لذا در این تحقیق هیدروگراف خروجی برای سناریو روگذری جریان از روی سد محاسبه می‌گردد که این سناریو، سناریو روز طوفانی^۳ نامیده می‌شود [۳۲]. در سناریوی حاضر فرض بر این است که تراز آب در ابتدا بیشینه بوده و دبی ورودی به مخزن سد، دبی سیلاب بیشینه محتمل (PMF) می‌باشد.

در زمینه مدل‌سازی شکست تدریجی سدهای خاکی، مدل‌های مختلفی وجود دارد (مدل DAMBRK، مدل MIKE و مدل Breach) که با توجه به کامل بودن مدل Breach نسبت به سایر مدل‌ها، از این مدل برای مدل‌سازی شکاف در شکست سد استفاده شده است. در شکاف از نوع سرریزی، ارتفاع آب از ارتفاع سد بیشتر شده و آب از روی سد سرریز و روی شیروانی پایین‌دست سد جریان یافته و باعث فرسایش آن می‌شود. با ازدیاد فرسایش یک آبراهه کوچک تقریباً مستطیلی ایجاد می‌شود که دبی ورودی به این کانال، $Q_b(ft^3/s)$ ، از رابطه سرریزهای لبه تخت محاسبه می‌گردد [۳۰]:

$$Q_b = 3.18 B_c (H - H_c)^{1.5} \quad (1)$$

¹ Overtopping

² Piping

³ Stormy Day

که در آن h بیانگر عمق جریان، A سطح مقطع فعال، A_0 سطح مقطع غیر فعال که در آن سرعت جریان کم بوده و در معادله اندازه حرکت تاثیر گذار نیست، S ضریب پیچ و خم، q دبی جانبی در واحد طول کانال، β ضریب تصحیح اندازه حرکت، S_f شیب اصطکاکی، S_e شیب واگرایی-همگرایی، S_i شیب اصطکاکی ناشی از حالت غیر نیوتنی و یا جریان غلیظ، L' اندازه حرکت ناشی از جریان جانبی، x فاصله در مسیر رودخانه و t معرف زمان است [۳۴].

با توجه به نوع هیدروگراف سیل، به دلیل تغییر ناگهانی در دبی و عمق هنگام وقوع سیلاب ناشی از شکست سد، تحلیل جریان سیلاب تنها با تحلیل دینامیکی جریان غیردائمی میسر می‌باشد. لذا استفاده از مدل یک‌بعدی جریان غیردائمی برای مدل‌سازی مطلوب‌تر بوده و به این منظور، نرم‌افزار HEC-RAS برای روندیابی هیدرولیکی غیردائمی جریان استفاده شده است. این نرم افزار معادلات حاکم بر پدیده را با روش تفاضلات محدود چهار نقطه‌ای وزن‌دار غیر صریح حل می‌نماید که در آن شرایط اولیه، شرایط مرزی و شرایط مرزی داخلی نظیر سرریزها و پل‌ها باید به درستی در نظر گرفته شوند.

۲-۴- پهنه‌بندی سیلاب ناشی از شکست سد شهرچای

جهت پهنه‌بندی سیلاب در پایین دست مقطع شکستگی سد، از نرم افزار ArcViewGIS استفاده شده است. این نرم افزار از پرکاربردترین نرم افزارهای محیط GIS بوده که می‌توان با استفاده از آن اطلاعات توصیفی را با اطلاعات مکانی مرتبط نمود. از سویی، باید از یک برنامه رابط جهت ارتباط بین محیط GIS و نرم افزار HEC-RAS استفاده نمود که بدین منظور از الحاقیه HEC-Geo به عنوان یک برنامه جانبی برای استخراج اطلاعات مورد نیاز HEC-RAS و نیز به عنوان ابزار پس پردازشی برای پردازش اطلاعات و نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدرولیکی برنامه HEC-RAS در محیط GIS استفاده شده است [۳۵].

برای مدل‌سازی، داده‌های اولیه نظیر مشخصات هندسی رودخانه، شرایط مرزی، شرایط اولیه، اطلاعات مربوط به سازه‌های هیدرولیکی موجود در مسیر، ضریب زبری رودخانه و ضرایب افت انبساط و انقباض مقاطع مختلف

فرسایش در کف و دیواره‌ها به جز 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 در کف کانال فرسایش به بستر می‌رسد فرسایش، در جهت قائم خاتمه یافته لیکن فرسایش دیواره‌ها ادامه پیدا می‌کند [۳۳].

تغییرات ارتفاع آب در مخزن، $\Delta H(ft)$ ، برای گام زمانی $\Delta t(\text{min})$ را می‌توان از معادله پیوستگی جریان بصورت زیر محاسبه نمود [۳۴]:

$$\bar{Q}_i - (\bar{Q}_b + \bar{Q}_{sp} + \bar{Q}_o) = \frac{\Delta H}{\Delta t} \times \frac{\bar{S}_a}{0.0826} \quad (6)$$

که ΔH تغییرات ارتفاع آب در مخزن سد در گام زمانی Δt ، \bar{S}_a سطح دریاچه مخزن سد بر حسب اکر، \bar{Q}_i دبی ورودی به مخزن سد، \bar{Q}_b دبی خروجی از شکاف، \bar{Q}_{sp} دبی خروجی از سرریز سد و \bar{Q}_o دبی سرریزی از تاج سد بر حسب فوت مکعب می‌باشند، علامت بار بیانگر مقدار متوسط کمیت‌ها در گام زمانی Δt می‌باشد. همچنین جریان در داخل کانال شکاف ایجاد شده را می‌توان با معادله مانینگ مدل‌سازی نمود. برای محاسبه میزان ذرات فرسایش یافته، از معادله ارائه شده توسط معادله میر-پیتر-مولر (۱۹۸۴) که توسط اسمارت تصحیح شده است، استفاده می‌شود. در نهایت برای کامل شدن مدل، یک فرآیند تکراری در هر گام زمانی به کار برده می‌شود.

۲-۳- روندیابی سیلاب شکست

معادلات حاکم بر مساله روندیابی جریان سیلاب ناشی از شکست سد را معادلات پیوستگی و دینامیکی در جریان-های متغیر غیردائمی تشکیل می‌دهند که به معادلات سنت-ونانت مشهور هستند. این معادلات با لحاظ کردن عبارت‌های اضافی مربوط به اثرات واگرایی یا همگرایی مقاطع، پیچ‌ها و خم‌ها در مسیر جریان و جریان‌های غیر نیوتنی در حالت بقای جرم و اندازه حرکت، به ترتیب به صورت جامع زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial [s(A + A_0)]}{\partial t} \mp q = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial (sQ)}{\partial t} + \frac{\partial (\beta Q^2 / A)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e + S_i \right) + L' = 0 \quad (8)$$

شرط مرزی پایین دست در نظر گرفته شده است. برای استفاده از عمق نرمال به عنوان شرط مرزی، باید یک شیب اصطکاک برای بازه مجاور مرز تعریف نمود. از آنجائی که شیب سطح آب برآورد مناسبی از شیب اصطکاک می باشد، با یک فرض مناسب و صحیح، با استفاده از شیب پروفیل طولی رودخانه به جای شیب هیدرولیکی، می توان شیب اصطکاک را به دست آورد.

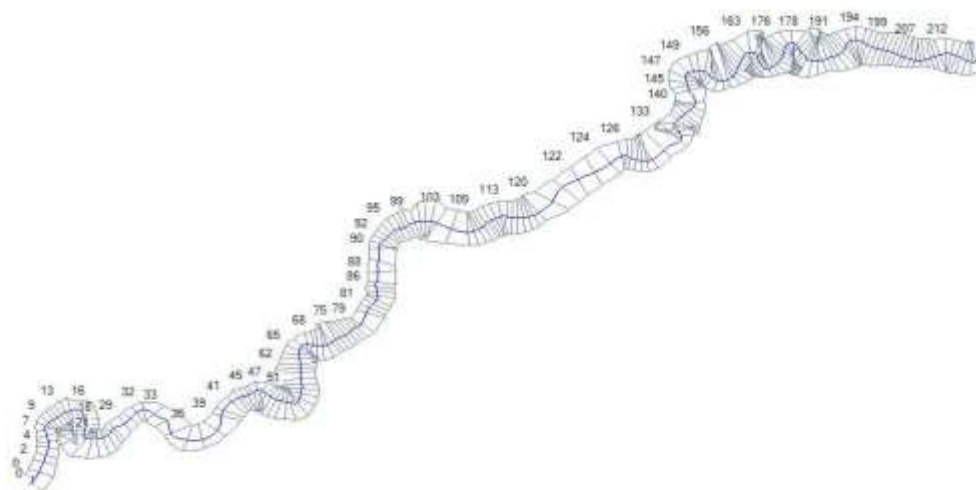
۲-۵- ایجاد و گسترش شکاف در سد شهرچای با نرم افزار Breach

در اثر وقوع سیلاب محتمل رخ داده، دبی خروجی از سیلاب مستقیماً وارد مخزن سد شهرچای خواهد شد. لذا، برای منظور نمودن اثر سیلاب، تعیین دبی و هیدروگراف خروجی از سیلاب مهم بوده که در این تحقیق هیدروگراف خروجی از سد در حال شکست برای سناریو روگذری جریان از روی سد محاسبه می گردد. مراحل پیشرفت روگذری جریان و منجر شدن آن به شکست سد در شکل ۵ مشاهده می شود. نکته قابل توجه در تحلیل شکست سد شهرچای آن است که علیرغم اعمال سیلاب PMF، سرریزها که براساس همین سیلاب طراحی شده اند قابلیت تخلیه سیل را داشته و هیچ شکافتی در سد رخ نداده است. در حالی که در ۱/۲ برابر سیلاب PMF، شکافت ایجاد و گسترش یافته است. شکل (۶) هیدروگراف خروجی از محل شکافت سد شهرچای را به عنوان مطلوب ترین قسمت خروجی مدل Breach سد شهرچای را نشان می دهد.

رودخانه به نرم افزار وارد شده و محاسبات برای جریان غیردائمی انجام گرفته است. پس از مدل سازی در نرم افزار HEC-RAS، نتایج حاصله به محیط GIS فرستاده شده تا مدل رقومی تراز آب ایجاد گردد. در نهایت با مقایسه مدل رقومی زمین و مدل رقومی تراز آب، نقشه های پهنه سیلاب حاصل می شود. شکل (۴)، مقاطع عرضی مربوط به تعداد ۴۰۰ مقطع در نظر گرفته شده در مسیر رودخانه شهرچای در نرم افزار HEC-RAS را نمایش می دهد.

مقادیر ضریب زبری مانینگ برای منطقه مورد مطالعه با توجه به داده های اندازه گیری شده، برای کانال اصلی رودخانه ۰/۰۳۵ و برای سیلاب دشت و نواحی حاشیه رودخانه ۰/۰۴ در نظر گرفته شد. با توجه به این مهم که عموماً باز و بسته شدن جریان در رودخانه به صورت تدریجی رخ می دهد از ضرایب ۰/۱ و ۰/۳ به عنوان مقادیر پیش فرض برای ضرایب تنگ و بازشدگی مقاطع رودخانه در محاسبات وارد می شود [۳۱]. تعریف شرایط مرزی به منظور انجام محاسبات هیدرولیکی در نرم افزار HEC-RAS ضروری می باشد.

برای جریان دائمی، در شرایط زیر بحرانی فقط شرط مرزی در پایین دست، در شرایط فوق بحرانی فقط شرط مرزی در بالادست و در جریان مختلط، شرط مرزی هم در بالادست و هم در پایین دست تعریف می شود. در جریان غیردائمی، شرط مرزی هم در بالادست و هم در پایین دست مورد نیاز می باشد. در این تحقیق هیدروگراف سیلاب ناشی از شکست سد در حالت شکست سد در اثر پدیده روگذری جریان به عنوان شرط مرزی بالادست و عمق نرمال برای



شکل (۴) مقاطع عرضی رودخانه شهرچای در محیط نرم افزار HEC-RAS

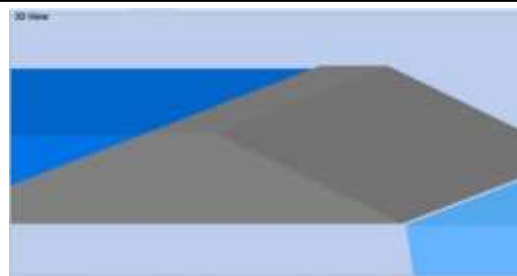
در واقع این هیدروگراف به عنوان شرط مرزی بالادست وارد مدل HEC-RAS شده و در پایین دست سد مورد روندیابی قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه جلوگیری از وقوع سیلاب و یا کنترل کامل سیلاب امری غیر ممکن است، نتایج به دست آمده در این کار مطالعاتی می تواند راهنمای مناسبی برای انجام اقدامات پیشگیرانه، اتخاذ تدابیری برای جلوگیری از وقوع یک فاجعه انسانی و یا تخفیف خسارات مالی و جانی احتمالی و در کل مدیریت جامع سیلاب و مدیریت سیلاب دشت در این حوضه آبریز باشد. بدیهی است استفاده از این نتایج در صورت وقوع سیلاب ناشی از شکست سد در اثر هر کدام از پدیده های فوق می تواند راه گشای مناسبی برای واکنش سریع در امر مدیریت سیلاب و بحران ناشی از آن باشد.

۳- نتایج و بحث

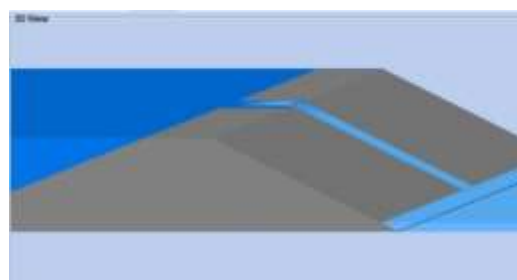
۳-۱- پهنه بندی سیلاب ناشی از شکست سد

به واسطه حرکت سیلاب ناشی از شکست سد در رودخانه پایین دست، ممکن است گستره بسیار وسیعی از نواحی پایین دست زیر آب رفته و مستغرق شود. بحرانی ترین حالت در تعیین پهنه سیلاب، مربوط به تراز آب بیشینه در هنگام عبور دبی بیشینه سیلاب است [۳۶]. در ادامه پروفیل طولی کانال اصلی رودخانه و پروفیل طولی خط انرژی رودخانه به ترتیب در شکل های (۷) و (۸) ارائه شده اند. مقاطع عرضی رودخانه نیز در محل هایی از مسیر رودخانه به هنگام تراز آب بیشینه به عنوان نمونه در شکل (۹) آورده شده است. مشاهده می شود که نتایج گستره سیلاب با شرایط توپوگرافی اراضی ساحل رودخانه و نواحی مسکونی روستایی مطابقت دارد. همان طور که انتظار می رود مناطق با ارتفاع پایین تر پهنه سیلاب گسترده تری دارند. همچنین از شکل های فوق کاملا مشهود است که ساحل راست رودخانه دارای مناطق مرتفع تر و پهنه سیلاب محدودتر می باشد.

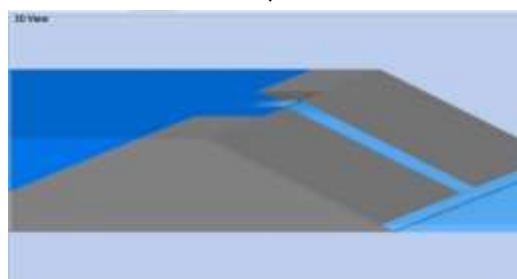
در فاصله ۸۰۰ متری پایین دست محل شکست سد، یک تنگ شدگی در مسیر جریان قرار دارد. بالا بودن دبی اوج سیلاب و نزدیک بودن محل تنگ شدگی به مقطع شکست، موجب می گردد تراز آب در پشت تنگ شدگی بسیار بالا رفته و سرعت جریان در مقطع تنگ شدگی و بالادست آن افزایش یابد.



(الف)



(ب)

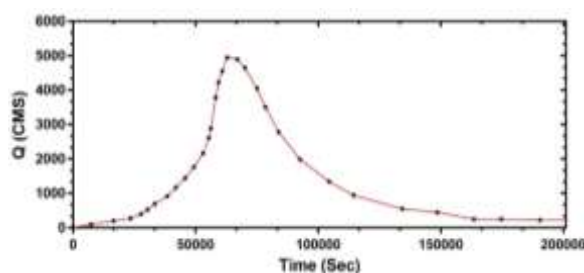


(ج)

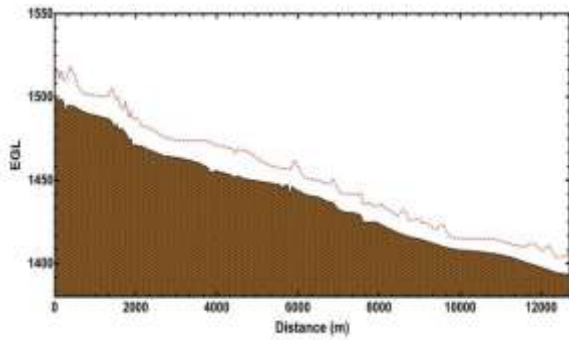


(د)

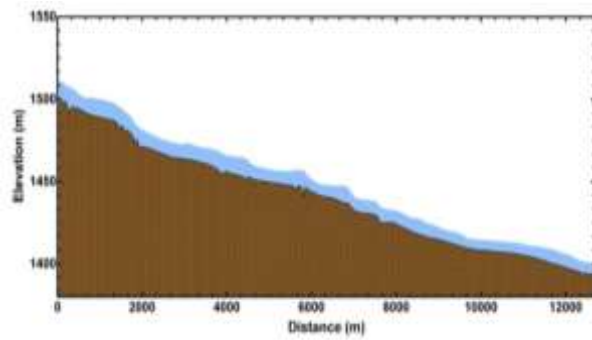
شکل (۵) نمایش سه بعدی ایجاد و گسترش شکاف شبیه سازی شده با مدل Breach (الف) تراز نرمال سد قبل از رسیدن سیلاب (ساعت ۰)، (ب) ورود سیلاب و شکست سد (۷ ساعت بعد)، (ج) ورود سیلاب و شکست سد (۱۰ ساعت بعد) و (د) ورود دبی پیک سیلاب و شکست سد (۱۵ ساعت)



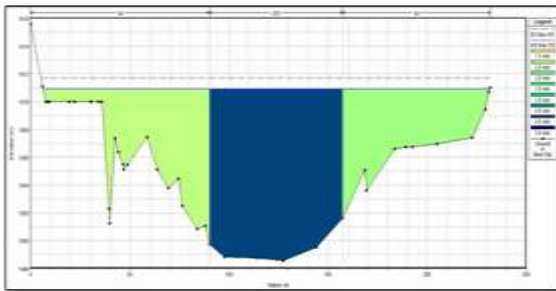
شکل (۶) هیدروگراف خروجی سد شهر چای پس از شکست سد در اثر پدیده روگذری جریان.



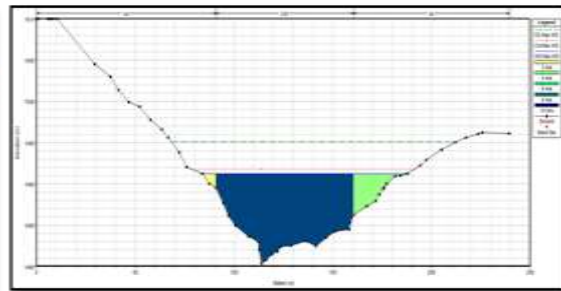
شکل (۸) مقطع طولی خط انرژی رودخانه شهرچای به هنگام تراز بیشینه سیلاب.



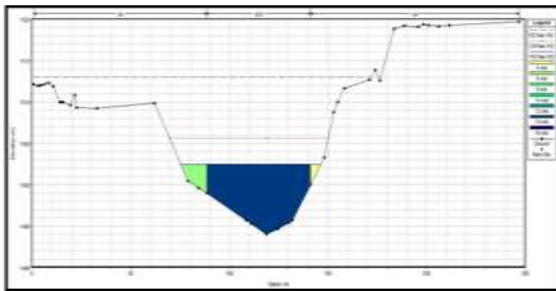
شکل (۷) مقطع طولی رودخانه شهرچای به هنگام تراز بیشینه سیلاب.



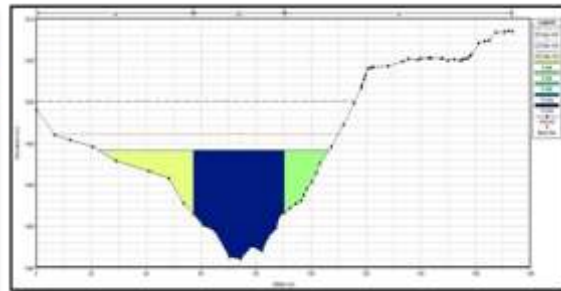
(ب)



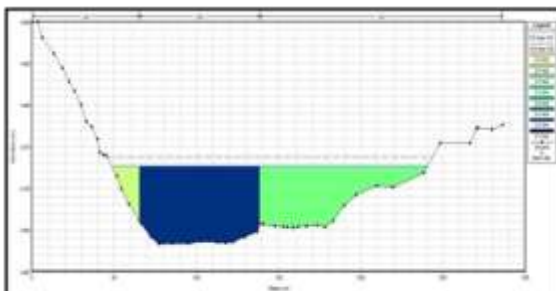
(الف)



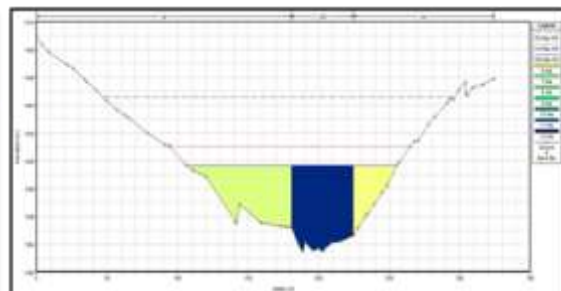
(ت)



(پ)

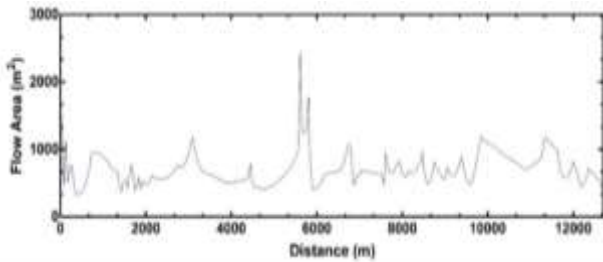


(ر)

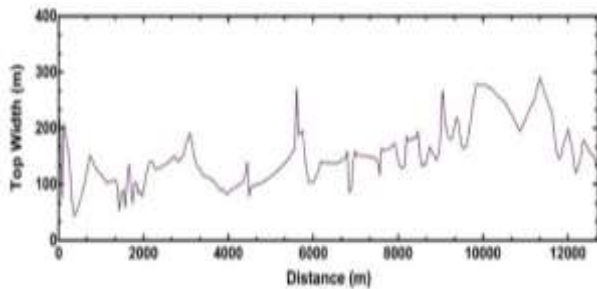


(د)

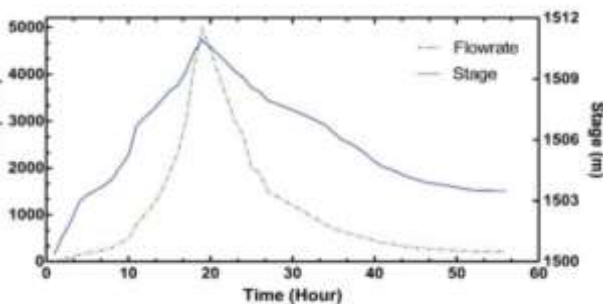
شکل (۹) مقاطع عرضی رودخانه شهرچای در نقاط مختلف پایین دست سد به هنگام تراز بیشینه سیلاب (الف) مقطع عرضی رودخانه شهرچای در فاصله ۳۰۰ متری پایین دست محل شکست سد، (ب) مقطع عرضی رودخانه شهرچای در محدوده روستای نوشان علیا در فاصله ۵۹۲ متری پایین دست محل شکست سد، (پ) مقطع عرضی رودخانه شهرچای در محدوده روستای نوشان سفلی در فاصله ۲/۲۲ کیلومتری پایین دست محل شکست سد، (ت) مقطع عرضی رودخانه شهرچای در محدوده پارکینگ بند در فاصله ۸/۳۸ کیلومتری پایین دست محل شکست سد، (د) مقطع عرضی رودخانه شهرچای در محدوده باغ سیب بند در فاصله ۱۰ کیلومتری پایین دست محل شکست سد و (ر) مقطع عرضی رودخانه شهرچای در انتهای محدوده مورد مطالعه در فاصله ۱۲/۲ کیلومتری پایین دست محل شکست سد.



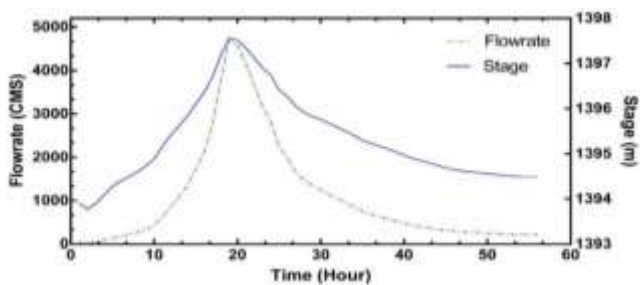
شکل (۱۱) خروجی سطح مقطع جریان پس از شکست سد در اثر پدیده روگذری جریان.



شکل (۱۲) خروجی عرض سطح جریان پس از شکست سد در اثر پدیده روگذری جریان.



شکل (۱۳) خروجی دبی اشل پس از شکست روگذری سد در ابتدای محدوده.



شکل (۱۴) خروجی دبی اشل پس از شکست روگذری سد در انتهای محدوده مورد مطالعه

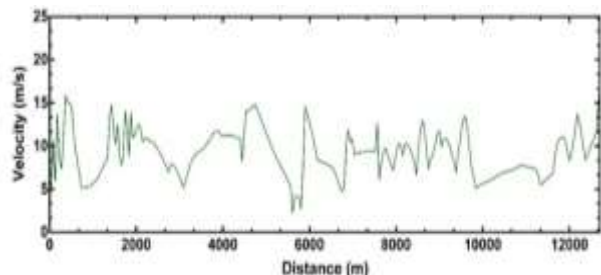
این بازه تقریباً در نزدیکی پارکینگ بند بوده که به عنوان یک مرکز تفریحی استفاده می‌شود. بیشینه تغییرات سرعت سطح مقطع، عرض سطح جریان و دبی اشل در بالادست مقطع تنگ‌شدگی مسیر سیلاب قرار دارد و می‌توان آن را

این امر سبب می‌شود تغییرات دبی در این محدوده بیش از مقدار دبی اوج سیلاب گردد. بحرانی‌ترین وضعیت برای تعیین پهنه سیلاب ناشی از شکست سد در اثر پدیده روگذری، مربوط به تراز آب بیشینه در هنگام عبور دبی بیشینه سیلاب می‌باشد که در این حالت گستره وسیع‌تری زیر آب رفته و مستغرق می‌شود. به همین منظور بیشتر بر روی تراز آب بیشینه تاکید شده است.

۳-۲- سناریو شکست در بیشینه سیلاب محتمل PMF (مکانیزم روگذری)

در سناریوی شکست در روز سیلابی، بر اثر وقوع سیلاب بیشینه PMF، فرض بر این است که مخزن سد در تراز نرمال قرار داشته و با ورود بیشینه سیلاب محتمل به مخزن سد و افزایش رقوم سطح آب تا بیش از رقوم تاج سد، مکانیزم روگذری باعث شسته شدن بدنه سد می‌شود. ایجاد شکاف در ابتدا به صورت مستطیلی بوده و سپس تبدیل به ذوزنقه‌ای می‌شود که در بدنه سد نمایان می‌گردد. در این سناریو سیلاب ناشی از شکست سد، معادل حجم سیلاب ورود به مخزن در اثر وقوع بیشینه سیلاب محتمل، به علاوه حجم معادل تراز نرمال مخزن سد خواهد بود.

نتایج شبیه‌سازی یک‌بعدی در نرم افزار HEC-RAS، نشان می‌دهد که با شکست سد شهرچای در اثر روگذری، دبی پیک سیلاب تولید شده در حدود ۴۹۴۴ متر بر ثانیه در ۱۵ ساعت پس از شکست سد می‌باشد. نمودارهای ۱۰ تا ۱۴ اطلاعات کاملی از مناطق اطراف پایین‌دست سد به هنگام وقوع سیلاب بیشینه را ارائه می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) مشهود است بیشترین اندازه سرعت و سطح مقطع جریان در فاصله تقریبی ۶ کیلومتر از مقطع شکست قرار دارد.



شکل (۱۰) خروجی سرعت پس از شکست سد در اثر پدیده روگذری جریان.

تلفیق شدند. این داده‌ها نتایج حاصل از مدل‌سازی، تحلیل شکست سد و سیلاب ناشی از آن، پیش‌پردازش داده‌های ماهواره‌ای و نیز نقشه‌های پایه را شامل می‌شود. با تلفیق این داده‌ها حدود مناطق سیل‌گیر تعیین و همچنین روستاهایی که در منطقه در اثر شکست سد و سیلاب ناشی از آن آسیب خواهند دید مشخص شده است. در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نقشه‌های کاربری اراضی، عمق بیشینه سیلاب و سرعت جریان در محدوده مورد مطالعه مشاهده می‌شوند.

عامل اصلی پس‌زدگی جریان و تشدید قدرت تخریب سیلاب بشمار آورد. در بخش بعد مقایسه عددی سرعت پیشانی موج و عمق سیلاب آورده شده است.

۳-۳- تلفیق نقشه‌ها با تصاویر ماهواره‌ای و نتایج حاصل از مدل‌سازی

پس از دریافت نتایج خروجی از نرم افزار HEC-RAS، داده‌های حاصل شده از مراحل و منابع مختلف در GIS



شکل (۱۵) نقشه سرعت بیشینه رخ داده در محدوده سیلاب.



شکل (۱۶) نقشه عمق بیشینه رخ داده در محدوده سیلاب.

۳-۴- تحلیل نتایج با پارامتر شاخص مخاطره

عمق (h) و سرعت جریان (V) از مهم‌ترین فاکتورهای مورد نیاز برای بررسی اثرات یک سیلاب می‌باشند [۷]. با توجه به این نکته که شاخص مخاطره تابعی از این دو پارامتر است، به منظور تخمین مقدار کمی آن، تعیین عمق و سرعت جریان در هر نقطه از محدوده مورد مطالعه ضروری است. تعاریف گوناگونی برای شاخص مخاطره وجود دارد که به سه مورد از آن‌ها در زیر اشاره شده است:

$$HR = f(h, V) \quad USA \quad (9)$$

$$HR = f(h, V^2 / 2g) \quad Austria \quad (10)$$

$$HR = f(h, V \times h) \quad Switzerland \quad (11)$$

به منظور تلفیق دو متغیر سرعت جریان و عمق آب‌گرفتگی در بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب، در سال ۱۹۸۸ USBR اقدام به ارائه شاخص مخاطره نمود که در جدول (۱) دسته‌بندی شده است:

جدول (۱) تعریف شاخص مخاطره بر اساس دسته‌بندی انجام شده.

شاخص مخاطره	رنگ اختصاص یافته	تعریف
زیاد	زرد	افراد چه در داخل و چه در خارج از مناطق مسکونی در خطر می‌باشند. تاسیسات مسکونی در معرض تخریب قرار دارند.
متوسط	نارنجی	افراد در خارج از مناطق مسکونی در خطر می‌باشند. تاسیسات مسکونی بسته به ساختار آنها در معرض آسیب قرار دارند.
کم	قرمز	افراد و تاسیسات چندان در معرض خطر نیست.

در شکل (۱۷) نقشه شاخص مخاطره برای محدوده مورد مطالعه تعیین شده است. با توجه به ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و توپوگرافیکی منطقه، سیلاب ناشی از شکست سد بعد از رها شدن از سد در حدود ۱۲ کیلومتری پایین‌دست سد در یک آبراهه تنگ با دیواره‌های بلند جریان یافته و به صورت جدی روستاهای نوشان و اراضی کشاورزی این منطقه را تهدید می‌کند.

با توجه به بالا بودن ضریب مانینگ، جریان سیلاب عمده انرژی خود را در این محدوده از دست داده و سپس در نزدیکی روستای بند به یکباره وارد یک مقطع گشاد می‌گردد. اگرچه سیلاب این ناحیه به‌طور چشمگیری گسترش نمی‌یابد لیکن با توجه به عریض بودن آبراهه،

عمق و سرعت سیلاب به‌طور چشمگیری کاهش یافته ولی خروش و قدرت خود را در زمینه تخریب سازه‌های موجود از دست نمی‌دهد. زمان رسیدن پیشانی سیلاب به روستاهای واقع در محدوده گسترش سیلاب و درصد استغراق آن‌ها در جدول (۲) برای شکست ناشی از روگذری جریان آورده شده است. شکل (۱۸) نقشه سه بعدی پهنه سیلاب را در محدوده مدل‌سازی سد شهرچای نشان می‌دهد.

با توجه به جدول (۲)، تمامی روستاهای پایین‌دست محل سد از خطر پذیری بالایی به لحاظ اثرات سیلاب برخوردار هستند. حسن‌زاده در سال (۱۳۸۲) نشان داده است چنانچه زمان فرار برای مناطق در خطر در حدود ۹۰ دقیقه باشد میزان تلفات به ۰/۰۲ درصد محدود می‌شود در حالی‌که با کاهش این زمان به ۱۵ دقیقه میزان این تلفات به ۵۰ درصد افزایش می‌یابد [۲۸].

بررسی زمان رسیدن پیشانی موج به محدود مورد مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که ساکنین منطقه نوشان (روستاهای علیا و سفلی) که اولین منطقه در معرض خطر سیلاب است، زمان بسیار زیادی برای فرار از خطر داشته و در صورت اتخاذ تدابیر لازم تلفات جانی به صفر درصد خواهد رسید. از سویی دیگر درصد استغراق این منطقه ۱۰۰ درصد می‌باشد. لذا اگرچه شکست تدریجی سد و وقوع بیشینه سیلاب ممکن است خسارات جانی به دنبال نداشته باشد لیکن خسارات مالی آن به لحاظ زیر آب رفتن زمین‌های کشاورزی و تخریب ساختمان‌های مسکونی و سازه‌های ارتباطی نظیر پل‌ها، قابل توجه خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

در کنار منافع قابل توجه ساخت سدها، سیلاب ناشی از شکست سد از جمله فاجعه آمیزترین حوادث در طی دو قرن اخیر بوده است. موج سیلاب ناشی از شکست سد به دلیل ویژگی‌های خاص هیدرولیکی که آن را از سیلاب‌های طبیعی متمایز می‌کند از حساسیت بیشتری برخوردار است. با توجه به مشخصات و جنس سد شهرچای، نوع و نحوه شکست این سد به صورت تدریجی خواهد بود خاص آنکه در سناریوی روگذری جریان که حجم بسیار زیادی آب جاری می‌گردد.



شکل (۱۷) نقشه شاخص مخاطره در محدوده مورد مطالعه.

جدول (۲) میزان تأثیرپذیری روستاهای واقع در محدوده مورد مطالعه از سیلاب ناشی از شکست فرضی سد شهرچای.

نام منطقه	نام روستا	تراز بیشینه عمق سیلاب (متر)	سرعت بیشینه سیلاب (متر بر ثانیه)	زمان رسیدن پیشانی سیل (دقیقه)	درصد استغراق
نوشان	نوشان علیا	۸/۲	۳/۷۷	۱۷۱	۷۷
	سفلی	---	---	---	---
پارکینگ بند	---	۱۰/۳	۴/۸۵	۲۲۰	۱۰۰
محدوده باغ سیب	باغ سیب	۸/۲	۶/۵۸	۳۱۰	۶۷
محدوده بند	بند	۴/۴	۵/۴۸	۳۵۰	۵۹

شکاف تا کف رودخانه (از بین کل ارتفاع سد) به ترتیب ۱۱۵ و ۱۲۳ متر می باشد.

۳) زمان توسعه شکاف و از بین رفتن سد شهرچای بر اساس مدل سازی و روابط مختلف در حدود ۴ الی ۱۵ ساعت می باشد.

۴) در نقشه های شاخص مخاطره محدوده مورد مطالعه، هیدروگراف های سیل رودخانه شهرچای که در محل ایستگاه میرآباد با دوره بازگشت های مختلف استخراج شده مورد استفاده قرار می گیرد. تعیین دوره بازگشت بستگی به سرمایه گذاری دولت برای حفظ جان مردم و حفاظت تاسیسات و همچنین اقتصاد ملی دارد. مهم ترین مساله در تعیین دوره بازگشت سیل، آن است که هر چه جمعیت انسانی و سرمایه گذاری بیشتر باشد، سیل با دوره بازگشت بیشتری تعیین و مورد استفاده قرار می گیرد.

به دلیل قابلیت بالای سرریز سد در عبور دادن جریان، دبی خروجی از شکاف سد توسط سرریزها تقلیل یافته و هیدروگراف خروجی از محل شکست سد حالت بسیار ناگهانی نداشته و بطور نسبتاً تدریجی در پایین دست سد جریان می یابد. لیکن با این وجود خسارات مالی آن قابل توجه خواهد بود. از جمع بندی نتایج حاصل از مدل سازی عددی می توان نشان داد:

۱) نتایج گستره سیلاب با شرایط توپوگرافی اراضی ساحل رودخانه و نواحی مسکونی مطابقت دارد و همانطور که انتظار می رود در مناطق با ارتفاع پایین تر پهنه سیلاب گسترده تری وجود داشته و نیز ساحل راست رودخانه دارای مناطق مرتفع تر و پهنه سیلاب محدودتری می باشد.

۲) عرض متوسط شکاف و عرض کف شکاف احتمالی سد شهرچای با استفاده از روابط موجود و با فرض توسعه

کشاورزی را احاطه می‌کند. بحرانی‌ترین وضعیت از ۱۵ ساعت بعد از شکست سد که به نقطه پیک هیدروگراف می‌رسد شروع می‌شود و تقریباً تمامی مناطق روستایی موجود در مسیر سیلاب و بخش عمده‌ای از روستای بند با شاخص مخاطره بالایی روبرو خواهند شد.

(۶) افزایش زبری رودخانه‌ها علی‌رغم اینکه دبی جریان را کاهش می‌دهد، سبب افزایش عمق جریان می‌شود ولی این افزایش عمق زیاد نبوده و کاهش زبری جریان نیز هر چند دبی جریان را افزایش می‌دهد لیکن عمق آب را کاهش می‌دهد.

۵- مراجع

[۱] مینا، ا. تحلیل و آنالیز هیدرولیکی جریان غیردائمی ناشی از شکست سد توسط مدل عددی مطالعه موردی رودخانه تاکستان، پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور استان تهران، ایران. ۱۳۹۳.

[۲] حسن زاده، ی. ۱۳۸۳. هیدرولیک شکست سد، انتشارات وزارت نیرو، کمیته ملی سدهای بزرگ.

[۳] حسن زاده، ی. ۱۳۷۰. بررسی انتشار امواج ناشی از شکست سد، نشریه دانشکده فنی، دانشگاه تهران - شماره ۱، صفحه های ۴۱ تا ۴۸.

[4] Ré, R., "Etude du Lâcher Instantané d'une Retenue Dans un Canal Par la Method Graphique", La Houille Blanche, 1946.

[5] Dressler RF, "Hydraulic Resistance Effect upon the Dam-Break Function", Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 49, No.3, pp.217-225. 1952.

[6] Hunt, B., "Dam-Break Solution", J. of Hydraulics Engineering, ASCE, Vol.110, No.6, pp.675-686, 1984.

[7] Garcia-Navaro P and Saviron JM, "Numerical Solution of the St. Venant Equation with Mac Cormack Finite Difference Scheme", International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol.6, pp.259-274. 1986.

[8] Rahman, M., Chaudhry, M.H., "Simulation of One Dimensional Dam-Break Flows", J. of Hydraulics Research, Vol. 25, 1987.

[9] Macchione F and Sirangelo B, "Study of Earth Dam Erosion due to Overtopping", Proceedings of the Technical Conference, November, WMO. Geneva, pp.212-219, 1988.

[10] Bell, S.W., Elliot, R.C., Chaudhry, M.H., "Experimental Results of Two-Dimensional Dam-Break Flows", J. of Hydraulic Research, Vol.30, No.2, 1992.



شکل (۱۸) نقشه سه‌بعدی پهنه سیلاب در محدوده مورد مطالعه سد شهرچای.

برای حفاظت اراضی کشاورزی، سیل با دوره ۷-۱۰ سال و برای حفاظت روستاها سیل با دوره بازگشت ۲۰-۵ سال مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین گزینه از لحاظ اقتصادی شاید مهار کردن سیل با دوره بازگشت ۶۰-۱۰۰ ساله باشد که برای این منظور می‌بایست سیل را با دوره بازگشت مورد نظر برآورده نموده و سازه‌های مهار سیلاب را بر اساس آن طراحی نمود. در تحقیق حاضر، هیدروگراف سیل با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله برای شبیه‌سازی سیلاب مورد استفاده قرار گرفته است.

(۵) با شکست سد و ایجاد سیلاب با حجم بالا و بیشتر از ظرفیت رودخانه، سیلاب فرصت خروج از مسیر رودخانه را پیدا کرده و وارد زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی روستایی می‌شود. بعد از گذشت نزدیک به ۱۵ ساعت از زمان سیلاب و رسیدن به نقطه پیک هیدروگراف، جریان سیلاب با شدت بیشتری مناطق مسکونی اعم از روستای نوشان (علیا - سفلی)، روستای بند و اراضی زراعی و

- [25] Chen, Y., Binliang, L., Chunbo, J., Ying, L., "Predicting Near- Field Dam Break Flow and Impact Force using a 3D Model", Journal of Hydraulic Research, Vol.48, No.6, pp.784-792, 2011.
- [26] Khankandi, A. F., Tahershamsi, A., Soares-Fraza, S., "Experimental Investigation of Reservoir Geometry Effect on Dam-Break Flow", Journal of Hydraulic Research, Vol.50, No.4, pp.376-387, 2012.
- [۲۷] حسن زاده، ی. و رنجینه، ع.، خجسته، ر. ع.، بررسی اثرات زبری بستر در سرعت انتشار امواج ناشی از شکست سد در یک مدل هیدرولیکی شبیدار، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۰، شماره ۱۳، صفحه های ۱ تا ۲۰، ۱۳۸۹.
- [۲۸] حسن زاده، ی.، رنجبری، ع.، خجسته، ر. ع.، بررسی اثرات شیب بستر در روند تحلیل مسأله شکست، مجله دانشکده فنی دانشگاه تبریز، جلد ۳۳، صفحه های ۱-۹، ۱۳۸۲.
- [۲۹] جوزدانی، آ. کبیری سامانی، ع. کاربرد روش پردازش تصاویر در تحلیل رفتار سیلاب ناشی از شکست سد، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۹.
- [۳۰] محمدنژاد، ب.ع. فاطمی کیا، م.ا. بهمنش، ج. منتصری، م. شبیه سازی عددی انتشار موج ناشی از شکست سد به صورت دو بعدی قائم، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۴، شماره ۳، صفحات ۴۷ تا ۵۹، ۱۳۹۳.
- [۳۰] حسن زاده، ی.، نورانی، و.، سپهری، و.، دل افروز، ه. الماس پور، ف. تحلیل امواج ناشی از شکست سد و پهنه بندی دشت سیلابی با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: سد ونیار)، نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، صفحات ۱ تا ۱۵، ۱۳۹۴.
- [۳۱] بی نام، گزارش فنی پروژه سد مخزنی شهرچای، مهندسین مشاور سکو، شرکت آب منطقه ای استان آذربایجان غربی، ایران، ۱۳۸۷.
- [32] Skoglund M, Bachke D, Midttomne GH and Wathne M, Norwegian guidelines for dam breaks analysis. A.A Balkema Publisher. 2001.
- [۳۳] ارزنلو، ا. بررسی شکست سد خاکی شهرچای ارومیه ناشی از روگذری جریان و پهنه بندی سیلاب با استفاده از مدل-HEC RAS و GIS. پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد در گرایش سازه-های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز. ۱۳۹۴.
- [34] Fread D.L., "Breach: An erosion modelsto for Earthen Dam-Failures. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service", NOAA, Silver Spring, Maryland Vol.209, No.10, pp.1-39. 1988.
- [35] Tate EC and Maidment DR, "Floodplain Mapping using HEC-RAS and Arc View GIS,
- [11] Zhang, H., Hassanzadeh, Y., Long, N.D., Kahawita, R., "A 1-D Numerical Model Applied to Dam-Break Flows on dry Beds", J. of Hydraulics Research, Vol.30, No.2, 1992.
- [12] Lauber, G., Hager, W.H., "Experiment to Dam-Break Wave: Sloping Channel", Journal of Hydraulic Research, Vol.36, No.5, pp.761-773, 1998.
- [13] Wu, C., "Theoretical Solution of Dam-Break Shock Wave", J. Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.125, No.11, pp.1210-1215, 1999.
- [14] Wang J, "Finite Difference TVD Scheme for Computation of Dam-Break Problems". Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol.126, No.4, pp.253-262, 2000.
- [15] Anonymous, HEC-GeoRAS: "An extension for support HEC-RAS Using Arc View", (USACE), User Manual, Ver3.1, 2002.
- [16] Zhou, J. G., Causon, D. M., Mingham, C. G., Ingram, D. M., "Numerical Prediction of Dam-Break Flows in General Geometries with Complex Bed Topography", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol.130, pp.332-340, 2004.
- [17] Mambretti, S., Larcana, E., Wrachien, D., "1D Modelling of Dam-Break Surges with Floating Debris", Journal of Biosystem Engineering, Vol.100, pp.297-308. 2008.
- [18] Chanson, H., "A Simple Solution of the Laminar Dam Break Wave", J. of Applied Fluid Mechanics, Vol.1, No.1, pp.1-10, 2008.
- [19] Francesco, S., Biscarini, C., "CFD Modelling Approach for Dam Break Flow Studies", Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 14, pp.705-718, 2009.
- [20] Roshandel, A., Hedayat, N., Kiamanesh, H., "Simulation of Dam Break using Finite Volume Method", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.47, pp. 11-26. 2010.
- [21] Biscarini, C., Francesco, S. D., Manciola, P., "CFD Modelling Approach for Dam Break Flow Studies", Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14, 705-718.
- [22] Singh, J., Mustafa, Altinakar, M. S., Ding, Y., "Two-Dimensional Numerical Modelling of Dam Break Flows over Natural Terrain Using a Central Explicit Scheme", Advances in Water Resources, Vol.34, No.10, pp.1366-1375, 2011.
- [23] Chang, T. J., Kao, H. M., Chang, K. H., Hsu, M. H., "Numerical Simulation of Shallow- Water Dam Break Flows in Open Channels -using Smoothed Particle Hydrodynamics", Journal of Hydrology, Vol.408, pp.78-90. 2011
- [24] Bellos, V., Hrissanthou, V., "Numerical Simulation of a Dam Break Flood Wave", Journal of European Water, Vol.33, pp.45-53. 2011.

[36] Fennema R.J.and Chaudhry W.H., "Simulation of One Dimensional Dam-Break Flows", Journal of Hydraulics. Research, Vol.25, pp.41-51, 1987.

Master Thesis, Apartment of Civil Engineering", The University of Texas at Austin, Texas., Center for Research in Water Resource (CRWR), online report, pp.99-1. 1999.