

## بررسی سرعت و ارتفاع سیلاب ناشی از شکست سد در مسیرهای غیرمستقیم در شرایط آزمایشگاهی

امین سالم‌نیا<sup>۱</sup>، رامین فضل‌اولی<sup>۲\*</sup>، مهدی قمشی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۲۷

### چکیده

با تغییرات اقلیمی رخ داده در دنیای امروز و وقوع بارش‌های شدید، وقوع سیلاب‌های متعدد در اقصی نقاط جهان افزایش چشمگیری داشته است. از طرف دیگر شکست سدهای مخزنی نیز باعث به وجود آمدن سیلاب‌های شدیدی می‌گردد. با توجه به جایگاه سدهای مخزنی که معمولاً در بالادست شهرهای بزرگ و پرجمعیت واقع شده‌اند، سیلاب ناشی از شکست آن‌ها موجب بروز خسارات جبران‌ناپذیری می‌گردد. محاسبه سرعت و حداکثر ارتفاع سیلاب و اندازه‌گیری زمان رسیدن آن به مناطق مهم در پایین‌دست می‌تواند به حداقل رساندن خسارات ناشی از سیلاب و آمادگی جهت آن کمک چشمگیری نماید. به علاوه با توجه به ساختگاه سدهای مخزنی که در مناطق کوهستانی می‌باشد، اثر وجود قوس در مسیر جریان بر سرعت حرکت سیلاب از اهمیت چشمگیری برخوردار است. در این پژوهش به بررسی اثر سطح آب بالادست و پایین‌دست بر روی سرعت و ارتفاع حرکت تک موج حاصل از شبیه‌سازی شکست سد در یک کانال قوسی ۹۰ درجه ملایم پرداخته شده است. اندازه‌گیری سرعت و ارتفاع سیلاب حاصل از شکست سد در تحقیق نشان می‌دهد در زاویه صفر درجه، در فاصله کم‌ترین تا بیش‌ترین مقدار نسبت سطح پایاب به سر آب، مقادیر سرعت ۳۳ درصد کاهش، در زاویه ۴۵ درجه، ۵۸ درصد کاهش، در زاویه ۹۰ درجه، ۵۷ درصد کاهش و در زاویه ۱۰۵ درجه ۶۲ درصد کاهش سرعت موج، اندازه‌گیری شده است. به علاوه نتایج این تحقیق نشان داد حداکثر ارتفاع سیلاب در مسیر یک قوس در زوایای ۲۵ تا ۳۵ درجه رخ داده و پس از آن کاهش چشمگیری پیدا می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** روندیابی سیلاب، سرعت موج، سطح آب بالادست، سطح آب پایین‌دست، شکست سد

### مقدمه

پژوهشی در بسیاری از کشورها قرار گیرد (Khoob., 2012). با شکست سد یک جریان غیردایمی ایجاد شده که می‌توان آن را با معادلات آب‌های کم‌عمق مدل‌سازی کرد. معادلات آب‌های کم‌عمق در واقع از انتگرال‌گیری معادلات شناخته شده ناویر استوکس<sup>۴</sup> در عمق حاصل شده و در آن‌ها فرض می‌شود که سرعت جریان در عمق ثابت است. این معادلات دیفرانسیلی با مشتقات جزئی در حالت یک‌بعدی به معادلات سنت-ونانت مشهورند و در حالت دویبعدی شامل معادلات پیوستگی و مومنتم در دو جهت هستند. روش‌های مختلفی را برای حل معادلات دیفرانسیل می‌توان به کاربرد، از جمله آن می‌توان به روش سنتی تفاضل محدود و روش‌های عناصر محدود و حجم‌های محدود اشاره کرد.

جریان حاصل از شکست یک سد در طبقه جریان‌های غیردایمی قرار می‌گیرد. جریان‌های غیردایمی خود به جریان‌های متغیر تدریجی و متغیر سریع تقسیم می‌شوند. در جریان متغیر تدریجی، انحنا و پروفیل موج ملایم بوده و تغییرات عمق با زمان به صورت تدریجی رخ می‌دهد، به علاوه شتاب قائم جریان در مقایسه با شتاب زمین ناچیز

سدهای مخزنی به طور معمول در بالادست سدها و در مناطق کوهستانی قرار گرفته و حجم زیادی از آب را در پشت خود ذخیره می‌کنند. در صورت شکست سد، حجم زیادی از آب به صورت یک موج عظیم سیلاب، از نوع جریان‌های غیرماندگار به سمت پایین‌دست سد حرکت می‌کند. پیشروی جریان‌های سیلابی در پایین‌دست سد و گسترش آن در دشت‌های مجاور خسارات جانی و مالی عظیمی به دنبال دارد. سیلاب‌های ناشی از شکست سد و خرابی‌های بسیاری که در پی آن رخ می‌دهد سبب شکست سد شده و مشخصات جریان خروجی مانند ارتفاع و سرعت آن به عنوان یکی از مهم‌ترین مطالعات

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
۳- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

\*- نویسنده مسئول: raminfazl@yahoo.com

تلقی شده ولی اثر اصطکاک جداره‌ها در نظر گرفته می‌شود. درحالی‌که در جریان‌های متغیر سریع، انحنای پروفیل سطح آب تند، تغییرات عمق جریان نسبت به زمان سریع، مولفه قائم شتاب ذرات محسوس و اثر اصطکاک جداره‌های قابل صرف نظر کردن می‌باشد. به بیانی دیگر هر جریان غیردایمی عبارت از حرکت موجی است که با تغییر مکان خود و برحسب شرایط، عمق جریان، دبی و یا هر دو را از مقطعی به مقطع دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر می‌دهد (Hosseini and Abrishami., 2006).

با توجه به این حقیقت که دلیل بسیاری از آسیب‌های وارده از طرف سیلاب ناشی از شکست سد، سرعت و فشار دینامیکی وارده از آن به ساختمان‌ها و سازه‌های موجود در مسیر جریان بوده و هندسه مسیر اثر مستقیمی بر مقدار سرعت سیلاب دارد، شناخت هیدرولیک جریان و یافتن عوامل موثر بر روی سرعت سیلاب می‌تواند پاسخگوی بسیاری از مشکلات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی باشد. به علاوه درک سرعت جریان سیلاب ناشی از شکست سد و عوامل موثر بر روی آن می‌تواند به درک بهتر هیدرولیک جریان‌های سیلابی کمک کرده و یافتن راهکاری را جهت کاهش سرعت جریان و افزایش زمان رسیدن سیلاب به مناطق شهری و مسکونی آسان‌تر می‌سازد. به علاوه با توجه به سازه‌ها و ساختمان‌های موجود در مسیر جریان که حاشیه رودخانه‌ها واقع شده و گسترش شهرهای مختلف در نزدیکی رودخانه‌ها، دانستن حداکثر ارتفاع سیلاب ناشی از شکست سد و شناخت نقاط با ریسک بالای سیلاب گرفتگی، در به حداقل رساندن خسارات جانی و مالی ناشی از شکست سد بسیار موثر است. بنابراین ترکیب‌های مختلف عمق پایاب و سر آب همگی منجر به مقادیر بعضاً متفاوت و یا یکسانی از سرعت حرکت سیلاب می‌گردد. در نتیجه همه این موارد نشان دهنده پیچیدگی بیش‌تر اثرات سطح آب بالادست و پایین‌دست می‌باشد که نیازمند دقت نظر بیش‌تر و مطالعه جامع‌تر بوده و تلاش می‌گردد در این پژوهش به این مهم توجه گردد. ریتز در سال ۱۹۸۲ اولین مطالعاتی را که در مورد جریان ناشی از شکست سدها صورت گرفت انجام داد. او یک مدل عددی ارایه نمود که به کمک آن می‌توانست سطح آزاد جریان آب ناشی از شکست سد را مدل سازی نماید. او این مدل عددی را بر اساس معادلات سنت-ونانت و بر روی یک کانال مستطیلی افقی و با بستر خشک ارایه نمود. از مشکلات مدل عددی ارایه شده توسط ریتز عدم در نظرگیری اصطکاک جداره‌ها و اثرات آشفتگی جریان را می‌توان نام برد (Ritter., 1982).

در ایران، بنی‌هاشمی و همکاران به بررسی پارامترهای مختلف شکست بر جریان سیل ناشی از سد پرداختند. آنان در یک مطالعه عددی به شبیه‌سازی شکست سدهای خاکی گلستان و بوستان پرداخته با کمک استفاده از مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی به نقشه‌های آب‌گرفتگی منطقه موردنظر را تولید کردند

(Banhashemi et al., 2009). خدایی و همکاران به بررسی اثر سرعت جریان و زمان فرار در مدیریت بحران سیلاب ناشی از شکست سد (مطالعه موردی سد گلستان ۱) پرداختند. آن‌ها در این مطالعه دریافتند که سرعت‌های بیش‌تر از ۲ متر در ثانیه در ترکیب با عمق‌های آب‌گرفتگی بیش‌تر از ۰/۵ متر می‌تواند همان خساراتی را ایجاد نماید که جریان‌هایی با عمق ۱ متر و سرعتی معادل ۰/۱ متر در ثانیه ایجاد می‌نماید که این امر اهمیت پارامتر سرعت و عمق پایاب را در نتایج تحلیل سیلاب را نشان می‌دهد (Khodaei et al., 2009). بلوس به بررسی آزمایشگاهی و عددی جریان ناشی از شکست سد جهت یافتن مشخصات موج مثبت پایین دست پرداخت. او در یک فلوم آزمایشگاهی مستقیم با بستر افقی و در حالت خشک و با حضور عمق پایاب و به کمک سنسورهای فشار، اندازه‌گیری عمق جریان را انجام داد. پس از اتمام آزمایش‌ها، او نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصله از مدل عددی ۲ بعدی ارایه شده توسط خود را با نتایج سایر محققین مقایسه کرد. در نهایت او نتیجه گرفت که اندازه‌گیری عمق جریان به کمک ترانسدیوسر فشار دارای دقت بالاتر، سرعت بیش‌تر و اقتصادی‌تر نسبت به روش‌های پیشین است (Bellos., 2004).

لوبوفسکی و همکاران، به بررسی دینامیکی جریان شکست سد بر روی یک بستر افقی خشک، با تاکید بر اندازه‌گیری فشار دینامیکی موج حاصله پرداختند. آنان در یک فلوم افقی با برداشت ناگهانی یک دریچه به کمک رهاسازی ناگهانی یک وزنه، شبیه سازی شکست ناگهانی یک سد را انجام دادند. آن‌ها در انتهای فلوم با قرار دادن تعدادی ترانسدیوسر فشار، فشار دینامیکی ناشی از برخورد موج به صفحه انتهایی را برداشت نمودند. علاوه بر برداشت فشار دینامیکی موج حاصل از برداشت ناگهانی دریچه، آنان با شبکه بندی کردن دیواره جانبی فلوم و به کمک عکس برداری با سرعت بالا سرعت حرکت موج و پروفیل سطح آب را نیز برداشت نمودند (Lobofsky et al., 2013). مرسولی و همکاران به مقایسه دو مدل عددی دوبعدی پرداختند. آن‌ها پس از نوشتن دو مدل عددی دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد، اقدام به مقایسه نتایج حاصله از دو مدل با شرایط واقعی نمودند. این دو مدل که بر اساس روش حجم محدود نوشته شده و به عنوان مدل عمودی و مدل افقی معرفی شده‌اند آنان دریافتند هر دو مدل نوشته شده جهت پیش‌بینی شرایط هیدرولیکی سیلاب ناشی از شکست سد کارایی لازم را داشته، با این تفاوت که مدل عمودی نوشته شده می‌تواند جزئیات بیش‌تری از پروفیل جریان آب را ارایه دهد (Marsooli et al., 2011).

مصطفی و مک گراث مدل عددی را معرفی نمودند که می‌تواند شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد را انجام دهد. در روش ارایه شده توسط ایشان، مدل به صورت موازی اقدام به حل سلول‌های مش‌بندی می‌نماید. آنان به نتیجه رسیدند که این روش حل ویژه برای افزایش سرعت محاسبات در شبکه‌های بزرگ دکارتی زمانی که

## مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی اثر وجود قوس یا تغییر در مسیر موج ناگهانی در نتیجه برداشت یک دریچه جهت شبیه‌سازی شکست سد می‌باشد، جهت انجام آزمایش‌ها این پژوهش، از یک فلوم قوس‌دار در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز استفاده گردید. در ابتدای فلوم یک دریچه کشویی از جنس پلاکسی گلاس ۱۰ میلی متر تعبیه شد که با آن فلوم رو به دو بخش بالادست و پایین دست تقسیم شد. جهت شبیه‌سازی موج ناگهانی از شکست، سیال را در ابتدای مدل آزمایشگاهی در پشت یک دریچه ذخیره شده و با برداشت ناگهانی آن شبیه‌سازی حرکت موج ناگهانی حاصل از شکست یک سد صورت پذیرفت. اختلاف ارتفاع طرفین دریچه و ضربه ناگهانی آن عامل ایجاد موج می‌باشد و انرژی موج که منجر به حرکت موج به سمت پایین دست می‌شود، بستگی به اختلاف ارتفاع طرفین دریچه و عمق پایاب دارد. جهت اندازه‌گیری سرعت موج ناگهانی و ثبت ارتفاع موج از سیستم عکس برداری با سرعت‌های بالا استفاده شد. بدین گونه که دوربین عکس برداری بر روی یک سه پایه با دید عمود بر حرکت جریان قرار گرفته و عکس برداری سریع و متوالی انجام گرفت، سپس با برداشت ناگهانی دریچه موج به سمت پایین دست تا انتهای فلوم حرکت کرد. بررسی تغییرات سرعت پیشروی موج در طول مسیر قوس، از اهداف مهم مطالعه حاضر به شمار می‌رود. به همین منظور چهار مقطع شامل مقاطع با زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و یک مقطع در مسیر مستقیم موجود در انتهای قوس، به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از مقطع زاویه ۹۰ درجه انتخاب شدند. لازم به ذکر است مقطع آخر که در مسیر مستقیم انتهایی قوس قرار گرفته است، "مقطع انتهایی" یا زاویه ۱۰۵ درجه نام‌گذاری شده است. مقادیر سرعت موج با احتساب فاصله مکانی و زمانی حرکت قله موج از کنار دریچه موج‌ساز تا رسیدن به هر یک از مقاطع مذکور، اندازه‌گیری شد. فیلم‌های ضبط شده، پیشروی موج را قبل از زمان تشکیل موج تا بعد از لحظه رسیدن آن به انتهای مسیر موردنظر برداشت کرده‌اند؛ بنابراین با تبدیل فیلم هر آزمایش به فریم‌های عکس و ثبت زمان وقوع آن‌ها، اختلاف زمانی رسیدن قله یا پیشانی موج از ابتدای مسیر تا هر یک از مقاطع و در نتیجه سرعت پیشروی تا مقطع موردنظر قابل محاسبه می‌باشد. علاوه بر این مشاهده حرکت آهسته پیشروی موج ناشی از شکست سد، امکان بررسی تغییرات نیم-رخ موج در طی مسیر قوس میسر می‌شود. با کمک زمانی که هر عکس گرفته شده و قرائت محل پیشانی موج درون فلوم سرعت حرکت موج را در هر آزمایش محاسبه شد. جهت مشخص کردن پروفیل حرکت جریان در هر عکس از نرم‌افزار Engauge Digitizer استفاده شد. به کمک این نرم‌افزار و با مشخص کردن نقاط محوری

فقط یک بخش کوچک از سلول‌های خیس موجود باشد کارایی زیادی دارد. باید اضافه نمود این حالت در لحظات اولیه حرکت سیلاب اتفاق می‌افتد. به علاوه آنان نتایج حاصله از مدل خود را با نتایج خروجی از نرم‌افزار CCHE2D-FLOOD مقایسه کرده‌اند (Mostafa and McGrath., 2012).

نگویان و وستون به شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد دالاس پرداختند. آنان در این مطالعه موردی علاوه بر بررسی هیدرولیکی جریان، به بررسی هیدرولوژیکی جریان حاصله از شکست سد پرداخته و اثرات این شکست سد را بر منابع آب مورد بررسی قراردادند. باید اضافه نمود آنان در این مطالعه از نرم‌افزارهای RAS-HEC و HECGeoRAS استفاده نمودند (Nguyen and Weston., 2013).

نادرخانلو و همکاران به بررسی اثر شکست سد در انتقال بار رسوب در یک بستر قابل شستشو پرداختند. آن‌ها به کمک نرم‌افزار Mike 3 توانستند به شبیه‌سازی موج ناشی از شکست سد پرداخته و به پیش‌بینی قابل قبولی از روند رسوب‌گذاری و فرسایش در یک بستر قابل شستشو دست یابند. نتایج مدل عددی ارائه شده نتایج قابل قبولی با داده‌های مدل فیزیکی انجام شده در دانشگاه UCL بلژیک نشان داد. (Naderkhanloo et al., 2017).

به طور کلی حجم وسیعی از مطالعات صورت گرفته در مورد موج مثبت پایین دست، موج منفی بالادست، شکل موج، اندازه‌گیری سطح آب و به طور کلی سینماتیک جریان در حالت بستر خشک و با حضور عمق پایاب و در کانال مستقیم انجام گرفته است. با توجه به اینکه جایگاه سدهای مخزنی به طور معمول در دره‌های تنگ مناطق کوهستانی می‌باشد، موج شکست با عبور از مناطق پر پیچ و خم وارد دشت‌های پایین دست می‌گردد. در این مطالعه به بررسی سرعت و ارتفاع موج ناشی از شکست سد در مسیر موج مثبت پایین دست و در مسیرهای غیرمستقیم پرداخته می‌شود که از نوآوری‌های مطالعه موجود می‌باشد، به بیانی دیگر عمده مطالعات صورت گرفته همگی در مقطع مستقیم بوده و به جز اندک مطالعاتی همگی تنها به اثرات سطح آب بالادست پرداخته‌اند، اما در این مطالعه اثر وجود و یا عدم وجود عمق پایاب در اندازه‌های مختلف بر روی پروفیل جریان و سرعت موج در مقاطع مختلف از یک قوس ۹۰ درجه ملایم پرداخته شده است. به گونه‌ای که به کمک سیستم تصویربرداری سریع از حرکت موج تصویربرداری شده و سرعت جریان محاسبه می‌گردد، باید اضافه نمود این تکنیک در محدود تحقیقاتی مانند لوبوفسکی و همکاران، در کانال مستقیم انجام گرفته است، اما تاکنون در مقاطع غیرمستقیم تحقیقی انجام نشده است. با توجه به مطالب گفته شده، هدف از این تحقیق بررسی آزمایشگاهی اثر وجود قوس در مسیر جریان، در سطوح آب بالادست و پایین دست بر روی سرعت و ارتفاع موج حاصل از شبیه‌سازی شکست سد می‌باشد.

با مختصات طولی و عرضی مشخص مختصات هر نقطه دلخواه، به‌عنوان خروجی از نرم‌افزار استخراج گردید. در مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده شکست سد، هر تک موج، از برداشت ناگهانی دریچه‌ای ایجاد می‌گردد که ارتفاع و در واقع انرژی اولیه آن وابسته به اختلاف ارتفاع سطح آب در طرفین دریچه می‌باشد. در مطالعه حاضر از رقوم سطح آب مخزن (سراب) ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر و رقوم پایین‌دست دریچه (پایاب) معادل صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر جهت انجام آزمایش‌های موج استفاده شد. در راستای برآوردن اهداف مطالعه، سطوح آب پایاب و سراب متفاوت به شرح جدول یک تنظیم شد و سرعت هر موج در نقاط موردنظر اندازه‌گیری شد. سناریو کلی آزمایش‌های انجام‌گرفته در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. در ادامه، مراحل انجام آزمایش‌ها به‌صورت تفکیکی و مرحله به مرحله ارایه می‌گردد.

ابتدا در حالت بسته بودن دریچه، ارتفاع و حجم آب موردنظر در پشت دریچه تنظیم شده و صفحه‌ای به ابعاد ۲۰ سانتی‌متر عرض و ۶۵ سانتی‌متر ارتفاع و به شکل عمودی در محل زاویه موردنظر جهت مشخص نمودن لحظه رسیدن پیشانی جریان قرار گرفت. لازم به ذکر است ارتفاع آب پشت دریچه از کم‌ترین مقدار خود (۱۵ سانتی‌متر) آغاز شده و تا حداکثر خود (۵۵ سانتی‌متر) ادامه می‌یابد.

سطح آب پایین‌دست به کمک یه شیر ورودی آب و شیر خروجی انتهایی فلوم تنظیم شد. مقادیر سطح آب پایین‌دست برابر با صفر، ۵ و

۱۰ سانتی‌متر بودند.

یک دوربین دیجیتال از طریق عکس‌برداری سریع آماده به تصویربرداری از تمامی مسیر جریان شد.

پس از اطمینان از آماده‌سازی همه مراحل، دریچه به‌صورت ناگهانی برداشت شده تا موج حاصل از آن به صفحه برخورد کرده و به کمک بررسی تصاویر لحظه دقیق برخورد پیشانی جریان به صفحه مشخص گردید.

پس از ذخیره آزمایش قبل در عمق پایاب صفر یا بستر خشک، مجدداً تمامی مراحل فوق، با پایاب ۵، و پس از آن ۱۰ و ۱۵ سانتی-متر تکرار می‌گردد.

با پایان یافتن متغیرهای عمق پایین‌دست، عمق آب بالادست تغییر کرده و مجدداً مراحل فوق تکرار می‌گردد. اعماق بالادست از ۱۵ سانتی‌متر آغاز شده و با فواصل ۱۰ سانتی‌متری تا ۵۵ سانتی‌متر ادامه می‌یابند.

پس از پایان یافتن اعماق آب مختلف در بالادست، صفحه عمودی از مقطع با زاویه صفر درجه به مقطع بعدی در زاویه ۴۵ درجه منتقل شده و مراحل فوق از سر گرفته شد. پس از پایان اندازه‌گیری در این مقطع، صفحه به زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ منتقل شده و تمام مراحل فوق مجدداً تکرار می‌گردد.

تصویری از فلوم آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- سناریو کلی آزمایش‌ها

ردیف	سطح آب بالادست (سانتی‌متر)	سطح آب پایین‌دست (سانتی‌متر)	زاویه اندازه‌گیری	تعداد آزمایش‌ها
۱	۱۵	۰-۵-۱۰	۰-۴۵-۹۰-۱۰۵	۱۲
۲	۲۵	۰-۵-۱۰-۱۵	۰-۴۵-۹۰-۱۰۵	۱۶
۳	۳۵	۰-۵-۱۰-۱۵	۰-۴۵-۹۰-۱۰۵	۱۶
۴	۴۵	۰-۵-۱۰-۱۵	۰-۴۵-۹۰-۱۰۵	۱۶
۵	۵۵	۰-۵-۱۰-۱۵	۰-۴۵-۹۰-۱۰۵	۱۶
				۷۶

تعداد کل آزمایش‌ها



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی.

## نتایج و بحث

### اثر زاویه بر روی حداکثر ارتفاع موج در سطوح مختلف پایاب و سرآب

به منظور تحلیل رفتار هر یک از امواج به لحاظ وضعیت شکست امواج در حین پیشروی و استخراج ارتفاع و سرعت پیشروی آن‌ها در طول مسیر نیز، فیلم‌های ضبط شده حرکت موج در حین آزمایش و پردازش تصاویر فریم هر فیلم مورد ملاحظه قرار گرفت.

با توجه به مشاهدات به عمل آمده و مطالعات انجام شده توسط محمد (Mohamed., 2008) و به دلیل بازه گسترده ارتفاع سطح آب مخزن معلوم گردید که یک موج بسته به اختلاف ارتفاع سطح آب طرفین دریچه و عمق پایاب یا به عبارت بهتر بسته به انرژی اولیه آن، پیشروی موج در طول مسیر ممکن است به یکی از حالات شکسته شده، شکنا و یا ناشکنا صورت پذیرد. به طوری که در شرایط اختلاف قابل توجه عمق سرآب و پایاب به دلیل انرژی اولیه زیاد، در واقع فرصتی برای تشکیل بدنه موج پس از عبور از زیر دریچه وجود نداشته و در همان ابتدا پیش از ورود موج به مسیر قوسی، توده شکسته شده موج تشکیل شده و به حرکت خود ادامه می‌دهد. با افزایش سطح آب پایین دست یا عمق پایاب، فرصت بیش تری جهت تشکیل موج و افزایش ارتفاع آن تا لحظه شکست به وجود آمده و پس از شکست، توده قارچی شکل تشکیل شده و به حرکت خود ادامه می‌دهد. این دسته از امواج که در حین حرکت و در اثنای مسیر در حال شکست می‌باشند، در اصطلاح شکنا اطلاق می‌گردد (Mohamed., 2008). علاوه بر این، در شرایطی که غیر از بالا بودن رقوم سطح پایاب، رقوم سرآب رو به کاهش می‌گذارد و میزان اختلاف ارتفاع سطح آب طرفین دریچه به اندازه شرایط تشکیل امواج شکسته شده و شکنا نیست، انرژی اولیه موج ورودی به مسیر قوسی نیز چندان قابل توجه نبوده و افزایش ارتفاع موج در حین پیشروی به اندازه‌ای نیست که منجر به شکست شود. بنابراین پیشروی موج با حفظ شکل نیمرخ متقارن سطح آب آن همراه بوده و این دسته به "امواج ناشکنا" موسوم‌اند. به منظور ملاحظه دقیق تر طبقه‌بندی امواج مورد آزمایش به لحاظ وضعیت شکست، جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به اطلاعات قرائت شده از عکس فریم‌های هر فیلم، شکل نیمرخ سطح آب موج در هر محدوده از مسیر قوس در شکل ۳ ترسیم شده است. بنابر اطلاعات به دست آمده، حداکثر ارتفاع سطح موج در هر یک از مقاطع قوس قابل استخراج بوده و بر این اساس نیمرخ عمومی امواج در طول کل مسیر قوسی ۹۰ درجه ملایم ترسیم شده است. شکل ۳ نتایج حاصل را نشان می‌دهد. محور افقی هر یک از نمودارها بیانگر مقاطع با زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ درجه در طول قوس بوده و محور قائم نمودارها شامل حداکثر رقوم سطح آب موج

پیش‌رونده در هر یک از مقاطع یاد شده در طول قوس می‌باشد. از این رو نحوه تغییرات ارتفاع هر موج و هر یک از دسته‌های امواج اشاره شده در طول قوس معلوم می‌گردد. بدین ترتیب موقعیت نقاط بحرانی به لحاظ آب‌گرفتگی ناشی از سیلاب شکست سد در طول مسیر قوسی قابل تشخیص بوده و نتایج حاصل در ایده‌های طراحی و اجرا کاربرد دارد. منظور از نقطه بحرانی، نقطه‌ای است که سیلاب ناشی از برداشت ناگهانی دریچه در بالاترین ارتفاع خود قرار دارد. لازم به ذکر است جهت تحلیل بهتر نتایج و دریافت دلایل کاهش یا افزایش عمق آب در مقاطع مختلف یک قوس ۹۰ درجه ملایم نیاز است هیدرولیک امواج و اثرات وجود قوس بر هیدرولیک جریان توامان مدنظر قرار گیرد. با دقت در نمودارهای مختلف شکل ۳ می‌توان دریافت موج حاصله از عمق سرآب ۱۵ سانتی‌متر و پایاب ۱۰ سانتی‌متر در طبقه‌بندی موج‌های ناشکنا قرار می‌گیرد. به صورت کمی می‌توان بیان نمود عمق آب در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ به ترتیب ۱۴/۵۲، ۱۴/۶۴، ۱۴/۷۳ و ۱۴/۸۰ سانتی‌متر می‌باشند. بدین معنا که از عمق آب از مقطع یک در زاویه صفر درجه تا انتهای کانال و مقطع چهارم که در زاویه ۱۰۵ درجه قرار گرفته است فقط در حدود ۲ درصد افزایش داشت که مقداری ناچیز بوده و برای این گونه امواج قابل قبول می‌باشد.

گونه دیگری از امواج ناشکنا بوده که در طول کانال به دلایل شکل هندسی کانال، تغییر شیب و یا رسیدن موج به عمق و انرژی حادی خود شکسته شده و مقداری از انرژی خود را به این صورت مستهلک می‌کند. به طور کلی این امواج تا رسیدن به نقطه شکست افزایش عمق داشته و پس از شکسته شدن رفته‌رفته کاهش عمق پیدا می‌کند. نقطه شکست نقطه‌ای است که تا آن مقطع، ارتفاع و سرعت موج رفته رفته افزایش یافته و بیش تر می‌گردد. با رسیدن به این نقطه انرژی موج به حداکثر خود رسیده و پس از آن به اصطلاح فرو می‌ریزد. نمونه‌ای از امواج شکنا، موج تشکیل شده در سرآب ۱۵ و پایاب صفر سانتی‌متر است. شکل ۲، الف، ب و ج به ترتیب حالت قارچی شکل موج، لحظه شکست و حالت پس از شکسته شدن را نشان می‌دهند.

همان گونه که در شکل ۳ مشخص است، تک موج حاصله از برداشت ناگهانی دریچه در عمق سرآب ۱۵ و پایاب صفر سانتی‌متر در طول کانال، افزایش عمق پیدا کرده و با افزایش نزدیک به ۹ درصدی، عمق آب از مقدار ۴/۷۱ در مقطع یک به مقدار ۶/۰۲ در مقطع سه می‌رسد. در این مقطع موج شکسته شده و انرژی مازاد خود را به علت این پدیده مستهلک می‌کند. پس از شکست موج عمق آب در طول کانال کاهش پیدا کرده و در مقطع چهارم که در زاویه ۱۰۵ درجه واقع است با ۱۰ درصد کاهش به ۵/۴۰ می‌رسد.

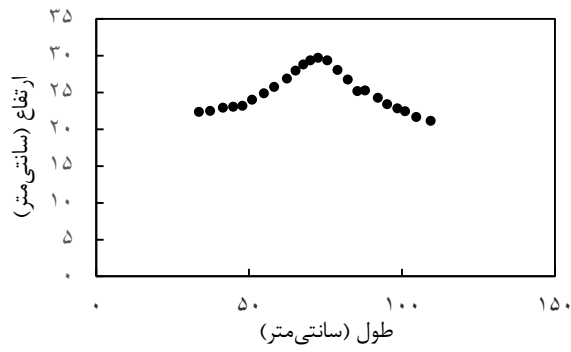
جدول ۲- طبقه‌بندی امواج تشکیل شده در تمامی آزمایشات

ردیف	سرآب (سانتی‌متر)	پایاب (سانتی‌متر)	نوع موج
۱	۱۵	۰	شکنا
		۵	ناشکنا
		۱۰	ناشکنا
۲	۲۵	۰	شکسته شده
		۵	شکنا
		۱۰	شکنا
۳	۳۵	۱۵	شکنا
		۰	شکسته شده
		۵	شکنا
۴	۴۵	۱۰	شکنا
		۱۵	شکنا
		۰	شکسته شده
۵	۵۵	۵	شکنا
		۱۰	شکنا
		۱۵	شکنا

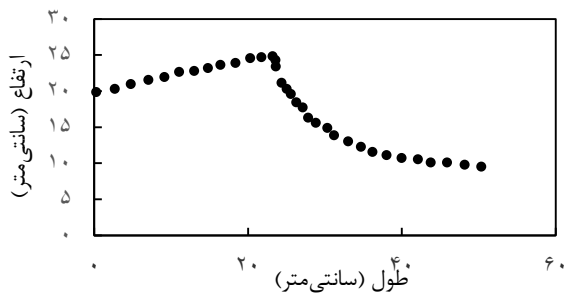
دریچه خارج شده و دارای شکل مشخص قارچی شکل نمی‌باشند. این امواج در طول کانال کاهش عمق پیدا کرده و هیچ‌گاه شکسته نمی‌شوند. به‌عنوان نمونه موج با سطح سرآب ۴۵ و پایاب صفر سانتی‌متر از طیف امواج شکسته شده می‌باشد. اعماق این موج در مقاطع یک، دو، سه و چهار به ترتیب ۱۸/۳۷، ۱۰/۹۱، ۷/۹۰ و ۷/۹۱ بوده که سطح آب در انتهای کانال نسبت به ابتدای آن در حدود ۵۷ درصد کاهش داشت. لازم به ذکر است به علت بسته بودن انتهای کانال، در برخی موارد عمق آب در مقطع چهارم به مقدار ناچیزی افزایش داشت که این افزایش به علت برگشت آب ناشی از بسته بودن انتهای کانال و کوچک بودن خروجی تخلیه آب در انتهای فلوم آزمایشگاهی می‌باشد. به علت کوچک بودن خروجی امکان تخلیه ناگهانی موج وجود نداشته و باعث برگشت آب و افزایش ناچیز عمق آب در مقطع چهارم می‌گردد. در شکل ۳ پروفیل طولی امواج تشکیل شده ناشی از برداشت ناگهانی دریچه در سطوح مختلف پایاب و سرآب در مسیر کانال قوسی شکل نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که اعداد درون اشکال از سمت چپ به ترتیب عمق آب بالادست و عمق پایاب را بر واحد سانتی‌متر نشان می‌دهند.

اما به علت وجود قوس ۹۰ درجه در بیش‌تر موارد موج‌های شکنا قبل از رسیدن به راس قوس و معمولاً در زوایای ۳۵ تا ۴۰ درجه شکسته شده و بعد از آن با کاهش عمق روبه‌رو می‌شوند. زیرا وجود قوس در مسیر جریان باعث تغییر در گرادیان عرضی و طولی فشار شده و سرعت موج را افزایش می‌دهد. این نتایج با نتایج مستخرج از مطالعات قدو و همکاران (Ghado et al., 2012) هم‌خوانی دارد. افزایش سرعت موج انرژی موج را افزایش داده و رسیدن به مقدار حدی شکست را به تعجیل می‌اندازد. با رسیدن به مقدار حدی عمق، موج شکسته شده و دچار کاهش ناگهانی عمق آب پس از آن می‌شود. باید اضافه نمود موج در ابتدای مسیر شکل قارچی شکل خود را حفظ کرده و در طول کانال افزایش عمق پیدا می‌کند. پس از موج حالت نوک تیز به خود گرفته و با پیشروی در طول کانال، وجه جلویی موج به سمت بالادست متمایل شده تا اینکه در یک نقطه به شکل عمودی در می‌آید. پس از آن تیزی موج به سمت پایین دست متمایل شده و پس از مدتی فرو می‌ریزد.

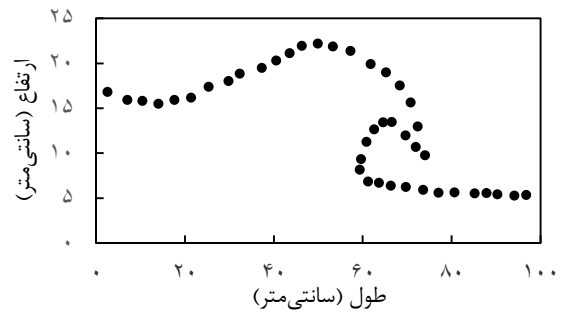
گونه‌ای دیگر از امواج تشکیل شده در مجموعه آزمایشات محققین این پژوهش، امواج شکسته شده می‌باشند. این امواج به علت اختلاف زیاد اعماق بالادست و پایین دست به صورت یک توده کف‌آلود از زیر



(الف)

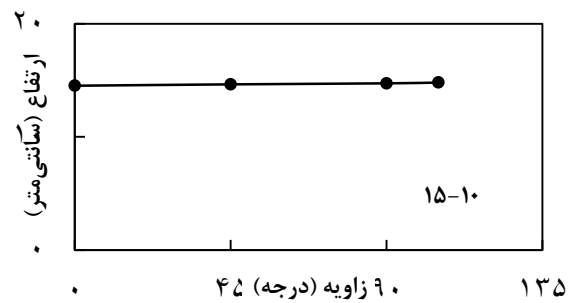
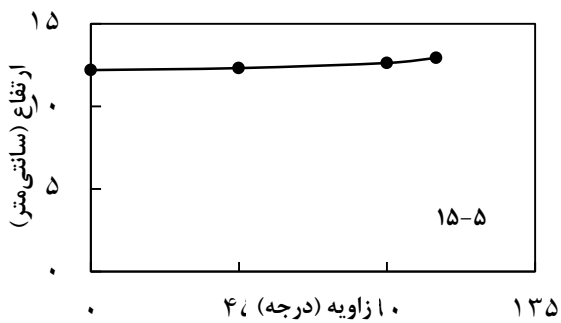
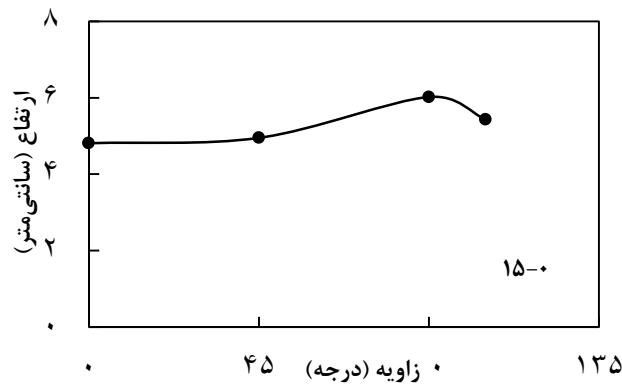


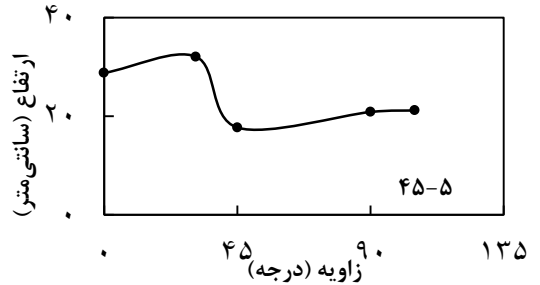
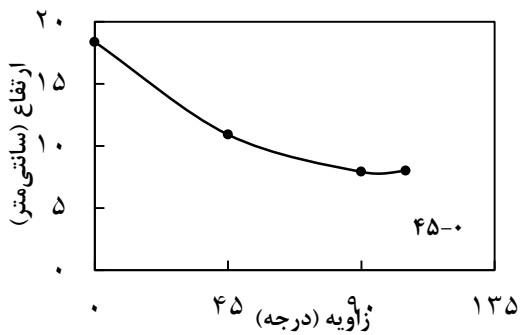
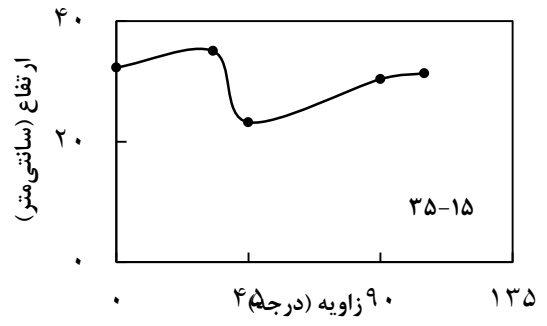
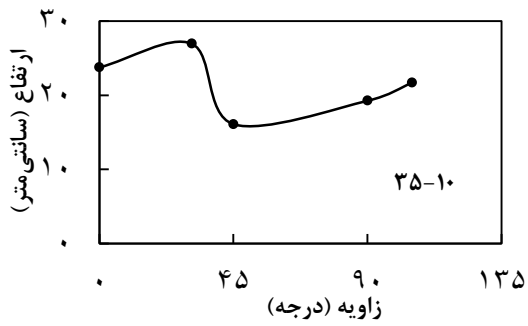
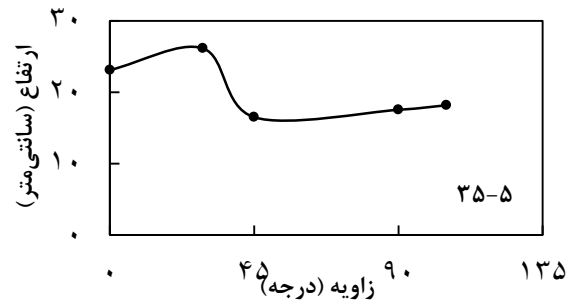
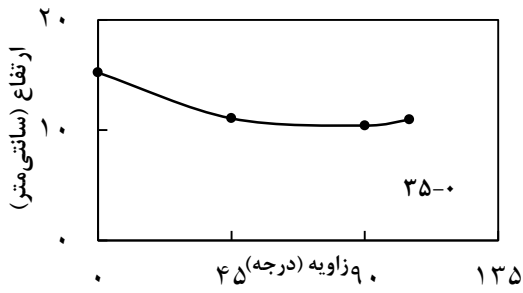
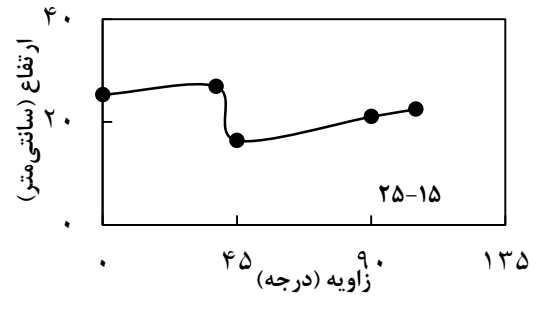
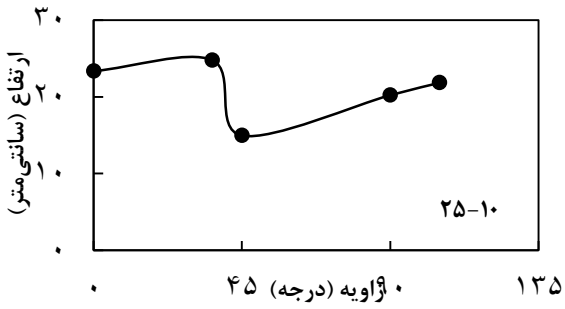
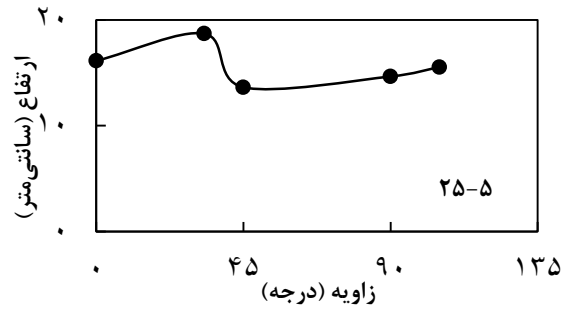
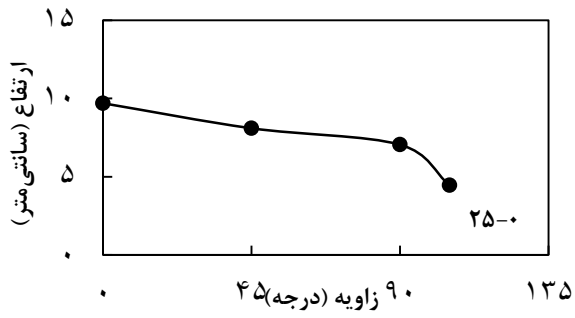
(ب)



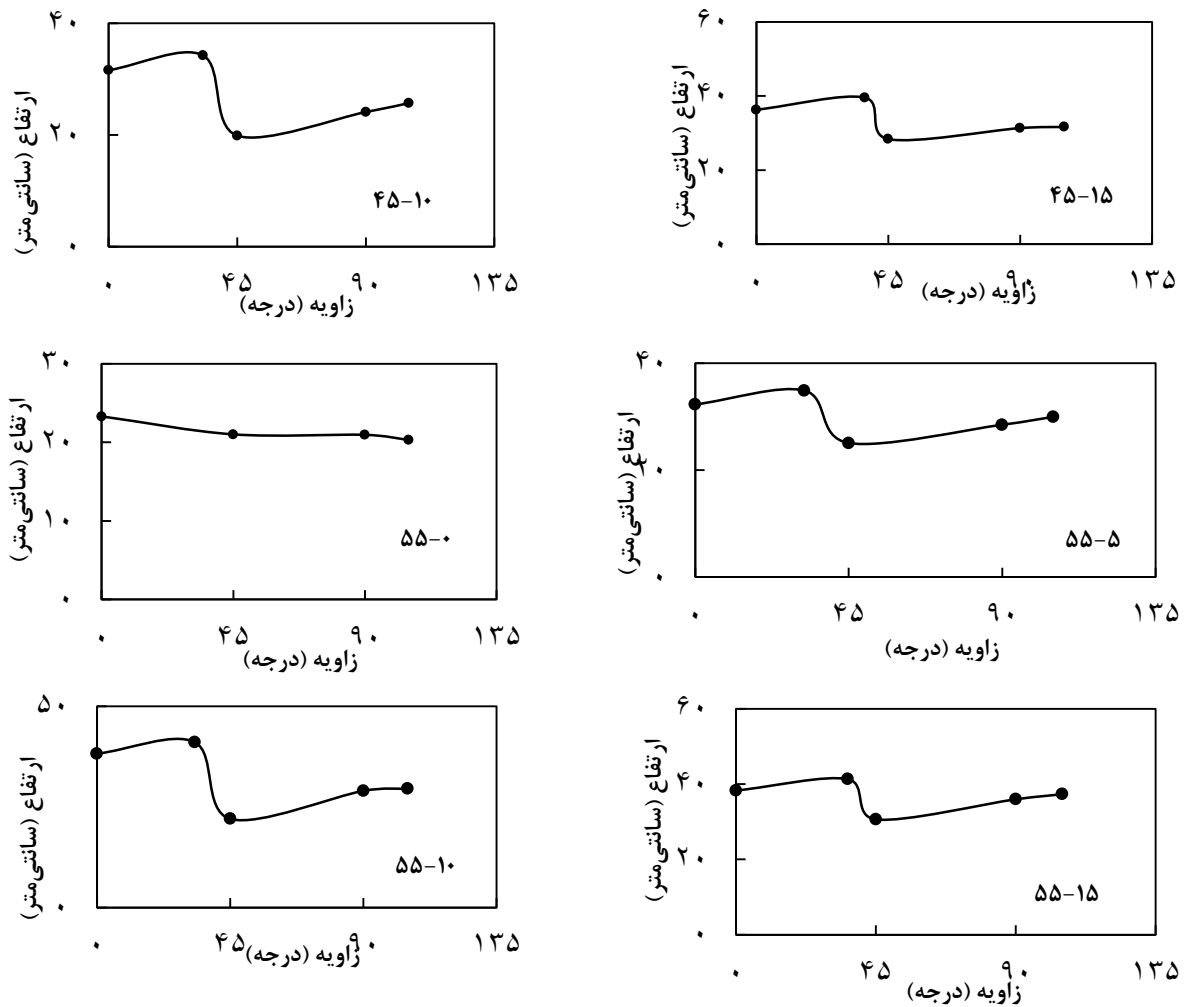
(ج)

شکل ۲- حالت های مختلف شکل موج. الف) قارچی شکل. ب) لحظه شکست. ج) پس از شکست









شکل ۳ - پروفیل طولی امواج تشکیل شده ناشی از برداشت ناگهانی دریچه در سطوح مختلف پایاب و سرآب در مسیر کانال

می‌باشد که تخریب و خسارات ناشی از پدیده شکست سد ناشی از نیروی این امواج بوده که خود بسته به سرعت و عمق توده جریان ناشی از حرکت موج دارد و مقدار سرعت در مقایسه با ارتفاع موج از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. علاوه بر این پیش‌بینی زمان رسیدن موج به یک محدوده مهم مانند نقاط استراتژیک و یا مناطقی با ترافیک جمعیتی بالا، از جمله نکات اساسی جهت ارزیابی راهکارهای کنترل و کاهش تخریب ناشی از شکست سد می‌باشد و به همین دلیل، در این مطالعه، اندازه‌گیری سرعت در مقاطع مختلف موردنظر بوده است. تاکنون بررسی دینامیک حرکت موج ناشی از شکست سد در مسیرهای مستقیم بررسی شده است. این در حالی است که اغلب رودخانه‌های پایین‌دست سدها به‌ویژه رودخانه‌های آبرفتی اراضی مشرف به دریا، دارای مسیرهای قوسی هستند. به همین دلیل تمرکز مطالعه حاضر بر روی بررسی تغییرات سرعت موج ناشی از شکست سد در طول مسیر قوس ملایم ۹۰ درجه می‌باشد. همان‌گونه که در قسمت‌های پیشین اشاره شد در زوایای صفر

### اثر اعماق مختلف پایاب و سرآب در قوس بر روی سرعت موج در زوایای مختلف

به‌طور کلی انرژی موج جهت طی کردن مسیر جریان، با فرض در نظر نگرفتن اتلاف‌های ناشی از اصطکاک بستر، حاصل اختلاف انرژی اولیه موج و انرژی در حین شکست می‌باشد. آنچه به‌طور عمده دلیل شکست موج تلقی می‌گردد، ناشی از رفتار انتقالی موج بوده که منجر به افزایش سرعت اوربیتالی ذرات موج در مقایسه با سرعت سطحی موج و در نهایت بر هم خوردن تقارن موج و بالاخره شکست می‌باشد. از این رو سرعت پیشروی موج از آغاز حرکت تا هنگام شکست افزایش و پس از آن رو به کاهش می‌گذارد. چنین روند تغییراتی راجع به ارتفاع موج قبل و بعد از نقطه شکست نیز رایج می‌باشد (Davidson and Greenwood., 2000). به همین سبب محل وقوع شکست که ناشی از ارتفاع موج و عمق پایاب می‌باشد، متوسط سرعت پیشروی موج در طول یک بازه و همچنین ارتفاع توده ناشی از شکست، اثر می‌گذارد. اهمیت بررسی سرعت موج از این نظر

قسمت از میدان، در امتداد دیواره بیرونی گرادیان طولی منفی و در امتداد دیواره داخلی گرادیان طولی مثبت حاکم است. در نتیجه، دو عامل جریان ثانویه و گرادیان طولی فشار در این حالت به‌عنوان عوامل همسو عمل کرده و باعث افزایش بیش‌تر سرعت در ناحیه نزدیک دیواره بیرونی می‌شوند (Safarzade., 2005). در نهایت می‌توان بیان داشت نتایج این بخش از پژوهش مورد تایید مطالعات پیشین نیز قرار دارد. به‌عنوان نمونه، مقادیر سرعت در زوایای مختلف و مقادیر متفاوت عمق پایاب در سطح آب بالادست ۳۰ سانتی‌متر در جدول ۳ آورده شده است. بالادست ۳۰ سانتی‌متر در جدول ۳ آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است بیشینه سرعت در راس قوس یا زاویه ۴۵ درجه رخ داده است به‌علاوه در زاویه صفر درجه روند تغییرات سرعت در طول فلوم در قیاس با سایر اعماق پایین‌دست کم‌تر می‌باشد. حدکثر تغییرات سرعت در زوایای مختلف در عمق پایاب ۱۵ سانتی‌متر رخ داده است. ذکر این نکته ضروری است که سرعت به‌دست آمده حاصل اثر هم‌زمان رفتار غیرخطی موج ناشی از شکست سد و قوس می‌باشد که نتایج استخراج شده، چگونگی این اثرات را بهتر تشریح می‌کند. بدین معنا که حضور جریان در مسیرهای غیرمستقیم به علت وجود جریان‌های ثانویه و گردابی دارای هیدرولیک پیچیده‌ای بوده و بررسی دلایل کاهش یا افزایش مشخصات هیدرولیکی جریان نظیر سرعت و عمق را مشکل می‌کند. از طرف دیگر تحلیل حرکت موج ناشی از شکست سد، با توجه به غیرماندگاری تا حدودی پیچیده می‌باشد. حال در این پژوهش به‌طور هم‌زمان هیدرولیک موج غیرماندگار شکست سد در قوس‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

درجه، ۴۵ درجه، ۹۰ درجه و ۱۰۵ درجه سرعت موج اندازه‌گیری شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است در همه موارد مقادیر سرعت موج در زاویه صفر درجه از تمامی سرعت‌های موج پیش‌رونده در زوایای ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ درجه کم‌تر می‌باشد. به بیانی دیگر سرعت موج از محل باز شدن ناگهانی دریچه تا رسیدن به ابتدای قوس دارای سرعت کم‌تری بوده و پس از ورود به قوس سرعت آن افزایش می‌یابد. دلیل این پدیده را در این امر می‌توان جستجو کرد که با ورود جریان به داخل قوس و به دلیل گرادیان طولی فشار ناشی از نیروی جانب مرکز (در بازه کوتاهی از ورودی قوس، به خاطر تغییر ناگهانی انحنای، در امتداد جداره داخلی کاهش فشار و در امتداد جداره خارجی افزایش فشار اتفاق می‌افتد)، سرعت موج افزایش یافته و به طرف دیواره داخلی منتقل می‌شود. در قسمت کوتاهی از ابتدای قوس، گرادیان فشار طولی منفی در نزدیکی دیواره داخلی رخ داده و باعث شتاب گرفتن ذرات آب می‌شود و در مقابل، در نزدیکی قوس بیرونی با گرادیان فشار طولی مثبت همراه بوده و سرعت سیال در این ناحیه کم می‌شود روند مزبور تا زوایای بین ۲۰ و ۳۰ درجه ادامه داشته و بعد از این مقطع، حداکثر سرعت به نزدیکی دیواره بیرونی منتقل می‌شود. علت این پدیده، تولید جریان‌های ثانویه در داخل مقاطع عرضی است، به‌طوری‌که این جریان‌ها که در نزدیک سطح آب به طرف دیواره بیرونی و در نزدیکی بستر به طرف دیواره داخلی برقرار هستند، بر گرادیان طولی فشار غالب شده باعث انتقال عرضی مومنت طولی جریان و یا به عبارتی باعث باز توزیع آن می‌شوند. در مقاطع انتهایی قوس سرعت در نزدیکی دیواره بیرونی افزایش می‌یابد که علت این پدیده، مشابه ورودی قوس، تاثیر گرادیان عرضی فشار است که در این

جدول ۳- مقادیر سرعت در زوایای مختلف و مقادیر عمق پایاب متفاوت در سطح سرآب ۳۰ سانتی‌متر

عمق پایاب (cm)		عمق سرآب (cm)		سرعت موج پیش‌رونده (m/s)	
عمق پایاب (cm)	عمق سرآب (cm)	زاویه صفر درجه	زاویه ۴۵ درجه	زاویه ۹۰ درجه	زاویه ۱۰۵ درجه
۰	۳۰	۱/۹۲	۲/۰۳	۱/۹۴	۱/۹۶
۵	۳۰	۱/۷۱	۲/۱۹	۱/۸۵	۱/۷۷
۱۰	۳۰	۱/۲۳	۲/۰۸	۱/۷۸	۱/۶۵
۱۵	۳۰	۱/۰۸	۱/۶۸	۱/۷۷	۱/۶۲

رخ داده است، با توجه به اینکه بعد از شکست موج سرعت و انرژی موج کاهش می‌یابد، در بیش‌تر موارد قوس ۹۰ درجه ملایم بعد از عبور از زاویه ۴۵ درجه شکسته شده و از سرعت آن کاسته می‌شود. با نزدیک شدن موج به ناحیه قوسی شکل، رفتار انتقالی ذرات موج به رفتار نوسانی آن‌ها غالب آمده و در نتیجه اندرکنش موج با قوس شدت می‌یابد. همچنین به دلیل پدیده خزش، سرعت انتشار و طول موج کاهش یافته، ارتفاع موج به تدریج افزایش می‌یابد و در نهایت تیزی موج (نسبت ارتفاع به طول موج) افزایش یافته و ضمن نزدیک شدن سرعت

از دیگر نکات قابل توجه در شکل ۴، محل وقوع حداکثر سرعت موج می‌باشد. هرچند با توجه به تعدد آزمایش‌ها و هیدرولیک پیچیده امواج نمی‌توان به‌طور قطع یک زاویه را به‌عنوان محل قطعی رخداد حداکثر سرعت موج مشخص نمود، اما با نگاهی کلی می‌توان دریافت در زاویه ۴۵ درجه به‌طور معمول بیش‌ترین مقدار سرعت موج پیش‌رونده مشاهده شده است. از دو جنبه می‌توان دلیل این پدیده را توضیح داد. نخست اینکه با توجه به مطالعات سوزه‌پور و همکاران (۱۳۹۴) حداکثر سرعت مطلق جریان در زاویه ۴۰ درجه قوس تند

کرده و موج پیش‌رونده تا رسیدن به آخرین مقطع اندازه‌گیری سرعت (زاویه ۱۰۵ درجه) بر سرعت خود می‌افزاید.

### سرعت موج در مقابل پارامتر بی بعد شده سطح آب پایین دست به بالادست

در شکل ۵ سرعت موج در مقابل پارامتر بی بعد شده سطح آب پایین دست به بالادست نشان داده شده است. در سطح پایاب صفر، تمامی این نسبت‌ها برابر با صفر بوده که بر روی محور عمودی شکل زیر به خوبی مشخص هستند. در سطح پایاب ۵ سانتی‌متر این نسبت در مقابل تمامی اعماق بالادست از ۰/۰۹ تا ۰/۵، در سطح پایاب ۱۰ سانتی‌متر از ۰/۱۸ تا ۰/۶۷ تغییرات داشته و برای عمق پایاب ۱۵ سانتی‌متر روند تغییرات نسبت پایاب به سرآب از ۰/۲۷ تا ۰/۷۵ تغییرات داشته‌اند. همان‌گونه که مشخص است در زاویه صفر درجه، یعنی تا رسیدن به نقطه‌ای که جریان وارد مسیر قوسی شکل می‌شود اختلاف چندانی در سرعت‌های امواج در تمامی حالات نسبت پایاب به سرآب مشاهده نمی‌شود. درحالی‌که در باقی زوایا که موج تحت تاثیر قوس قرار گرفته است این مقادیر اختلاف حداکثر و حداقل کاملاً مشهودتر می‌باشد. با نگاهی کمی به مقادیر ابتدایی و انتهایی مجموعه مقادیر سرعت در هر مقطع می‌توان گفت که در شرایط برقراری کم-ترین مقدار سطح پایاب به سرآب نسبت به بیش‌ترین آن، مقادیر سرعت در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ درجه قوس ملایم، به ترتیب، ۳۳، ۵۸، ۵۷ و ۶۲ درصد کاهش داشته است. پس می‌توان بیان نمود افزایش سطح پایاب اثر چشم‌گیرتری نسبت به وجود قوس در مسیر جریان بر کاهش سرعت موج ناشی از شکست سد داشت. این نکته یادآور می‌شود که اجرای سد در شرایط برقراری پایاب مناسب مانند پایین آوردن کف حوضچه آرامش، در شرایط مختلف بهره‌برداری، میزان تخریب و دامنه آسیب را کاهش می‌دهد و در مقایسه با خسارات جانی و مالی ناشی از پدیده شکست سد، صرفه اقتصادی دارد پس وجود یک سطح پایاب معنادار در مقابل عمق آب بالادست به کاهش سرعت حرکت سیلاب کمک بیش‌تری می‌کند.

### نتیجه‌گیری

اختلاف عمق آب در امواج ناشکنا در ابتدا و اختلاف کانال ناچیز بوده (۲ درصد) و در این‌گونه امواج عمق آب در طول کانال روند افزایشی ناچیزی دارد. در طیف موج‌های شکنا، پدیده شکست معمولاً در زوایای ۲۵ تا ۳۵ درجه رخ داده و پس از شکست به علت تلفات انرژی عمق آب و سرعت موج کاهش چشمگیری دارد. در سری موج‌های شکسته شده، عمق آب در ابتدای کانال حداکثر بوده و تا انتهای کانال با شیب کاهشی قابل ملاحظه ادامه می‌یابد. با توجه به فزونی یافتن سرعت در راس قوس و بیش‌تر بودن سرعت

اوربیتالی ذرات به سرعت انتشار، موج می‌شکند. به‌طور کلی سرعت حرکت امواج تا رسیدن به نقطه شکست سرعت افزایش و بعد از آن کاهش پیدا می‌کند. دلیل این پدیده را می‌توان از طریق کاهش قابل توجه انرژی موج بعد از شکست بیان نمود؛ زیرا بخش قابل توجهی از انرژی اولیه موج صرف شکست می‌شود؛ یعنی انرژی ادامه مسیر برابر است با اختلاف انرژی اولیه و انرژی شکست. به‌علاوه باید مقادیر اتلاف انرژی مسیر و تنش‌ها و اصطکاک بستر و دیواره را لحاظ نمود. همان‌گونه که مشخص است سرعت از زاویه صفر درجه که همان ابتدای مسیر قوسی شکل هست تا ۴۵ درجه که همان راس قوس هست افزایش پیدا کرده و بعد از آن تا رسیدن به زوایای ۹۰ و ۱۰۵ روند کاهشی به خود گرفت؛ اما این کاهش آنقدر نبوده تا سرعت معادل زاویه صفر درجه برسد و در اغلب موارد مقدار چشم‌گیری از آن بیش‌تر است.

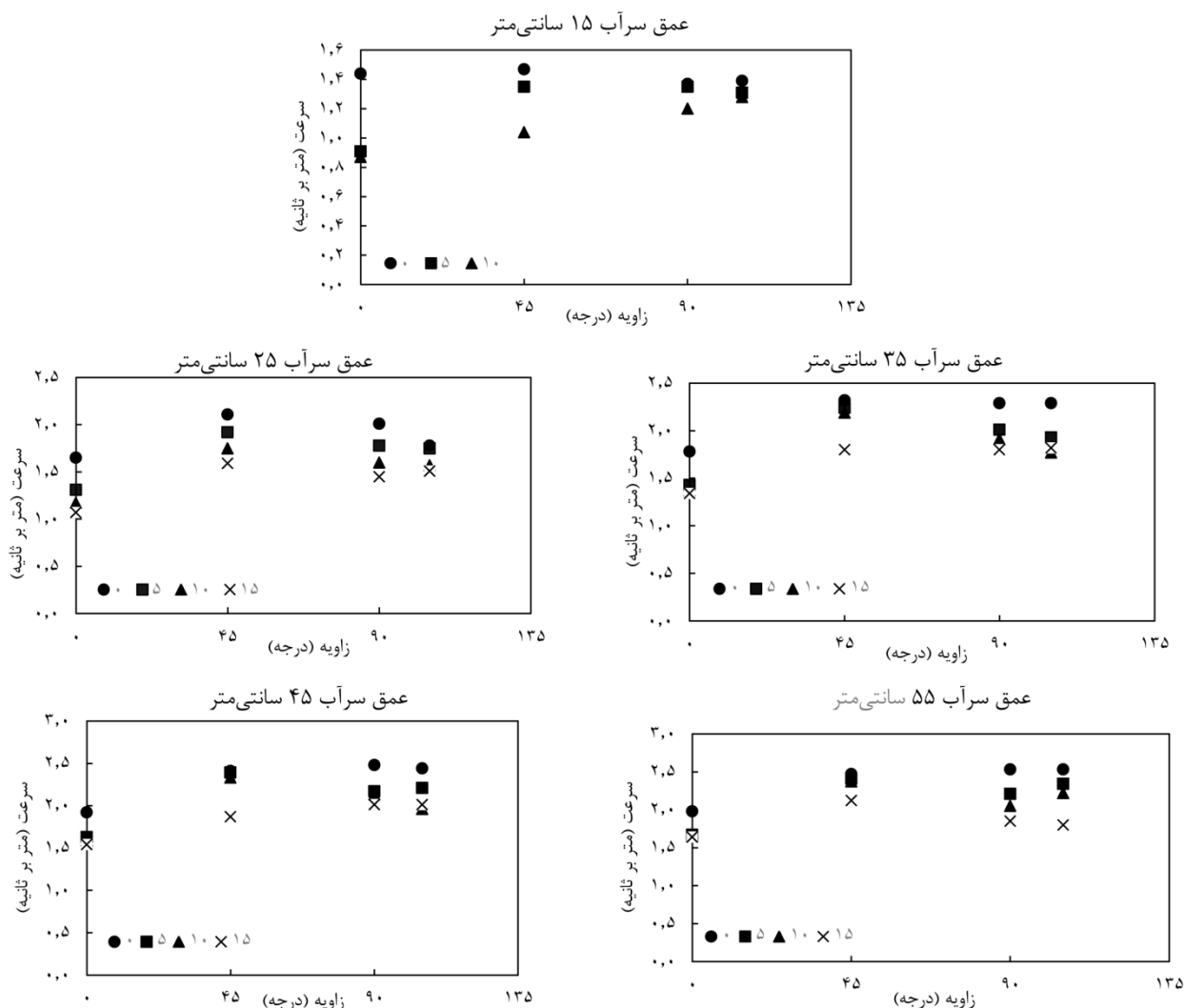
به‌علاوه می‌توان بیان نمود که با افزایش اختلاف بین اعماق پایاب و سرآب سرعت موج‌های بیش‌تری اندازه‌گیری شده است. از آنجایی که از عوامل موثر بر سرعت موج، مقدار انرژی موج می‌باشد، با افزایش اختلاف سطح آب بالادست و پایین دست، انرژی اولیه موج بیش‌تر بوده که منجر به افزایش سرعت موج، به‌خصوص در زاویه صفر درجه می‌شود.

نکته قابل توجه در شکل ۴، رفتار متفاوت موج پیش‌رونده در سطح آب پایین دست ۱۵ سانتی‌متر است که در طول مسیر قوس روندی افزایشی داشته و تا رسیدن به انتهای قوس رفته رفته بر سرعت آن افزوده شده است، درحالی‌که در باقی سطوح آب پایین دست، اغلب تا زاویه ۴۵ درجه سرعت موج روندی افزایشی را طی کرده و بعد از آن رفته رفته از مقدار سرعت آن کم می‌شود. دلیل این پدیده را این‌گونه می‌توان توضیح داد که به علت سطح پایاب زیاد، موج به سرعت حد خود در مسیر جریان نرسیده و تا انتهای کانال بر سرعت حرکت خود می‌افزاید. با توجه به اینکه پس از آن که موج به سرعت حد خود برسد، شکسته شده و به علت اتلاف انرژی شکست، ادامه مسیر را با سرعت کم‌تری طی می‌کند، می‌توان بیان نمود که به تاخیر افتادن رسیدن سرعت موج پیش‌رونده به سرعت حدی خود به علت زیاد بودن عمق پایاب، دلیل روند افزایشی سرعت موج در سطح آب پایین دست ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد. پس می‌توان بیان نمود در صورت وجود مقاطعی دیگر بعد از زاویه ۱۰۵ درجه، احتمال شکست موج‌هایی با عمق پایاب ۱۵ سانتی‌متر وجود دارد. ذکر این نکته ضروری است که در بعضی دیگر از اعماق پایین دست با توجه به ناشکنا بودن موج این پدیده رخ داده است. به‌عنوان نمونه در سطح آب بالادست ۱۵ سانتی‌متر و پایین دست ۵ سانتی‌متر، از بررسی تصاویر برداشت شده از حرکت موج در مسیر کانال، می‌توان دریافت موج تشکیل شده از گروه ناشکنا بوده و با رسیدن به قوس دچار تغییرات عمده‌ای نمی‌شود. بنابراین وجود تغییرات فشار طولی و عرضی به افزایش سرعت موج در قوس کمک

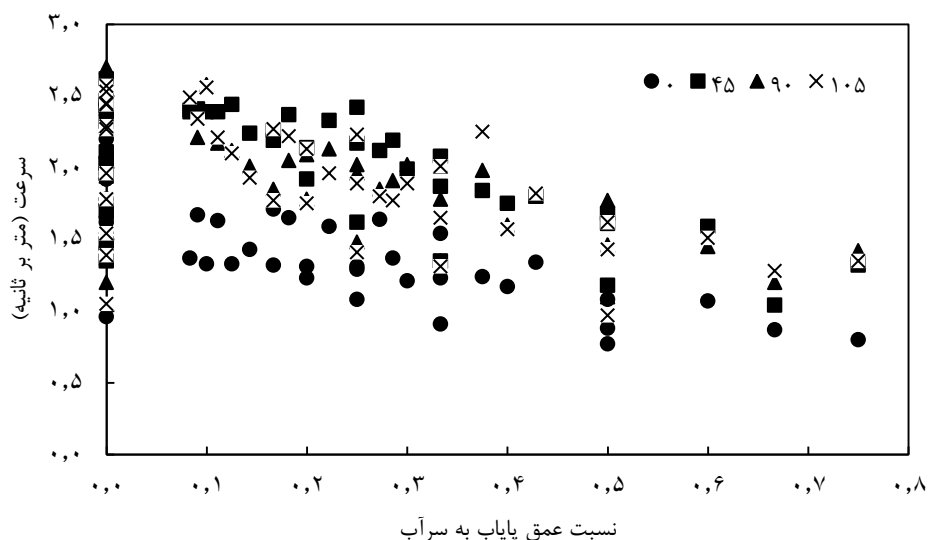
درصد کاهش داشت. در نهایت برای سطح پایاب ۱۵ سانتی‌متر تغییرات سرعت در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ درجه به‌ترتیب ۵۷ درصد افزایش، ۱ درصد کاهش و ۱ درصد کاهش داشت. رفتار متفاوت موج پیش‌رونده در سطح آب پایین‌دست ۱۵ سانتی‌متر است که در طول مسیر قوس روندی افزایشی داشته و تا رسیدن به انتهای قوس رفته‌رفته بر سرعت آن افزوده شد، درحالی‌که باقی سطوح آب پایین‌دست، اغلب تا زاویه ۴۵ درجه سرعت موج روندی افزایشی را طی کرده و بعد از آن رفته‌رفته از مقدار سرعت آن کم می‌شود. در شرایط برقراری کم‌ترین مقدار سطح پایاب به سرآب نسبت به بیش‌ترین آن، مقادیر سرعت در زوایای صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۰۵ درجه قوس ملایم، به‌ترتیب، ۳۳، ۵۸، ۵۷ و ۶۲ درصد کاهش داشت.

مسافت‌های پس از راس در مقایسه با مسیر مستقیم و همچنین امکان احداث ایستگاه‌های پمپاژ یا نقاط آگیری در نیمه دوم مسیر قوس، لحاظ نمودن تمهیدات حفاظتی و یا در صورت امکان برش مسیر قوسی و تبدیل آن به مسیر مستقیم به‌عنوان روش‌های کنترل و کاهش خسارات سیلاب ناشی از شکست سد، پیشنهاد می‌گردد. در سطح آب پایاب صفر، اختلاف سرعت حرکت موج از زوایای صفر تا ۴۵ درجه، ۴۵ تا ۹۰ و ۹۰ تا ۱۰۵ درجه به‌ترتیب، ۱۸ درصد افزایش، ۳ درصد افزایش و ۱ درصد کاهش داشت. این روند برای سطح پایاب ۵ سانتی‌متر در همین زوایا ۶۳ درصد افزایش، ۶ درصد کاهش و ۳ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

برای سطح پایاب ۱۰ سانتی‌متر با همین تغییر زوایا تغییرات سرعت امواج به‌طور متوسط ۷۳ درصد افزایش، ۸ درصد کاهش و ۱



شکل ۴- اثر زوایای مختلف در قوس بر روی سرعت موج در اعماق مختلف سرآب و پایاب



شکل ۵- سرعت موج در مقابل پارامتر بی بعد شده عمق سرآب به پایاب

بررسی آزمایشگاهی تاثیر زبری جداره کانال بر روی الگوی جریان در قوس ۹۰ درجه تند. مجله علوم و مهندسی آبیاری اهواز. ۳۵: ۳. ۴۷-۵۷.

## منابع

Bellos, C.V. 2004. Experimental Measurements of Flood Wave Created by a Dam Break. *European Water* 7/8: 3-15.

Davidson, R.G and Greenwood, B. 2000. Waves and sediment transport in the Nearshore zone, Coastal Zone and Estuarine. *Encyclopedia of life support system*. 1- 5

Marsooli, R. Zhang, M., Wu, W. 2011. Vertical and Horizontal Two-Dimensional Numerical Modeling of Dam-Break Flow over Fixed Beds. *World Environmental and Water Resources, Congress Bearing Knowledge for Sustainability*. 2225-2233.

Mustafa, S.A., McGrath, M.Z. 2012. Parallelized Two-Dimensional Dam-Break Flood Analysis with Dynamic Data Structures. *World Environmental and Water Resources Congress, Crossing Boundaries, ASCE*. 1513-1522.

Mohamed, A. 2008. Characterization of tsunami-like bores in support of loading on structures, M.Sc. Thesis, University of Hawaii, p.93

Nguyen, S., Weston, D. 2013. Dam Break for the Dallas Dam. *World Environmental and Water Resources Congress, Showcasing the Future, ASCE*. 1687-1697.

Lobovsky, L., Botia-Vera, E., Castellana, F., Mas-Soler, J., Souto-Iglesias, A., Aug, B. 2013. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break. *Journal of Fluids and*

بنی هاشمی، م.، کرمی، و.، مصباحی، ج.، مسافری، م.، مقدم کیا، ه.، ۱۳۸۸. تاثیر پارامترهای شکست بر مشخصات جریان سیل ناشی از شکست سدهای خاکی بوستان و گلستان. هشتمین سیمینار بین-المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران.

حسینی، م و ابریشمی، ج. ۱۳۸۵، هیدرولیک کانال‌های باز، دانشگاه امام رضا (ع) - مشهد. ۶۱۳ صفحه.

خدایی، م.، عطاری، ج.، بنی هاشمی، م. ۱۳۸۸. نقش سرعت جریان و زمان فرار در مدیریت بحران سیلاب ناشی از شکست سد (مطالعه موردی سد گلستان ۱). هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه شیراز، ایران.

خوب، ع. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی شکست سد با استفاده از پردازش تصویر. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۲۹ صفحه.

سوزه پور، ع.، شفاعی بجستان، م.، شیخ رضازاده نیکون. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی اثر زبری کف بر تنش برشی و قدرت گردابه در قوس ۹۰ درجه تند کانال مستطیلی. مجله پژوهش آب ایران. ۹: ۱. ۸۸-۸۱

صفرزاده، ا. ۱۳۸۰. شبیه‌سازی عددی الگوی جریان در آبگیر جانبی از قوس ۱۸۰ درجه "پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

قدو، ع.، شفاعی بجستان، م.، فتحی مقدم، م.، سوزه پور، ع. ۱۳۹۱.

Hamidi,S.2017. 3D Numerical Simulation of Dam-Break Flows with Sediment Transport over Movable Beds, World Environmental and Water Resources Congress 2017.May 21-25, 2017 | Sacramento, California. pp:161-170.

Structures. 48 :407-434.

Ritter,A. 1892. Die Fortpanzung de Wasserwellen. Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure. 36.33: 947-954.

Naderkhanloo,V., Soudi,M., Hemmati,M and Ahmad

## Routing Speed and Water Surface Height of the Flooding Caused by Dam Break in Indirect Pathway

A. Salemnia<sup>1</sup>, R. Fazloulou<sup>2\*</sup>, M. Ghomeshi<sup>3</sup>  
Recived: Jun.01, 2017 Accepted: Jul.01, 2017

### Abstract

Flood usually happened in various place in the world because of climate change and heavy rainfall in these years. In other hand, dams break can cause of flood that lead to damages to people and urban area in downstream. Calculating flood velocity can help us to minimizing damages. Also regarding the place of dams that are in mountain area, effect of curves on the flood pathway on flood velocity is really important. The researcher worked on the effect of downstream and upstream water level on the velocity of flood wave in the 90 degree curved canal. For flood velocity measuring rapidly photography technique has been done. The result of the research shows 33% decrease for 0 degree, 58% decrease for 45 degree, 58% decrease for 90 degree and 62% decrease for 105 degree between minimum value and maximum value of rate of downstream water level on upstream one. Moreover, the results show maximum water surface elevation occur between 25 to 35 in a 90 degree mild bend, after that water surface elevation has a significant drop.

**Keywords:** Flood Routing, Wave Velocity, Upstream Water level, Downstream Water Level, Dam Break

1- Ph.D Student of Water Structure, Department of Irrigation, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

2- Associated Professor, Department of Irrigation, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

3- Professor, Department of Water Structure, Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz

(\* - Corresponding Author, Email: raminfazl@yahoo.com)