

مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر ضریب شکل مخزن سد در خصوصیات سیلاب ناشی از شکست سدها

طاهره سادات میرمحمد حسینی (کارشناس ارشد)

احمد طاهرشمسی (دانشیار)

سید مجدالدین میرمحمد حسینی* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۵ (دوره ۲ - شماره ۱/۲، ص. ۱۱۹-۱۲۵، یادداشت شفی)

هدف از این پژوهش، یافتن ارتباط بین ضریب شکل مخزن سد و خصوصیات جریان سیلاب به‌ویژه عدد فرود در پدیده‌ی شکست سد به‌وسیله‌ی یک مدل فیزیکی است. به این منظور، آزمایش‌ها بر روی یک مدل فیزیکی شبیه‌سازی پدیده‌ی شکست سد در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. اندازه‌گیری سرعت در نقاط مختلف کانال به وسیله‌ی سرعت‌سنج ADV و اندازه‌گیری تغییرات سطح آب به وسیله‌ی حسگرهای آلتراسونیک انجام شده است. با داشتن تغییرات سرعت و تغییرات تراز سطح آب، دبی ناشی از شکست سد محاسبه شده و هیدروگراف مربوط برای هر یک از ضرایب شکل مخازن ترسیم شده است. آنگاه رابطه‌ی بین عدد فرود و ضریب شکل مخزن سد به‌دست آمده است. نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج داده‌های شکست واقعی سدها در گذشته، نشان داده است که روند تغییرات سازگاری مناسبی با نتایج جمع‌آوری ناشی از شکست سدها دارد.

tahere_mirhosseini@yahoo.com

tshamsi@aut.ac.ir

mirh53@yahoo.com

واژگان کلیدی: شکست سد، ضریب شکل مخزن، مدل فیزیکی، حسگر

آلتراسونیک، حسگر ADV.

۱. مقدمه

احداث سد، فواید و مزایای زیادی برای جامعه‌ی بشری دارد، اما سیلاب ناشی از شکست سدهای بزرگ معمولاً خسارت‌های قابل توجه و فاجعه‌باری را به همراه خواهد داشت. مطالعات شکست سد و روندیابی سیلاب ناشی از آن به همراه تعیین مناطق بحرانی در پایین‌دست سد در مطالعات دانشگاهی، برنامه‌ریزی دولت و سرمایه‌گذاری در پایاب سدها اهمیت بسیاری دارد. برای مدیریت ایمنی مسائل مربوط به شکست سدها، تخمین دقیق پارامترهای مؤثر در استهلاک موج ناشی از فروپاشی سدها به کار برده می‌شود و با وجود نظارت‌های دقیقی که در کلیه‌ی مراحل احداث سد صورت می‌گیرد، امکان شکست و فروپاشی در اثر عوامل مختلف و متعدد وجود دارد. اطلاع قبلی از چگونگی سیلاب حاصل از شکست سد می‌تواند نواحی آسیب‌پذیر پایین‌دست را، که در معرض خطر سیلاب قرار دارد، مشخص و به آماده‌سازی مؤسسات مسئول قبل از وقوع این فاجعه کمک کند.

مطالعات مربوط به برآورد خسارت ناشی از شکست سد، یکی از بخش‌های مهم کارهای مهندسی مربوط به سدهای بزرگ است. روش‌های مختلف تجربی - تئوری برای برآورد پیشینه‌ی دبی ناشی از شکست سد وجود دارد، لیکن تاکنون یک روش

دقیق نظری برای تعیین این دبی و در نتیجه هیدروگراف خروجی ناشی از شکست سد وجود ندارد. در مطالعات پیشین با توجه به آمار و اطلاعات مربوط به شکست سدها در جهان یک رابطه‌ی تجربی بین عدد فرود تعریف شده براساس پیشینه‌ی دبی مشاهده‌شده از شکست سد و یک عدد بی‌بعد (ضریب شکل مخزن) به‌دست آمده است. با توجه به اینکه در آمار شکست سدها ممکن است انواع و اقسام عدم قطعیت و خطاها وجود داشته باشد، در این پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی، پدیده‌ی شکست سد در حالت ناگهانی مدل‌سازی شده و هیدروگراف سیل ایجادشده، در بازه‌ی وسیعی از عدد ضریب شکل مخزن، به‌دست آمده است.

پژوهش‌های مختلفی تا به حال در مورد موضوع شکست سد مطالعاتی انجام شده است، از جمله در پژوهشی در سال ۱۹۵۴، اولین داده‌های آزمایشگاهی برای شکست سد به‌صورت آبی در یک فلوم افقی، مستطیلی، و مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱] همچنین در پژوهش دیگری در سال ۱۹۹۲، به بررسی جریان‌های دوبعدی ناشی از شکست سد در کانال‌های انحنادار در آزمایشگاه پرداخته شده است.^[۲]

در پژوهشی در سال ۱۹۹۸ نیز به مطالعه‌ی موج ناشی از شکست سد در یک کانال افقی به‌صورت آزمایشگاهی پرداخته و با نتایج تحلیلی روش مشخصه مقایسه شده است.^[۳] پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۲، به بررسی مسئله‌ی شکست

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۱۱/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۲/۲۲، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۲۷.

سد به صورت آزمایشگاهی و عددی در یک خم 90° درجه پرداخته^[۴] و داده‌های اندازه‌گیری شده با نتایج عددی را، که توسط روش حجم محدود محاسبه شده بود، مقایسه کرده‌اند.

همچنین در پژوهشی در سال 2002 ، جریان شکست سد در یک کانال صاف افقی با مایع لزج مطالعه و آزمایش‌هایی با مایع لزج نیوتنی، به‌عنوان مثال شربت گلوکز انجام شده است.^[۵] در پژوهش مذکور به تأثیر ویژگی‌های جدید از رژیم جریان و تأثیر طول مخزن و همچنین مایع چسبناک بر روی انتشار جریان پرداخته شده و در انتها، معادلات جریان شکست سد به صورت بی‌بعد در آورده شده و سپس با نتایج حاصل از آزمایش‌ها مقایسه شده است. در سال 2004 پژوهشگران، برای تحلیل دبی اوج هیدروگراف، فاکتور شکل جدیدی را براساس مشخصات هندسی مخزن ارائه کرده و نتیجه گرفته‌اند که ارتباط خوبی بین دبی پیک، عدد فرود و این ضریب شکل وجود دارد.^[۶] همچنین برخی پژوهشگران در سال 2006 ، به مطالعه‌ی اساسی از امواج شکست سد با مایع لزج پرداخته‌اند.^[۷] در پژوهش‌هایی در سال 2007 نیز محققان به بررسی گسترش موج ناشی از شکست سد در اطراف یک برآمدگی مثلثی در بستر به صورت آزمایشگاهی^[۸] و یا به بررسی یک‌بعدی جریان ناشی از شکست سد بر روی بسترهای قابل فرسایش پرداخته و نتایج به‌دست آمده با مدل‌های عددی موجود را مقایسه کرده‌اند،^[۹] و در سال 2007 به مطالعه‌ی آزمایشگاهی امواج شکست سد روی بستر متحرک در مقیاس کوچک پرداخته شده است.^[۱۰]

در پژوهش دیگری در سال 2008 ، نیز به مطالعه‌ی جریان ناشی از شکست سد و برداشت داده‌های تجربی از طریق شیوه‌ی تصویربرداری و مدل‌سازی عددی دوبعدی پرداخته شده و نتایج تجربی و دوبعدی مدل‌سازی عددی مربوط به 4 آزمون، که شامل سرعت متغیر جریان ناشی از بازشدن ناگهانی دریچه است، ارائه و جهت برداشت داده‌های تجربی، از شیوه‌ی تصویربرداری که قادر به برداشت و ارائه‌ی اطلاعات گسترده است، استفاده شده است.^[۱۱] پژوهشگری نیز در سال 2008 ، به مطالعه‌ی نتایج حاصل از یک مطالعه‌ی تجربی از امواج تولیدشده‌ی ناشی از 2 مدل شکست سد پرداخته و نتایج پژوهش وی نشان داده است که سرعت انتشار امواج در پایاب، به میزان قابل توجهی تحت تأثیر تلفات انرژی جریان ناشی از شکست است.^[۱۲]

همچنین برخی پژوهشگران در سال 2009 ، به مطالعه‌ی آزمایشگاهی پیشینه‌ی تراز و زمان پیک جریان شکست سد در بستر افقی متحرک پرداخته‌اند.^[۱۳] یک مطالعه‌ی تجربی نیز در سال 2011 ، بر روی امواج شکست سد در مخازن رسوبی انجام شده است.^[۱۴] در پژوهش دیگری در سال 2012 ، نیز به مطالعه‌ی تأثیر هندسه‌ی مخزن در جریان ناشی از شکست سد پرداخته شده و 4 شکل مخزن با ضریب شکل یکسان، به صورت مستطیل طویل، مستطیل عریض، دوزنقه‌یی، و خم 90° درجه مورد مطالعه قرار گرفته و آزمایش‌ها بر روی 4 مخزن انجام شده است.^[۱۵] علی‌رغم پژوهش‌های انجام‌شده و مطالعات در دست انجام در خصوص مسائل و عوارض ناشی از سیلاب شکست سد، به دلیل تنوع و تعدد عوامل اثرگذار در این پدیده از یک سو و محدود بودن داده‌های واقعی مربوط به شکست سد از سوی دیگر، نیاز به بسط و گسترش دامنه‌ی پژوهش‌ها جهت تدقیق و توسعه یافته‌ها امری کاملاً ضروری است.

در این پژوهش، تأثیر ضریب شکل مخزن در جریان شکست سد با استفاده از یک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته و هیدروگراف خروجی جریان ناشی از شکست سد به‌دست آمده است. در انتها رابطه‌ی بین ضریب شکل مخزن و عدد فرود معرفی شده است.

۲. آزمایش‌ها

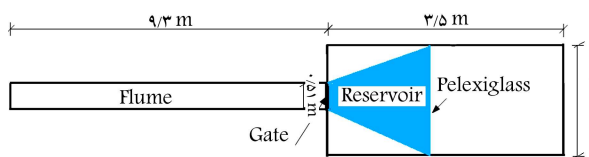
به منظور شناخت بهتر از مسئله‌ی پدیده‌ی شکست ناگهانی سد، موضوع مذکور در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر به صورت فیزیکی مدل‌سازی شده است. برای پوشش دادن اعداد ضریب شکل مخزن، 7 سری مخزن با ضرایب شکل مختلفی در بازه‌ی 0.4 الی 0.56 ساخته و آزمایش‌ها بر روی همه‌ی آن‌ها انجام شده است. اندازه‌گیری تغییرات تراز سطح آب توسط حسگرهای آلتراسونیک انجام و برای اندازه‌گیری سرعت در جهت x از دستگاه سرعت‌سنج ADV استفاده شده است.

۳. مخزن و فلوم استفاده‌شده

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به شکست سد از یک مخزن با قابلیت شکل‌دهی مختلف و فلومی مستطیل‌شکل با عرض 51 و ارتفاع 75 سانتی‌متر و نیز طول 9.3 متر استفاده شده است. فلوم موردنظر در پژوهش‌های پیشین ساخته و بهینه شده است،^[۱۵] به نحوی که کف کانال و جداره‌ی فلوم از جنس شیشه به ضخامت 10 میلی‌متر بوده و اصول آب‌بندی در آن کاملاً رعایت شده است. ضریب زبری بستر (مانینگ) در شرایط جریان دائمی در فلوم برابر 0.1 تخمین زده شده است. فلوم موردنظر از سمت بالادست به یک مخزن قابل تغییر با طول و عرض اولیه به ترتیب 3.75 و 2.25 متر متصل شده است. کف و دیواره‌های مخزن از جنس ورق گالوانیزه 4 میلی‌متری بوده و به گونه‌ی ساخته شده است که از لحاظ آب‌بندی کامل باشد. علت استفاده از ورق گالوانیزه، جلوگیری از زنگ‌زدگی است. مخزن ساخته‌شده، 2 سیستم تغذیه از بالا و پایین و 3 سیستم زهکشی و تخلیه‌ی آب دارد. آب از منبع تغذیه‌ی اصلی که یک مخزن زیرزمینی است، از طریق یک پمپ با ظرفیت آب‌دهی 200 مترمکعب در ساعت کشیده شده و با استفاده از لوله‌ی 4 اینچ از بالا و لوله‌ی 3 اینچ از پایین، وارد مخزن موردنظر می‌شود. در آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش، جهت تأمین ضرایب شکل مخزن، داخل مخزن گالوانیزه، مخزنی دیگر با دیواره‌هایی از جنس پلکسی‌گلاس به شکل دوزنقه با مساحت‌های مختلف ساخته شده و آزمایش‌ها به کمک آن مخازن صورت گرفته است. تصویری از مخزن و فلوم آزمایشگاهی استفاده شده در شکل 1 ارائه شده است. در شکل 2 نمایی کلی از تجهیزات آزمایشگاهی و در شکل 3 نمونه‌ی از حسگر آلتراسونیک نصب شده و در طول کانال ارائه شده است.

۴. ایجاد مکانیزم شکست سد

برای اینکه بتوان پدیده‌ی شکست سد را در آزمایشگاه مدل کرد، براساس معیار لابر و هگر (1998)، زمان بازشدگی دریچه باید از مقدار $\sqrt{\frac{2h_0}{g}}$ کمتر شود، که در این رابطه h_0 ارتفاع آب بالادست در مخزن سد است. در این پژوهش ارتفاع آب مخزن



شکل ۱. تصویری از مخزن و فلوم آزمایشگاهی استفاده‌شده.

حرکت و قائم‌بودن مسیر، در هر طرف دریچه‌ی موردنظر، ۴ عدد بلبرینگ به همراه دو شفت در دو ردیف به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از یکدیگر به‌کار رفته است.

طراحی جک پنوماتیکی براساس وزن دریچه، مقدار فشار هوای تولیدی برای حرکت جک، مقدار نیروی اصطکاک در شیار، مقدار جابه‌جایی لازم، و زمان موردنیاز جهت بازشدن دریچه صورت گرفته است و با انتخاب مناسب مدل جک و وسایل مرتبط، دریچه در مدت زمانی کمتر از ۲۸/۰ ثانیه باز می‌شود. برای تأمین فشار هوای ورودی از کمپرسور هوای ۱۱۰ لیتری با قابلیت تولید بیشینه‌ی فشار ۸ بار در سیستم استفاده شده است. محل قرارگیری جک در فاصله‌ی ۱ متری از محل دریچه و به فاصله‌ی ۳ متری از کف آزمایشگاه و به‌صورت کاملاً جدا از سیستم فلوم و مخزن است، تا از ایجاد نوسانات ناشی از حرکت سریع جک بر روی سطح آب مخزن جلوگیری شود.

چون فاصله‌ی کمپرسور تا اتصال به جک در حدود ۳ متر است، جهت جلوگیری از افت زیاد هوای فشرده، از یک مخزن کمکی در نزدیکی جک و به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری استفاده شده است، تا تقریباً افت فشار در لوله‌ها قابل اغماض باشد. برای تنظیم و کنترل حرکت جک، یک برنامه‌ی کامپیوتری در سیستم نرم‌افزاری Lab View نوشته شده است. نرم‌افزار موردنظر با استفاده از یک Data Logger، که در پژوهش طراحی شده است، با ابزارها ارتباط دارد و از این طریق قرائت و کنترل ابزارها صورت می‌پذیرد.

۵. وسایل اندازه‌گیری مدل فیزیکی

۱.۵. دستگاه آلتراسونیک

دستگاه آلتراسونیک با فرستادن صوت به سطح آب و محاسبه‌ی مدت زمان برگشت، تغییرات سطح آب را در لحظات مختلف بدون تماس با سطح آب و ایجاد اغتشاش در آن برداشت می‌کند. در این پژوهش، برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب از ۴ عدد حسگر آلتراسونیک^۱ و ۲ عدد حسگر میکروسونیک^۲ استفاده شده است. در نرم‌افزاری که در Lab View نوشته شده است، علاوه بر کنترل جک پنوماتیکی، کنترل همه‌ی حسگرها و پمپ‌ها و مدارهای فرمان و نیز کالیبره‌کردن آنها صورت می‌پذیرد.

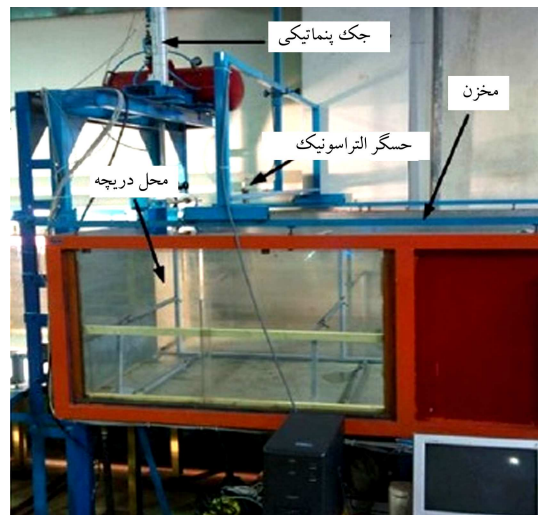
از لحاظ دقت اندازه‌گیری حسگرها به‌صورت عدد متریک، حسگرهای آلتراسونیک با دقت $\pm 0.2 \text{ mm}$ ، ولی حسگرهای میکروسونیک با دقت $\pm 0.12 \text{ mm}$ هستند.

۲.۵. دستگاه اندازه‌گیری سرعت سنج ADV

برای اندازه‌گیری سرعت در نقاط مختلف کانال از سرعت سنج ADV استفاده شده است. این ابزار وسیله‌ی است که می‌تواند نوسانات سرعت را در یک بازه‌ی زمانی مشخص در ۳ راستای عمود بر هم ثبت و به کمک نرم‌افزار مربوط پردازش کند. در این دستگاه، ابتدا امواج صوتی با بسامدی مشخص به‌وسیله‌ی حسگری که در انتهای محور قائم آن قرار دارد، ارسال و انعکاس آن توسط ۳ حسگرگیرنده دریافت می‌شود، که اختلاف بین بسامد ارسالی و بسامد دریافت شده متناسب با سرعت جریان است. سپس تحلیل اطلاعات توسط پردازشگر دستگاه که به رایانه متصل است، انجام و نمودار تغییرات سرعت در بازه‌ی زمانی مشخصی ترسیم می‌شود. همچنین برخی از عملیات آماری مانند محاسبه‌ی میانگین و واریانس نیز روی اطلاعات مربوط انجام می‌گیرد.

برای همه‌ی آزمایش‌ها یکسان و برابر با ۴۰ سانتی‌متر، و شرایط بستر در پایین دست خشک است.

اگر ارتفاع آب در بالادست را ۴۰ سانتی‌متر در نظر بگیریم، میزان زمان بازشدگی دریچه براساس معیار گفته‌شده باید از عدد ۲۸/۰ ثانیه کمتر شود. برای اینکه بتوان به چنین سرعتی در مقیاس آزمایشگاهی دست یافت، از جک‌های هوای فشرده^۱ و وسایل مربوط به آن استفاده شده است. جنس دریچه‌ی که به‌عنوان سد در نظر گرفته شده است، از یک صفحه‌ی پلکسی‌گلاس به ابعاد $10 \times 400 \times 600$ (به ترتیب: طول - عرض - ضخامت) میلی‌متر براساس استانداردهای مدل‌سازی سد در آزمایشگاه است. علت انتخاب پلکسی‌گلاس، تولید اصطکاک سطحی کمتر با آب است. این صفحه در داخل شیاری که در دیواره‌ی مخزن تعبیه شده است، به‌راحتی قابل حرکت است. به دلیل اینکه مقدار سرعت، نسبت مستقیم با میزان اصطکاک موجود در شیار با دریچه دارد، در داخل شیار از نوار آب‌بند لاستیکی دو تکه استفاده شده است؛ که ضمن تأمین آب‌بندی لازم، مقدار اصطکاک را در داخل شیار به‌صورت خطی تغییر می‌دهد و باعث تقلیل ضریب اصطکاک بین دریچه و نوار آب‌بندی می‌شود. برای جلوگیری از نشست تحتانی، دو نوار آب‌بند ۰/۵ میلی‌متری زیر دریچه چسبانده شده است، که با دریچه قابل حرکت است. جهت روانی در



شکل ۲. نمایی کلی از تجهیزات آزمایشگاهی.



شکل ۳. نمونه‌ی از حسگر آلتراسونیک.

ADV استفاده شده است. آزمایش‌های سرعت برای نقاط مختلف در داخل فلوم به فاصله‌ی ۵، ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ سانتی‌متری از محل دریچه (موقعیت مدل سد) انجام شده است. دستگاه سرعت‌سنج در هر نقطه به صورت عمودی در ۴ عمق اقدام به اندازه‌گیری شده است تا بتوان پروفیل قائم سرعت را به دست آورد. این دستگاه همواره با در نظر گرفتن حجمی از آب، قادر به ثبت سرعت جریان در نقطه‌ی که ۵ سانتی‌متر پایین‌تر از حسگر فرستنده قرار دارد، است. در این نوشتار جریان برای نقطه‌ی به فاصله‌ی ۸ سانتی‌متری از دریچه مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱۶]

۷. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

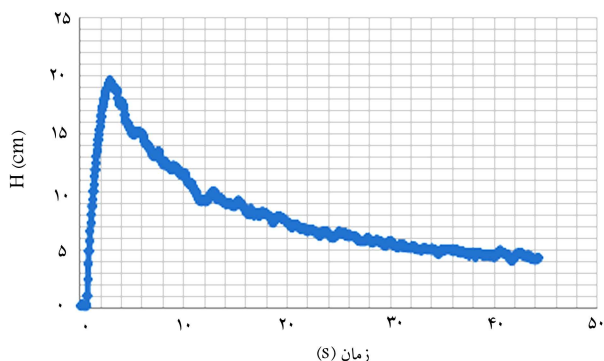
به دلیل داشتن سرعت در عمق‌های مختلف، سرعت متوسط برای هر نقطه طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه شده است. براساس این روش، میانگین سرعت برای عمق‌های متفاوت که با \bar{u} نشان داده شده است، به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{z_1}^{z_2} u dz$$

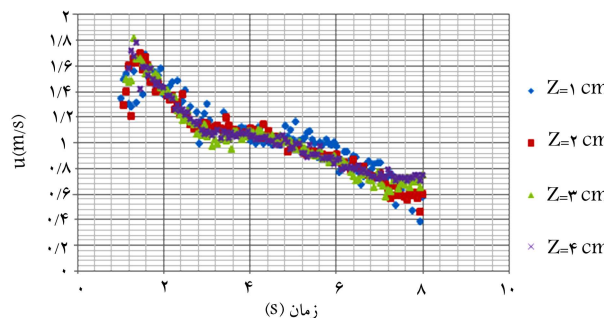
$$h = z_2 - z_1 \quad (2)$$

در شکل ۴، نمونه‌ی از تغییرات سطح آب سیلاب در فلوم با زمان برای مخزنی با ضربه‌ی شکل ۰٫۹۵ در فاصله‌ی ۸ سانتی‌متری از دریچه نشان داده شده است. در شکل ۵، تغییرات سرعت با زمان در نقاط مختلف برداشت برای همین نقطه ترسیم شده است.

سرعت متوسط طبق رابطه‌ی ۲ محاسبه و تغییرات آن با زمان برای همین شرایط و همان نقطه در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۴. تراز سطح آب در فاصله‌ی ۸ سانتی‌متری از دریچه برای مخزن با ضربه‌ی شکل ۰٫۹۵.



شکل ۵. پروفیل سرعت در ۸ سانتی‌متری از دریچه.

این دستگاه همواره با در نظر گرفتن حجمی از آب، قادر به ثبت سرعت جریان در نقطه‌ی که ۵ سانتی‌متر پایین‌تر از حسگر فرستنده قرار دارد، است. بدین ترتیب برای به دست آوردن پروفیل سرعت در راستای قائم، مقادیر سرعت فقط تا ۵ سانتی‌متری سطح آب قابل برداشت هستند.

۶. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

برای محاسبه‌ی ضربه‌ی شکل از رابطه‌ی که در مطالعات پیشین،^[۷] به دست آمده استفاده شده است (رابطه‌ی ۱):

$$S_f = \frac{W_b \times W_d \times H_d}{V_r} \quad (1)$$

که در آن V_r حجم مخزن مورد بررسی، W_b عرض بالایی شکست سد، W_d عرض بالایی سد، H_d ارتفاع کل سد، و S_f ضربه‌ی مربوط به تأثیر شکل هندسی است. جدول ۱، مشخصات شکل‌های مورد مطالعه برای مخزن را نشان می‌دهد.^[۱۶] در این پژوهش، مخزن دوزنقه‌ی و مستطیل شکل در نظر گرفته شده‌اند و ارتفاع سد در رابطه‌ی ۱ برای تمام شکل‌ها ثابت و برابر با ۴۰ سانتی‌متر است.

۱.۶. آزمایش تراز سطح آب

اندازه‌گیری تراز سطح آب توسط حسگرهای آلتراسونیک و میکروسونیک صورت گرفته است. قبل از شروع آزمایش، جهت دقت کار، تمامی حسگرها کالیبره و سپس با روشن کردن پمپ، مخزن تا ارتفاع ۴۰ سانتی‌متری پر شده است. به منظور حذف تلاطم و نوسانات سطح مخزن اندکی باید صبر کرد تا آب ساکن و سطح مخزن ثابت شود. سپس با کمک نرم‌افزار مربوط جهت باز شدن سریع دریچه اقدام و در فاصله‌ی زمانی بسیار کوتاه توسط جک مربوط، دریچه به بالا کشیده و در حقیقت فرایند شکست ناگهانی سد شروع و آب وارد فلوم می‌شود و حسگرها شروع به برداشت داده می‌کنند. در نتیجه تغییرات تراز سطح آب با زمان پس از باز شدن دریچه یا در واقع همان شکست سد به دست می‌آید. بررسی تراز سطح آب پس از جاری شدن سیلاب در داخل فلوم برای نقاط مختلف و با فاصله‌ی متفاوت از دریچه انجام شده است.

۲.۶. آزمایش اندازه‌گیری سرعت

برای اندازه‌گیری سرعت جریان ناشی از شکست سد، در این پروژه از دستگاه

جدول ۱. مشخصات شکل‌های مورد مطالعه.

شماره‌ی شکل	نوع شکل	ضربه‌ی شکل	مساحت (m ²)
۱	دوزنقه + مستطیل	۰٫۰۴۰	۶٫۳۹۰
۲	دوزنقه + مستطیل	۰٫۰۶۳	۴٫۱۲۸
۳	دوزنقه	۰٫۰۹۵	۲٫۷۶۳
۴	دوزنقه	۰٫۱۴۶	۱٫۷۹۸
۵	دوزنقه	۰٫۱۹۵	۱٫۳۳۴
۶	دوزنقه	۰٫۳۳۷	۰٫۷۷۱
۷	دوزنقه	۰٫۵۵۷	۰٫۴۶۷

جدول ۲. دبی بیشینه برای ضرایب شکل مخزن در فاصله‌ی ۸۰ سانتی متری دریچه (محل سد).

S_f	۰/۰۴۰	۰/۰۶۳	۰/۰۹۵	۰/۱۴۶	۰/۱۹۵	۰/۳۳۷	۰/۵۵۷
$Q_{peak} (m^3/s)$	۰/۱۸۰۵۹	۰/۱۳۳۴	۰/۱۲۷۶	۰/۱۰۱۲۵	۰/۰۸۱۵۴	۰/۰۷۲۹۸	۰/۰۵۵۰۶

جدول ۳. عدد فرود به دست آمده برای ضرایب شکل مخزن در فاصله‌ی ۸۰ سانتی متری دریچه.

S_f	۰/۰۴۰	۰/۰۶۳	۰/۰۹۵	۰/۱۴۶	۰/۱۹۵	۰/۳۳۷	۰/۵۵۷
F	۰/۴۴۶۹۷۹	۰/۳۳۰۱۷۹	۰/۳۱۵۸۲۴	۰/۲۵۰۶۰۵	۰/۲۰۱۸۲	۰/۱۸۰۶۳۳	۰/۱۳۶۲۷۹

سد، برای مخزنی با ضریب شکل ۰/۴، دبی اوج بیشتری نسبت به سایر شکل‌های مخزن دارد.

باتوجه به در دست داشتن تغییرات تراز سطح آب با زمان و نیز تغییرات سرعت میانگین با زمان، هیدروگراف دبی خروجی در هر زمان طبق معادله‌های ۳ و ۴ محاسبه شده است:

$$Q_t = U_t \cdot A \quad (3)$$

$$A = b \cdot h_t \quad (4)$$

۸. رابطه‌ی بین عدد فرود و ضریب شکل مخزن

پس از به دست آوردن دبی پیک با توجه به معادله‌ی ۵، مقدار عدد فرود با در دست داشتن ضریب شکل مخزن به دست می‌آید. مقادیر به دست آمده در این مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است:

$$F = \frac{Q_p}{(W_b)(gD_b^3)^{0.25}} \quad (5)$$

در رابطه‌ی ۵، Q_p دبی پیک خروجی، W_b عرض بالایی شکست، g شتاب ثقل، D_b بیشینه‌ی عمق شکست است. مقادیر جدول ۳ در شکل ۸، نشان داده شده است.

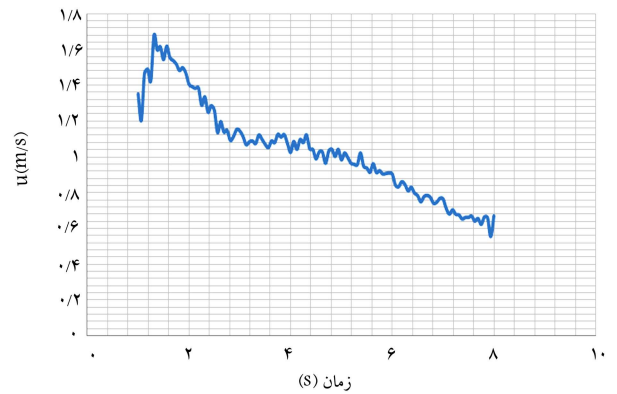
با توجه به شکل ۸، رابطه‌ی ۶ که حاصل از نتایج آزمایشگاهی این پژوهش است، نشان دهنده‌ی رابطه‌ی بین عدد فرود با عدد ضریب شکل مخزن است:

$$F = 0.1067 S_f^{-0.236} \quad (6)$$

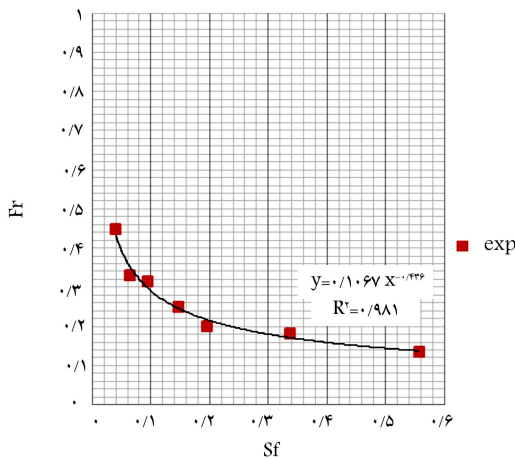
نتایج حاصل از این پژوهش با رابطه‌ی ۷، که از مطالعات طاهرشمسی و همکاران در سال ۲۰۰۴ براساس جمع‌آوری داده‌های محدود از شکست چند سد واقعی به دست آمده است،^[۶] مورد مقایسه قرار گرفته است:

$$F = 0.0089 S_f^{-0.7648} \quad (7)$$

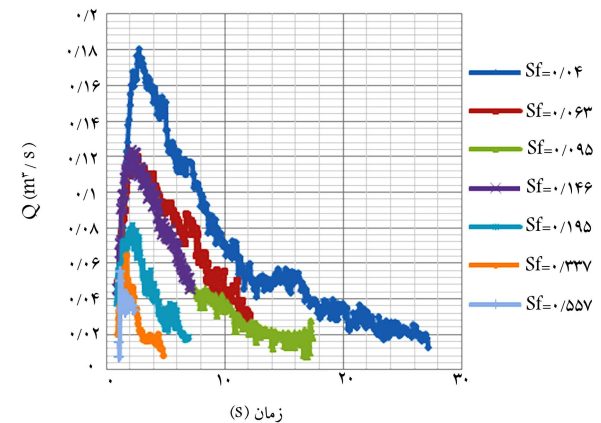
که در آن، b عرض کانال و در تمام آزمایش‌ها ثابت و برابر با ۵۱ سانتی متر است. در جدول ۲، بیشینه‌ی دبی به دست آمده برای هر ضریب شکل مخزن ارائه شده است. در شکل ۷، مقایسه‌ی دبی پیک برای ضرایب شکل مخزن، هیدروگراف به دست آمده برای تمامی ضرایب شکل در نقطه‌ی ۸۰ سانتی متری از دریچه مشاهده می‌شود. مشاهدات جریان نشان می‌دهد که هیدروگراف خروجی جریان ناشی از شکست



شکل ۶. سرعت متوسط برای مخزن با ضریب شکل ۰/۹۵ در فاصله‌ی ۸۰ سانتی متری.



شکل ۸. نمودار بین عدد فرود و ضریب شکل مخزن حاصل از مدل آزمایشگاهی مطالعه شده.



شکل ۷. هیدروگراف جریان شکست سد برای ضرایب شکل مخزن در فاصله‌ی ۸۰ سانتی متری دریچه.

جدول ۴. مقایسه‌ی دبی حاصل از آزمایش با دبی محاسبه‌شده از رابطه‌ی ۵.

S_f	Q_{exp} (m^3/s)	Q (m^3/s)
۰٫۰۴۰	۰٫۱۸۰۵۹	۰٫۰۴۲۶
۰٫۰۶۳	۰٫۱۳۳۴	۰٫۰۳۰۰
۰٫۰۹۵	۰٫۱۲۷۶	۰٫۰۲۹۲
۰٫۱۴۶	۰٫۱۰۱۲۵	۰٫۰۱۵۷
۰٫۱۹۵	۰٫۰۸۱۵۴	۰٫۰۱۲۶
۰٫۳۳۷	۰٫۰۷۲۹۸	۰٫۰۰۸۳
۰٫۵۵۷	۰٫۰۵۵۰۶	۰٫۰۰۵۶

نتایج آزمایشگاهی با مقادیر واقعی تا حدود زیادی می‌تواند ناشی از دلیل اخیر باشد. در هر صورت وجود چنین اختلافاتی بیان‌گر این واقعیت است که تا حصول به یک نتیجه‌ی دقیق، معتبر، و فراگیر هنوز به مطالعات و پژوهش‌های بیشتر و کامل‌تری نیاز است، تا بتوان رابطه‌ی نسبتاً دقیق‌تر و قابل قبول از نظر کاربردی ارائه داد.

۹. نتیجه‌گیری

به منظور بررسی اثر ضریب شکل مخزن سد در دبی سیلاب ناشی از شکست سد، یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه ساخته و به کمک آن مخازنی با شکل‌های هندسی با ۷ ضریب شکل مختلف بررسی شده است. پدیده‌ی شکست ناگهانی سد با تعبیه‌ی یک دریچه در دیواره‌ی مخزن، که با سرعت زیاد قابل بالارفتن بود، ایجاد و رودخانه‌ی پایین‌دست به‌وسیله‌ی یک فلوم با مقطع مستطیل‌شکل به طولی حدود ۹ متر شبیه‌سازی شده است. نوسانات سطح آب و نیز سرعت جریان در نقاط مختلف فلوم پس از رخداد سیلاب اندازه‌گیری و به کمک داده‌های به‌دست‌آمده‌ی دبی، پیشینه‌ی سیلاب و هیدروگراف مربوط تعیین شده است. آنگاه عدد فرود برای هر حالت محاسبه و رابطه‌ی میان عدد فرود و ضریب شکل استخراج شده است. رابطه‌ی به‌دست‌آمده بین ضریب شکل و عدد فرود، در مقایسه با رابطه‌ی به‌دست‌آمده در گذشته متعلق به موارد محدودی از پدیده‌ی شکست چند سد واقعی نشان داده است که روند تغییرات، سازگاری مناسبی با نتایج مدل آزمایشگاهی دارد، معذالک اختلافات فاحش میان نتایج واقعی و مدل آزمایشگاهی مبین این واقعیت است که برای دستیابی به نتایجی واقع‌گرایانه، دقیق‌تر، و فراگیر به مطالعات و پژوهش‌های بیشتر و جامع‌تری در این زمینه و نیز اصلاح و تکمیل مدل آزمایشگاهی به‌گونه‌ی که تعداد بیشتری از عوامل و پارامترهای مهم و اثرگذار در دبی پیک ناشی از سیلاب شکست سدها را در برگیرد، نیاز است.

برای هر ضریب شکل مخزن، از روابط ۶ و ۷ عدد فرود محاسبه و با انجام آنالیز معکوس دبی پیشینه‌ی متناظر از معادله‌ی ۵ محاسبه شده است. نتایج حاصل در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، علی‌رغم سازگار و مشابه بودن روند تغییرات در نتایج حاصل از دو رابطه‌ی مذکور، اختلاف در کمیت‌ها و مقادیر به‌دست‌آمده بسیار زیاد و کاملاً تأمل‌برانگیز است. برخی از این اختلافات می‌تواند به دلیل کم و محدود بودن داده‌های میدانی و نیز تنوع و تعدد پارامترها و عوامل مؤثر در این پدیده باشد. عامل بعدی می‌تواند ساده‌سازی‌های بسیاری باشد که در ساخت مدل فیزیکی (جای‌گزینی هندسه و توپوگرافی نامنظم و پیچیده‌ی مخزن، رودخانه‌های پایین‌دست سدهای واقعی با شکل‌های منظم هندسی، و توپوگرافی صفر در آزمایشگاه، حذف و یا کاهش قابل ملاحظه‌ی اصطکاک، و عوارض اثرگذار کف و جداره‌ها بر جریان در مدل‌های فیزیکی در مقایسه با سدهای واقعی، و شکست سد در حالت تدریجی) در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی صورت گرفته است. بالاتر بودن

پانویس‌ها

1. pneumatic
2. Ultrasonic
3. Microsonic

منابع (References)

1. Dressler, R.F. "Comparison of theories and experiments for the hydraulic dam-break wave", *Int. Assoc. Sci. Hydraul.*, **38**, pp. 319-328 (1954).
2. Bell, W.S., Elliot, R.C. and Chaudhry, M.F. "Experimental results of two-dimensional dam-break flows", *J. Hydraul. Res.*, **30**(2), pp. 225-252 (1992).
3. Lauber, G. and Hager, W.H. "Experiments to dam-break wave: Horizontal channel", *J. Hydraul. Res.*, **36**(3), pp. 291-307 (1998a).
4. Soares, F.S. and Zech, Y. "Dam break in channels with 90 bund", *J. Hydraul. Eng.*, **128**(11), pp. 956-968 (2002).
5. Nsom, B. "Horizontal viscous dam-break flow: Experiments and theory", *J. Hydraul. Eng.*, **128**(5), pp. 543-546 (2002).
6. Taher-Shamsi, A. and Shetty, A. "Embankment dam breaching geometry and peak outflow characteristics", *J. Dam Engineering*, **5-2**(1), pp. 72-87 (2004).
7. Chanson, H., Jarny, S. and Coussot, P. "Dam break wave of thixotropic fluid", *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(3), pp. 280-293 (2006).
8. Soares, F.S. "Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill", *J. Hydraul. Res.*, **45**(1), Extra Issue, pp. 19-26 (2007).
9. Weiming, W., Sam, S. and Wang, Y. "One-dimensional modeling of dam-break flow over movable beds", *J. Hydraul. Eng., ASCE*, **133**(1), pp. 48-58 (2007).
10. Spinewine, B. and Zech, Y. "Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds", *Journal of Hydraulic Research*, **45**(1), Extra Issue, pp. 73-86 (2007).
11. Aureli, F. and et.al. "Dam-break flows: Acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling", *Journal of Hydraulic Engineering*, **134**(8), pp. 1089-1101 (2008).

12. Bukreev, V.I., Degtyarev, V.V. and Chebotnikov, A.V. "Experimental verification of methods for calculating partial dam-break waves", *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, **49**(5), pp. 754-761 (2008).
13. Leal, G.A.B., Ferreira, M.L. and Cardoso, A.H. "Maximum level and time to peak of dam-break waves on mobile horizontal bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, **135**(11), pp. 995-999 (2009).
14. Duarte, R. and et.al. "Experimental study on dam-break waves for silted-up reservoirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**(11), pp. 1385-1393 (2011).
15. Feizi Khankandi, A., Tahershamsi, A. and Soares, F.S. "Experimental investigation of reservoir geometry effect on dam-break flow", *Journal of Hydraulic Research*, **50**(4), pp. 376-387 (2012).
16. Mirmohammad Hosseini, T. "The relationship between the dams reservoir shape factor and the maximum dam-break flow", Master's thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran (2012).