

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر پایه‌ی استوانه‌یی شکل در جریان‌های ناشی از شکست سد

اتابک فیضی‌خانکندی (دانشجوی دکتری)

احمدطاهر شمسی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران: شریف  
دوری ۲-۱۳۹۰، شماره ۲، ص. ۵۹-۴۹

در این نوشتار، مشخصات جریان به‌دست‌آمده از نتایج مدل آزمایشگاهی شکست سد با در نظر گرفتن پایه‌ی پل استوانه‌یی شکل واقع شده در میان کانال مستطیلی شکل بررسی شده است. تغییرات سطح آب توسط حسگرهای آلتراسونیک و دوربین با سرعت بالا و مؤلفه‌های سرعت با دستگاه سرعت‌سنج (ADV) برداشت شده است. مشاهدات جریان، نشان‌دهنده‌ی تغییر مسیر جریان برای عبور از پایه‌ی پل و ایجاد جریان‌های عرضی در پایین‌دست است؛ به طوری‌که پشت پایه‌ی پل تا فاصله‌یی به اندازه‌ی ۱۳ برابر قطر آن، ناحیه‌ی برخاستگی جریان مشاهده می‌شود. همچنین مقایسه‌ی تغییرات سطح آب به‌دست‌آمده با مقادیر حل تحلیلی ریتز، بیانگر وجود درصد اختلاف‌های کمتر (۴ الی ۱۲ درصد) در محدوده‌ی بین مخزن سد تا محل پایه‌ی پل است؛ در حالی‌که در فاصله‌ی پشت پایه‌ی پل تا ۱۳ برابر قطر آن به‌علت وجود گردابه‌های برخاستگی، مقادیر آزمایشگاهی از حل تحلیلی ریتز فاصله می‌گیرد.

واژگان کلیدی: شکست سد، پایه‌ی پل، حسگرهای التراسونیک، دوربین CCD، دستگاه ADV.

## ۱. مقدمه

سیل‌های ناگهانی<sup>۱</sup>، سیل‌هایی هستند که بدون مقدمه و هیچ نشانه‌ی قبلی اتفاق می‌افتند و این در حالی است که می‌توانند خسارات مالی و جانی شدیدی به‌بار آورند. هیدروگراف این سیل‌ها اغلب دارای زمان پایه‌ی کوتاه و نقطه‌ی اوج مرتفع هستند. سیل‌هایی با چنین مشخصاتی ممکن است ناشی از طوفان، بارندگی شدید، و کوتاه‌مدت (سیلاب‌های فصلی) و یا ناشی از ریزش ناگهانی آب در اثر شکست سد باشند. فروریختن ناگهانی یک سد که در پشت آن حجم عظیمی از آب ذخیره شده است، باعث می‌شود که به تأسیسات پایین‌دست از قبیل نیروگاه‌ها، مناطق مسکونی، تأسیسات شهری، و تأسیسات کشاورزی خسارت وارد شود. در صورتی‌که در پایین‌دست سد، مناطق مسکونی وجود داشته باشد؛ علاوه بر خسارات مالی، خسارات جانی فراوانی نیز به بار می‌آید. برای تعیین تلفات جانی و خسارات مالی ناشی از شکست سد، دانستن مشخصات سیلاب ایجادشده در مناطق پایین‌دست سد، نظیر ارتفاع سیلاب و زمان رسیدن آن به مناطق موردنظر، امری ضروری است. به‌علاوه پیش‌بینی جریان خروجی بیشینه و هیدروگراف‌های سیل مربوط در فرایند ارزیابی ایمنی هر سد، مؤلفه‌های بسیار مهمی هستند و می‌توانند در تعیین نقاط بحرانی پایین‌دست که در معرض خطرات بالقوه‌ی سیل‌های ناشی از شکست سد قرار

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۱۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۵/۲، پذیرش ۱۳۹۰/۹/۱۳.

دارند، مفید واقع شوند.<sup>[۱]</sup> مطالعات بسیاری برای آنالیز جریان ناشی از شکست سد مانند آشنایی با مفاهیم اساسی شکست سد انجام شده است، که در آن حل تحلیلی برای مسائل هیدرودینامیک شکست آبی سد در یک کانال مستطیلی افقی و بدون اصطکاک ارائه شده است.<sup>[۲]</sup> در سال ۱۹۵۴، نیز اولین داده‌های آزمایشگاهی برای شکست سد به‌صورت آبی در یک فلوم افقی، مستطیلی، و مستقیم بررسی شده است.<sup>[۳]</sup> همچنین در سال ۱۹۹۲، به بررسی جریان‌های دوبعدی ناشی از شکست سد در کانال‌های انحنادار در آزمایشگاه،<sup>[۴]</sup> و نیز حرکت دوبعدی موج سیلابی ناشی از شکست ناگهانی سد با در نظر گرفتن بسترهای خشک و تر در پایین‌دست سد به‌صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است.<sup>[۵]</sup> در این آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب از موج‌سنج‌ها<sup>۲</sup> و فشارسنج‌ها<sup>۳</sup> استفاده و با تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده، رفتار جریان بررسی شده است. در سال ۱۹۹۶، نیز به بررسی آزمایشگاهی و عددی مسئله‌ی شکست سد بر روی بستر خشک پرداخته شده است، که در آن روش حل عددی به‌کار گرفته‌شده بر پایه‌ی روش تسخیر شوک از نوع گودونوف بوده و برای ارزیابی صحت حل عددی استفاده‌شده، مدل فیزیکی آن ساخته شده است.<sup>[۶]</sup> همچنین در سال ۱۹۹۸، به بررسی مسئله‌ی موج ناشی از شکست سد در یک کانال افقی به‌صورت آزمایشگاهی پرداخته و نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر تحلیلی روش مشخصه مقایسه شده است، که حاکی از تقریب خوب مطالعات تحلیلی ارائه‌شده است.<sup>[۷]</sup> در سال ۲۰۰۲، نیز به بررسی مسئله‌ی شکست به‌صورت آزمایشگاهی و عددی

atabak.feizi@aut.ac.ir  
atshamsi@yahoo.com

در خم ۹۰ درجه‌ای واقع شده در پایین دست سد پرداخته و مدل هیبریدی دوبعدی برای تحلیل جریان شکست سد در خم‌ها پیشنهاد شده است که نتایج به دست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مدل شده تطابق مناسبی داشته است.<sup>[۸]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۴، برای تحلیل دبی اوج هیدروگراف، فاکتور شکل جدیدی براساس مشخصات هندسی مخزن و شکاف ایجاد شده در محل سد ارائه شده است.<sup>[۹]</sup>

در سال ۲۰۰۷، به بررسی گسترش موج ناشی از شکست سد در اطراف یک برآمدگی مثلثی در بستر به صورت آزمایشگاهی پرداخته شده و مشخصات جریان با نتایج آزمایشگاهی به دست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته.<sup>[۱۰]</sup> و همچنین تأثیر وجود مانع واقع شده در پایین دست سد بر روی جریان‌های ناشی از شکست ناگهانی سد مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته و با استفاده از نتایج به دست آمده، الگوی جریان در اطراف مانع مذکور، که به صورت پایه‌ی پل مستطیلی شکل با زاویه‌ی ۶۴ درجه در راستای خط مرکزی کانال قرار داشت، بررسی شده است.<sup>[۱۱]</sup> در سال ۲۰۰۷ نیز به بررسی یک بعدی آزمایشگاهی جریان شکست سد بر روی بسترهای قابل فرسایش پرداخته و نتایج به دست آمده با مدل‌های عددی موجود در این زمینه مقایسه شده است.<sup>[۱۲]</sup> در سال ۲۰۰۸، هم تغییرات سطح آب با استفاده از روش تصویربرداری بررسی و نتایج به دست آمده با مدل عددی دو بعدی ارائه شده مقایسه شد.<sup>[۱۳]</sup> در ایران نیز در دانشگاه‌های مختلف کشور روی مسئله‌ی شکست سد، گزارش‌ها و پایان‌نامه‌هایی ارائه شده است.<sup>[۱۴، ۱۵]</sup>

وجود موانع طبیعی مانند پایه‌های پل و یا تکیه‌گاه‌های آن، درختان و پوشش گیاهی امری طبیعی در بستر رودخانه‌هاست. جریان‌های ناشی از شکست سد در اثر برخورد به چنین موانعی در پایین دست، مخصوصاً اگر این موانع طبیعی یا مصنوعی در نزدیکی سد قرار گرفته باشند، به شدت متأثر می‌شوند. در این تحقیق، بررسی تأثیر پایه‌ی پل استوانه‌ای شکل بر روی جریان‌های ناشی از شکست ناگهانی سد با استفاده از مدل آزمایشگاهی انجام شده است. با تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده، چگونگی تأثیر موانع، مخصوصاً پایه‌های پل، بر روی الگو و مشخصات جریان از قبیل تغییرات سطح آب، مؤلفه‌های سرعت، و هیدروگراف جریان خروجی در نقاط مختلف بررسی شده است تا درک فیزیکی بهتری از تأثیر پدیده‌ی مذکور در مشخصات جریان حاصل شود.

## ۲. تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

### ۲.۱. آنالیز ابعادی و مطالعه‌ی پارامتریک پدیده‌ی موردنظر

پژوهشگران بسیاری پارامترهای مؤثر در الگوی جریان در اطراف پایه‌ی پل را بررسی کرده‌اند که در درک و برآورد پارامترهایی از جمله میزان آب‌شستگی حائز اهمیت بوده است (رابطه‌ی ۱). از آنجایی که مطالعه‌ی مذکور در ارتباط با بررسی هیدرودینامیکی جریان‌های غیردائمی در اطراف پایه‌ی پل بوده است و مسئله‌ی رسوب مطرح نیست، بنابراین پارامترهای مؤثر در آب‌شستگی در رابطه‌ی ۱ ذکر نمی‌شوند.

$$h = f(k_s, k_\theta, L, D, B, x, u, g, h_0) \quad (۱)$$

در این رابطه،  $h$  عمق جریان،  $k_s$  ضریب شکل پایه،  $k_\theta$  ضریب زاویه‌ی بین جهت جریان و پایه،  $D$  قطر پایه،  $B$  عرض فلوم،  $L$  طول پایه اگر پایه در جهت جریان زاویه داشته باشد،  $x$  فاصله‌ی پایه از دریچه،  $u$  سرعت جریان،  $g$  شتاب ثقل زمین و  $h_0$

عمق اولیه‌ی آب در مخزن است. در مکانیک سیالات و هیدرولیک برای حل مسائل عملی طراحی به نتایج تئوری و آزمایشگاهی احتیاج است. با گروه‌بندی مقادیر مهم به صورت پارامترهای بدون بعد، این امکان وجود دارد که تعداد متغیرهای موجود را کاهش داد و این نتایج را برای تمام حالت‌های مشابه اعتبار بخشید.

با استفاده از یکی از روش‌های آنالیز ابعادی (مانند روش باکینگهام) رابطه‌ی بدون بعد به صورت رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید.

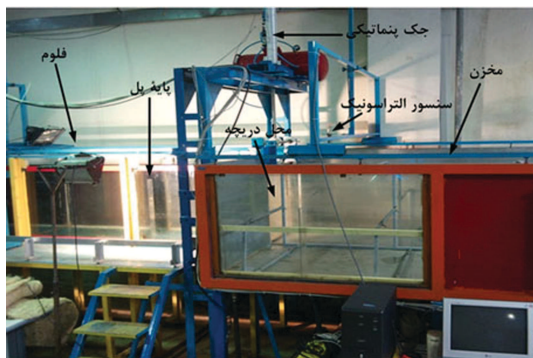
$$\frac{h}{h_0} = f(k_s, k_\theta, \frac{L}{B}, \frac{D}{B}, \frac{x}{h_0}, \frac{u^2}{gh_0}) \quad (۲)$$

شکل‌های رایج پایه‌ی پل، اغلب به صورت استوانه‌ای، مستطیلی، و یا مستطیلی با گوشه‌های گرد هستند. در این تحقیق تأثیر پایه‌ی استوانه‌ای شکل بررسی شده است. برای پرهیز از اثر جریان جانبی به وسیله‌ی دیواره‌های فلوم، بیشینه‌ی نسبت قطر پایه به عرض کانال که در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است،<sup>[۱۶]</sup> ۱/۶٫۲۵ است. در این مطالعه، این نسبت ۱/۱۲٫۷۵ در نظر گرفته شده است تا با معیار فوق سازگاری داشته باشد. همچنین براساس نظر چو و ملویل (۱۹۸۷)،<sup>[۱۷]</sup> قطر پایه نباید از ۱۰٪ عرض کانال بیشتر باشد که با انتخاب قطر پایه‌ی ۴ سانتی‌متری این معیار نیز رعایت شده است. الگوی جریان در اطراف پایه‌های پل، مخصوصاً اطراف پایه‌های غیر استوانه‌ای شکل، با نحوه‌ی قرارگیری پایه‌ی پل و زاویه‌ی برخورد جریان با آن تغییر می‌کند؛ ولی از آنجا که در این نوشتار شکل پایه به صورت استوانه‌ای و هم‌راستا با جریان است، پارامترهای  $k_\theta$  و  $L$  اثری در الگوی جریان نمی‌گذارند.

پارامتر مؤثر دیگر، ارتفاع اولیه‌ی آب در مخزن ( $h_0$ ) است؛ به این صورت که براساس معیار لابر و هگر (۱۹۹۸)،<sup>[۱۸]</sup> اگر تراز سطح آب در مخزن بالاتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد، در این بازه از تراز سطح آب از تأثیرات مقیاسی در کانال مستطیلی و صاف صرف‌نظر می‌شود. در این نوشتار، ترازهای در نظر گرفته شده بالاتر از ۳۰ سانتی‌متر هستند. از آنجایی که جریان در پایین دست محل دریچه به صورت فوق بحرانی است، مقدار کمی عدد فرود متناسب با مقدار اولیه‌ی سطح آب در مخزن ( $h_0$ ) تغییر می‌کند و در تغییرات سطح آب تأثیر می‌گذارد.

### ۲.۲. مخزن و فلوم استفاده شده

جهت انجام آزمایش‌های مربوط به بررسی تأثیر پایه‌ی پل در جریان‌های ناشی از شکست سد، فلومی به عرض ۵۱ سانتی‌متر، عمق ۷۵ سانتی‌متر، و طول ۹٫۳۰ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شد. کف کانال و جداره‌ی فلوم از جنس شیشه به ضخامت ۱۰ میلی‌متر بود و ضریب زبری بستر (مانینگ) برابر ۰٫۰۱ در شرایط جریان دائمی در فلوم به دست آمده است. فلوم موردنظر از طرف بالادست به یک مخزن به عرض ۰٫۵۱ (هم‌عرض با فلوم) و طول ۳٫۵ متر متصل شده است. جنس دیواره‌های مخزن از پلگسی‌گلاس و کف آن از ورق گالوانیزه به ضخامت ۴ میلی‌متر ساخته شده است. برای تغذیه‌ی مخزن موردنظر از ۲ روش استفاده شده است: ۱. تغذیه از بالای مخزن، و ۲. تغذیه از کف مخزن. سیستم تأمین آب شامل ۲ پمپ بود که با ایجاد جریان گردشی از مخزن به فلوم و بالعکس، آب موردنیاز جهت انجام آزمایش‌ها را تأمین کرده است. به منظور شبیه‌سازی مانع پایین دست در مسیر رودخانه، از پایه‌ی پل استوانه‌ای شکل و از جنس پلگسی‌گلاس به قطر ۴ سانتی‌متر و واقع شده در فاصله‌ی ۱۰۸ سانتی‌متری از دریچه و در مرکز فلوم استفاده شده است (شکل‌های ۱ و ۲).



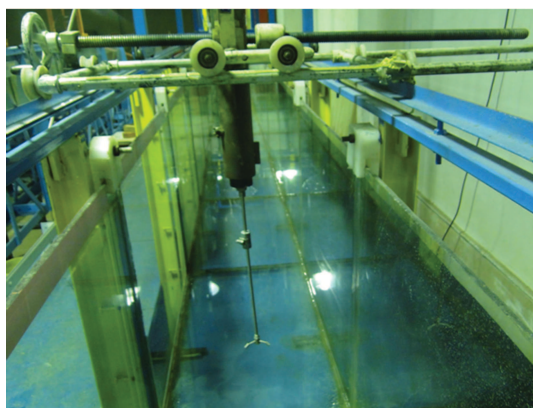
شکل ۳. نمای کلی از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده.

این کار پیش‌بینی شده است. نرم‌افزار موردنظر با Data Logger سیستم در ارتباط بوده است و از این طریق کنترل پروژه صورت می‌پذیرد. این دستگاه در اداره‌ی کل ثبت شرکت‌ها و مالکیت صنعتی به‌عنوان اختراع ثبت شده است (شکل ۳).<sup>[۱۸]</sup>

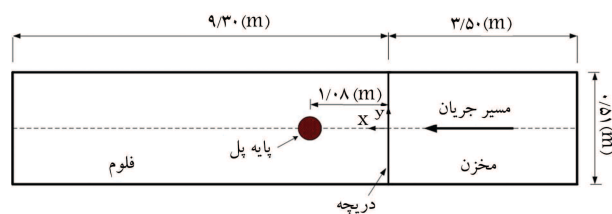
#### ۴.۲. وسایل اندازه‌گیری استفاده شده

برای اندازه‌گیری سرعت در نقاط مختلف کانال از سرعت‌سنج ADV<sup>۵</sup> استفاده شده است که می‌تواند نوسانات سرعت را در یک بازه‌ی زمانی مشخص در ۳ راستای عمود بر هم ثبت و با کمک نرم‌افزار مربوط پردازش کند. دستگاه مورد استفاده دارای بسامد بیشینه‌ی ۵۰ هرتز جهت برداشت داده‌ها بود و در بالای فلوم قرار داشت و با نصب ریل در پایه‌ی آن، امکان جابجایی طولی و عرضی فراهم شده بود. آشفتگی ایجاد شده توسط پروب ADV موضعی و قابل اغماض بوده است، چون قطر پروب اندازه‌گیری کمتر از ۶ میلی‌متر بود و تأثیری در جریان نمی‌گذاشت (شکل ۴).

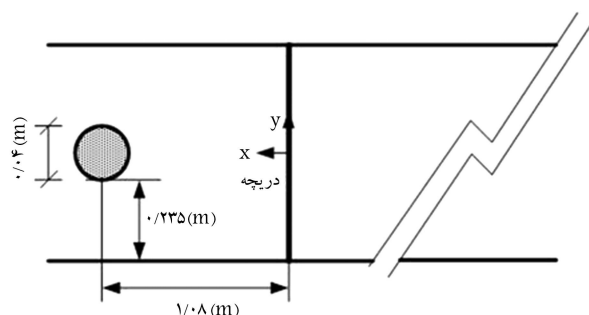
از ۲ روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب در این تحقیق استفاده شده است: ۱. برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب از حسگرهای التراسونیک استفاده شده است. حسگر التراسونیک با فرستادن امواج صوتی به سطح آب و محاسبه‌ی مدت زمان برگشت آن‌ها، تغییرات تراز سطح آب را در لحظات مختلف بیان می‌کند و چون هیچ تماسی با جریان آب ندارد، باعث ایجاد اغتشاش در جریان آب نمی‌شود. دقت حسگرهای التراسونیک استفاده شده ۱۰۰ میلی ثانیه است که به‌صورت عدد متریک دارای دقت  $\pm 0.2$  میلی‌متر هستند. برای کالیبره کردن حسگرها در نرم‌افزار طراحی شده، گزینه‌ی پیش‌بینی شده است که وقتی برنامه در حالت اجرا قرار گیرد، گزینه‌های کالیبراسیون حسگرها فعال شوند و عدد برداشت شده توسط هر حسگر با



شکل ۴. نمای کلی از دستگاه ADV و نحوه‌ی نصب آن.



شکل ۱. پلانی از مخزن و فلوم آزمایشگاهی استفاده شده.



شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری پایه‌ی پیل در فلوم.

#### ۳.۲. مکانیزم شکست سد

برای اینکه بتوان پدیده‌ی شکست سد آبی را در مقیاس آزمایشگاهی مدل کرد، براساس معیار لابر و هگر<sup>[۱۷]</sup> (۱۹۹۸)، باید زمان بازشدگی دریچه از معیار زمانی  $(2h_0/g)^{0.5}$  کمتر شود که در آن  $h_0$  عمق اولیه‌ی آب در مخزن سد است.

در این پژوهش، آزمایش‌ها در ۳ تراز اولیه‌ی سطح آب ۳۵، ۴۰ و ۴۵ سانتی‌متری در مخزن سد و با در نظر گرفتن بستر خشک در پایین دست آن انجام شده است. اگر کمینه‌ی ارتفاع اولیه‌ی آب در بالادست (مخزن) ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شود، زمان بازشدگی دریچه،  $t_{op}$  براساس معیار گفته شده باید از  $0.26$  ثانیه کمتر شود. برای دستیابی به چنین سرعتی در مقیاس آزمایشگاهی، از جک‌های پنوماتیکی و وسایل مربوط به آن استفاده شده است. با انتخاب مناسب مدل جک و وسایل مربوط و استفاده از کمپرسور هوای فشرده با مقدار فشار تولیدی ۹ بار هوا، مدت زمان بازشدگی دریچه کمتر از  $0.15$  ثانیه به دست آمده است. جنس دریچه‌ی که به‌منزله‌ی سد در نظر گرفته شده است، از پلگسی‌گلاس به ضخامت ۱۰ میلی‌متر براساس استانداردهای مدل‌سازی محل سد در مسائل آزمایشگاهی شکست سد و به علت ایجاد اصطکاک سطحی کمتر با آب بوده است. برای جلوگیری از نشت تحتانی در محل دریچه، ۲ نوار آب‌بند  $0.5$  میلی‌متری زیر دریچه چسبانده شده است که قابل حرکت با دریچه است. برای حرکت روان دریچه و استقامت مسیر حرکت در جهت قائم، ۲ سری بلبرینگ در امتداد حرکت دریچه نصب شده است؛ به طوری که در هر طرف دریچه، ۴ عدد بلبرینگ به همراه ۲ شفت در ۲ ردیف ۲۰ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند. همچنین جهت تسهیل حرکت دریچه، از روان‌کننده‌های مختلف از جمله اسپری سیلیکون نیز استفاده شده است. برای کاهش نوسانات سطح آب مخزن هنگام باز شدن سریع دریچه، محل قرارگیری دریچه به صورت کاملاً مجزا از بدنه‌ی مخزن و فلوم ساخته شده و جک پنوماتیکی بر روی آن قرار گرفته است؛ و همچنین برای افزایش عمر دستگاه و نیز کاهش سرعت در محل برخورد دریچه به قسمت تحتانی جک پنوماتیکی از ۲ عدد ضربه‌گیر<sup>۴</sup> نیز استفاده شده است. برای تنظیم حرکت جک هیدرولیکی استفاده شده، برنامه‌ی رایانه‌ی در محیط نرم‌افزاری Lab View طراحی شده و در نرم‌افزار موردنظر گزینه‌ی برای انجام

جدول ۱. مختصات دکارتی نقاط برداشت شده.

| مکان | $x$ (m) | $y$ (m) |
|------|---------|---------|
| G۱   | ۰٫۸۳    | ۱۱٫۷۵   |
| G۲   | ۰٫۸۳    | -۱۱٫۷۵  |
| G۳   | ۰٫۹۸    | ۰       |
| G۴   | ۱٫۰۸    | ۱۱٫۷۵   |
| G۵   | ۱٫۰۸    | -۱۱٫۷۵  |
| G۶   | ۱٫۳۳    | ۰       |
| G۷   | ۱٫۴۸    | -۱۱٫۷۵  |
| G۸   | ۱٫۵۸    | ۰       |
| G۹   | -۰٫۰۵   | ۰       |
| G۱۰  | -۰٫۰۵   | ۰       |



شکل ۵. نمای کلی از دستگاه آلتراسونیک و نحوه نصب آن.

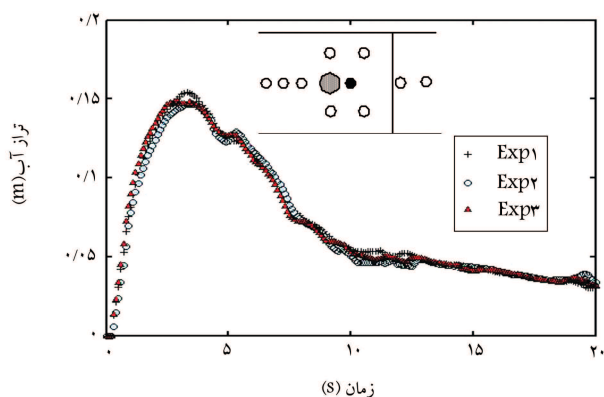
و G۶ و در ارتفاع ۵ سانتی متری نسبت به بستر فلولم اندازه‌گیری شده است تا پروب دستگاه بتواند در داخل بخش عظیمی از جریان آب قرار گیرد. اندازه‌گیری سرعت‌ها در تراز سطح آب مخزن برابر ۴۰ سانتی متر انجام شده است.

## ۴. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی

### ۴.۱. ارزیابی تغییرات سطح آب در نقاط اندازه‌گیری شده

در این بخش، مقایسه‌ی تغییرات سطح آب در نقاط مشخص شده در جدول ۱ ارائه شده است. در بعضی از این نمودارها از مختصات بی بعد زمانی و مکانی به این صورت استفاده شده است: مختصات بی بعد مکانی  $Z$  و  $X$  به صورت  $Z = h/h_0$  و  $X = x/h_0$  است که در آن‌ها،  $h$  تغییرات تراز سطح آب،  $h_0$  تراز اولیه‌ی آب مخزن،  $x$  فاصله‌ی مکان موردنظر از محل دریاچه است. مختصات بی بعد زمانی نیز به صورت  $T = t(g/h_0)^{0.5}$  در نظر گرفته شده است که در آن،  $t$  مشخص‌کننده‌ی زمان و  $g$  شتاب گرانش زمین است. به علت وجود روند یکسان در تغییرات سطح آب در ترازهای مختلف سطح آب مخزن، نتایج فقط برای حالت تراز اولیه‌ی آب مخزن ۴۰ سانتی متری به صورت کامل بیان شده است. جهت اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها، با در نظر گرفتن ۴۰ سانتی متر تراز اولیه‌ی آب در مخزن، ۳ سری آزمایش در شرایط مشابه برای به دست آوردن تغییرات سطح آب در نقاط G۳ و G۷ انجام شده است (شکل‌های ۷ و ۸).

تحلیل داده‌های به دست آمده از این شکل‌ها، وجود متوسط خطای ۳ الی



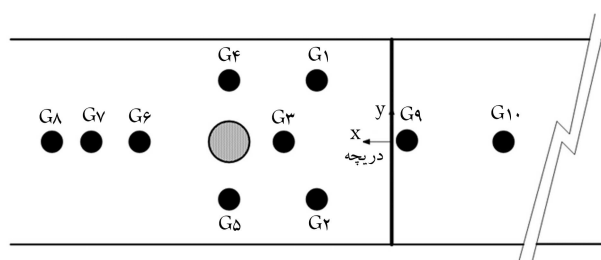
شکل ۷. نتایج ۳ سری آزمایش یکسان در نقطه‌ی G۳.

محدوده‌ی خطایی که قبلاً برای آن‌ها تعریف شده است، نمایش داده شود. بنابراین با توجه به موقعیت قرارگیری حسگرها، کالیبراسیون آن‌ها جهت انجام آزمایش‌ها صورت می‌پذیرد. مکان نصب این وسیله‌ی اندازه‌گیری به گونه‌ی است که امکان جابجایی طولی و عرضی برای آن فراهم شده است (شکل ۵).

۲. روش دیگر برای اندازه‌گیری تغییرات سطح آب، استفاده از دوربین سرعت بالاست (CCD). دوربین سرعت بالای استفاده شده در این تحقیق، ۶۰ تصویر در ثانیه با رزولوشن  $512 \times 1024$  پیکسل برداشت می‌کند. برای جابجایی دوربین موردنظر، ریلی در کنار فلولم آزمایشگاهی تعبیه شده است که در فاصله‌ی ۵۰ سانتی متری از آن قرار دارد. برای تأمین روشنایی کافی در انجام آزمایش‌های مربوط از ۲ عدد پروژکتور با توان ۱۰۰۰ وات استفاده شده است.

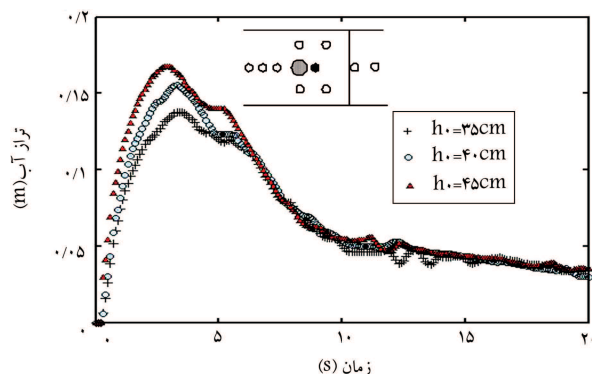
## ۳. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

در این نوشتار، در همه‌ی آزمایش‌های انجام شده، تراز اولیه‌ی سطح آب در داخل مخزن بالاتر از ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است که براساس معیار لایرو و هگر (۱۹۹۸) [۷] در این بازه از تراز سطح آب مخزن از تأثیرات مقیاسی در کانال مستطیلی و صاف صرف نظر می‌شود. در این تحقیق، آزمایش‌ها در ۳ تراز آب ۳۵، ۴۰ و ۴۵ سانتی متری در مخزن سد و با در نظر گرفتن بستر خشک در پایین دست انجام شده است و برای هر کدام از ترازهای سطح آب مخزن، تغییرات سطح آب در مکان‌های اندازه‌گیری مشخص شده در شکل ۶ ارائه شده است. جدول ۱، مختصات دکارتی نقاط نشان داده شده در شکل ۶ را ارائه می‌کند. مرکز دریاچه به منزله‌ی مبدأ مختصات اندازه‌گیری  $(x, y) = (0, 0)$  در نظر گرفته شده است. در ابتدای هر آزمایش، مخزن موردنظر در ارتفاع آب موردنظر پر و بعد از مدتی که شرط آب ساکن در مخزن تأمین شد، آزمایش‌ها انجام شده است. مؤلفه‌های سرعت جریان در مکان‌های G۵، G۲

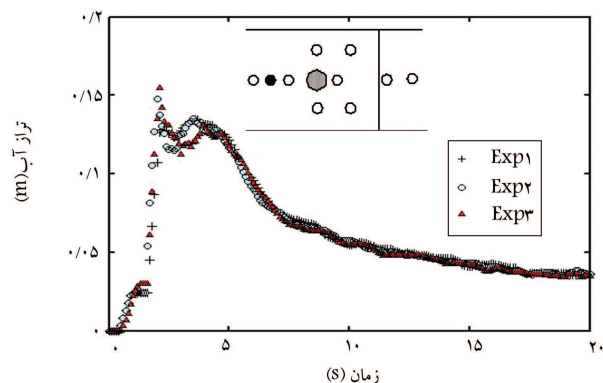


شکل ۶. شماتیکی از مکان‌های اندازه‌گیری شده.

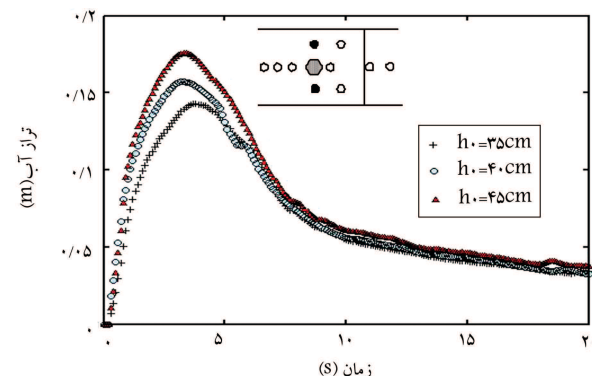




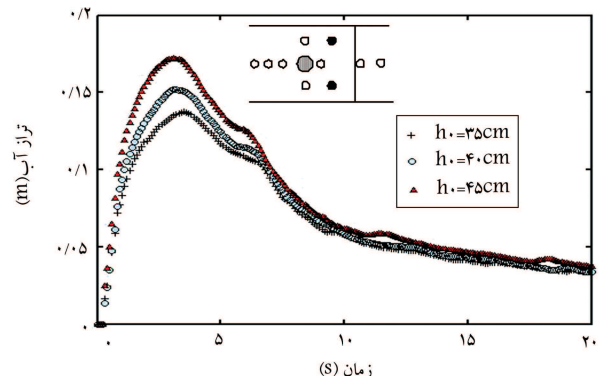
شکل ۱۰. تغییرات سطح آب در نقطه‌ی G۳.



شکل ۸. نتایج ۳ سری آزمایش یکسان در نقطه‌ی G۷.



شکل ۱۱. تغییرات سطح آب در نقاط G۴ و G۵.



شکل ۹. تغییرات سطح آب در نقاط G۱ و G۲.

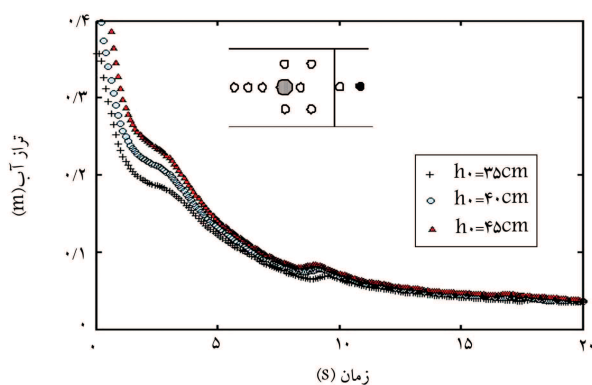
در حالت با پایه در این نقطه بوده است که ناشی از تأثیر پایه‌ی پل بر روی الگوی جریان در پایین‌دست دریچه است. شکل ۱۰، تغییرات سطح آب را در مکان G۳، جلوی پایه‌ی پل و در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری از آن نشان می‌دهد. مقدار بیشینه‌ی سطح آب با در نظر گرفتن ۴۰ سانتی‌متر آب در مخزن، ۱۴/۸ سانتی‌متر بوده و ۳/۱ ثانیه بعد از باز شدن دریچه رخ داده است. مقدار تراز سطح آب در این نقطه‌ی اندازه‌گیری نسبت به حالت قبل (G۱)، دارای افت ۴/۵٪ بوده است که علت این کاهش تراز سطح آب به دلیل تطبیق حرکت خطوط جریان به سمت پایین (جریان پایین‌رو) در اثر برخورد به پایه‌ی پل است. در این نقطه تراز سطح آب در مقایسه با حالت بدون پایه دارای افت ۶٪ بوده است (جدول ۲). شکل ۱۱، تغییرات سطح آب را در نقاط G۴ و G۵ نشان می‌دهد. در نقاط G۴ و G۵ نیز مشابه G۱ و G۲، نمودارهای سطح آب به دست آمده یکی هستند و روند یکسان در تغییرات سطح آب آن‌ها مشاهده می‌شود. مدت زمان رسیدن به نقطه‌ی بیشینه‌ی سطح آب در این حالت نسبت به حالت قبل اندکی با تأخیر بوده است و در زمان ۳/۷ ثانیه بعد از باز شدن دریچه به مقدار بیشینه‌ی ۱۶/۵ سانتی‌متر می‌رسد. نوسانات جزئی موجود در این نمودار به علت ایجاد جریان‌های عرضی ناشی از تغییر مسیر جریان بوده است. در این نقاط افزایش موضعی تراز سطح آب به اندازه‌ی ۶٪ نسبت به تراز سطح آب ارائه شده در نقاط G۱ و G۲ به دلیل قرارگیری پایه‌ی پل در این مقطع دیده می‌شود. همچنین در این نقاط تراز سطح آب نسبت به حالت بدون پایه دارای افت ۶٪ است (جدول ۲). شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ تغییرات تراز سطح آب را در نقاط G۶، G۷ و G۸ نشان می‌دهند. در این نقاط که پشت پایه‌ی پل قرار گرفته‌اند، نوسانات شدیدی در سطح آب به علت ایجاد گردابه‌های برخاستگی ایجاد شده است. این گردابه‌ها باعث به وجود آوردن رفتار متفاوت در مسیر جریان می‌شوند.

۴ درصدی بین اطلاعات برداشت شده از آزمایش‌های یکسان حکایت می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که آزمایش‌ها دارای تکرارپذیری مناسبی هستند و این تکرارپذیری در انجام آزمایش‌های مختلف در مورد استفاده از دوربین با سرعت بالا برای تصویربرداری از جریان بسیار مهم است.

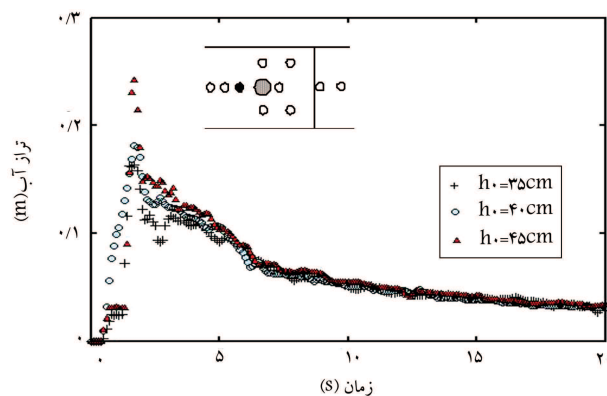
شکل ۹، تغییرات سطح آب را در نقاط G۱ و G۲ نمایش می‌دهد. تحلیل داده‌های به دست آمده نشان می‌دهند که برای مکان‌های G۱ و G۲ تغییرات سطح آب ایجاد شده به صورت یکسان هستند و روند تغییرات در هر دو یکی است. نمودار تغییرات سطح آب برای ۳ تراز آب مختلف در مخزن رسم شده‌اند. مقدار بیشینه‌ی سطح آب در تراز ۴۰ سانتی‌متری آب مخزن، ۱۵/۵ سانتی‌متر و زمان رسیدن به آن ۲/۷۶ ثانیه بعد از باز شدن دریچه بوده است. براساس تحلیل نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۲، تراز سطح آب در حالت بدون پایه ۷٪ بالاتر از تراز سطح آب

جدول ۲. مقایسه‌ی تراز سطح آب در حالت‌های با پایه و بدون پایه.

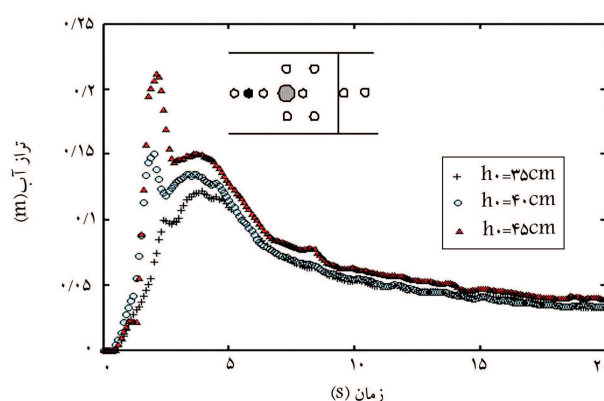
| مکان اندازه‌گیری شده | متوسط اختلاف حالت با پایه‌ی پل و بدون پایه بر حسب درصد |
|----------------------|--------------------------------------------------------|
| G۱ و G۲              | ۷                                                      |
| G۳                   | ۶                                                      |
| G۴ و G۵              | ۶                                                      |
| G۶                   | ۲۷                                                     |
| G۸                   | ۲۵                                                     |
| G۹                   | ۳                                                      |
| G۱۰                  | ۴                                                      |



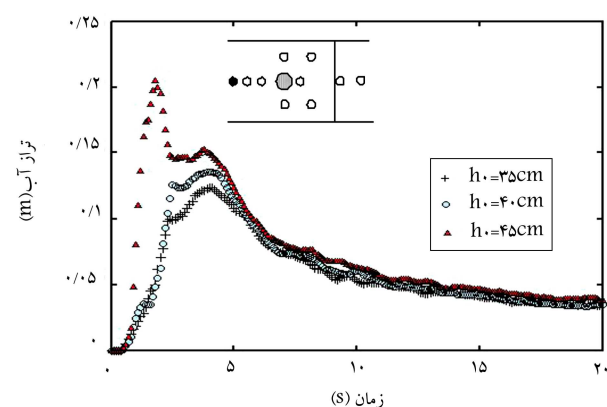
شکل ۱۱. تغییرات سطح آب در نقطه‌ی G۱۰ (داخل مخزن).



شکل ۱۲. تغییرات سطح آب در نقطه‌ی G۶.



شکل ۱۳. تغییرات سطح آب در نقطه‌ی G۷.



شکل ۱۴. تغییرات سطح آب در نقطه‌ی G۸.

**۲.۴. مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی با حل تحلیلی ریتز**  
در سال ۱۹۷۸، حل تحلیلی مسئله‌ی شکست سد با در نظر گرفتن کانال مستطیلی و بدون اصطکاک در پایین دست و مخزن بی نهایت در بالادست توسط ریتز ارائه شد.<sup>[۲]</sup> این حل تحلیلی تغییرات پروفیل سطح آب را در حالت یک بعدی و به صورت معادله‌ی ۳ ارائه کرده است:

$$Z = \left[ \frac{1}{3} \left( 2 - \frac{X}{T} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

که در آن  $X$  و  $Z$  مختصات بی بعد مکانی هستند که به صورت  $X = x/h_0$  و  $Z = h/h_0$  محاسبه می شوند و در آن ها،  $x$  فاصله‌ی مکان مورد نظر از محل در پیچه،  $h_0$  مقدار اولیه‌ی سطح آب در داخل مخزن و  $h$  تغییرات سطح آب است. پارامتر بی بعد زمان نیز به صورت  $T = t(g/h_0)^{0.5}$  منظور می شود که  $t$  مشخص کننده‌ی زمان و  $g$  شتاب گرانش زمین است.

در شکل های ۱۶ تا ۱۹، مقایسه‌ی حل تحلیلی ریتز با داده های آزمایشگاهی به دست آمده در نقاط G۱، G۳، G۶، G۱۰ و G۱۰ با در نظر گرفتن ۲ حالت با پایه و بدون پایه‌ی پل نشان داده شده و در جدول ۳، متوسط اختلاف موجود بین داده های آزمایشگاهی در ۲ حالت مذکور با حل تحلیلی ریتز نیز ارائه شده است. قابل ذکر است که نمودارهای مذکور به صورت بی بعد ترسیم شده اند. مقادیر آزمایشگاهی با حل تحلیلی ریتز در محدوده‌ی  $T = 0$  تا  $T = 20$  قابل مقایسه است، چون بعد از این محدوده، تغییرات سطح آب در هر ۲ حالت با پایه و بدون پایه به علت تخلیه‌ی مخزن روند نزولی به خود می گیرد؛ در حالی که در حل تحلیلی ریتز، مخزن بی نهایت فرض می شود و خالی نمی شود. نتایج به دست آمده نشان می دهند که وجود پایه‌ی

جدول ۳. مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از حل تحلیلی ریتز با داده های آزمایشگاهی در ۲ حالت با پایه و بدون پایه‌ی پل.

| مکان<br>اندازه گیری<br>شده | متوسط اختلاف بر حسب درصد              |                                       |                                         |
|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
|                            | حالت با پایه‌ی پل<br>و بدون وجود پایه | حالت با پایه‌ی پل<br>و حل تحلیلی ریتز | حالت بدون پایه‌ی پل<br>و حل تحلیلی ریتز |
| G۱ و G۲                    | ۷                                     | ۱۵                                    | ۱۲                                      |
| G۳                         | ۶                                     | ۱۲                                    | ۱۰                                      |
| G۶                         | ۲۷                                    | ۲۲                                    | ۱۰                                      |
| G۸                         | ۲۵                                    | ۳۴                                    | ۱۲                                      |
| G۹                         | ۳                                     | ۴                                     | ۴                                       |
| G۱۰                        | ۴                                     | ۸                                     | ۷                                       |

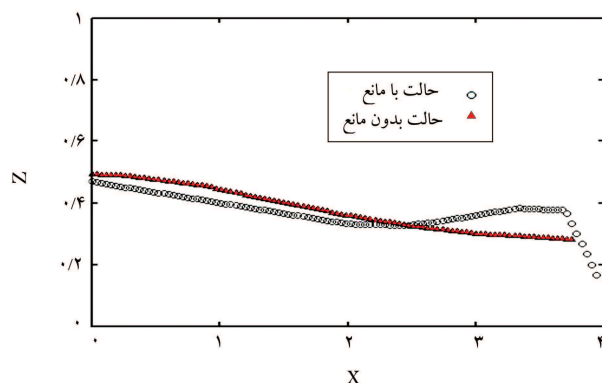
و آشفتگی زیادی در آن ایجاد می کنند. به دلیل ایجاد گردابه های برخاستگی در این نقاط، اختلاف تراز سطح آب نسبت به حالتی که پایه‌ی پل وجود نداشته باشد، قابل توجه است به صورتی که افزایش ۲۷ درصدی تراز سطح آب در نقطه‌ی G۶ و افزایش ۲۵ درصدی در نقطه‌ی G۸ نسبت به حالت بدون پایه دیده می شود (جدول ۲). شکل ۱۵، روند تغییرات سطح آب را در نقطه‌ی G۱۰ در داخل مخزن نشان می دهند. این روند در جهت خالی شدن مخزن است. با بررسی تغییرات سطح آب به دست آمده از این نقاط نسبت به حالتی که پایه‌ی پل در پایین دست وجود نداشته باشد، چنین استنباط می شود که وجود پایه‌ی پل در روند تغییرات تراز سطح آب در داخل مخزن تأثیر بسزایی ندارد و مانند حالت بدون پایه‌ی پل است (جدول ۲).

پل تأثیر چندانی بر تراز سطح آب در نقاط داخلی مخزن نسبت به حالت بدون پایه‌ی پل نداشته است و مقادیر به‌دست‌آمده در هر ۲ حالت با حل تحلیلی ریتز دارای اختلاف یکسان به اندازه‌ی ۴٪ بوده است. بنابراین حل تحلیلی ریتز علی‌رغم وجود پایه‌ی پل در نقاط داخلی مخزن قابل استفاده بوده است و دقت مناسبی دارد. مقادیر به‌دست‌آمده از حل تحلیلی ریتز برای نقاط قبل از پایه‌ی پل (فاصله‌ی درجه تا محل پایه) نیز دقت مناسبی دارد، به طوری‌که بیشینه‌ی خطای ۱۲ تا ۱۵ درصدی ایجاد شده است؛ در حالی‌که اگر شرایط بدون پایه در نظر گرفته شود، بیشینه‌ی مذکور به ۱۰ تا ۱۲ درصد کاهش پیدا می‌کند. تحلیل نتایج بیانگر این است که با قبول محدوده‌ی از خطا، حل تحلیلی ریتز در نقاط قبل از پایه‌ی پل قابل استفاده است. حال آنکه در نقاط بعد از پایه‌ی پل تا فاصله‌ی به اندازه‌ی ۱۳ برابر قطر آن، به دلیل تشکیل گردابه‌های برخاستگی، اختلاف مقادیر حل تحلیلی ریتز با مقادیر آزمایشگاهی قابل توجه بوده و اختلاف‌هایی در رنج ۲۲ تا ۳۴ درصد نسبت به حل تحلیلی ریتز ایجاد شده است.

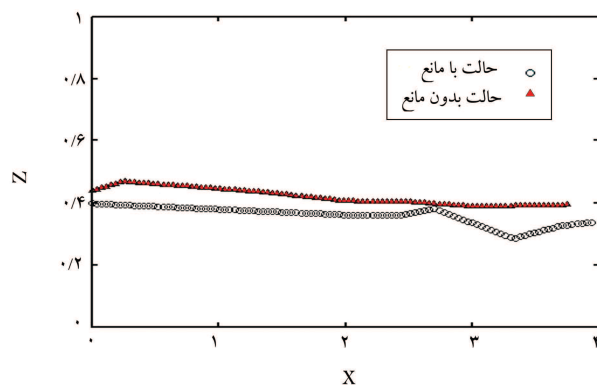
### ۳.۴. ارزیابی تغییرات پروفیل طولی سطح آب

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، تصویربرداری از جریان و مطالعه‌ی آن روشی نوین است که در مسائل شکست سد کاربرد بسزایی دارد. در انجام آزمایش‌ها از دوربین با سرعت بالا برای توصیف چگونگی گسترش موج سیلابی ناشی از شکست سد در پایین‌دست استفاده شده است.

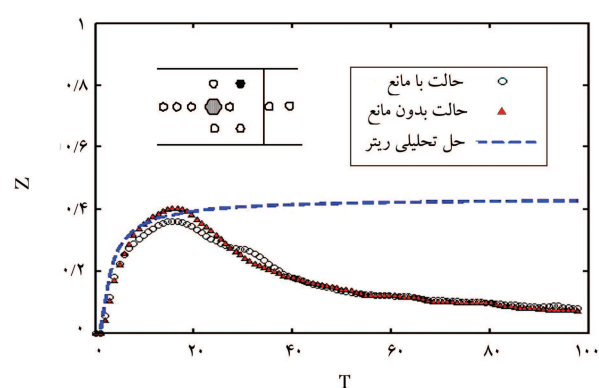
شکل‌های ۲۰ و ۲۱ که به صورت بی‌بعد ارائه شده‌اند، بیانگر گسترش موج سیلابی در پایین‌دست سد در حالت بستر خشک در زمان‌های ۲ و ۴ ثانیه با



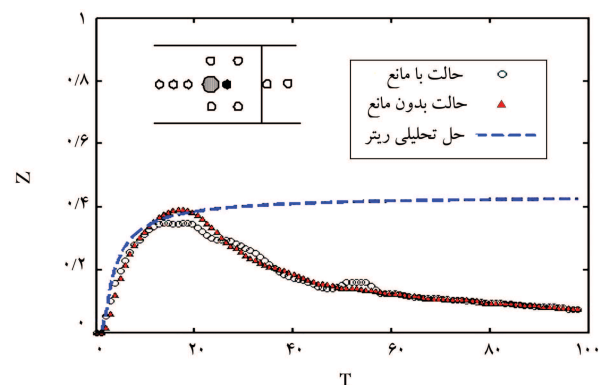
شکل ۲۰. تغییرات پروفیل طولی سطح آب در  $t = 2s$ .



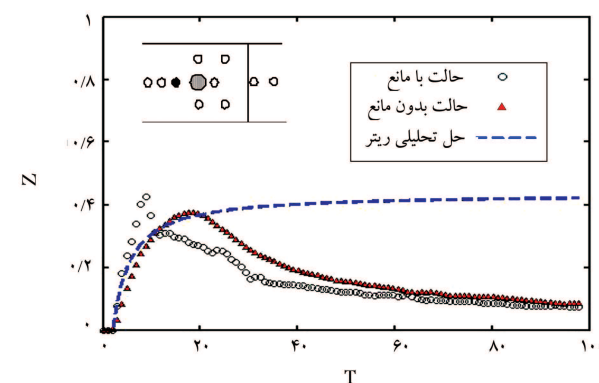
شکل ۲۱. تغییرات پروفیل طولی سطح آب در  $t = 4s$ .



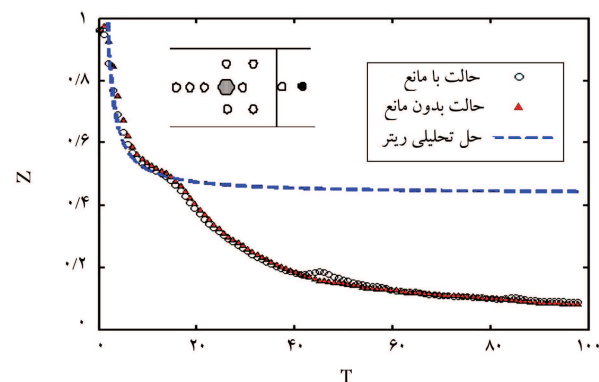
شکل ۱۶. مقایسه‌ی حل تحلیلی ریتز با مقادیر آزمایشگاهی در نقطه‌ی G۱.



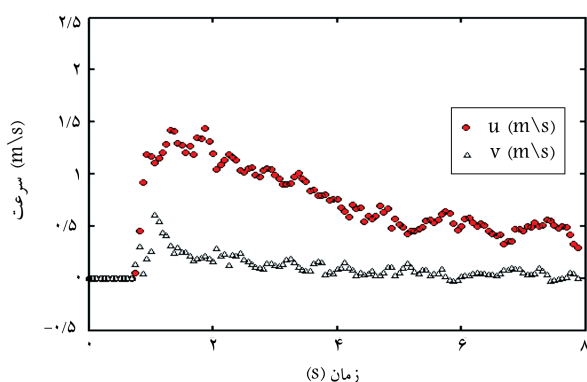
شکل ۱۷. مقایسه‌ی حل تحلیلی ریتز با مقادیر آزمایشگاهی در نقطه‌ی G۳.



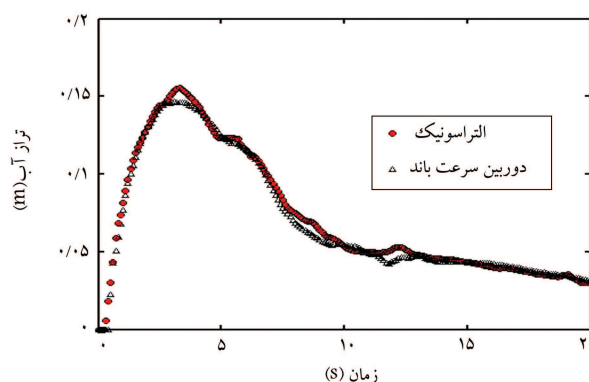
شکل ۱۸. مقایسه‌ی حل تحلیلی ریتز با مقادیر آزمایشگاهی در نقطه‌ی G۶.



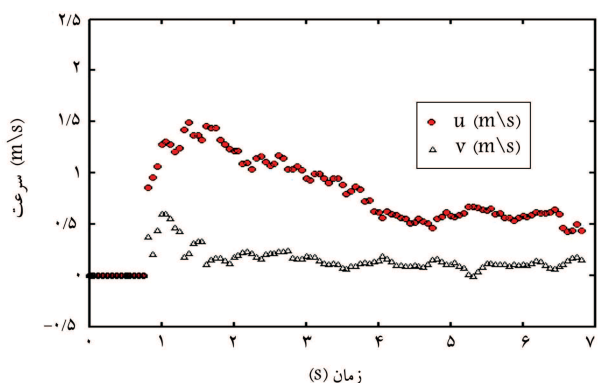
شکل ۱۹. مقایسه‌ی حل تحلیلی ریتز با مقادیر آزمایشگاهی در نقطه‌ی G۱۰.



شکل ۲۳. منحنی تغییرات سرعت در نقطه‌ی G۲.



شکل ۲۲. نتایج حسگر آلتراسونیک و دوربین CCD در نقطه‌ی G۳.



شکل ۲۴. منحنی تغییرات سرعت در نقطه‌ی G۵.

متر بر ثانیه بوده است و روند نزولی در آن کاملاً مشهود است. تغییرات نوسانی منظم ایجاد شده در مؤلفه‌ی افقی سرعت به‌خاطر وجود جریان‌های عرضی ناشی از شروع تغییر مسیر جریان برای عبور از کناره‌ی پایه‌ی پل است. شکل ۲۴، تغییرات مؤلفه‌های سرعت را در فاصله‌ی ۱۰۸ سانتی‌متری از دریچه در نقطه‌ی اندازه‌گیری G۵ و در ارتفاع ۵ سانتی‌متری از بستر فوم نشان می‌دهد. چنانچه دیده می‌شود مؤلفه‌ی افقی سرعت ( $u$ )، در زمان ۱/۴ ثانیه بعد از بازشدن دریچه به مقدار بیشینه‌ی ۱/۴۸ متر بر ثانیه رسیده و حدود تغییرات سرعت بین ۰/۴۳ تا ۱/۴۸ متر بر ثانیه بوده است. بیشینه‌ی سرعت به‌خاطر کاهش سطح مقطع عبور جریان به اندازه‌ی ۸٪ نسبت به حالت قبل ( $x = ۸۳ \text{ cm}$ ) افزایش داشته است. با تحلیل داده‌های برداشت شده دیده می‌شود که روند نزولی مقادیر مؤلفه‌ی افقی سرعت ( $u$ ) با کاهش تراز سطح آب همخوانی داشته است؛ ولی در این روند، کاهش مقادیر سرعت با نوسانات منظمی همراه بوده است که ناشی از جریان‌های عرضی ایجاد شده از تغییر مسیر جریان برای عبور از محدوده‌ی پایه‌ی پل است. این مسئله توسط مؤلفه‌ی عرضی سرعت در این مکان قابل درک است. شکل ۲۵، تغییرات سرعت را در مکان G۶ یعنی درست پشت پایه‌ی پل نشان می‌دهد. مقادیر سرعت‌ها برای مؤلفه‌ی افقی سرعت ( $u$ ) در بازه‌ی بین ۰/۲۹ تا ۱/۶ متر بر ثانیه در حال تغییر هستند. با مشاهده‌ی نوسانات پربودیک در داده‌های آزمایشگاهی برای مؤلفه‌ی عرضی سرعت ( $v$ )، وجود گردابه‌های برخاستگی پشت پایه‌ی پل اثبات می‌شود. روند نزولی مقادیر مؤلفه‌ی افقی سرعت ( $u$ ) در این مکان به‌علت ایجاد گردابه‌های برخاستگی ذکر شده، تحت تأثیر قرار گرفته است و نوسانات شدیدی در آن مشاهده می‌شود.

شکل‌های ۲۶ تا ۲۸، بیانگر تغییرات هیدروگراف جریان در فواصل مختلف از دریچه و پایه‌ی پل استوانه‌یی شکل هستند. هیدروگراف‌های محاسبه شده به‌صورت

در نظر گرفتن مقدار اولیه‌ی سطح آب در مخزن  $h_0$ ، برابر با ۴۰ سانتی‌متر هستند. شکل ۲۰، پروفیل طولی سطح آب را برای حالت ۲ با پایه‌ی پل و بدون آن در زمان  $t = ۲ \text{ s}$  بیان می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود، در فاصله‌ی بین دریچه تا ۱۰۰ سانتی‌متری از آن (محل پایه‌ی پل) تراز سطح آب با وجود پایه‌ی پل مقدار پایین‌تری از تراز سطح آب نسبت به حالت با پایه است. علت این امر تأثیر وجود پایه بر روی خطوط جریان و انقباض جریان در این محدوده است، این در حالی است که ۲ تراز سطح آب ذکر شده (با پایه و بدون پایه) با روند یکسان و یکنواخت سیر نزولی خود را طی می‌کنند. بعد از این فاصله، روند تغییرات سطح آب با وجود پایه‌ی پل در پایین‌دست دریچه نسبت به حالت بدون پایه تغییر کرده است و افزایش ناگهانی سطح آب در فاصله‌ی ۱۰۰ سانتی‌متری تا ۱۵۰ سانتی‌متری از دریچه دیده می‌شود. علت افزایش ناگهانی سطح آب به‌دلیل ایجاد گردابه‌های برخاستگی در این فاصله است. شکل ۲۱، پروفیل طولی سطح آب را برای حالت ۲ با پایه‌ی پل و بدون آن در زمان  $t = ۴ \text{ s}$  نشان می‌دهد. بررسی داده‌های به‌دست آمده بیانگر وجود روند تغییرات مشابه تراز سطح آب نسبت به حالت قبل ( $t = ۲ \text{ s}$ ) بوده است، با این تفاوت که با گذشت زمان گردابه‌های برخاستگی به سمت پایه‌ی پل حرکت می‌کنند و در محل‌های نزدیک به آن رخ می‌دهند.

شکل‌های ۲۲، مقایسه‌ی داده‌های برداشت شده توسط دستگاه آلتراسونیک و دوربین CCD را با در نظر گرفتن تراز اولیه‌ی آب ۴۰ سانتی‌متری در نقطه‌ی G۳ نشان می‌دهند. تحلیل نتایج حاصله نشان می‌دهد که اندرکنش مناسبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر آلتراسونیک و دوربین با سرعت بالا برقرار است، به‌صورتی که متوسط خطای ۳٪ در مکان G۳ و ۴٪ در محل G۷ بین داده‌های موجود مشاهده می‌شود.

#### ۴.۴. ارزیابی تغییرات سرعت و دبی جریان

همان‌طور که قبلاً بیان شد، برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت  $u$  و  $v$  در جهات  $x$  و  $y$  از دستگاه ADV استفاده شده است. به‌علت محدودیت‌های آزمایشگاهی نزدیک‌ترین فاصله برای اندازه‌گیری سرعت از ۸۰ سانتی‌متری دریچه شروع شده است و به‌علت افت سریع سطح آب و خروج پرورب دستگاه ADV از دامنه‌ی جریان، اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت بسیار مشکل بود.

شکل ۲۳، تغییرات سرعت آب را در مکان G۲ در فاصله‌ی ۸۳ سانتی‌متری از دریچه و ۲۵ سانتی‌متری از پایه‌ی پل و در ارتفاع ۵ سانتی‌متری از بستر فوم نشان می‌دهد. مؤلفه‌ی افقی سرعت ( $u$ ) در زمان ۱/۳۷ ثانیه بعد از بازشدن دریچه به مقدار بیشینه‌ی ۱/۳۹ متر بر ثانیه می‌رسد. بازه‌ی تغییرات سرعت بین ۰/۲ تا ۱/۳۹



شکل ۲۹. تصویر به‌دست‌آمده از دوربین سرعت بالا، ۳۳/۰ ثانیه بعد از بازشدن دریچه.

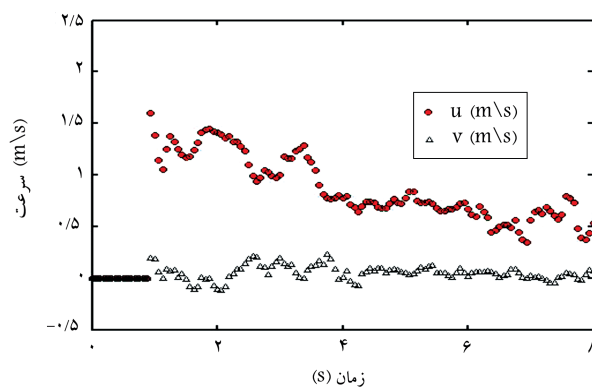


شکل ۳۰. تصویر به‌دست‌آمده از دوربین سرعت بالا، ۶۵/۱ ثانیه بعد از بازشدن دریچه.

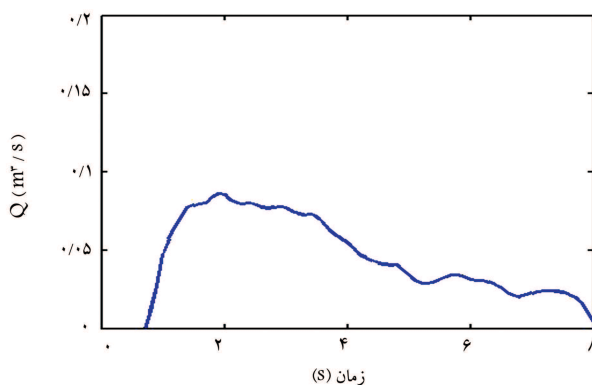
لحظه‌یی‌اند و تخمین کلی از مقدار دبی گذرنده از مقاطع مورد محاسبه را ارائه می‌کنند. هیدروگراف‌های موردنظر در نقاط G۲، G۵ و G۶ با استفاده از مقادیر سرعت در جهت  $x$  ( $u$ ) و تراز سطح آب در این محل و با به‌کارگیری معادله‌ی ۴ برای هرگام زمانی محاسبه شده‌اند:

$$Q = uA \quad (4)$$

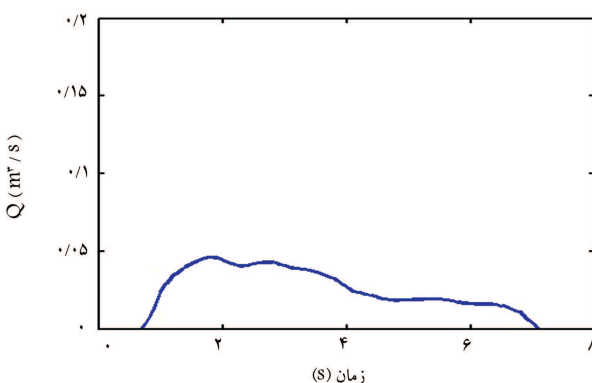
که در آن  $Q$  عبارت است از دبی جریان،  $u = u(z)$  مقادیر سرعت اندازه‌گیری شده در جهت  $x$ ،  $A = by$  است که در آن،  $b$  عرض فلوم و  $y$  تغییرات سطح آب با زمان است. مقادیری از  $y$  و  $u$  برای محاسبه‌ی  $Q$  استفاده شده‌اند که هم‌زمان اندازه‌گیری شده باشند. شکل ۲۶، بیانگر تغییرات هیدروگراف ایجاد شده در مقطعی به فاصله‌ی ۸۳ سانتی‌متری از دریچه و ۲۵ سانتی‌متری از مانع پایین دست است. از این تغییرات استنباط می‌شود که ۱/۸ ثانیه بعد از شروع آزمایش، بیشینه‌ی دبی لحظه‌یی برابر ۷۷/۰ مترمکعب بر ثانیه اتفاق افتاده است که این دبی بیشینه ناشی از وجود تراز سطح آب بیشینه و سرعت جریان در آن لحظه است. تغییرات هیدروگراف ایجاد شده در مقطعی به فاصله‌ی ۱۰۸ سانتی‌متری از دریچه، حد فاصل بین پایه‌ی پل تا دیواره‌ی کناری، در شکل ۲۷ نمایانگر است. بیشینه‌ی مقدار ۴۵/۰ مترمکعب بر ثانیه در این مقطع مشاهده شده است. افت به‌وجود آمده در مسیر جریان در این مقطع به علت کاهش عرض مقطع ناشی از وجود پایه‌ی پل است. شکل ۲۸، تغییرات هیدروگراف ایجاد شده در مقطعی به فاصله‌ی ۱۳۳ سانتی‌متری از دریچه و ۲۵ سانتی‌متری از پشت مانع پایین دست است. چنانچه قبلاً ذکر شد، به دلیل وجود گردابه‌های برخاستگی، تغییرات تراز سطح آب و مقادیر سرعت جریان دارای نوسانات



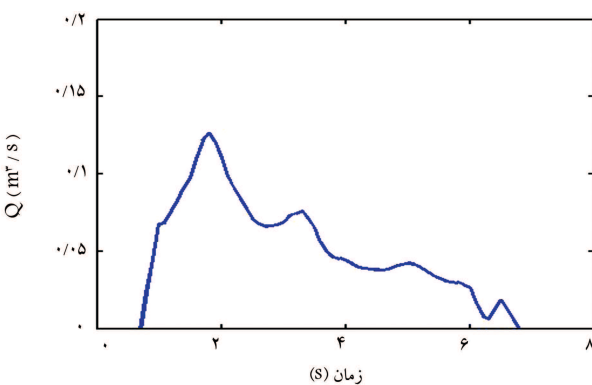
شکل ۲۵. منحنی تغییرات سرعت در نقطه‌ی G۶.



شکل ۲۶. تغییرات هیدروگراف ایجاد شده در نقطه‌ی G۲.



شکل ۲۷. تغییرات هیدروگراف ایجاد شده در نقطه‌ی G۵.



شکل ۲۸. تغییرات هیدروگراف ایجاد شده در نقطه‌ی G۶.

و تغییرات شدید بودند و همین علت باعث ایجاد دبی بیشینه‌ی ۱۳/۰ مترمکعب بر ثانیه و در فاصله‌ی زمانی ۲ ثانیه از شروع آزمایش شده است. شکل‌های ۲۹ تا ۳۰، نمونه‌هایی از تصاویر برداشته‌شده با دوربین CCD در زمان‌های مختلف در اطراف پایه‌ی پل هستند. محل تشکیل گردابه‌های برخاستگی در پشت پایه‌ی پل در تصاویر کاملاً معلوم است و چنانچه قبلاً نیز بیان شد، با گذشت زمان گردابه‌های برخاستگی به پایه‌ی پل نزدیک‌تر می‌شوند.

## ۵. نتیجه‌گیری

نتایج محاسبات بیانگر آن است که وقتی پایه‌ی پل در پایین‌دست محل سد وجود داشته باشد، داده‌های آزمایشگاهی با حل تحلیلی ریتز در نقاط داخلی مخزن دارای اختلاف ۴ درصدی هستند و تطابق مناسبی با مقدار تحلیلی دارند. از طرفی مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی در محدوده‌ی نقاط واقع‌شده از محل سد تا پایه‌ی پل با حل تحلیلی ریتز بیانگر وجود خطای ۱۲-۱۵ درصدی هستند که با در نظر گرفتن این محدوده‌ی خطایی، حل تحلیلی ریتز در این فاصله نیز کاربرد دارد، ولی در

محدوده‌ی از پشت پایه‌ی پل تا ۱۳ برابر قطر آن به جهت ایجاد گردابه‌های برخاستگی، داده‌های آزمایشگاهی از حل تحلیلی ریتز فاصله گرفته‌اند و قابل به‌کارگیری نیستند. وجود پایه‌ی پل، تأثیری در روند تغییرات سطح آب در نقاط داخلی مخزن ایجاد نمی‌کند. مانع پایین‌دست باعث افزایش موضعی جریان در کناره‌های پایه و ایجاد تغییر مسیر جریان شده و تراز سطح آب نسبت به حالت بدون پایه دارای افت است. براساس نتایج حاصل از پروفیل طولی سطح آب و تصاویر به‌دست‌آمده از دوربین با سرعت بالا دیده می‌شود که با گذشت زمان، محل گردابه‌های برخاستگی ایجادشده در پشت پایه‌ی پل به سمت محل پایه‌ی پل حرکت می‌کند و در فاصله‌ی نزدیک‌تر به آن رخ می‌دهد.

در فاصله‌ی ۲۵ سانتی‌متری از پشت پایه، محدوده‌ی تغییرات مؤلفه‌ی افقی سرعت بین ۲۹/۰ تا ۱/۶ متر بر ثانیه بوده است و مؤلفه‌ی عرضی به‌علت وجود گردابه‌های برخاستگی دارای نوسانات شدید و دوره‌ی است. ناحیه‌ی برخاستگی جریان نیز تا فاصله‌ی بی به اندازه‌ی ۱۳ برابر قطر مانع و پشت آن ادامه داشته است. دلیل افزایش ۴۵ درصدی دبی بیشینه‌ی پشت پایه نسبت به جلوی پایه، وجود گردابه‌های برخاستگی و تغییرات شدید سطح آب و سرعت جریان در این محدوده است.

## پانویس‌ها

1. flash floods
2. wave meters
3. pressure transducers
4. shock absorber
5. acoustic doppler velocimeter (ADV)

## منابع (References)

1. Ponce, V.m., Taher-shamsi, A. and Shetty, V.Sh. "Dam breach flood wave propagation using dimensionless parameters", *J. Hydraulic. Eng.*, **129**(10), pp. 777-782 (2003).
2. Ritter, A. "Fortpflanzung der Wasserwellen (The propagation of water waves)", *Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure*, **36**(33), pp. 947-954 (in German) (1892).
3. Dressler, R.F. "Comparison of the theories and experiments for the hydraulic dam-break wave", *Int. Assoc. Sci. Hydraul.*, **38**, pp. 319-328 (1954).
4. Bell, W.S., Elliot, R.C. and Chaudhry, M.F. "Experimental results of two-dimensional dam-break flows", *J. Hydraulic. Res.*, **30**(2), pp. 225-252 (1992).
5. Bellos, C.V., Soulis, J.V. and Sakkas, J.G. "Experimental investigation of two-dimensional dam-break induced flows", *J. Hydraulic. Res.*, **30**(1), pp. 47-63 (1992).
6. Fraccarollo, L. and Toro, E.F. "Experimental and numerical assessment for the shallow water model for 2D dam-break type problems", *J. Hydraulic Res.*, **33**(6), pp. 843-864 (1995).
7. Lauber, G. and Hager, W.H. "Experiments to dam-break wave: Horizontal channel", *J. Hydraulic Res.*, **36**(3), pp. 291-307 (1998a).
8. Soares, F.S. and Zech, Y. "Dam break in channels with 90 bend", *J. Hydraulic Eng.*, **128**(11), pp. 956-968 (2002).
9. Taher-shamsi, A., Shetty, A.V. and Ponce, V.M. "Em-bankment dam breaching: Geometry and peak outflow characteristics", *J. Dam. Eng.*, **14**(2), pp. 73-87 (2004).
10. Soares, F.S. "Experiments of dam-break wave over a tri-angular bottom sill", *J. Hydraulic. Res.*, **45**, Extra Issue, pp. 19-26 (2007).
11. Soares, F.S. and Zech, Y. "Experimental study of dam break flow against an isolated obstacle", *J. Hydraulic. Res.*, **45**, Extra Issue, pp. 27-36 (2007).
12. Weiming, Wu. and Sam, S.Y. Wang, *One-Dimensional Modeling of Dam Break Flow Over Movable Beds*, Tech Science Press, USA (2007).
13. Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P. and Zieweri, C. "Dam-break flows: Acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling", *J. Hydraulic Eng.*, **134**(8), pp. 1089-1101 (2008).



14. Khamsei, S.R. "Study on hydrodynamic of unsteady dam breach out flow" Msc. Dissertation, Civil Engineering department, Amirkabir university of Technology (In Persian) (2007).
15. Mohamadian, A. "2,D Analytical modeling of dam break problem", Msc. Dissertation, Faculty of Engineering Tabriz university (In Persian) (2005).
16. Raudkivi, A. and Ettema, R., "Clear-water scour at cylindrical piers", *J. Hydraulic Eng.*, **109**(3), pp. 338-350 (1983).
17. Chiew, Y.M. and Mellville, B.W. "Local scour around bridge piers", *J. Hydraulic Res.*, **25**(1), pp. 15-26 (1987).
18. Tahershamsi, A. and Feizi, K.A., "Design of dam break mechanism, Laboratort scale" , Amirkabir university of Technology, Patent #66134 Iran, (In Persian) (2010).

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CYLINDRICAL PIER SHAPE EFFECT ON FLOW INDUCED BY DAM BREAK

**A. F. Khankandi**

atabak\_aut.ac.ir

**A. Tahershamsi**(corresponding author)

atshamsi@yahoo.com

**Dept. of Civil and Environmental Engineering  
Amirkabir University of Technology**

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 2, Page 49-59, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 9 March 2011; received in revised form 24 July 2011; accepted 4 December 2011.

## Abstract

Although dam failure rarely occurs, flooding caused by dam-break flow usually results in considerable property damage, as well as, in some cases, loss of life. Induced flow by a dam break occurrence is affected very much by natural and artificial obstacles, such as bridge piers, in the downstream of a dam. Understanding the basic characteristics of dam-break flow, such as maximum water level, maximum discharge and the arrival time of the wave front around the obstacle, such as the bridge pier, at assigned locations, is fundamental to a reliable engineering design. Therefore, it is necessary to determine the extent of damage in cases of possible dam failure around obstacles. In the present study, experimental results of a cylindrical bridge pier with a diameter of 4cm have been modeled in a rectangular flume. The mentioned pier was located 108cm from the gate and made of plexiglass in the downstream.

The experiments were carried out to assess flow propagation along the flume and around the pier under dry bed conditions in the downstream reach. Also, effects of an initial upstream depth on flow propagation were investigated. Dam failure was simulated by sudden removal of the gate that separates the reservoir from the channel, by means of a pneumatic jack. The gate was made of plexiglas plate in order to keep gate-water interference at a minimum level.

Variations in water surface were recorded using ultrasonic sensors and a high speed camera. In addition, an ADV sensor has been used for recording the velocity components at different locations.

Flow results show the significant effect of the bridge pier on the flood wave induced by the dam break. It caused a change in flow direction and made a slight increase in water depth. Also, the wake zone is observed behind the

bridge pier at a distance of 13 times the pier diameter. In addition, experimental data are compared with the analytical solution proposed by Ritter. This comparison shows a very small difference (4-12%) between experimental results and the Ritter solution in the distance between the dam reservoir and the bridge pier location. However, at the distance of 13 times pier diameter behind the bridge pier, due to the existence of the wave zone, the difference percentage is increased.

**Key Words:** Dam break, bridge pier, ultrasonic sensor, CCD camera, ADV sensor