

## بررسی پدیده کاویتاسیون در محل تغییر شیب تنداب سرریز سد سورک با استفاده از مدل فیزیکی

حسین صمدی بروجنی\*<sup>۱</sup>، سهیل عباسی<sup>۲</sup>، روح‌الله فتاحی<sup>۳</sup> و بهزاد قربانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد - رئیس مرکز تحقیقات منابع آب  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شهرکرد  
<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

(دریافت: ۹۵/۱۰/۲۸، پذیرش: ۹۷/۲/۲، نشر آنلاین: ۹۷/۲/۲)

### چکیده

وقوع کاویتاسیون در شوت سرریزها یکی از عوامل تخریب سدها می‌باشد. محل‌های تغییر شیب در تنداب سرریزها به دلیل جدایش جریان، یکی از مواردی است که احتمال وقوع یا تشدید این پدیده را افزایش می‌دهد. در تحقیق حاضر پدیده کاویتاسیون در تنداب سرریز سد سورک که دارای یک تغییر شیب ناگهانی است، با استفاده از مدل فیزیکی بررسی شده است. مدل از جنس پلکسی گلاس با مقیاس ۱:۵۰ ساخته شد و تشابه دینامیکی مدل با برابر قرار دادن عدد فرود بین مدل و نمونه اصلی برقرار شد. آزمایش‌ها در ۵ دبی متفاوت انجام گرفت و پارامترهای فشار، سرعت و عمق جریان در دو محور مرکزی و کنار دیواره برداشت گردید. نتایج نشان داد شاخص کاویتاسیون در دبی سیلاب طراحی از تاج سرریز به سمت پائین‌دست روند نزولی داشته، به طوری که این عدد در نقطه شروع شوت سرریز برابر ۴/۱۹ بوده و در انتهای شوت یعنی نقطه‌ای که به حوضچه آرامش منتهی می‌شود به ۰/۳۴۸ می‌رسد. در محل تغییر شیب نیز عدد کاویتاسیون برابر ۰/۳۸ به دست آمد ولی پس از نقطه تغییر شیب، روند کاهش عدد کاویتاسیون تندتر گردید. بر این اساس عدد کاویتاسیون سرریز سد سورک در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که در این بازه طبق توصیه Falvey برای پیشگیری از خطر وقوع کاویتاسیون نیاز است نامنظمی‌ها موجود در سطح بتن تنداب سرریز، برطرف و سطح به‌طور کامل صاف و صیقلی گردد. با توجه به این که سطح بتن فعلی سرریز سورک نامنظم بوده و زبر می‌باشد، لذا بر اساس یافته‌های این تحقیق انجام اقدامات اصلاحی بر روی سرریز این سد ضروری می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** سد سورک، کاویتاسیون، سرریز، مدل فیزیکی.

### ۱- مقدمه

مطالعات خود نشان داد که در سرعتی برابر ۳۰ متر بر ثانیه در فرورفتگی‌هایی معادل ۳ میلی‌متر نیز خوردگی رخ می‌دهد. Falvey (۱۹۸۲) نشان داد سرریزهای تونل USBR با شاخص خوردگی ۰/۲ یا بالاتر از صدمات ناشی از خوردگی مصون هستند. وی محدوده مقدار بحرانی کاویتاسیون ( $\alpha$ ) بر روی مجاری تحت‌فشار، دریچه‌ها و سرریزها را ۰/۲ تا ۰/۲۵ ذکر کرده است. در همین زمینه مهری (۱۳۸۵) با ساخت مدل فیزیکی سرریز سد بالا رود در مقیاس ۱:۱۱۰ و تعیین شاخص کاویتاسیون در ۱۴ دبی مختلف ثابت کرد در سرریز سد بالا رود شاخص کاویتاسیون از مقدار بحرانی بیشتر بوده و این سرریز از خطر خوردگی در امان می‌باشد.

یکی از بزرگ‌ترین مشکل‌ها و خطرهایی که ساختمان سرریزها را تهدید می‌کند، پدیده کاویتاسیون است. این پدیده در نقاطی از سازه که سرعت جریان آب زیاد بوده و فشار آب به پائین‌تر از فشار اتمسفر کاهش می‌یابد، امکان وقوع خواهد داشت و شدت آن متناسب با خلأ نسبی ایجاد شده و دمای آب می‌باشد. اغلب این پدیده به روش مدل‌سازی فیزیکی و عددی بررسی و شبیه‌سازی می‌گردد.

امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون در اثر جریان بر روی سطوح غیرمسطح، توسط Johnson (۱۹۶۳) و Ball (۱۹۷۶) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. Johnson در نتایج به دست آمده از

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۳۸-۳۲۳۲۴۴۳۰

سرریز سد ساگار با ارتفاع ۱۲۴/۶۶ متر واقع در رودخانه کریشنا به علت حفره‌های موجود بر سطح سرریز و به دست آوردن راه کارهای برای بهبود آن پرداختند. آزمایش‌های در دبی‌های مختلف و در مدلی با مقیاس ۱:۸۰ انجام گرفت نتایج نشان داد علاوه بر دبی سیلاب طراحی، در دبی‌های پایین‌تر (معادل سه‌چهارم دبی طراحی) نیز فشار منفی وجود دارد. در ادامه اندازه‌گیری فشار منفی و محاسبه شاخص کاویتاسیون به این نتیجه رسیدند که کاویتاسیون در سرریز مورد نظر ایجاد و منجر به خورده شدن سطح سرریز می‌گردد. آن‌ها برای مبارزه با این پدیده بهترین و اقتصادی روش را هوادهی و ایجاد شیرهای عرضی دانستند. Zandi Goharrizi و همکاران (۲۰۱۴) به وسیله مدل پیش‌بینی فازی پدیده کاویتاسیون را بررسی نمودند ایشان از داده‌های شوت سرریز سد کارون ۱ برای این کار استفاده نمودند نتایج آن‌ها با نتایج واقعی سازگاری خوبی داشته است؛ و با توجه به نتایج آن‌ها شوت شماره ۲ و ۳ این سرریز دارای خطر آسیب‌دیدگی جدی هستند. در این پژوهش با ساخت مدل فیزیکی سرریز سد سورک پارامترهای فشار، سرعت و عمق جریان در دو محور مرکز و کناره دیواره برداشت گردید و سرانجام با محاسبه شاخص کاویتاسیون به بررسی پدیده کاویتاسیون در سرریز سد سورک پرداخته شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معرفی سد مورد مطالعه

در این تحقیق از سد سورک به عنوان نمونه اصلی استفاده شده است. سد سورک بر روی رودخانه کیار در نزدیکی روستای سورک از توابع استان چهارمحال و بختیاری با ارتفاع ۳۹ متر و حجم مفید ۲۵ میلیون مترمکعب با هدف تأمین آب اراضی کشاورزی پائین دست و کنترل سیلاب ساخته شده است. این سد از نوع خاکی با هسته رسی است و سرریز آن از نوع اوجی شوت‌دار می‌باشد که در مسیر شوت یک تغییر شیب در فاصله افقی ۷۳ متری پائین دست تاج سرریز قرار دارد که همین مسئله علت انجام تحقیق حاضر می‌باشد. شیب شوت قبل و بعد از تغییر شیب به ترتیب ۱۴ و ۲۸ درجه می‌باشد محل تغییر شیب در جدول (۱) برخی مشخصات کلی سرریز آورده شده است.

### جدول ۱- مشخصات کلی سرریز سد سورک

| پارامتر                                      | مقدار / شرح         |
|--|---------------------|
| عرض تاج و شوت سرریز (متر)                    | ۲۰                  |
| دبی سیلاب طراحی (مترمکعب بر ثانیه)           | ۲۳۱                 |
| معادله اوجی سرریز                            | $Y=0.216 X^{1.748}$ |
| شیب وجه بالادست سرریز                        | ۱:۱                 |
| ارتفاع تاج سرریز نسبت به کفبند بالادست (متر) | ۱                   |

Bahmani و Kamanbedast (۲۰۱۴) با انجام ۳۰ آزمایش در ۵ زبری مختلف بر روی مدل فیزیکی به این نتیجه رسیدند که با افزایش زبری، ضریب تخلیه و ضریب کاویتاسیون کاهش می‌یابد. عارف‌پور (۱۳۸۸) با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین دست در پرتابه جامی شکل سرریز سد بالا رود در مقیاس ۱:۴۰ پرداخته است. نتایج وی حاکی از قابل قبول بودن دامنه تغییرات فشارهای دینامیکی بوده است. دورقی (۱۳۸۸) به بررسی رفتار هیدرودینامیک جریان بر روی سرریز اوجی سه دهانه و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت آن در مقیاس ۱:۴۰ پرداخت. وی در ۶ دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل: عمق، سرعت، فشار استاتیکی، نوسانات لحظه‌ای فشار و بی‌نظمی‌های جریان را با هدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهره‌برداری مورد اندازه‌گیری و مشاهده قرارداد. بررسی عمق آب روی سرریز و کیفیت دیواره‌ها مشخص کرد که از دبی ۲۷۴ لیتر بر ثانیه بلافاصله بعد از تبدیل ابتدائی، عمق آب به بالای دیواره سرریز می‌رسد که نیازمند اصلاح می‌باشد. حداقل ضریب خوردگی که در آستانه سرریز و در دبی ۱۹۰/۳ لیتر بر ثانیه رخ داد، ۰/۸۷ بوده ولی با توجه به ضریب خوردگی بحرانی ( $\alpha$ ) احتمال رخ دادن پدیده کاویتاسیون در طول محور سرریز وجود ندارد.

Savage و Johnson (۲۰۰۱) با استفاده از مدل فیزیکی با مصالح پلیسکی گلاس مطالعاتی بر روی جریان در سرریز اوجی انجام دادند. آن‌ها داده‌های فشار و سرعت را برای ۱۰ دبی مختلف در ۲۹ موقعیت ثبت کردند و عملکرد تاج و شوت سرریز را ارزیابی نمودند. پارسا و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی ماهیت و چگونگی رخ داد کاویتاسیون بر روی سرریز سد گلابر به وسیله مدل فیزیکی با مقیاس ۱:۳۰ پرداختند و اثبات کردند در هیچ یک از نقاط این سرریز شاخص کاویتاسیون به مقدار بحرانی نمی‌رسد

هاشمی و همکاران (۱۳۹۱) نوسان‌های فشار، روند آن‌ها و پدید کاویتاسیون را در ناحیه شیار دریچه سرویس مدل فیزیکی تونل تحتانی سد مخزنی گتوند علیا را بررسی نمودند. آزمایش‌ها در بازشدگی‌های ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد دریچه با ارتفاع معادل فشار آب ۲،۳ و ۴ متر انجام شد. داده‌های فشار با استفاده از میدل فشار برداشت شد و به یک دستگاه تقویت کننده منتقل و در نهایت در رایانه ثبت گردید. این داده‌ها با احتمال وقوع ۰/۱ درصد مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که احتمال وقوع کاویتاسیون در بازشدگی‌های ۵۰،۳۰ و ۷۰ درصد دریچه بیشتر از مقادیر آن در بازشدگی‌های ۱۰ و ۱۰۰ درصد دریچه می‌باشد. همچنین پیژومتری که به لبه دریچه نزدیک‌تر است در معرض نوسان‌های بیشتری قرار دارد و با افزایش بازشدگی دریچه نقطه بحرانی نوسان‌های فشار به نقاط بالاتر انتقال می‌یابد. Rajasekhar (۲۰۱۴) به مدل‌سازی

می‌باشد و نیروی غالب ثقل است لذا برابری عدد فرود برای رعایت تشابه دینامیکی مدنظر قرار می‌گیرد. با کاربرد قانون فرود می‌باید  $F\dot{r}_R = 1$  باشد. به بیان دیگر:

$$F\dot{r}_R = V_R / \sqrt{g_R Z_R} = 1 \quad (۳)$$

با توجه به آن که  $g_R = 1$  است پس:

$$V_R = \sqrt{Z_R} \xrightarrow{\text{Assuming two phase flow}} V_R = \sqrt{L_R} \quad (۴)$$

مقیاس زمان و دبی خواهیم داشت:

$$V_R = \frac{X_R}{T_R} \longrightarrow T_R = \frac{X_R}{V_R} = \sqrt{L_R} \quad (۵)$$

$$Q_R = A_R \times V_R = L_R \left(\frac{5}{2}\right) \quad (۶)$$

برای مقیاس شیب کف داریم:

$$S_R = \frac{Y_R}{X_R} = \frac{L_R}{L_R} = 1 \quad (۷)$$

لذا در صورت رعایت مقیاس سرعت و دبی، تشابه سینماتیکی نیز برقرار خواهد بود. با توجه به این‌که مقیاس طولی مدل ۱:۵۰ انتخاب شده است، مقیاس سرعت برابر ۷/۰۷ و مقیاس دبی برابر ۱:۱۷۶۷۷ به دست می‌آید.

#### ۲-۴- ساخت مدل فیزیکی و انجام آزمایشات

با توجه به مقیاس انتخاب شده، مدل فیزیکی سرریز سد سورک در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد ساخته و نصب گردید است. شاسی مدل از جنس فلز و خود مدل از جنس پلکسی گلاس ساخته شد. جهت شکل‌دهی صفحه‌های پلکسی گلاس در قسمت اوجی سرریز، از قالب چوبی استفاده شد. با اتمام مراحل ساخت، مدل در انتهای فلوم<sup>۳</sup> موجود در آزمایشگاه، که دارای عرض و عمق ۶۰ سانتی‌متر و طول ۲۰ متر بود، نصب و راه‌اندازی گردید (شکل (۳)). سیستم پمپاژ و چرخش آب در این آزمایشگاه در بهترین راندمان قادر به تأمین ۷۰ لیتر بر ثانیه جریان در فلوم بود که برای ایجاد حداکثر دبی سیلاب طراحی سرریز سد سورک طبق مقیاس کدل، کفایت می‌کرد. برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز مثلی واقع در انتهای سیستم استفاده شد. در طول مسیر جریان در سرریز از پیژومتر جهت اندازه‌گیری فشار، استفاده شد. شکل (۱) محل نصب پیژومترها را نشان می‌دهد. در مناطقی که تغییر ناگهانی شیب و رقوم کف وجود داشت، پیژومترها با فاصله کمتر نصب گردید. برای سهولت کار، پیژومترها همانند شکل (۲) روی یک تابلو قرار داده برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری ارتفاع

#### ۲-۲- آنالیز ابعادی

روش‌های تجربی و آزمایشگاهی بر پایه اندازه‌گیری‌های عملی و اغلب بر اساس قضیه باکینگهام بنا شده‌اند؛ یعنی با بی‌بعدسازی روابط می‌توان به‌جای آزمایش بر روی یک مدل حقیقی و بزرگ، آزمایش‌ها را بر روی یک مدل با مقیاس کوچک انجام داد؛ و سپس با استفاده از قضیه پی باکینگهام نتایج را به مدل اصلی تعمیم داد. از طرفی با کمک این قضیه و بی‌بعدسازی می‌توان تعداد آزمایش‌های لازم برای رسیدن به نتیجه را کاهش داد. جریان در سرریزهای همراه شوت بر اساس خصوصیت‌های هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان به صورت رابطه (۱) به دست آمد:

$$F(V, Y, B, P, H, S, Q, \sigma, \rho, \mu, g) = 0 \quad (۱)$$

که در آن  $B$  عرض کانال،  $V$  سرعت جریان،  $P$  فشار وارد روی سطح سرریز،  $S$  شیب طولی کانال،  $Q$  دبی جریان،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\mu$  لزجت دینامیکی  $\rho$  چگالی مخصوص سیال،  $H$  ارتفاع استاتیکی روی سرریز و  $Y$  عمق آب می‌باشند. تحلیل ابعادی با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام صورت گرفت و پارامترهای مؤثر جریان به صورت رابطه (۲) به دست آمد:

$$f_1 \left( \frac{P}{\rho V^2}, \frac{V^2}{gY}, \frac{\mu}{\rho V Y}, \frac{\sigma}{\rho V^2 Y}, \frac{S}{Y}, \frac{B}{Y}, \frac{H}{Y} \right) \quad (۲)$$

با توجه به این‌که عرض در کانال تغییر نمی‌کند و شیب‌های موجود در مدل در طول آزمایش‌های ثابت است می‌توان از این دو پارامتر چشم‌پوشی کرد. یکی از مسائل مهم در مدل‌سازی سازه‌های آبی به حداقل رساندن اثر مقیاس می‌باشد و همواره باید توجه نمود برای ناچیز کردن اثر ویسکوزیته باید عدد رینولدز<sup>۱</sup> حداقل  $10^5$  و برای به حداقل رساندن اثر کشش سطحی عدد وبر<sup>۲</sup> برابر  $10^6$  باشد تا بتوان اثرات نامطلوب مقیاس را به حداقل رساند (Boes و Hager، ۲۰۰۳، Chanson و Gonzalez، ۲۰۰۴).

#### ۲-۳- تشابه مدل

مدل‌های فیزیکی باید از سه نظر هندسی، سینماتیکی و دینامیکی دارای تشابه با مدل اصلی باشند. تشابه هندسی با رعایت مقیاس مدل در همه ابعاد حاصل می‌شود که تحقیق با رعایت ضوابط موجود مقیاس مدل برابر ۱:۵۰ انتخاب گردید. برای رعایت تشابه دینامیکی لازم است نسبت نیروها در مدل و نمونه اصلی یکسان گرفته شوند که این امر با برابری نسبت‌های بدون بعد نیروها قابل انجام است ولی با توجه به این‌که به دلیل تفاوت ماهیت نیروهای حاکم بر جریان نمی‌توان هم‌زمان همه نسبت نیروها را یکسان در نظر گرفت، این برابری برای نیروی غالب انجام می‌شود که با توجه به این‌که در سرریزهای اوجی، جریان از نوع سطح آزاد

پارامترهای موردنظر در هر دبی در طول سرریز و تنداب در ۵۱ موقعیت اندازه‌گیری گردید. سرعت این موقعیت‌ها به صورتی بوده است که ۲۵ موقعیت در محور مرکزی و ۲۵ موقعیت در محور کناری (۳ سانتی‌متری از کناره دیواره) و همچنین یک موقعیت در تاج سرریز در نظر گرفته شد. در این تحقیق آزمایش‌ها برای ۵ دبی مختلف به شرح جدول (۲) انجام پذیرفت. دبی حداکثر معادل دبی سیلاب طراحی در نظر گرفته شده و دبی حداقل حدود یک سوم دبی حداکثر و سایر دبی‌ها در حدفاصل آن‌ها انتخاب شده است.

جدول ۲- مقادیر دبی مورد آزمایش

| شرح               | دبی اول | دبی دوم | دبی سوم | دبی چهارم | دبی پنجم |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------|----------|
| متر مکعب بر ثانیه | ۲۳۴     | ۱۷۶/۷   | ۱۵۱/۷   | ۱۱۰/۸     | ۷۳/۴     |

#### ۵-۲- شاخص کاویتاسیون

با توجه به این‌که پارامترهای جریان طی آزمایشات اندازه‌گیری شد برای بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در مدل، از شاخص کاویتاسیون ( $\sigma$ ) استفاده گردید که به شرح زیر تعریف شده است (Falvey, ۱۹۹۰):

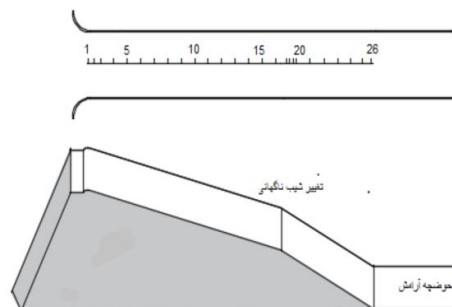
$$\sigma = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (8)$$

که در آن  $P_0$ : فشار در نقطه موردنظر که با توجه به قرائت پیزومترها تعیین می‌گردد،  $V$ : سرعت متوسط جریان،  $P_V$ : فشار بخار سیال (متر) و  $\rho$  جرم مخصوص سیال (آب) است. با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها، مقدار شاخص کاویتاسیون در کلیه آزمایش‌ها و در مقاطع مختلف جریان محاسبه گردید. قضاوت در مورد وقوع کاویتاسیون در این پژوهش نیز بر مبنای مشاهداتی که توسط Falvey (۱۹۹۰)، در طراحی سرریزها ارائه شده است و برحسب شاخص کاویتاسیون می‌باشد، صورت گرفته است. در جدول (۳) توصیه‌های Falvey بیان شده است.

جدول ۳- توصیه‌های Falvey برای پدیده کاویتاسیون

| اقدام مورد نیاز  | شاخص کاویتاسیون |
|--|-----------------|
| نیاز به حفاظت در برابر کاویتاسیون نیست                             | $\sigma > 1/8$  |
| اصلاح جریان به وسیله حذف نامنظمی‌ها                                | $1/8 - 0/25$    |
| اصلاح طراحی  | $0/25 - 0/17$   |
| حفاظت به وسیله گالری‌های هواده با ایجاد پله                        | $0/17 - 0/12$   |
| هیچ‌گونه حفاظتی امکان‌پذیر نبوده و نیاز به طراحی و ساخت مجدد دارد. | $\sigma < 0/12$ |

ستون آب در پیزومترها، تابلو با زاویه ۳۰ درجه نسبت به کف در آزمایشگاه نصب گردید. با برقراری ۵ دبی مختلف در مدل نصب شده و با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه، سرعت به وسیله لوله پیتوت (با دقت ۰/۱ متربر ثانیه)، فشار به وسیله پیزومتر (با دقت ۱ میلی‌متر) و عمق جریان به کمک عمق‌سنج کولیس‌دار (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) اندازه‌گیری گردید. شکل (۲) مدل فیزیکی سرریز سد سورک را نشان می‌دهد.



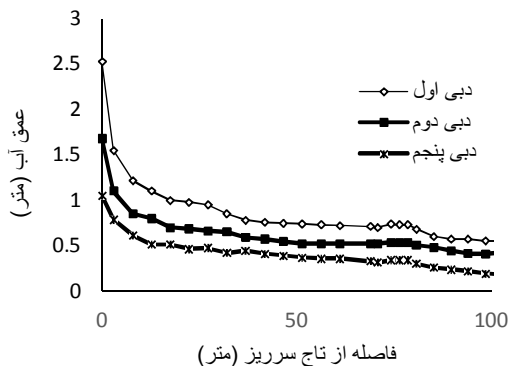
شکل ۱- نمای سرریز سد سورک و موقعیت‌های اندازه‌گیری



شکل ۲- تابلو نصب پیزومترها با چرخش ۳۰ درجه



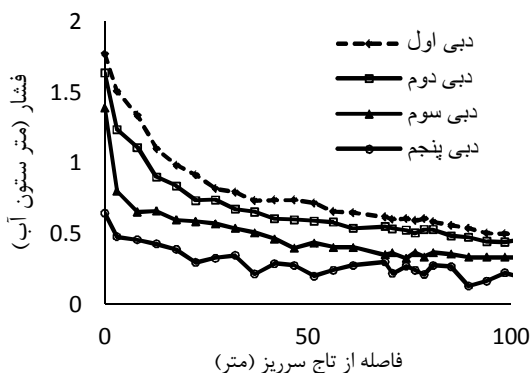
شکل ۳- تصویر مدل فیزیکی سرریز سد سورک



شکل ۵- تغییرات عمق شوت در محور کناره مدل فیزیکی

### ۳-۲- تغییرات فشار

مقادیر فشارهای اندازه‌گیری شده در دو محور مرکزی و کناری در شکل‌های (۶) و (۷) قابل مشاهده می‌باشد. روند نمودارها در این شکل‌ها نشان می‌دهد در پیژومترهای شماره ۱ تا ۳ مقدار فشار با شیب تندتر کاهش پیدا کرده است و به نظر می‌رسد علت آن افت سطح آب از تاج سرریز به قسمت شوت باشد. کاهش فشار در طول مدل فیزیکی سرریز سد سورک به صورتی بوده که در هیچ‌یک از موقعیت‌های نصب پیژومتر، فشار منفی مشاهده نگردید. با توجه به وجود سرعت‌های بالا در این شوت اگر در بتن این قسمت درز و شکاف و ناهمواری به وجود آید ایجاد فشار منفی که زمینه‌ساز کاویتاسیون می‌باشد؛ دور از انتظار نیست. با توجه به دو شکل تغییرات فشار مشاهده می‌شود هرچه دبی کاهش پیدا کرده است نوسانات در مقدار فشار اندازه‌گیری شده در طول سرریز افزایش پیدا کرده است. این نوسانات از دبی چهارم به بعد نمایان‌تر شده است.



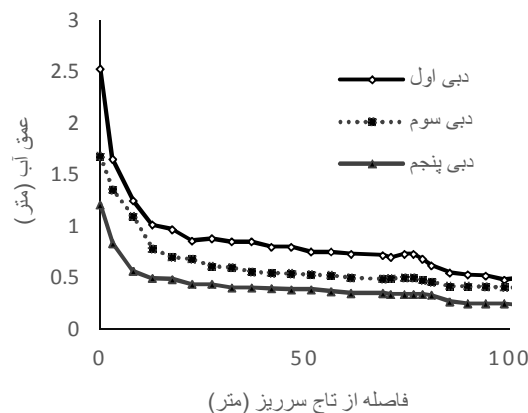
شکل ۶- تغییرات فشار در محور مرکزی مدل فیزیکی

### ۳- بحث و نتایج

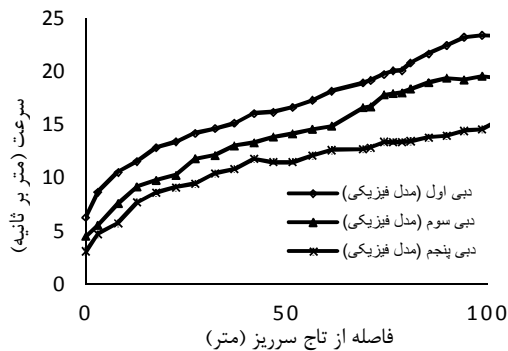
در این تحقیق با انجام ۵ آزمایش با دبی‌های مختلف و تعیین پارامترهای فشار، سرعت و عمق و محاسبه شاخص کاویتاسیون در سرریز سد سورک برای ۵ دبی مختلف با هدف بررسی احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون در شوت سرریز بررسی گردید.

### ۳-۱- تغییرات عمق آب

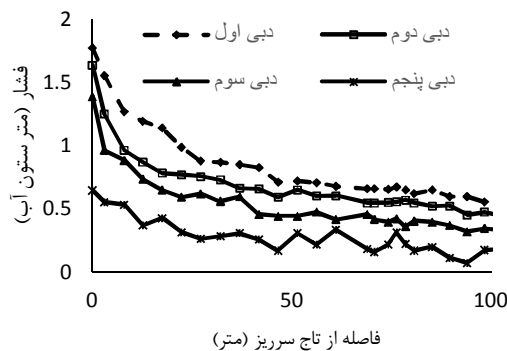
عمق جریان روی سرریز در تمامی دبی‌های جریان به وسیله عمق سنج در دو محور کنار و مرکز برداشت گردید. در شکل‌های (۴) و (۵) تغییرات سطح آب در مدل قابل مشاهده می‌باشد. روند تغییرات عمق در طول سرریز کاهشی بود و همواره بیشترین مقدار عمق بر روی تاج سرریز و کمترین آن در انتهای سرریز مشاهده گردید. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود عمق آب در بدو ورود به قسمت شوت کاهش شدیدی دارد این افت آب به دلیل تغییر وضعیت جریان از زیر بحرانی به فوق بحرانی می‌باشد و از آنجائی که جریان در بالادست سرریز آرام و با توزیع یکنواخت به روی سرریز منتقل می‌گردد این امر در مدل تحقق یافته است. با توجه به امواج عرضی تشکیل شده در قسمت شوت مقدار عمق آب در محور مرکزی مقداری بیشتر از عمق آب در محور کناری بوده است. در بدو ورود آب به قسمت دوم شیب عمق آب مقداری افزایش یافته است با نظر به این‌که هیچ‌گونه جدایش جریان در مدل فیزیکی مشاهده نگردید، احتمال می‌رود اختلاط زیاد هوا با آب در قسمت تغییر شیب ناگهانی دلیل رخ دادن این اتفاق باشد.



شکل ۴- تغییرات عمق شوت در محور مرکزی مدل فیزیکی



شکل ۹- تغییرات سرعت در محور کناری شوت مدل فیزیکی



شکل ۷- تغییرات فشار در محور کناری مدل فیزیکی

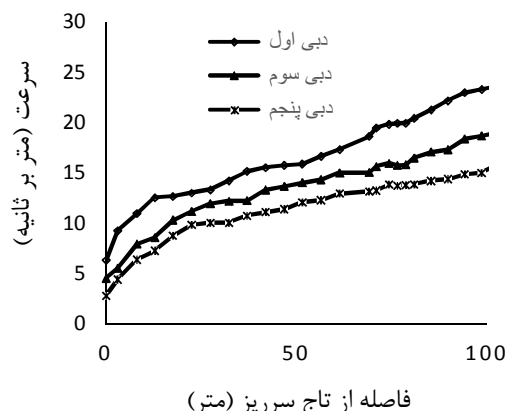
### ۳-۴- بررسی کاویتاسیون در سرریز سد سورک

جهت بررسی و کنترل وقوع کاویتاسیون، نیاز به اطلاعاتی نظیر سرعت متوسط و فشار وارد بر کف در قسمت‌های مختلف سازه می‌باشد که این اطلاعات در موقعیت‌های مختلف در دو محور مرکز و کناره دیواره برداشت گردید. با توجه به پارامترهای مورد نیاز و استفاده از رابطه (۸) شاخص کاویتاسیون محاسبه شد شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نتایج حاکی از اختلاف بین شاخص کاویتاسیون در محور مرکزی و کناری بوده است که ناشی از تفاوت در مقدار فشار و سرعت در هر دو محور نسبت به یکدیگر می‌باشد. با مشاهده منحنی‌های ضریب خوردگی که بر مبنای اندازه‌گیری‌های صورت گرفته نتیجه شده‌اند، حداقل ضریب کاویتاسیون بحرانی در دبی اول و در فاصله ۱۰۷/۲ متری از تاج در موقعیت ۲۶ محور مرکزی به میزان ۰/۲۴۷ محاسبه شد. با آن که عدد حداقل به دست آمده در مرز بازه بحرانی عدد کاویتاسیون (۰/۱۷ - ۰/۲۵) قرار می‌گیرد و در این بازه طبق توصیه Falvey سرریز نیاز به اصلاح طراحی دارد ولی با توجه به این که سرریز مورد مطالعه احداث گردیده است و تغییر طراحی مستلزم تخریب کل سرریز و احداث دوباره آن است و از سوی دیگر حداقل عدد کاویتاسیون اختلاف بسیار ناچیز با حداقل ۰/۲۵ دارد توصیه می‌شود در سرریز فعلی سد سورک که سطح پوششی بتن آن زبر و نامنظم است، در اسرع وقت مورد اصلاح قرار گیرد و تا حد امکان صاف و صیقلی گردد و برای این منظور از طرح اختلاط بتن مناسب استفاده شود. در این صورت جریان روی سرریز نیز اصلاح شده و از خطر وقوع کاویتاسیون پیشگیری می‌گردد.

همچنین در شکل (۱۲) می‌توان تغییرات شاخص کاویتاسیون را در مقاطع مختلف با افزایش دبی را مشاهده نمود. با توجه به این نمودار شاخص کاویتاسیون با افزایش دبی کاهش داشته است اما بعضی نقاط این روند برعکس بوده و در چندین نقطه با افزایش دبی شاخص کاویتاسیون کاهش پیدا کرده است. با تأکید بر این نکته می‌توان گفت افزایش دبی لزوماً در همه مقاطع منجر به کاهش ضریب کاویتاسیون نمی‌گردد.

### ۳-۳- سرعت در مدل فیزیکی

پارامتر سرعت متوسط در ۵۱ موقعیت و در فاصله ۰/۶ عمق جریان از سطح آب اندازه‌گیری شد. تغییرات سرعت طبق رابطه برنولی برعکس فشار بوده و در کلیه آزمایش‌ها روندی افزایشی داشته است. بیش‌ترین مقدار سرعت به اجزاء دبی اول (۲۳۱ مترمکعب بر ثانیه) به میزان ۲۳/۸ متر بر ثانیه به ثبت رسید که مربوط به محور مرکزی و در انتهای شوت سرریز می‌باشد. به دلیل متفاوت بودن عمق آب در محور وسط نسبت به محور کنار در هر مقطع، ناشی از دلیل گسترش موج‌های عرضی تشکیل شده اختلاف جزئی بین سرعت جریان در محور مرکز و محور کنار وجود دارد. با توجه به شکل‌ها شیب افزایش سرعت در ابتدای ورود آب به تنداب افزایشی ناگهانی داشته است که به علت افت سطح آب در این مقطع می‌باشد. در شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان تغییرات سرعت در مدل فیزیکی سرریز سد سورک را مشاهده نمود.



شکل ۸- تغییرات سرعت در محور مرکزی شوت مدل فیزیکی

#### ۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق با انجام آزمایش بر روی مدل فیزیکی سرریز سد سورک در مقیاس ۱:۵۰، شاخص کاویتاسیون در طول سرریز و تنداب برای دو محور مرکز و کنار دیواره محاسبه گردید. در دبی‌های کمتر از دبی طراحی در هر دو محور کنار و مرکز مقدار شاخص کاویتاسیون محاسبه شده در بازه (۰/۲۵-۱/۸) قرار گرفت. بر اساس جدول (۳) و توصیه‌های Falvey (۱۹۹۰) این سرریز نیاز به اصلاح جریان به کمک حذف نامنظمی‌ها در راستای کاهش شاخص کاویتاسیون دارد. نتایج آزمایش‌ها در دبی طراحی سرریز نشان داد حداقل شاخص کاویتاسیون محاسبه شده به کمتر از مقدار بحرانی (۰/۲۵) و به میزان ۰/۲۴۷ در فاصله ۱۰۷/۲ متری از تاج سرریز می‌رسد. با توجه به این‌که این مقدار طبق معیار ارزیابی (Falvey, ۱۹۹۰) در بازه (۰/۲۵ - ۰/۱۷) قرار گرفته است این سرریز نیاز به اصلاح طراحی دارد. ولی با توجه به این‌که سرریز مورد مطالعه احداث گردیده است و تغییر طراحی مستلزم تخریب کل سرریز و احداث دوباره آن است و از سوی دیگر حداقل عدد کاویتاسیون اختلاف بسیار ناچیز با حداقل ۰/۲۵ دارد توصیه می‌شود در سرریز فعلی سد سورک که سطح پوششی بتن آن زبر و نامنظم است، در اسرع وقت مورد اصلاح قرار گیرد و تا حد امکان صاف و صیقلی گردد و برای این منظور از طرح اختلاط بتن مناسب استفاده شود. در این صورت جریان روی سرریز نیز اصلاح شده و از خطر وقوع کاویتاسیون پیشگیری می‌گردد.

با توجه به یافته‌های این تحقیق، خطر وقوع کاویتاسیون در سرریز سد سورک برای دبی‌های بیشتر از ۳۰ درصد دبی سیلاب طراحی محتمل بوده که با توجه به زبری بالای سطح شوت سرریز این سد و با توجه به توصیه‌های Falvey (۱۹۹۰) پیشنهاد می‌گردد عملیات اجرای پوشش مناسب و صاف بر روی سطح شوت سرریز انجام شود.

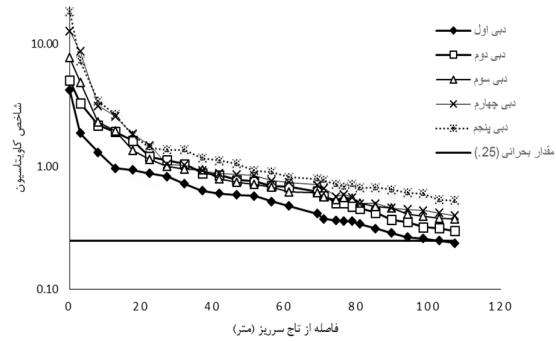
#### ۵- سپاس‌گزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهرکرد که بخشی از هزینه‌های این تحقیق را تأمین نموده‌اند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

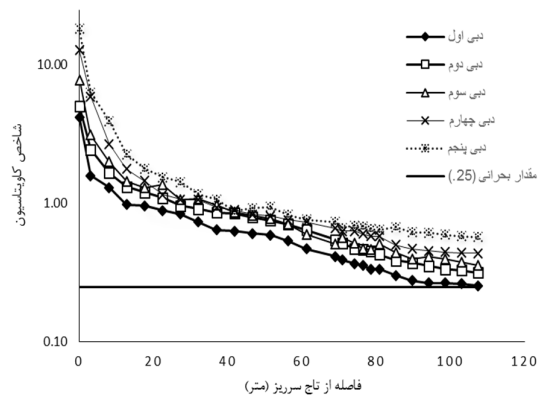
#### ۶- مراجع

دورقی، " رفتار هیدرولیکی آب بر روی سرریز اوجی سه‌دهانه و تعیین رابطه دبی- اشل و بهینه‌سازی دیواره‌های هدایت (مطالعه موردی سد بالارود)", پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۸.

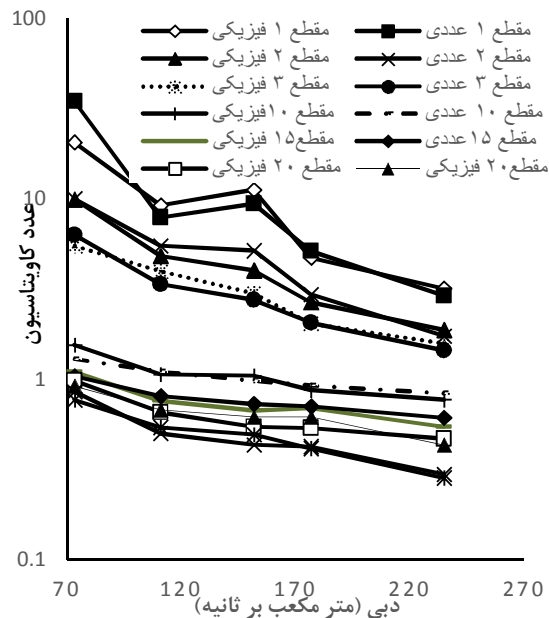
عارف پور م، " بررسی هیدرو دینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین دست در پرتابه جامی شکل (مطالعه موردی سد



شکل ۱۰- تغییرات شاخص کاویتاسیون در محور مرکزی شوت



شکل ۱۱- تغییرات شاخص کاویتاسیون در محور کناری شوت



شکل ۱۲- تغییرات عدد کاویتاسیون در مقاطع و دبی‌های مختلف

- Savage BM, Johnson C, "Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study", Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127, 640-649.
- Zandi Goharrizi F, Azhdary Moghadam M, Parchami A, "Fuzzy Predicting Model for Cavitation in Chute Spillways", Global Journal of Scientific Researches, 2014, 2 (1), 12-20.
- بالا رود"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۸.
- مهری م، "مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی جریان روی سرریز سد بالا رود با مقیاس کوچک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۳۸۵.
- نصراصفهانی م ج، شفاعی بجستان م، "بررسی پدیده کاویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زبر و پله ناگهانی"، نشریه هیدرولیک، ۱۳۹۲، ۸ (۲)، ۴۰-۲۹.
- هاشمی اف، خوسروجردی ا، صدقی ح، "بررسی نوسان‌های فشار و احتمال وقوع کاویتاسیون داخل شیار دریچه کشویی تحتانی سد گتوند"، نشریه دانش آب و خاک، ۱۳۹۲، ۲۲ (۳)، ۱۸۳-۱۹۴.
- Ball JW, "Cavitation from surface Irregularities in high velocity flow", American Society of Civil Engineers, 1976, 102 (9), 1283-1297.
- Boes R, Hager WH, "Two-phase characteristics of stepped spillways", Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129 (9), 661-670.
- Darren Hinton PE, Brian Hughes MA, Ed Zapel MS, "Scott Dam Spillway- Comparing Physical Model Study Results", Paper Presented Hydro Vision Conference, July, 2015, 15-17.
- Falvey, "Cavitation in chut and spillway [Engineering Monograph No. 42]", United States Department of The Interior-Bureau Of Reclamation, Denever, Colorado, 1990.
- Falvey, "Predicting cavitation in tunnel spillway", Water Power and Dam Construction, 1982, 34 (8), 13-15.
- Gonzalez AC, Chanson H, "Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows", In the 8<sup>th</sup> National Conference on Hydraulics in Water Engineering. Gold Coast. Australia, 2004.
- Inozemtsev YP, "Cavitation destruction of concrete and protective facings under natural conditions", Power Technology and Engineering, 1969, 3 (1), 24-29.
- Johnson VE, "Mechanics of cavitation", Tran American Society of Civil Engineerss, Journal of Hydraulic Engineering, 1963, 89 (3), 251-275.
- Kamanbedast A, Bahmani M, Aghamajidi R, "The Effect of Surface Roughness on Discharge Coefficient and Cavitations of Ogee Spillways Using Physical Models", Journal of Applied Science and Agriculture 2014, 9 (6), 2442-2448.
- Peltier Y, Dewals P, Archambeau M, Piroton S, Ercicum, "Pressure and velocity on an ogee spillway crest operating at high head ratio: experimental measurements and validation", 2<sup>nd</sup> International Workshop on Hydraulic Structures: Data Validation (IWHS), Coimbra, Portugalia, 2015.
- Rajasekhar P, Santhosh YVG, Soma Sekhar S, "Physical and Numerical Model Studies on Cavitation Phenomenon-A Study on Nagarjuna Sagar Spillway", International Journal of Recent Development in Engineering and Technology, ISSN 2014, 2 (1), 2347-6435.



## EXTENDED ABSTRACT

# Investigation of Cavitation in Location of Change Slope Surk Dam Spillway Using Hydraulic Lab Modeling

Hossein Samadi- Boroujeni <sup>a,\*</sup>, Sohail Abbasi<sup>b</sup>, Rohollah Fattahi<sup>c</sup> and Behzad Ghorbani<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Water Resources Research Center, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>b</sup> Water Engineering Department, Faculty of Agricultural, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>c</sup> Faculty of Agricultural, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 18 January 2017; Accepted: 23 April 2018

### Keywords:

Surk dam, Cavitation, Spillway, Physical model.

## 1. Introduction

In a chute spillway flow, it is possible to separate water sheet from bed surface, which produces negative pressure on the surface and forming bubbles (Kamanbedast, 2014). When cavitation bubbles grow and travel with the flow to an area where the local pressure is higher, they can no longer be sustained and collapse. When a cavitation bubble collapses or implodes close to or against a solid boundary, an extremely high pressure is generated that acts on an infinitesimal area of the surface for a very short time period. Falvey (1990) has described the mechanism of the collapse of an individual bubble. The bubble collapse consists of phases in which the bubble diameter decreases, reaches a minimum, and then grows or rebounds. The process is repeated for several cycles, with the bubble diameter decreasing during each cycle until it finally becomes microscopic in size. During the rebound phase, a shock wave forms, with a velocity equal to the speed of sound in water. It has been estimated that the pressure intensity due to this shock wave is about 200 times the ambient pressure at the collapse site. Countless impacts due to such collapses erode the metal and concrete, which is known as cavitation pitting (Johnson, 1963). The damage mechanism in concrete is more complicated due to the presence of micro-fissures in the surface and between the mortar and coarse aggregates. Falvey (1990) provided a comprehensive set to determine the critical cavitation index based on the shapes and different compositions of roughness and coarseness. As an example, he showed that at tunnel spillways with cavitation index of 0.2 and higher, the probability for cavitation phenomenon occurrence is negligible and somewhat precluded, while for indices less than 0.2, the spillway is at the risk of this phenomenon occurrence.

## 2. Methodology

### 2.1. Experimental study

In modeling for a physical phenomenon, the first step is to recognize important relations and parameters concerning the studied process based on information, researches and experiences. The dimensionless analysis is the next step which it can be conducted using Buckingham theory for defining the important dimensionless parameters. These relations let us to decrease the number of variables and to use results for all modes. In this work, the effective parameters were introduced in the following equation:

$$F(V, Y, B, P, H, S, Q, \sigma, \rho, \mu, g) = 0 \quad \text{then} \quad f_1\left(\frac{P}{\rho V^2}, \frac{V^2}{gY}, \frac{\mu}{\rho VY}, \frac{\sigma}{\rho V^2 Y}, \frac{S}{Y}, \frac{B}{Y}, \frac{H}{Y}\right) = 0 \quad (1)$$

\* Corresponding Author

E-mail addresses: samadi153@yahoo.com (Hossein Samadi-Boroujeni), soheil.abbasi91@yahoo.com (Sohail Abbasi), fatahi2@gmail.com (Rohollah Fattahi) behzad.ghorbani55@gmail.com (Behzad Ghorbani).

In which,  $v$  is water speed on the spillway,  $B$  is spillway width,  $Y$  is depth of water,  $Q$  is flow rate,  $P$  is pressure on the spillway,  $H$  is water height on the spillway,  $\rho$  is fluid density,  $g$  is acceleration of gravity,  $\mu$  is viscosity of the fluid,  $S$  is slope of chute spillway and finally  $\sigma$  is surface tension of the fluid.

## 2.2. Model Description

The Surk Dam Spillway physical hydraulic model was constructed at an undistorted scale of 1:50 in the hydraulic laboratory of Shahrekord University. The model reproduced the full length of the Surk Dam Spillway chute and extended approximately 107 m downstream of the spillway crest. The physical model was made by plexiglass. The dynamic and kinematic similarity between the model and the prototype was considered based on the Froude number. The experiments were conducted in 5 different flow rates including 234 (i.e. maximum flood discharge), 176.7, 151.7, 110.8 and 73.40 m<sup>3</sup>/s. Pressure, velocity and flow depth were measured in the central axis and side of the wall in 26 different sections, as shown in Fig. 1.



Fig. 1. Test setup of Surk Dam spillway model

## 2.3. Model Measurements and Instrumentation

In this work, model discharge flow was supplied to the model using centrifugal pumps regulated with butterfly valves connected to the model headbox diffusers. Flow measurement was conducted by a sharp-crested weir with a triangular control section. Pressure data were recorded within the model using 52 piezometric (static) pressure taps in 26 stations. The surface water levels in the model were measured by point-gauge with accuracy of 0.1 mm. Flow velocity was also measured by using a pitot tube.

## 2-4-Cavitation index

The cavitation index is a dimensionless measure used to characterize the susceptibility of a system to cavitate. The general expression for cavitation index,  $\sigma$  is:

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (2)$$

Where,  $P_0$  is reference pressure,  $P_v$  is vapor pressure,  $V$  is reference velocity, and  $\rho$  = density of the fluid.

In 1983, Falvey proposed a series of criteria to prevent the damage caused by cavitation, which can be seen in Table 1.

## 3. Results and discussion

Observations of pressure records in different locations of the chute spillway, as shown in Fig. 2, show that no pressure negative occurred. Flow velocity variations and cavitation number are shown in Fig. 3 and Fig. 4. In all of the experiments at location of change slope ( $X=72m$ ), the velocity had a rapid change. It may be because of the increasing slope after the location. The minimum cavitation number was also obtained for the maximum flow discharge (234m<sup>3</sup>/s). At this discharge, the values of cavitation number were varied from 4.19 in the location of ogee spillway crest to value of 0.247 at the end of the chute spillway. This value is pointed in range of 0.25 to 1.8 and based on the Falvey's recommendations (Table. 1). In order to prevent damaging by cavitation, the flow surface should be polished (e.g. smoothing all surface roughness or protecting by smooth surface treatment). At the present condition, the chute surface of the Surk dam spillway is rough and irregular, therefore if maximum designated flood to be occurred, damaging by cavitation may be possible.

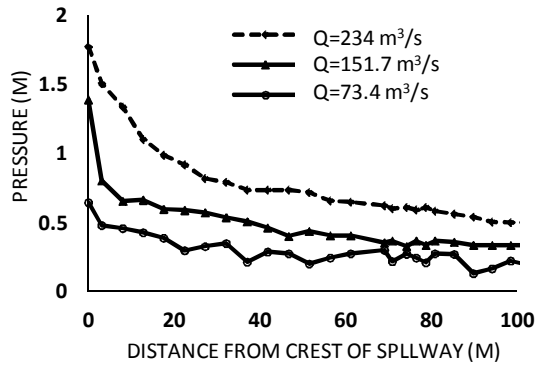


Fig. 2. pressure recorded from the physical model

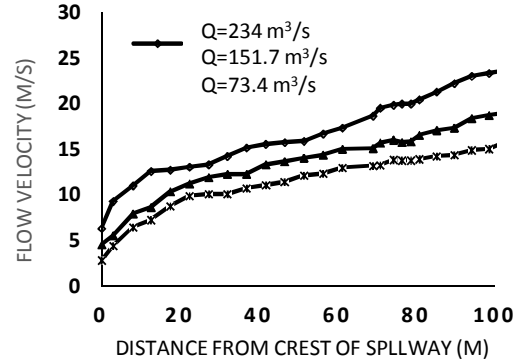


Fig. 3. Flow velocity obtained from the physical model

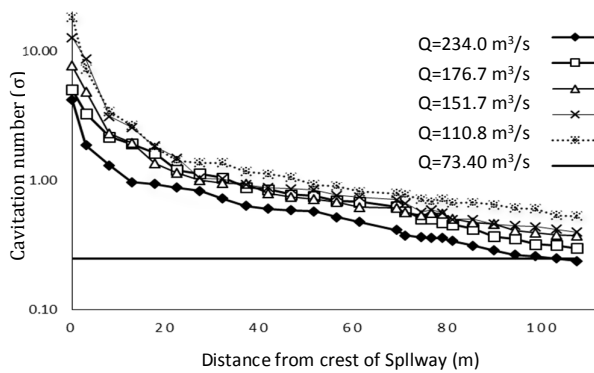


Fig. 4. Cavitation number ( $\sigma$ ) obtained from the physical model

Table 1. Falvey criteria to prevent the damage caused by cavitation

| Design requirements  | Cavitation number ( $\sigma$ ) |
|--|--------------------------------|
| No cavitation protection is required   | >1.80                          |
| The flow surface can be protected by flow surface treatment (e.g. smoothing all surface roughness) | 0.25 - 1.80                    |
| Modification of the design (e.g. increasing boundary curvature) Revising Design                    | 0.17 - 0.25                    |
| Protection by addition of aeration grooves or steps  | 0.12 - 0.17                    |
| Surface cannot be protected and a different configuration is required (assumption)                 | <0.12                          |

#### 4. Conclusions

In this work, cavitation in the chute spillway of Surk dam, which it has a rapidly change slope in the chute path, has been studied using physical modeling. The physical model was made by plexiglass with scale of 1:50 and in this study, Falvey criterion (1986) was used for commenting of cavitation index. The results showed that the calculated cavitation index in the chute spillway was obtained in range of 0.25 to 1.8. In this range based on the Falvey's recommendations in order to prevent the risk of cavitation, the concrete surface of the chute spillway should be lining with a smooth materials. At the end of the chute spillway, the calculated cavitation index was obtained equal 0.247, that in this value in order to prevent the risk of cavitation, the design of the structure should be refined.

#### 5. References

- Johnson VE, "Mechanics of cavitation", Tran American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Engineering, 1963, 89 (3), 251-275.
- Falvey, "Cavitation in chut and spillway [Engineering Monograph No. 42]", United States Department of The Interior-Bureau Of Reclamation. Denever, Colorado, 1990.
- Falvey, "Predicting cavitation in tunnel spillway", Water Power and Dam Construction, 1982, 34 (8), 13-155.
- Kamanbedast A, Bahmani M, Aghamajidi R, "The Effect of Surface Roughness on Discharge Coefficient and Cavitations of Ogee Spillways Using Physical Models", Journal of Applied Science and Agriculture 2014, 9 (6), 2442-2448.
- Rajasekhar P, Santhosh YVG, Soma Sekhar S, "Physical and Numerical Model Studies on Cavitation Phenomenon-A Study on Nagarjuna Sagar Spillway", International Journal of Recent Development in Engineering and Technology, 2014, 2 (1), 2347-6435.
- Darren Hinton PE, Brian Hughes MA, Ed Zapel MS, "Scott Dam Spillway- Comparing Physical Model Study Results", Paper Presented Hydro Vision Conference, July, 2015, 15-17.