

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

### چکیده

وقوع کاویتاسیون در شوت سرریزها یکی از عوامل تخریب سدها می‌باشد. محل‌های تغییر شیب در تنداب سرریزها بدلیل 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 قراردادن 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، بطوریکه این عدد در نقطه شروع شوت سرریز برابر ۴/۱۹ بوده و در انتهای شوت یعنی نقطه‌ای که به حوضچه آرامش منتهی می‌شود به ۰/۲۴۸ می‌رسد. در محل تغییر شیب نیز عدد کاویتاسیون برابر ۰/۳۸ بدست آمد ولی پس از نقطه تغییر شیب، روند کاهش عدد کاویتاسیون تند تر گردید. براین اساس عدد کاویتاسیون سرریز سد سورک در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که در این بازه طبق توصیه فالووی برای پیشگیری از خطر وقوع کاویتاسیون نیاز است نامنظمی‌ها موجود در سطح بتن تنداب سرریز، بر طرف و سطح بطور کامل صاف و صیقلی گردد. با توجه به اینکه سطح بتن فعلی سرریز سورک نامنظم بوده و زبر می‌باشد، لذا براساس یافته‌های این تحقیق انجام اقدامات اصلاحی بر روی سرریز این سد ضروری می‌باشد.

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

### ۱- مقدمه

هستند. وی محدوده مقدار بحرانی کاویتاسیون ( $\alpha$ ) بر روی مجاری تحت فشار، درپچه‌ها 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. کمان به دست و بهمنی (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 می‌یابند. عارف پور (۱۳۸۸) با استفاده از مدل فیزیکی به بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین‌دست 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

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 پائین تر از فشار اتمسفر کاهش می‌یابد، امکان وقوع خواهد داشت و شدت آن متناسب با خلأ نسبی ایجادشده و دمای آب می‌باشد. اغلب این پدیده به روش مدل‌سازی فیزیکی و عددی بررسی و شبیه‌سازی می‌گردد. هولاند و نپ (۱۹۷۰) از اولین افرادی بودند که این پدیده را با عکس‌برداری سریع مورد مطالعه قرار دادند. امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون در اثر جریان بر روی سطوح غیر مسطح، توسط جانسون (۱۹۶۳) و بال (۱۹۷۶) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. جانسون در نتایج به دست آمده از مطالعات خود نشان داد که در سرعتی برابر ۳۰ متر بر ثانیه در فرورفتگی‌هایی معادل ۳ میلی‌متر نیز خوردگی رخ می‌دهد. فالوی (۱۹۸۲) نشان داد سرریزهای تونل USBR با شاخص خوردگی ۰/۲ یا بالاتر از صدمات ناشی از خوردگی مصون

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۳۸-۳۲۳۲۴۴۳۰

آن‌ها برای مبارزه با این پدیده بهترین و اقتصادی روش را هودادی و ایجاد شیاهای عرضی دانستند. زندی گوهر ریزی و همکاران (۲۰۱۴) به‌وسیله 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 پارامتر-های 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 به‌عنوان 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 شوت دار 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

### ۲-۲- آنالیز ابعادی

روش‌های تجربی و آزمایشگاهی بر پایه اندازه‌گیری‌های عملی و اغلب بر اساس قضیه باکینگهام بنا شده‌اند؛ یعنی با بی‌بعد سازی روابط می‌توان به‌جای آزمایش بر روی یک مدل حقیقی و بزرگ، آزمایش‌ها را بر روی یک مدل با مقیاس کوچک انجام داد؛

مقیاس ۱:۴۰ پرداخت. وی در ۶ دبی مختلف پارامترهای مهم جریان شامل: عمق، سرعت، فشار استاتیکی، نوسانات لحظه‌ای فشار و بی‌نظمی‌های جریان را باهدف حصول اطمینان از عملکرد مطلوب سرریز در دوران بهره‌برداری مورداندازه‌گیری و مشاهده قرارداد. بررسی عمق آب روی سرریز و کفایت 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. ساوج و جانسون (۲۰۰۱) با استفاده از مدل فیزیکی با مصالح پلکسی 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. پارسی و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی ماهیت و چگونگی رخ داد کاویتاسیون بر روی سرریز سد گلابر به‌وسیله 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 ۵۰، ۳۰، ۱۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد دریچه با ارتفاع معادل فشار آب ۲، ۳ و ۴ مترانجام شد. داده‌های فشار با استفاده از مبدل فشار برداشت شد و به یک دستگاه تقویت‌کننده منتقل و در نهایت در رایانه ثبت گردید. این داده‌ها با احتمال وقوع ۰/۱ درصد مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده 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. راجیسخار (۲۰۱۴) به مدل‌سازی سرریز سد ساگار با ارتفاع ۱۲۴/۶۶ متر واقع در رودخانه کریشنا به علت حفره‌های موجود بر سطح سرریز و به دست آوردن راه‌کارهای 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 موردنظر ایجاد و منجر به خورده شدن سطح سرریز می‌گردد.

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

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 ۷/۰۷:۱ و مقیاس دبی برابر ۱:۱۷۶۷۷ بدست 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 شکل دهی صفحه‌های پلکسی گلاس در قسمت اوجی سرریز، از قالب چوبی استفاده شد. با اتمام مراحل ساخت، مدل در انتهای فلوم موجود در آزمایشگاه، که دارای عرض و عمق ۶۰ سانتی‌متر و طول ۲۰ متر بود، نصب و راه اندازی 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 مثلثی 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 بافاصله کمتر نصب گردید. برای سهولت کار، پیژومترها همانند شکل (۲) روی یک تابلو قرار داده برای دقت بیشتر در اندازه‌گیری ارتفاع ستون آب در پیژومترها، تابلو با زاویه ۳۰ درجه نسبت به کف در آزمایشگاه نصب گردید. با برقراری ۵ دبی مختلف در مدل نصب‌شده و با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه، سرعت به‌وسیله لوله پیتوت (با دقت ۰/۱ متربر ثانیه)، فشار به‌وسیله پیژومتر (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.

و سپس با استفاده از قضیه بی‌باکینگهام نتایج را به مدل اصلی تعمیم داد شود. از طرفی با کمک این قضیه و بی‌بعد سازی می‌توان تعداد آزمایش‌های لازم برای رسیدن به نتیجه را کاهش داد. جریان در سرریزهای همراه شوت بر اساس خصوصیت‌های هندسی، سینماتیکی و دینامیکی جریان به‌صورت 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 و  $\rho$  چگالی مخصوص سیال می‌باشند. H ارتفاع استاتیکی روی سرریز، Y عمق آب می‌باشند. تحلیل ابعادی با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام صورت گرفت و پارامترهای مؤثر جریان به‌صورت 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 این که 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 حداقل  $10^5$  و برای به حداقل رساندن اثر کشش سطحی عدد وبر برابر ۱۰۰ باشد تا بتوان اثرات نامطلوب مقیاس را به حداقل رساند (باس و هاگر ۲۰۰۳، گونزالس و جانسون 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 بدلیل 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 می‌باشد و نیروی غالب ثقل است لذا برابری عدد فرود برای رعایت تشابه دینامیکی مد نظر قرار می‌گیرد. با کاربرد قانون فرود می‌باید  $Fr_R = 1$  باشد. به بیان دیگر:

$$Fr_r = V_R / \sqrt{g_R \cdot Z_R} = 1 \quad (۳)$$

با توجه با آنکه  $g_R = 1$  است پس:

دبی حداقل حدود یک سوم دبی حداکثر و سایر دبیها در حد فاصل آنها انتخاب شده است.

جدول ۲ مقادیر دبی مورد آزمایش

شرح	دبی اول	دبی دوم	دبی سوم	دبی چهارم	دبی پنجم
مترمکعب بر ثانیه	۲۳۴	۱۷۶/۷	۱۵۱/۷	۱۱۰/۸	۷۳/۴

### ۲-۵- شاخص کاویتاسیون

با توجه به اینکه پارامترهای جریان طی آزمایشات اندازه گیری شد برای بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون در مدل، از شاخص کاویتاسیون ( $\sigma$ ) استفاده گردید که به شرح زیر تعریف شده است (فالووی 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 اندازه گیریها، 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 فالووی (۱۹۹۰)، در طراحی سرریزها ارائه شده است و برحسب شاخص کاویتاسیون می‌باشد، صورت گرفته است. در جدول (۳) توصیه‌های فالووی بیان شده است.

جدول ۳ توصیه‌های فالووی برای پدیده کاویتاسیون

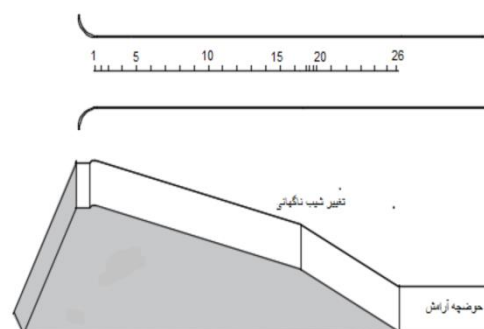
اقدام مورد نیاز	شاخص کاویتاسیون
نیاز به حفاظت در برابر کاویتاسیون نیست	$\sigma > 1/8$
اصلاح جریان به وسیله حذف نامنظمی‌ها	$1/8 - 0/25$
اصلاح طراحی	$0/17 - 0/25$
حفاظت به وسیله گالری‌های هواده با ایجاد پله	$0/12 - 0/17$
هیچ‌گونه حفاظتی امکان‌پذیر نبوده و نیاز به طراحی و ساخت مجدد دارد.	$\sigma < 0/12$

### 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



شکل ۱ نمای سرریز سد سورک و موقعیت‌های اندازه‌گیری



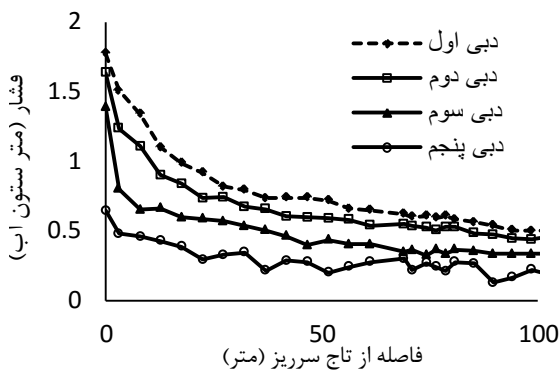
شکل ۲ تابلو نصب پیزومترها با چرخش ۳۰ درجه



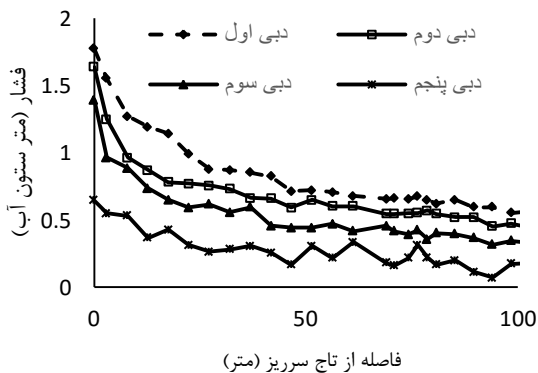
شکل ۳ تصویر مدل فیزیکی سرریز سد سورک

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

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 پیزومتر، 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 کاویتاسون 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 نمایان تر شده است.



شکل ۶ تغییرات فشار در محور مرکزی مدل فیزیکی

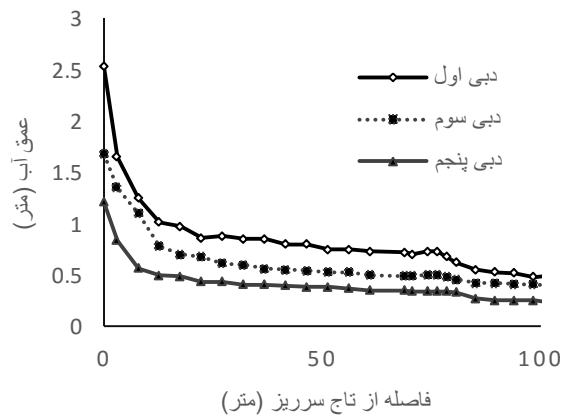


شکل ۷ تغییرات فشار در محور کناری مدل فیزیکی

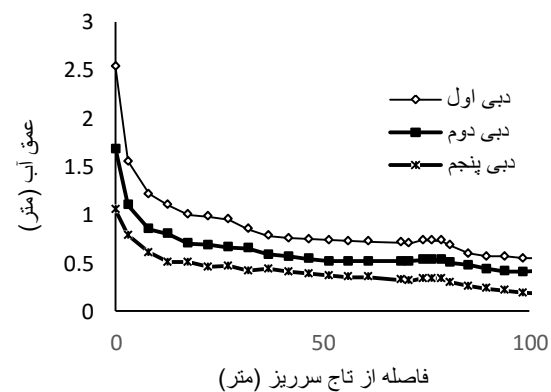
### ۳-۳- سرعت در مدل فیزیکی

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

تغییرت 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 آنجایی 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 ۵ تغییرات عمق شوت در محور کناره مدل فیزیکی

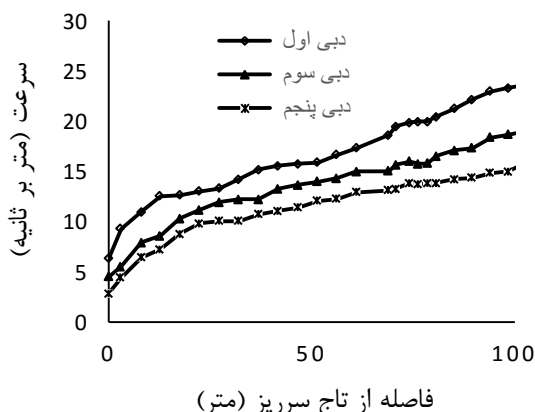
### ۳-۲- تغییرات فشار

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 پیزومترهای شماره ۱

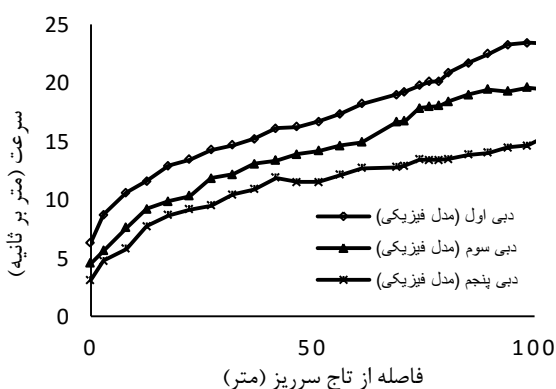
جهت بررسی و کنترل وقوع کاویتاسیون، نیاز به اطلاعاتی نظیر سرعت متوسط و فشار وارد بر کف در قسمت‌های مختلف سازه می‌باشد که این اطلاعات در موقعیت‌های مختلف در دو محور مرکز و کناره دیواره برداشت گردید. با توجه به پارامترهای موردنیاز و استفاده از رابطه (۸) شاخص کاویتاسیون محاسبه شد شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نتایج 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 آنکه عدد حداقل بدست آمده در مرکز بازه بحرانی عدد کاویتاسیون (۰/۲۵ - ۰/۱۷) قرار می‌گیرد و در این بازه طبق توصیه فالووی 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.

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.

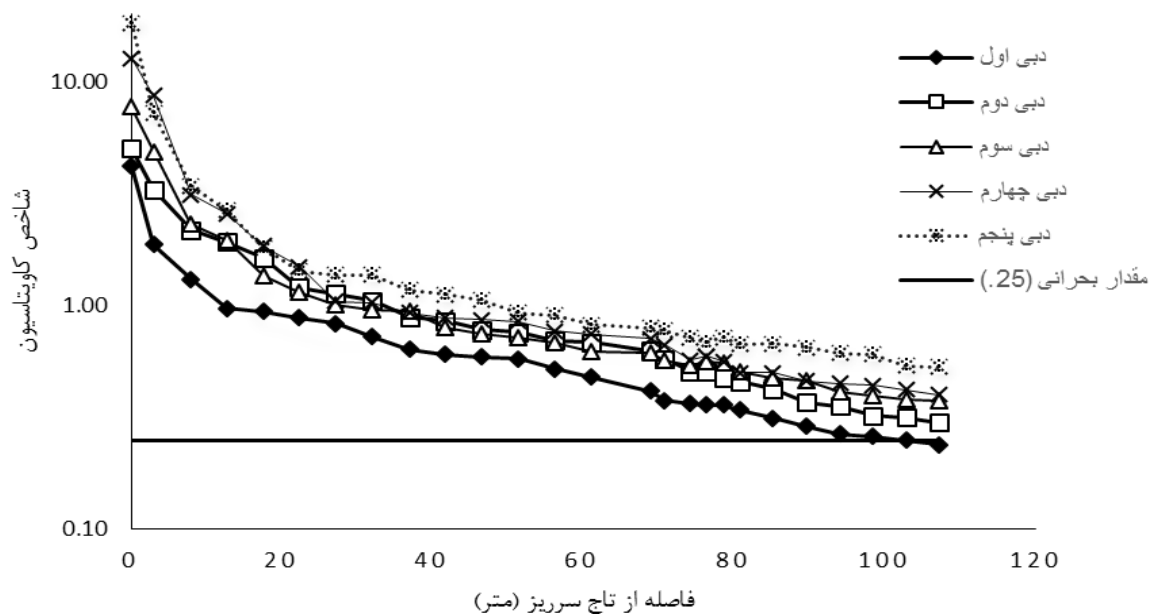
در هر مقطع، ناشی از دلیل گسترش موج‌های عرضی تشکیل شده اختلاف جزئی بین سرعت جریان در محور مرکز و محور کناری وجود دارد. با توجه به شکل‌ها شیب افزایش سرعت در ابتدای ورود آب به تنداب افزایشی ناگهانی داشته است که به علت افت سطح آب در این مقطع می‌باشد. در شکل‌های (۸) و (۹) می‌توان تغییرات سرعت در مدل فیزیکی سرریز سد سورک را مشاهده نمود.



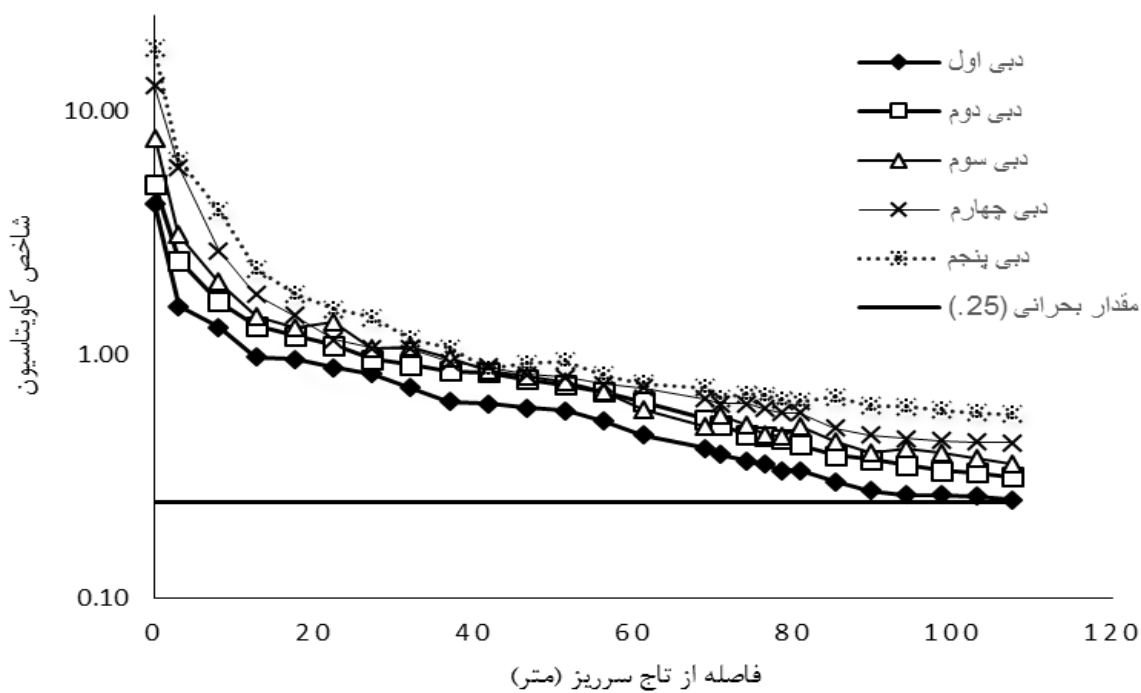
شکل ۸ تغییرات سرعت در محور مرکزی شوت مدل فیزیکی



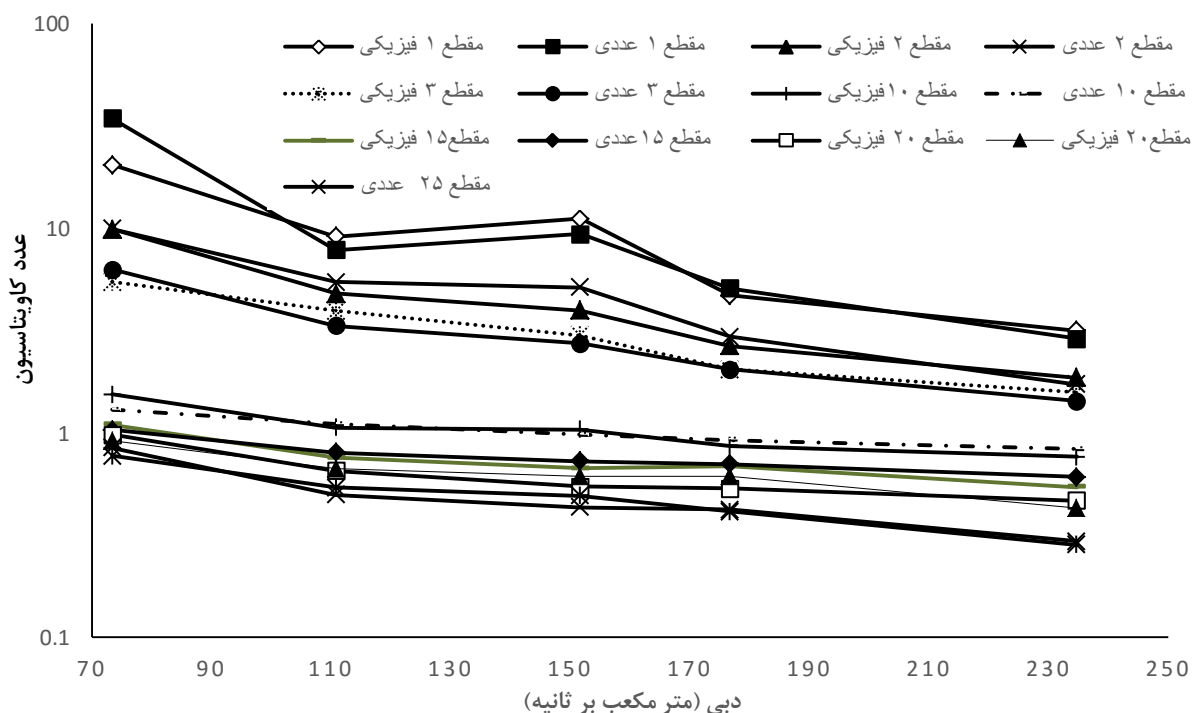
شکل ۹ تغییرات سرعت در محور کناری شوت مدل فیزیکی



شکل ۱۰ تغییرات شاخص کاویتاسیون در محور مرکزی شوت



شکل ۱۱ تغییرات شاخص کاویتاسیون در محور کناری شوت



شکل ۱۲ تغییرات عدد کائولینسیون در مقاطع و دبی‌های مختلف

این صورت جریان روی سرریز نیز اصلاح شده و از خطر وقوع کائولینسیون پیشگیری می‌گردد.

با توجه به یافته‌های این تحقیق، خطر وقوع کائولینسیون 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 فالووی (۱۹۹۰) پیشنهاد می‌گردد عملیات اجرای پوشش مناسب و صاف بر روی سطح شوت سرریز انجام شود.

#### ۵- سپاسگذاری

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

#### ۶- مراجع

دورقی ا. ۱۳۸۸. رفتار هیدرولیکی آب بر روی سرریز اوجی سه دهانه و تعیین رابطه دبی-اشل و بهینه سازی دیواره های هدایت (مطالعه موردی سد بالا رود) پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز.

عارف پور م. ۱۳۸۸. بررسی هیدرو دینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین دست در پرتابه جامی شکل

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق با انجام آزمایش بر روی مدل فیزیکی سرریز سد سورک در مقیاس ۱:۵۰، شاخص کائولینسیون 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 کائولینسیون محاسبه شده در بازه (۱/۸-۰/۲۵) قرار گرفت. بر اساس جدول (۳) و توصیه‌های فالووی (۱۹۹۰) این سرریز نیاز به اصلاح جریان به کمک حذف نامنظمی‌ها در راستای کاهش شاخص کائولینسیون دارد. نتایج آزمایش‌ها در دبی طراحی سرریز نشان داد حداقل شاخص کائولینسیون 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 (فالووی، 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 کائولینسیون 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



- Development in Engineering and Technology. ISSN 2(1): 2347-6435.
- Darren Hinton. P.E. Brian Hughes, M.A. Ed Zapel, M.S. 2015. Scott Dam Spillway – Comparing Physical Model Study Results. paper presented HydroVision Conference, July 15 – 17.
- Peltier Y. Dewals P. Archambeau M. Pirotton S. And Erpicum .2015. Pressure and velocity on an ogee spillway crest operating at high head ratio: experimental measurements and validation. 2nd International Workshop on Hydraulic Structures: Data Validation (IWHS). Coimbra, Portugalia
- مطالعه موردی سد بالا رود). پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز.
- مهروی، م. ۱۳۸۵. مدل سازی رفتار هیدرولیکی جریان روی سرریز سد بالا رود با مقیاس کوچک. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران اهواز.
- نصر اصفهانی م ج. شفای بیجستان م. ۱۳۹۲. بررسی پدیده کویتاسیون در حوضچه آرامش با بستر زیر و پله ناگهانی. نشریه هیدرولیک. جلد ۸، شماره ۲. صفحات ۴۰-۲۹.
- هاشمی ا ف. خسروجردی ا. و صدقی ح. ۱۳۹۱. بررسی نوسان های فشار و احتمال وقوع کویتاسیون داخل شیار دریچه کشویی تحتانی سد گتوند. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۲. شماره ۳. صفحات ۱۸۳-۱۹۴.
- Johnson V E. 1963. Mechanics of cavitation. Tran American Society of Civil Engineers. Journal of Hydraulic Engineering. 89(3). 251-275.
- Savage B M. and Johnson C. 2001. Flow over ogee spillway: Physical and numerical model case study. Journal of Hydraulic Engineering. 127. 640-649.
- Inozemtsev. Y P. 1969. Cavitation destruction of concrete and protective facings under natural conditions. Power Technology and Engineering, 3(1): 24-29.
- Zandi Goharrizi f. Azhdary Moghadam M. and Parchami A. 2014. Fuzzy Predicting Model for Cavitation in Chute Spillways. Global Journal of Scientific Researches. Vol. 2(1), pp. 12-20
- Falvey .1990. cavitation in chut and spillway [engineering monograph no. 42]. united states department of the interior-bureau of reclamation. denever, Colorado
- Falvey. 1982. Predicting cavitation in tunnel spillway, water power and Dam construction. 34(8) : 13-155
- Kamanbedast, A., Bahmani, M., Aghamajidi, R. 2014. The Effect of Surface Roughness on Discharge Coefficient and Cavitations of Ogee Spillways Using Physical Models. journal of applied science and agriculture 9(6) : 2442-2448
- Gonzalez, A.C. and Chanson. H. 2004 Scale effects in moderate slope stepped spillways experimental studies in air-water flows. In The 8th National Conference on Hydraulics in Water Engineering. Gold Coast. Australia
- Boes R. and Hager W H 2003. Two-phase characteristics of stepped spillways. Journal of Hydraulic Engineering. 129(9) : 661-670
- Rajasekhar P. Santhosh, Y V G. And Soma Sekhar S. 2014. Physical and Numerical Model Studies on Cavitation Phenomenon-A Study on Nagarjuna Sagar Spillway. International Journal of Recent