

بررسی نوسان های فشار و احتمال وقوع کاویتاسیون داخل شیار دریچه

کشویی تحتانی سد گتوند

امیرفرید هاشمی^{1*}، امیر خسرو جردی²، حسین صدقی³

تاریخ دریافت: 90/06/23 تاریخ پذیرش: 91/02/31

¹ - استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نراق

² - استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

³ - استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

* مسئول مکاتبه: [E-mail:af.hashemi@iau-naragh.ac.ir](mailto:af.hashemi@iau-naragh.ac.ir)

چکیده

سرعت زیاد سیال همراه با افت شدید فشار باعث اغتشاش های زیاد در جریان شده که می تواند منجر به وقوع پدیده های مخرب مانند کاویتاسیون و کوبش در سازه های هیدرولیکی و تخریب جدی در قسمت هایی از آنها گردد. در این تحقیق نوسان های فشار، روند آنها و پدیده کاویتاسیون در ناحیه شیار دریچه سرویس مدل فیزیکی تونل تحتانی سد مخزنی گتوند علیا بررسی شد. آزمایش ها در بازشدگی های 10، 30، 50، 70 و 100 درصد دریچه با ارتفاع معادل فشار آب 2، 3 و 4 متر انجام شد. داده های فشار با استفاده از مبدل فشار برداشت شد و به یک دستگاه تقویت کننده منتقل و در نهایت در رایانه ثبت گردید. این داده ها با احتمال وقوع 0/1 درصد مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که احتمال وقوع کاویتاسیون در بازشدگی های 30، 50 و 70 درصد دریچه بیشتر از مقادیر آن در بازشدگی های 10 و 100 درصد دریچه می باشد. همچنین پیرومتری که به لبه دریچه نزدیکتر است در معرض نوسان های بیشتری قرار دارد و با افزایش بازشدگی دریچه نقطه بحرانی نوسان های فشار به نقاط بالاتر انتقال می یابد. ضریب بی بعد نوسان های فشار C_p' نیز در بازشدگی 10% دریچه بیشینه بوده که نشان دهنده کوبش و ضربه های فشاری به سازه در این بازشدگی می باشد. لذا با استفاده از پوشش مناسب، کنترل شرایط هیدرولیکی و تغییرات هندسی شیار می توان احتمال وقوع کاویتاسیون را به کمترین میزان ممکن رساند.

واژه های کلیدی: افت فشار، تونل تحتانی، دریچه سرویس، سرعت زیاد سیال، ضریب نوسان های فشار، کاویتاسیون

**Study of Pressure Fluctuations and Probability of Cavitation Occurrence
in the Slot of Bottom Outlet Gate of Gotvand Dam**
AF Hashemi^{1*}, A Khosrowjerdi², H Sedghi³

Received: 14 September 2011 Accepted: 20 May 2012

¹Assist. Prof., Naragh Branch, Univ. of Islamic Azad, Naragh, Iran

²Assist. Prof., Dept. of Water Sci. and Engin., Sci. and Research Branch, Univ. Of Islamic Azad, Tehran, Iran

³Prof., Dept. of Water Sci. and Engin., Sci. and Research Branch, Univ. of Islamic Azad, Tehran, Iran

*Corresponding author E-mail: af.hashemi@iau-naragh.ac.ir

Abstract

High velocity of fluid along with the severe head loss causing several turbulences in the flow, may lead to the occurrence of cavitation phenomenon in hydraulic structures and severe destruction in some parts of them. In this research, pressure fluctuations, its processes and cavitation phenomenon in area of service gate slot have been investigated and analyzed by a hydraulic model including bottom outlet of Gotvand Olya storage dam. These experiments were conducted at the gate openings of 10, 30, 50, 70, and 100 percent and at different 2, 3 and 4 meter-heads in the region of gate slot. Pressure data were collected by using a transducer and were then transferred to an amplifier and finally were recorded in the computer. These data were analyzed on the basis of 0.001 probability level. The obtained results indicated that the probability of cavitation occurrence in 30, 50 and 70 percent of gate openings was higher than 10 and 100 percent ones. Also the piezometer which was the closest to the gate lip was subject to more fluctuations and critical point of pressure fluctuations was shifted to higher points due to increase of gate opening. Dimensionless coefficient of pressure fluctuations (C_p) was the maximum for 10 of gate opening, indicating compaction and pressure impacts on the structure in this opening. So by suitable lining, control of hydraulic conditions, and change of slot geometry probability of cavitation occurrence can be decreased to the lowest value.

Key words: Bottom outlet, Cavitation, Coefficient of pressure fluctuations, Head loss, High velocity of fluid, Service gate.

مقدمه

کاویتاسیون بر روی شوت‌ها و سرریزها انجام داد. او مقدار بحرانی شاخص کاویتاسیون را برای مجراها و سرریزها 0/25-0/2 بدست آورد و در آزمایش‌های خود از نوسان‌های فشار با احتمال وقوع 0/1% استفاده نمود. ناداشر (1991) تحقیقات وسیعی را بر روی دریچه‌های تحتانی، بخصوص با ارتفاع زیاد جریان در شکاف‌های دریچه انجام داد و دریافت که بطور روشن کاهش فشار در شکاف‌های دریچه که ناحیه ایجاد گرداب هستند بوجود می‌آید و مقالات متعددی را در این زمینه ارائه نمود. لوپاردو و همکاران (1982) گرایش به کاویتاسیون را در پرش هیدرولیکی توسط یک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار دادند و استفاده از سطح احتمالاتی 0/1% برای وقوع پدیده کاویتاسیون را پیشنهاد نمودند. عبدالقادر و ایلانکو (1974) تحقیقاتی را در ناحیه تلاطم جریان در زیر پرش هیدرولیکی انجام دادند و نتیجه گرفتند که نوسان‌های فشار در پرش هیدرولیکی باعث تولید نیروهای هیدرودینامیک شدید شده که خرابی دال‌های کف حوضچه آرامش و تند آبرو را بر اثر مکانیزم خستگی، لرزش و کاویتاسیون موجب می‌شود. اکبری و همکاران (1982) تحقیقاتی را در رابطه با زمان برداشت نوسان‌های فشار انجام دادند و نشان دادند که از 60 ثانیه به بعد برداشت نوسان‌های فشار از زمان مستقل می‌شوند. فاتور و همکاران (2007) نیز مقاله‌ای را با عنوان کاویتاسیون در نوسان‌های فشار با جریان آشفته در پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش ارائه نمودند. در این مقاله به بررسی عملکرد مخرب جریان‌های متلاطم در پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با تمرکز بر نقطه شروع کاویتاسیون و خسارت‌های آن در جریان‌های با سرعت نسبتاً پایین در دامنه نوسان‌های فشار با احتمال وقوع 0/1% پرداخته شد. کار بر روی مدل آزمایشگاهی سد آرویتو³ انجام گردید. خسروجردی (2010) نوسان

سرعت زیاد سیال وافت شدید فشار به همراه اغتشاش‌های زیاد سیال در مناطقی مانند تونل‌های تحتانی سدها و به ویژه شیار دریچه‌ها زمینه ساز پدیده‌های مخرب هیدرولیکی مانند کاویتاسیون بوده که می‌توانند خسارت‌های جدی به سازه وارد نمایند. بعنوان مثال سد گلن کنیون¹ که بر روی رودخانه کلرادو در ایالت متحده آمریکا ساخته شد، پس از 2 سال از شروع بهره‌برداری، نوسان‌های شدید فشار و در نتیجه وقوع پدیده کاویتاسیون منجر به خسارت‌های شدیدی در سقف تونل تحتانی این سد شد. همچنین حفره‌ای نیز با عمق 11 متر در کف سرریز تونل سمت چپ سد گلن کنیون دلیل وقوع پدیده کاویتاسیون ایجاد گردید. وگنر (1967) تحقیقاتی را در این زمینه انجام داد و ناهمواری‌های سطح مجرا و ایجاد اغتشاش در جریان را علت اصلی خسارت‌های وارده به دریچه‌ها و پوشش مجرا عنوان نمود. خسارت‌های وارده به تونل تحتانی شماره 2 سد تاربالا² در پاکستان در اثر پدیده کاویتاسیون نمونه دیگری از تخریب‌های ایجاد شده توسط این پدیده بر روی قسمت‌هایی از این سازه می‌باشد. کن و گارود (1981) خسارت‌های ناشی از این پدیده را بر روی تونل این سد مورد بررسی قرار دادند و نوسان‌های فشار را از دلایل عمده وقوع پدیده کاویتاسیون اعلام کردند. سافر (1979) طی تحقیقات خود در دریچه‌هایی با ارتفاع‌های زیاد جریان ضمن تأکید بر بسیار کوچک بودن شیار دریچه مشکلاتی مانند کاویتاسیون، سایش، ارتعاش و بسته نشدن را عامل از کار افتادن دریچه اعلام کرد. سافر (1995) زاویه لبه دریچه‌های کشویی را نیز به منظور جلوگیری از ارتعاش و کاهش نیروهایی که به طرف کف اعمال می‌شود، کمتر از 45 بدست آورد. فالوی (1990) نیز تحقیقاتی را در زمینه

¹ Glen Canyon² Tarbela³ Arroyito

Logging به اعداد واقعی فشار دینامیکی تبدیل گردیدند. سپس مقادیر ضرایب نوسان‌های فشار شامل: C_p ، $C'p+$ ، $C'p-$ و نیز شاخص کاویتاسیون محاسبه و نسبت به بازشدگی‌ها و ارتفاع‌های آب ذکر شده به صورت نمودار مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و نقاط بحرانی بازشدگی دریاچه مشخص گردیدند. مهمترین وسایل جهت انجام آزمایش آمپلی فایر، ترنسدیوسر (مبدل فشار)، فیلتر، رایانه و نرم افزار نصب شده روی آن جهت برداشت داده‌های فشارهای دینامیکی و لوله‌های رابط و سه پایه می‌باشند. مبدل فشار به یک آمپلی فایر یا دستگاه تقویت کننده متصل می‌باشد که دارای 8 کانال بوده و این دستگاه نیز نهایتاً به یک رایانه متصل می‌گردد. ارتفاع معادل فشار آب پشت دریاچه نیز توسط یک مخزن تأمین می‌شود. لازم به ذکر است که در هر آزمایش و در هر بازشدگی تعداد مشخصی از پیژومترها پوشش داده می‌شوند. بدین ترتیب که در بازشدگی 10% بدلیل ارتفاع کوتاه شیار فقط یک پیژومتر پوشش داده می‌شود و در باز شدگی‌های 30، 50، 70 و 100 درصد به ترتیب 2، 3، 4 و 5 پیژومتر در آزمایش‌ها شرکت می‌کنند (شکل 2). مدل مجرای تخلیه‌کننده عمقی سد گتوند علیا شامل لوله ورودی مجرا به قطر 9/5 متر، تبدیل، تنگ‌شدگی، شیارها و اتاقت‌های دریاچه‌های اضطراری و سرویس، مجرای میانی، هواده‌های بین دو دریاچه و همچنین کل مجرای پایین دست دریاچه سرویس همراه با شیب معکوس انتهایی می‌باشد. ابعاد شکاف دریاچه در شکل‌های 1 و 2 نشان داده شده است. شکل‌های 3 و 4، جریان در تونل تحتانی مدل شده سد گتوند علیا، تقویت کننده‌های مدل که بر روی بدنه نصب گردیده و نیز دریاچه‌های اضطراری و سرویس که به شکل کشویی ساخته شده‌اند را نشان می‌دهد.

های فشار را بر روی دریاچه‌های با ارتفاع معادل فشار آب زیاد و در شکاف دریاچه تحتانی سدها (در حالت دو دریاچه‌ای) درآزمایشگاه گروه عمران دانشگاه ملبورن استرالیا مورد آزمایش قرار داد و در بازشدگی‌های 10، 30، 50 و 70 درصد، داده‌های فشارهای دینامیکی را برداشت نمود. وی نتیجه‌گیری نمود که مقادیر ضرایب نوسان‌های فشار در بازشدگی 10 درصد دریاچه بیشینه و در بازشدگی‌های تا 70 درصد این ضرایب بطور واضحی کاهش می‌یابند. وی همچنین شاخص کاویتاسیون را (با فشار دینامیکی در احتمال وقوع 0/1%) محاسبه نمود و در بازشدگی 10 درصد دریاچه مقدار بیشینه و در بازشدگی‌های 30، 50 و 70 درصد کمینه مقدار آن را بدست آورد.

در این تحقیق نوسان‌های فشار و پدیده کاویتاسیون در شکاف دریاچه تحتانی (که به ندرت به شکل موجود در این تحقیق بر روی آن کار شده) مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی وقوع پدیده کاویتاسیون و روندیابی ضرایب نوسان‌های فشار در ناحیه شکاف دریاچه تحتانی سد گتوند علیا در بازشدگی‌های مختلف دریاچه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

روش تحقیق استفاده از یک مدل فیزیکی می‌باشد که پس از ترمیم و آماده‌سازی بر روی مدل اقدام به اندازه‌گیری جریان گردید. آزمایش‌ها در موسسه تحقیقات آب بر روی مدل هیدرولیکی دریاچه تحتانی سد گتوند علیا با مقیاس 1:17 و در ناحیه شکاف دریاچه و با کارگذاری 5 پیژومتر در مقطع عرضی انجام شد. نوسان‌های فشار در هر 20 ثانیه (فرکانس 200 هرتز) با 4000 برداشت در هر آزمایش (در کل 45 آزمایش) و در ارتفاع معادل فشار آب 2، 3 و 4 متر با استفاده از ترنسدیوسر¹ یا مبدل فشار اندازه‌گیری و با استفاده از نرم افزار Data

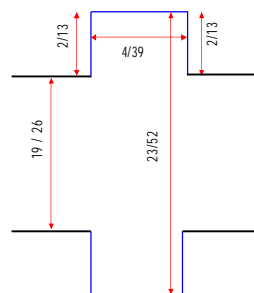
¹ Transducer



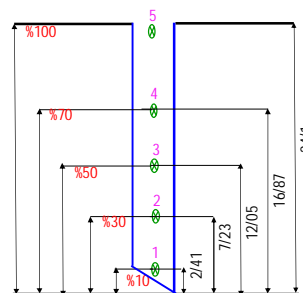
شکل 4- مدل دریچه سرویس گتوند علیا در حین آزمایش، ارتفاع معادل فشار آب مخزن 4 متر، بازشدگی دریچه 100٪.

در این مطالعه شرایط جریان در قسمت ورودی مدل مد نظر است که در قسمت بالادست دریچه سرویس بصورت تحت فشار و در پایین دست آن با سطح آزاد می‌باشد. در این آزمایش‌ها بر اساس منابع علمی موجود از عدد فرود به جای عدد رینولدز استفاده شده است، مشروط بر آنکه عدد رینولدز در مدل از حد خاصی (10^5) بزرگتر بوده، تا اثر لزجت قابل صرفنظر کردن باشد (نواک 1981). چرا که با توجه به سرعت بسیار زیاد جریان در نمونه واقعی $43/57$ متر بر ثانیه در زیر دریچه در صورت استفاده از معیار تشابهی عدد رینولدز در مدل، سرعت جریان به بالاتر از $740/74$ متر بر ثانیه می‌رسید که تأمین آن در مدل امکان پذیر نخواهد بود. مقیاس $1/17$ برای مدل نیز با توجه به محاسبات انجام شده و محدودیت‌های آزمایشگاهی بزرگترین مقیاس قابل اجرا بوده است (بیشترین دبی در نمونه واقعی 500 متر مکعب بر ثانیه و ارتفاع و عرض متوسط مجرا نیز به ترتیب $3/961$ و $2/894$ متر می‌باشند).

برای تأمین ارتفاع معادل فشار آب و دبی مورد نیاز از دو مخزن استوانه‌ای فلزی استفاده شده، که بر روی یکدیگر نصب گردیده‌اند. ارتفاع دو مخزن 10 متر بوده و به وسیله چهار پمپ که ظرفیت هر یک 250 لیتر بر ثانیه می‌باشد تغذیه می‌گردند (شکل 5).



شکل 1- نمایی از پلان دریچه در سد گتوند علیا با مقیاس 1:17 (واحدها به سانتی متر است).



شکل 2- نمایی از مقطع عرضی شکاف دریچه در سد گتوند علیا با مقیاس 1:17 (واحد ارتفاع به سانتی متر است).



شکل 3- مدل تخلیه کننده تحتانی سد گتوند علیا در محل شکاف دریچه.

$$C_p' = \frac{RMS}{V_1^2 / 2g} \quad [1]$$

$$C_{p+} = \frac{P_{max} - P_{mean}}{V_1^2 / 2g} \quad [2]$$

$$C_{p-} = \frac{P_{min} - P_{mean}}{V_1^2 / 2g} \quad [3]$$

$$C_p = \frac{P_{mean} - P_0}{V_1^2 / 2g} \quad [4]$$

که در این روابط:

RMS: انحراف از معیار (متر)

$V_1^2 / 2g$: ارتفاع سرعت ورودی (متر)

P_{mean} : میانگین های فشارهای دینامیکی (متر)

P_{min} و P_{max} : به ترتیب حداکثر و حداقل ارتفاع معادل فشارها (متر) در هر نقطه می‌باشند. C_p ضریب بی بعد فشار بوده که نشان دهنده اختلاف معنی دار بین فشارهای دینامیکی و استاتیکی است. P_0 نیز ارتفاع نظیر فشار مبناء (متر) در یک نقطه می‌باشد که در اینجا فشار استاتیکی در هر آزمایش در نظر گرفته می‌شود. مقدار بالای C_p نشان می‌دهد که تغییرات شدید فشار وجود دارد. اگر مقدار آن منفی شود با افت فشار و در صورت مثبت بودن آن با افزایش فشار مواجه هستیم. با در نظر گرفتن فشارهای دینامیکی که ممکن است فشار را به زیر فشار بخار برساند پدیده کاویتاسیون بروز و ظهور می‌نماید. قدر مطلق این پارامترها بیانگر تغییرات فشار خواهد بود. تعیین میزان وقوع کاویتاسیون و ضربات وارده بر محدوده شکاف دریچه از این طریق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

شاخص کاویتاسیون یکی از پارامترهایی است که می‌تواند از طریق برداشت داده‌های مربوط به فشار محاسبه شده و مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. شاخص کاویتاسیون از معادله زیر بدست می‌آید:



شکل 5- منبع تأمین آب.



شکل 6- سرریز اندازه گیری دبی در حین آزمایش (ارتفاع معادل فشار آب مخزن 4 متر، باز شدگی دریچه 50%).

دبی در هر باز شدگی توسط سه سرریز مستقر در انتهای مدل و با قرائت ارتفاع معادل فشار آب بر روی سرریز و مراجعه به جدول کالیبراسیون دبی- اشل اندازه‌گیری گردید (شکل 6). سطح سنج نصب شده در دیواره کانال شامل یک خط کش مجهز به ورنیه با دقت $\pm 0/1$ میلی متر می‌باشد. سرعت نیز با توجه به دبی و سطح مقطع جریان در هر باز شدگی از رابطه پیوستگی محاسبه شده است. بازه مقدار سرعت (بر حسب متر بر ثانیه): $3.14 < V < 7.25$ و بازه عدد فرود: $3 < Fr < 11$ می‌باشد.

پس از اندازه گیری و ثبت مقادیر نوسان‌های فشارمقادیر بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف از معیار و سایر پارامترهای آماری داده‌ها محاسبه می‌گردند. همچنین مقادیر فشارهای استاتیکی نیز در هر آزمایش با استفاده از لوله‌های متصل به پیزومترها اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. با اندازه‌گیری دبی، سرعت جریان نیز در هر باز شدگی با استفاده از رابطه پیوستگی بدست می‌آید. ضرایب بی بعد نوسان‌های فشار که بیانگر تغییرات فشار می‌باشند از روابط زیر محاسبه می‌شوند (ناداشر 1991):

0/2-0/25 قرار گیرد پدیده کاویتاسیون رخ خواهد داد (فالوی 1990).

برای بررسی رفتار نوسان های فشار و رسیدن به الگوی مشخصی که در آینده بتوانیم رفتار آنها را پیش بینی نماییم، باید به محاسبه توزیع احتمالات نوسان های و مقایسه آن با توزیع نرمال استاندارد بپردازیم. توزیع نرمال استاندارد از رابطه زیر بدست می آید:

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{z^2}{2}} \quad [9]$$

که در این رابطه F_p تابع چگالی احتمال تغییرات فشار نرمال شده و Z متغیر استاندارد می باشد. با تبدیل این رابطه به متغیرهای متناظر با فشار خواهیم داشت:

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{2p}} e^{-\frac{P'^2}{2}} \quad [10]$$

مقدار P' (فشار با سطح احتمالاتی خاص) از رابطه زیر بدست می آید:

$$P' = \frac{P - P_{ave}}{S} \quad [11]$$

که در این رابطه:

P : ارتفاع معادل فشار برداشتی (متر)، P_{ave} : ارتفاع معادل فشار میانگین (متر) و S : انحراف از معیار (متر) می باشد. توزیع نرمال استاندارد دارای میانگین صفر و انحراف از معیار 1 می باشد.

نتایج و بحث

تغییرات فشارهای دینامیکی

فشارهای دینامیکی بر حسب درصد بازشدگی درجه به تفکیک ارتفاع های مختلف و شماره پیزومتر در شکاف دریچه تحتانی گتوند علیا در شکل 7 نشان داده شده است. علامت اختصاری P_{iz} روی محور X ها مخفف کلمه پیزومتر می باشد. افزایش بازشدگی دریچه با مقادیر فشارهای دینامیکی و استاتیکی نسبت معکوس

$$s_i = \frac{P - P_v}{v^2/2g} \quad [5]$$

که در آن:

p : ارتفاع معادل فشار مطلق جریان (متر) در یک نقطه مبنا است.

p_v : ارتفاع معادل فشار بخار آب (برابر با 0/23 متر) V : سرعت جریان (متر بر ثانیه) می باشد.

نکته مهم در ارتباط با محاسبه شاخص کاویتاسیون محاسبه p می باشد. طبق مراجع معتبر باید در محاسبه شاخص کاویتاسیون از فشار با احتمال وقوع 0/1% استفاده شود (فالوی 1990، لویاردو و همکاران 1982) بدین ترتیب که با استفاده از توزیع های آماری (در این جا توزیع نرمال) ابتدا متغیر (فشار) با احتمال وقوع مورد نظر را از رابطه زیر بدست می آوریم:

$$X = \bar{X} + K . S \quad [6]$$

که در این رابطه: \bar{X} میانگین داده ها، S انحراف از معیار داده ها و K ضریب فراوانی است که از جداول آماری استخراج می گردد. لذا با جای گذاری مقادیر متناظر فشار در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$P'_\% = D_p (ave) + K . D_p (stdev) \quad [7]$$

که در اینجا:

$P'_\%$: ارتفاع معادل فشار با احتمال وقوع

$D_p (ave)$: میانگین فشارهای دینامیکی (4000 داده)

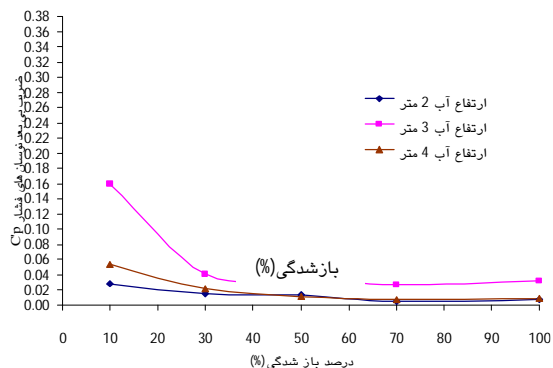
و $D_p (stdev)$ نیز انحراف از معیار داده ها می باشد.

برای بدست آوردن مقدار مطلق ارتفاع معادل فشار باید مقدار $P'_\%$ محاسبه شده را با مقدار فشار جو (10/13 متر) جمع نمود که خواهیم داشت:

$$P = P'_{0.1\%} + 10.13 \quad [8]$$

در ادامه: $P - P_v$ را محاسبه نموده و در رابطه 5 قرار می گیرد. در صورتی که این شاخص در محدوده

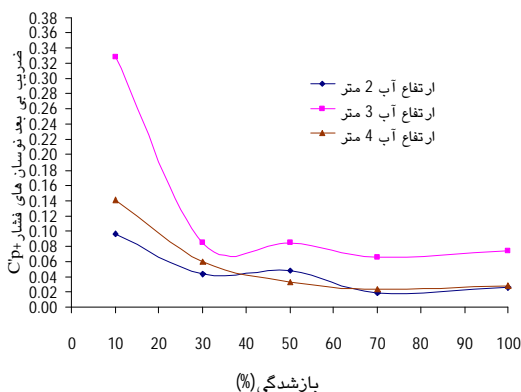
باعث کنده شدگی بتن و صدمه به سازه گردند (شکل 8).



شکل 8- ضریب بی بعد فشار کل $C'p$ به ازای درصد بازشدگی دریاچه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب.

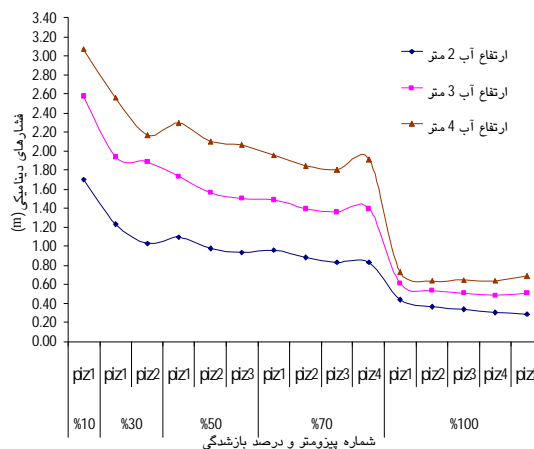
ضریب نوسان های فشار $C'p$

در شکل 9 نیز در بازشدگی 10% دریاچه ضریب نوسان های فشار در هر سه ارتفاع معادل فشار آب مورد آزمایش بیشینه گردیده است که نشان دهنده تطابق آن با روند تغییرات نوسان های $C'p$ می باشد. با توجه به اینکه $C'p$ نشان دهنده دامنه فشار مثبت نسبت به فشار میانگین می باشد (معادله 2) لذا این ضریب بیان کننده کوبش و ضربه های فشاری مثبت می باشد. در اینصورت تنها در بازشدگی کمینه دریاچه این مسئله وجود دارد که باید مقاومت شکاف در این محدوده مد نظر قرار گیرد.



شکل 9- ضریب بی بعد فشار کل $C'p$ به ازای درصد بازشدگی دریاچه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب.

دارد. این امر می تواند به دلیل افزایش دبی باشد که افزایش افت را به همراه خواهد داشت. همینطور در پایین ترین پیژومتر در هر بازشدگی بیشترین مقدار فشار و در بالاترین پیژومتر کمترین مقدار فشار دیده می شود (شکل 7) که با توجه به رابطه مستقیم فشار و ارتفاع، در پیژومترهای پایین تر به علت ارتفاع بیشتر فشار نیز زیادتر می باشد. لذا در بازشدگی کمینه (10%)، وجود حداکثر فشار در طراحی ابعاد شکاف دریاچه و مسایل نشت حائز اهمیت است.

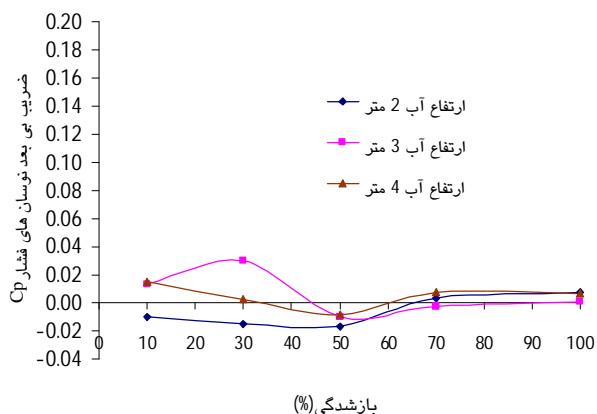


شکل 7- روند فشارهای دینامیکی بر حسب درصد بازشدگی دریاچه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب و شماره پیژومتر.

ضریب نوسان های فشار $C'p$

شکل 8 نشان می دهد در بازشدگی 10% دریاچه ضریب نوسان های فشار در هر سه ارتفاع معادل فشار آب مورد آزمایش بیشینه گردیده است که نمایانگر اثرات کوبشی جریان در این بازشدگی می باشد. با توجه به شکل 7 و بیشینه بودن فشار در بازشدگی 10٪، کوبش نیز به سازه در این بازشدگی بیشینه می گردد. لذا انتظار می رود که در این بازشدگی کوبش و ضربه های فشاری

مورد توجه قرار می‌گیرد. چرا که در اغلب موارد دیده می‌شود در اندازه‌گیری فشار متوسط دینامیکی به فشار استاتیکی که توسط پیزومتر معمولی بدست می‌آید بسنده می‌گردد. در حالی که بجای فشار استاتیکی باید از فشار دینامیکی استفاده نمود. این نمودار نشان می‌دهد که ضریب C_p فقط در برخی بازشدگی‌ها بخصوص تا 50% غیر صفر بوده که بعلت تفاوت بین این دو فشار است که در اینصورت در این محدوده نمی‌توان به فشار استاتیکی اکتفا نمود. از دلایل عدم صفر شدن این ضریب می‌توان به وجود اغتشاش در جریان اشاره نمود که پراکنش شدید فشار را در پی دارد.



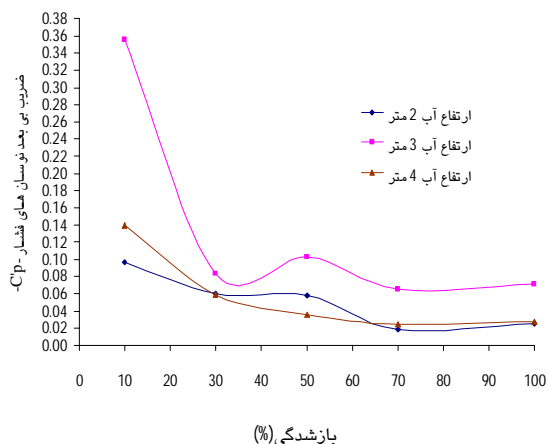
شکل 11- ضریب بی بعد فشار C_p به ازای درصد بازشدگی درجه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب.

واریانس فشارهای دینامیکی

در بازشدگی 100% میزان اغتشاش‌های جریان کمینه می‌باشد. با توجه به بازشدگی کامل درجه و نبودن مانعی در برابر جریان روند منحنی منطقی می‌باشد (شکل 12). در این نمودار نوسان‌های شدید فشار در 10% بازشدگی و بخصوص در ارتفاع آب متوسط 3 متر قابل توجه می‌باشد. بنابراین پیش‌بینی نوسان‌ها با افزایش ارتفاع آب غیر ممکن ولی پیش‌بینی

ضریب نوسان‌های فشار $C'p$

روند ضریب نوسان‌های فشار $C'p$ - با $C'p+$ مطابقت دارد. برای بهتر نشان دادن تطابق این دو ضریب، $C'p-$ در یک منفی ضرب شده است (شکل 10). با توجه به اینکه $C'p$ بیان‌کننده تفاوت فشارهای منفی نسبت به فشار متوسط است (معادله 3) لذا مانند قسمت قبل علاوه بر کوبش می‌تواند در بازشدگی کوچک فشارهای کم و احياناً منفی را ایجاد نماید که خود محل توجه می‌باشد. دلیل اینکه در کلیه بازشدگی‌های حداقل، حداکثر قدرمطلق $C'p+$ وجود دارد این است که با تنگ شدن مقطع، سرعت جریان افزایش یافته و به سمت اغتشاش و تلاطم¹ پیش می‌رود لذا تغییر فشار بیشینه خود را نشان می‌دهد.



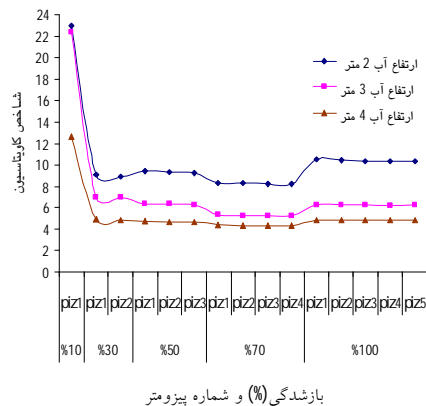
شکل 10- ضریب بی بعد فشار کل $C'p$ - به ازای درصد بازشدگی درجه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب.

ضریب نوسان‌های فشار C_p

از بازشدگی 70% به بعد روند ضریب فشار C_p تقریباً حالت خطی پیدا کرده که نشان دهنده نزدیک شدن مقادیر فشارهای استاتیکی و دینامیکی می‌باشد (شکل 11). ضریب C_p نشان دهنده تفاوت متوسط فشارهای دینامیکی نسبت به فشار متوسط استاتیکی است (معادله 4) که معمولاً در آزمایشگاه‌های هیدرولیک

¹ Turbulence

مسیر جریان و تولید نشدن گردابه‌ها و کم شدن تدریجی سرعت جریان احتمال وقوع پدیده کایتاسیون کم می‌شود (شکل 13).



شکل 13- شاخص کایتاسیون بر حسب درصد بازشدگی دریاچه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب و شماره پیزومتر.

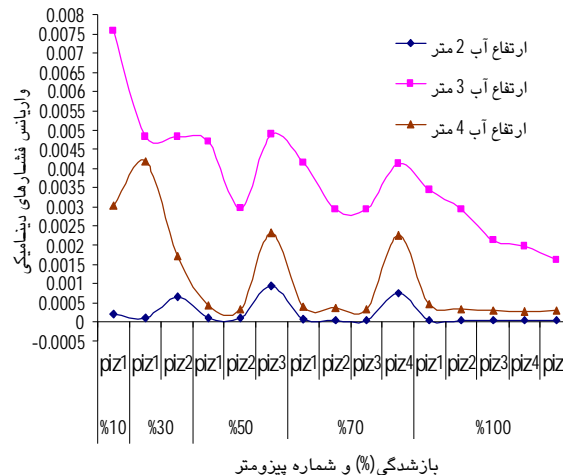
انطباق نوسان های فشار با توزیع نرمال

شکل 14 مطابق داده های فشار دینامیکی با منحنی توزیع نرمال را نشان می‌دهد. با اعمال توزیع نرمال بر روی داده های برداشت شده نوسان های فشار و ضریب 0/4 در مخرج کسر رابطه زیر بدست آمد (شکل 14):

$$Fp = \frac{1}{0.4\sqrt{2p}} e^{-\frac{P'^2}{2}} \quad [12]$$

با استفاده از این رابطه و جداول احتمالاتی می‌توان رفتار سازه را در احتمالات وقوع بالا برای بررسی اثرات کوبش در سازه و در احتمالات وقوع پایین برای بررسی اثرات پدیده کایتاسیون پیش بینی نمود.

نوسان های شدیدتر برای بازشدگی های کم می تواند مورد استناد باشد.

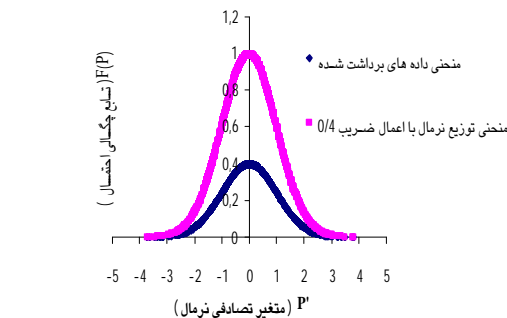
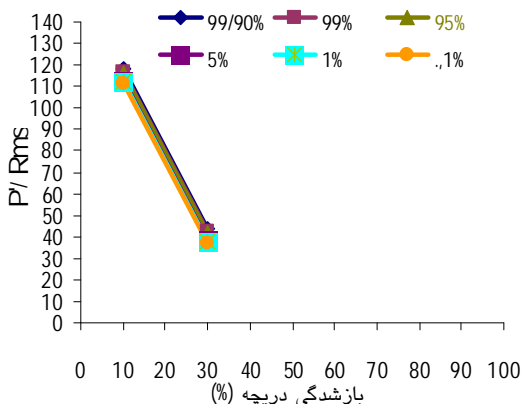


شکل 12- واریانس فشارهای دینامیکی بر حسب درصد بازشدگی دریاچه به تفکیک ارتفاع معادل فشار آب و شماره پیزومتر.

شاخص کایتاسیون

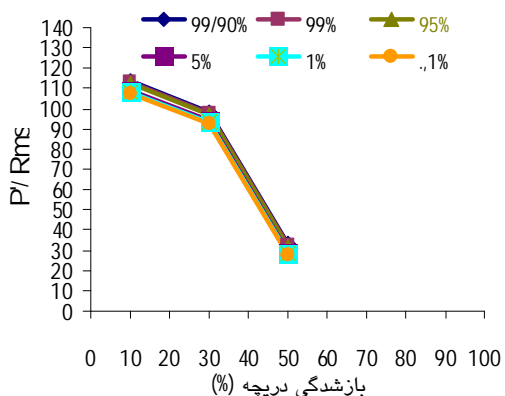
در بازشدگی های 30%، 50% و 70% دریاچه شاخص کایتاسیون کمینه بوده که نشان دهنده خطر وقوع این پدیده می‌باشد. با توجه به سرعت بیشینه جریان و اغتشاش های زیاد و وجود گردابه ها و نیز افت ناگهانی و شدید فشار مطابق با شکل 7 در این بازشدگی ها و در نتیجه ایجاد خلاءزایی روند منحنی منطقی می‌باشد. در بازشدگی های 10% و 100% دریاچه همواره شاخص کایتاسیون بیشتر بوده که نشان دهنده کم بودن احتمال وقوع کایتاسیون خواهد بود. در بازشدگی 10% به دلیل کمی سرعت جریان و نیز فشار مثبت بسیار زیاد (شکل 7) وقوع کایتاسیون نامحتمل خواهد بود. در بازشدگی 100% دریاچه به دلیل عدم وجود مانع در

که می‌تواند جهت ممانعت از وقوع کاویتاسیون نقش موثری ایفا نماید.



شکل 14- منحنی توزیع نرمال نوسان‌های فشار با اعمال ضریب 0/4 در ارتفاع معادل فشار آب 4 متر، بازشدگی 100% و پیزومتر شماره 2.

شکل 15- فشار دینامیکی بی بعد با احتمال وقوع مختلف بر حسب بازشدگی های 30-10 درصد دریچه.

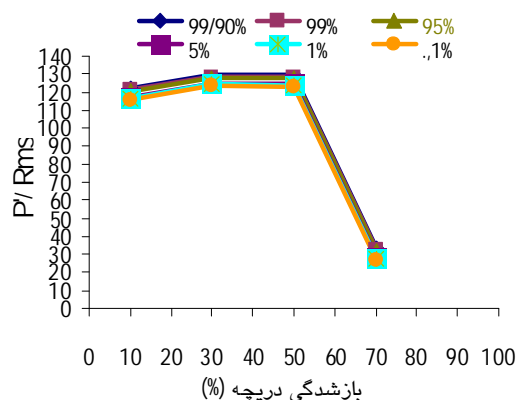


شکل 16- فشار دینامیکی بی بعد با احتمال وقوع مختلف بر حسب بازشدگی های 50-10 درصد دریچه.

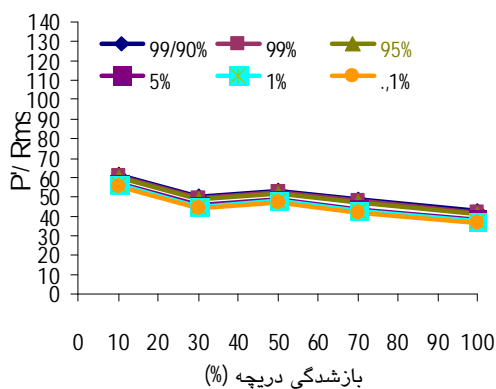
فشار دینامیکی بی بعد با احتمال وقوع مختلف فشارهای دینامیکی محاسبه شده با احتمال وقوع 0/1، 1%، 5%، 95%، 99% و 99/9% برانحراف معیار داده‌ها تقسیم شد تا مقادیر فشار بی بعد شود. سپس نمودار تغییرات فشار بی بعد بر حسب بازشدگی های مختلف دریچه ترسیم شد تا بازشدگی هایی که در آنها احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون بیشینه می‌باشد مشخص گردند (ناداشر 1991) (شکل های 15 تا 18).

اختلاف عددی بین نقاط بیشینه و کمینه درمنحنی‌ها در بازشدگی‌های 50 و 70 درصد دریچه (شکل‌های 16 و 17) بیشتر از بازشدگی های 10 و 100 درصد می‌باشند (شکل‌های 15 و 18). سرعت زیاد و افت فشار جریان و نیز اغتشاش‌های زیاد ایجاد شده در جریان در بازشدگی‌های 50 و 70 درصد می‌تواند این اختلاف معنی دار را ایجاد نماید. همچنین مقادیر با احتمال وقوع بالا (بیشتر از 90% احتمال) نشان دهنده کوبش از طرف جریان می‌باشد. لذا معیار مناسبی جهت مقاوم سازی شکاف خواهد بود. همینطور مقادیر P'/Rms در احتمال وقوع کم (کمتر از 1%) نشانه مکش فشار جریان است

احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون بیشتر است که ضروری است حفاظت های لازم در این محدوده انجام پذیرد. در بازشدگی 10٪ به دلیل بیشترین فشار مثبت، وارد آمدن کوبش و ضربه های فشاری به سازه بسیار محتمل می باشد. بازشدگی 100٪ در پیچه نیز می تواند ایمن ترین حالت برای تخلیه مخزن باشد.



شکل 17- فشار دینامیکی بی بعد با احتمال وقوع مختلف بر حسب بازشدگی های 10-70 درصد در پیچه



شکل 18- فشار دینامیکی بی بعد با احتمال وقوع مختلف بر حسب بازشدگی های 10-100 درصد در پیچه

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در تونل تحتانی سد گتوند علیا نشان داد که در بازشدگی های 30، 50 و 70 درصد در پیچه

منابع مورد استفاده

- Abdul Khader MH and Elango k, 1974. Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. Journal of Hydraulic Research 12(2): 469-489.
- Akbari ME, Mittal MK and Pande PK, 1982. Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. Paper C1, Pp. 87-96. Proc. Int. Conf. on the Hydraulic Modeling of Civil Eng. Struc., BHRA Fluid Engrg., Coventry, England.
- Fattor CA, Lopardo MC, Casado JM and Lopardo RA, 2007. Cavitation by Macro Turbulent Pressure Fluctuation in Hydraulic Jump Stilling Basins. C.46. National Institute of Water and Environment (INA), (1802) Ezeiza, Argentina.
- Falvey HT, 1990. Cavitation in Chutes and Spillways. Engineering Monograph 42. Water Resources Technical Publication. US Printing Office. Bureau of Reclamation. Denver.
- Kenn MJ and Garrod, AD, 1981. Cavitation damage and the Tarbela tunnel collapse of 1974. Pp. 65-89. Proc. Institution Civil Engineers. Rawalpindi, Pakistan.
- Khosrojerdi A, 2010. Application of pressure fluctuation under slot of high head lift gate. Pp.78-89. Russia Power Conference and Exhibition, Moscow, Russia.
- Lopardo RA, Delio JC and Vernet GF, 1982. Physical modeling on cavitation tendency for macrobulence of hydraulic jump. paper C3, Pp.109-121. proc., Int. Conf. on Hydraulic Modelling of Civil Eng. Struc., BHRA Fluid Engrs., Coventry, England.
- Naudascher E, 1991. Hydrodynamic Forces. Brookfield; Rotterdam, Netherlands

- Novak p, Cabelka J, 1981, Models in Hydraulic Engineering: physical principles and design applications. Pitman advanced publishing program, Boston.
- Sagar, BTA, 1979. Safe practices for high head outlet gates. Pp.459-467.13 ICOLD Congress, New Delhi, India.
- Sagar BTA, 1995. ASCE hydrogates task Committee design guidelines for high-head gates. Journal Hydraulic Engineering 121(12): 845-852.
- Wagner WE, 1967. GlenCanyon diversion tunnel outlets. Journal Hydraulics Division ASCE, 93: 113-134.