بررسی خلاءزایی(کاویتاسیون) بر روی پرتاب کننده جامی شکل سد بالارود به کمک مدل فیزیکی

مسلم عارف پور[1]
مهدی خواجه پور[2]
دکتر منوچهر فتحی مقدم[3]

چکیده

معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمی از سازه هیدرولیکی از یک حد مجاز فراتر رود، آن سازه در معرض‌خسارت ناشی از خلاءزائی قرار می‌گیرد. روشهای عددی و تحلیلی و روابط تجربی موجود به دلیل پیچیدگی رفتار دینامیکی سیالات و خصوصاً وجود جریان‌های دوفازی در تنداب سرریزها محدودیت‌های زیادی دارند. دراین تحقیق مدل سرریز سد مخزنی بالارود که از نوع اوجی دریچه‌دار با تنداب و پرتاب کننده‌ی جامی است، با استفاده از مصالح پلکسی‌گلاس در مقیاس ۱:۴۰ ساخته و در فلوم آزمایشگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز نصب گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت به ازاء هر دبی از جریان، ضریب خوردگی کاهش یافته و در ابتدای پرتاب کننده‌ی جامی در محور وسط به کمترین مقدار خود می رسد. همچنین به ازاء دبی ۳۸۳۱ مترمکعب بر ثانیه در سرعتی معادل ۲۵/۹متر بر ثانیه حداقل ضریب خوردگی برابر (۵۲ /۰ = σ) شده، که بیشتر از ضریب خوردگی بحرانی (۵۲ / ۰ = σcr) می باشد، وخوردگی رخ نمی دهد، درمقایسه حداقل ضریب خوردگی نتیجه شده از آزمایش مدل با حداقل ضریب خوردگی ارائه شده در گزارش مطالعاتی مشاور (۲۱۵ / ۰ = σ) علت عدم تطابقت نتایج تئوری با آزمایش مدل می‌تواند ناشی از تاثیر پایه‌های یل بر الگوی جریان، اعمال فرضیات ساده کننده در معادلات حاکم و خطای مقیاس باشد.

کلیدواژه‌ها : خلاءزائی (کاویتاسیون)، ضریب خوردگی بحرانی، فشار دینامیکی

مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی، ساخت سازه‌های عظیم آبی در راستای توسعه منابع آب پیشرفت قابل توجهی نموده است. هزینه‌ی گزاف و مدت زمان طولانی احداث سازه های هیدرولیکی و نیز توجه به این واقعیت که انجام آزمایش، هنوز هم بعنوان دقیق‌ترین روش در بررسی مسائل و مشکلات پیش روی این گونه سازه‌ها مطرح می باشد، محققان و طراحان را بر آن داشته تا

[1]- کارشناسی ارشد شرکت مهندسی مشاور سازآب اهواز
[2]- کارشناسی ارشد معاونت حفاظت و بهرداری از منابع آب – سازمان آب و برق خوزستان
[3]- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز

با ساخت مدل فیزیکی از سازهی طراحی شده و انجام آزمایشات از جنبه های پنهان پدیده، توسط شبیه‌سازی جریان‌های واقعی پرده بردارند. از این طریق، صرفه جویی های لازم صورت گرفته و نواقص و اشکلات طرح اصلاح می‌گردد. مدل هیدرولیکی سرریزها از متداول ترین نوع مدل های هیدرولیکی می باشد. انتخاب نوع سرریز تابع شرایط توپوگرافی، مقدار سیلاب طراحی و نوع سد از متداول ترین نوع سرریزهای ساخته شده جهت خروج سیلاب های اضافه بر می باشد. سرریزهای آزاد یا شیب دار ظرفیت سدهای خاکی بوده و بسته به تراز تاج و سطح آب دریاچه‌ی پشت سد، از نوع دریچه دار و یا بدون دریچه، طراحی می‌گردند. جریان آب از داخل دریاچه و پس از عبور از روی یک سرریز با لبه آبریز نسبتاً کوتاه وارد تنداب (شوت) می شود. این تنداب با شیب تقریباً منطبق بر شیب کناره‌ها به سیستم استهلاک انرژی و در پایان به رودخانه در پایین دست منتهی می گردد. معمولاً هنگامی که سرعت جریان در قسمی از سازه هیدرولیکی (مانند تنداب سرریزها) از یک حد مجاز فراتر رود، آن سازه در معرض خسارت ناشی از خوردگی قرار می‌گیرد. برجستگی‌ها و ناصافی‌های سطوح بتن که به هنگام ساخت و یا پس از آن ایجاد می‌گردد، باعث ایجاد انحراف خطوط جریان و کاهش فشار در بعضی نقاط می‌گردد. که چنانچه این کاهش فشار در ازاء افزایش سرعت باشد شرایط آستانه یا آغاز خوردگی پیش خواهد آمد. در اثر این پدیده حفره‌های کوچکی بر سطح بتن بوجود می‌آید، که خود این حفرها به عنوان یک ناهموار ثانویه عمل نموده و باعث جدایی بیشتر جریان و در نهایت تخریب سازه می‌گردند. به عنوان مثال در سرریز سد کارون ۱، پیشرفت خوردگی باعث تخریب قسمت انتهائی تنداب گردید [۱۴]. برای جلوگیری از چنین صدماتی، باید امکان ایجاد خوردگی در یک سرعت خاص در حین طراحی و یا در ضمن اجرا بوسیله مدل‌سازی مورد مطالعه قرار گیرد تا با تخمین دقیق سرعت، میزان زبری مطلق مورد نیاز بدست آید. مطالعات و تحقیقات گسترده ای در این زمینه تا کنون صورت گرفته است. مروری بر این تحقیقات در سطرهای زیر آورده شده است.

از اولین مطالعات صورت گرفته بر روی خوردگی می‌توان به مطالعات الدر[۴] در سال ۱۹۵۸ اشاره کرد. الدر، زبری مطلق مورد نیاز برای تونل آپالاچی[۵] به قطر ۵/۵ متر را در محدوده ۰/۸۷ تا ۱/۰۹ میلیمتر معین کرد. این میزان زبری، احتمالاً صیقلی‌ترین سطح ممکن بدون استفاده از پوشش فولادی می‌باشد. سپس الدر و کولگیت[۶] در سال ۱۹۶۱ جهت بررسی خصوصیات خوردگی اولین مطالعات را بر روی زبری‌های تک واحدی انجام دادند، که در سال ۱۹۸۰ نیز توسط جین وهمکارانش[۷] مورد بررسی قرار گرفت.

امکان ایجاد پدیده کاویتاسیون در اثر جریان بر روی سطوح غیر مسطح، در سال ۱۹۳۶ توسط جانسون و در سال‌های ۱۹۷۵ و ۱۹۷۶ توسط بال مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیقات آنها بر روی برجستگی‌ها و فرو رفتگی‌های ناگهانی در شکل‌های شماره (۱) نشان داده شده است.

جانسون در نتایج بدست آمده از مطالعات خود نشان داد که در سرعتی برابر $۳۰\frac{m}{s}$ حتی در فرورفتگی هایی معادل ۳ میلیمتر نیز خوردگی رخ می‌دهد، بل نیز نشان داد که در سرعتی معادل $۲۳\frac{m}{s}$ حتی در برجستگی هایی معادل ۱ میلیمتر نیز خورگی رخ می‌دهد، ونگ و چو[۸] در سال ۱۹۷۹ تحقیقاتی در زمینه نحوه تاثیر تغییر ارتفاع‌های شیبدار و دایروی بر روی خوردگی انجام دادند، شکل شماره(۲). نتایج ونگ و چو بر حسب عدد خوردگی اولیه K_i بیان گردیده است [۱] :

$$K_i = \frac{H_a + H + H_r + H_v}{\frac{V^2{}_0}{2g}} \qquad (۱)$$

۴- (Elder)

۵- (Appalachia)

۶- (Elder & Colgate)

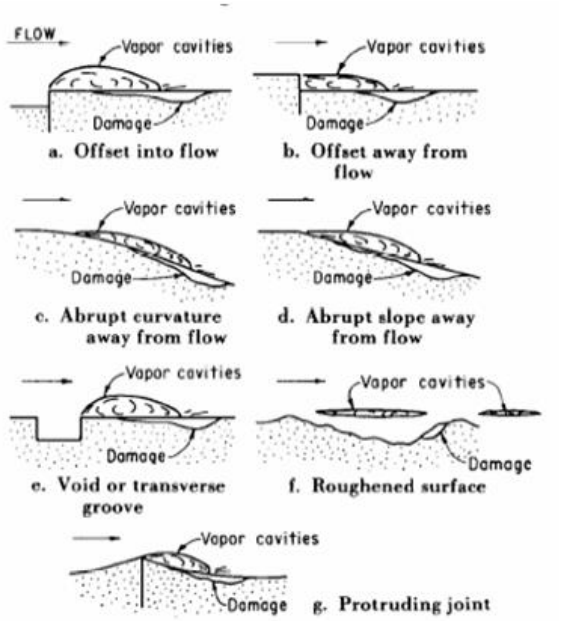
۷- (Jin et al)

۸- (Wang & Chou)

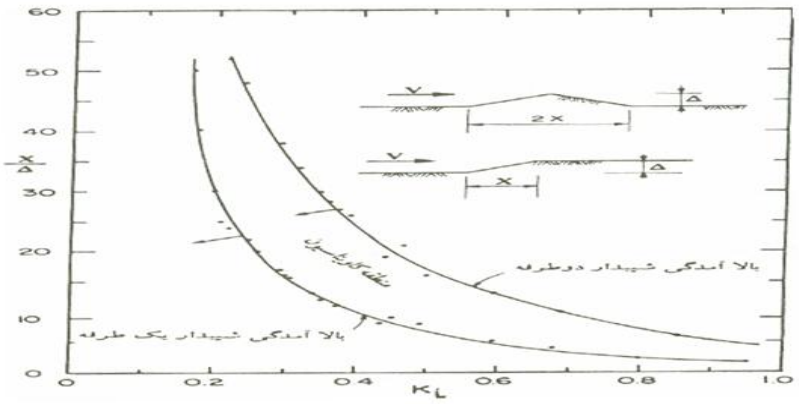
که در آن H_a ارتفاع معادل فشار اتمسفر ؛ H ارتفاع فشار استاتیک آب ؛ H_v ارتفاع معادل فشار تبخیر ؛ $V_.$ سرعت در نزدیکی و بالای محل تغییر شکل و H_r فشار معادل گریز از مرکز بوده و برابر است با :

$$H_r = \frac{V_.^2 y}{gR} \qquad (۲)$$

در این رابطه y برابر عمق جریان در جهت عمود بر افق و ، R شعاع مربوط به انحنائی سطح سرریز می‌باشد.



شکل شماره (۱)- *شکل های مختلف ناهمواری سطوح بتنی و نحوه تشکیل خوردگی بعد از آنها*

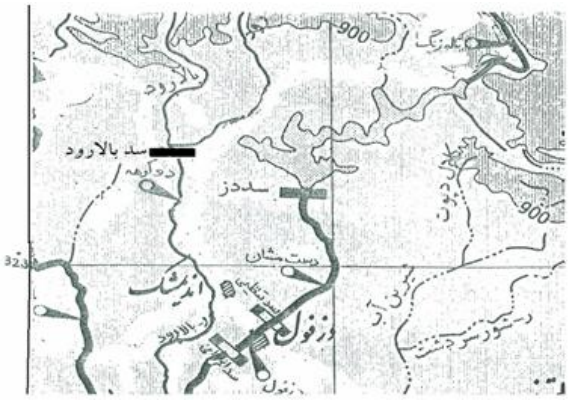


شکل شماره (۲) - *نحوه شکل‌گیری خوردگی در برجستگی شیب دار (Wang,Chou,۱۹۷۹)*

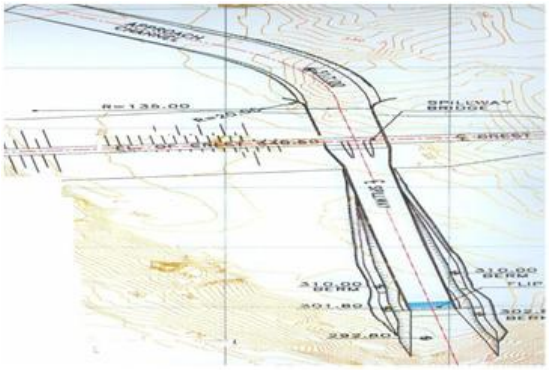
جمع‌آوری اطلاعات پایه

یکی از مهمترین مراحل انجام طرح‌های تحقیقاتی، جمع‌آوری آمار و اطلاعات اولیه است. در حقیقت تمام طرح‌های مهم به خصوص در صنعت آب، که با هزینه‌های بسیار سنگینی احداث می‌گردند، پیش از اجرا و در مرحله مطالعات مقدماتی نیاز به اطلاعات جامع وکامل از محیط و منابع موجود دارند. اطلاعات به صورت خام از منابع آماری و ایستگاه‌های اندازه‌گیری تهیه

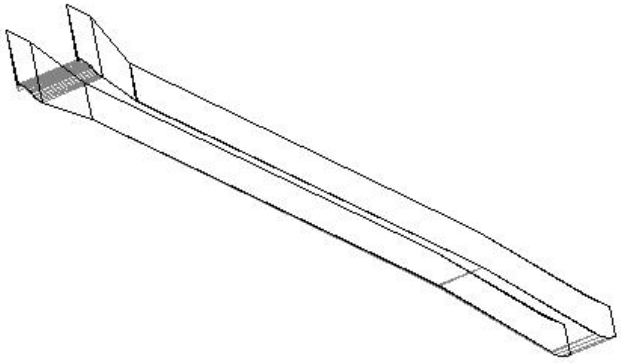
می‌شود. در این راستا، برای طراحی مدل‌های هیدرولیکی اطلاعات مربوط به توپوگرافی، زمین- شناسی و هیدرولوژی و نقشه‌های پلان و پروفیل پروتوتیپ که از اهمیت ویژه‌ای برخودارند تهیه شده و در مواردی مانند سطوحی که سیال از آن عبور می‌کند نقشه‌های جزئی‌تری تهیه می‌گردد (شکل ۴).سپس کلیه اطلاعات و جزئیات با توجه به شرایط منطقه‌ای با دقت مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات مورد نیاز بیان شده جهت ساخت مدل سرریز سد بالارود از مطالعات مرحله اول سد مخزنی بالارود که توسط شرکت مهندسی مشاور دزآب انجام گرفته،تهیه شده است. این اطلاعات عبارتند از محل و موقعیت ساختگاه سد، موقعیت سرریز نسبت به محور سد، شکل (۳)، اطلاعات هیدرولوژی شامل ظرفیت عبور دهی رودخانه - ۸۷۰ مترمکعب بر ثانیه - ،حداکثردبی خروجی ۱۰۰۰۰ ساله - دبی طراحی سرریز ۲۵۹۱ مترمکعب بر ثانیه - و حداکثردبی سیلاب- ۲۵۸۳ مترمکعب بر ثانیه - و در نهایت جهت مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌ها، محاسبات تئوری مربوط به رفتار هیدرولیکی سازه‌ی طراحی شده مورد نیاز می باشد.



شکل (۳)- *محل و موقعیت ساختگاه سد [۳]*



شکل (۴)- *موقعیت سرریز نسبت به محور سد [۳]*



شکل شماره (۵) - *نمای سه بعدی از سرریز سد بالارود*

تعیین مقیاس

اولین و مهمترین مرحله طراحی مدل انتخاب دقیق مقیاس می‌باشد . مقیاس پایه برای هر مدل هیدرولیکی مقیاس هندسی است ، که با نسبت طولی از مدل به طول نظیر آن در پروتوتیپ تعریف میشـــــود . وقتی مقیاس هندسی مدل مشخص شد ، شرایط لازم جهت احراز تشابه دینـــــامیکی فـــــراهم می‌گردد . از نقطه نظر فنی ، در صورتی که امکانات فضا و سیستم تغذیه اجازه دهد ، مدل باید بـــه اندازه کافی بزرگ انتخاب شود . از نقطه نظر اقتصادی و به جهت صرفه جویی در وقت و هزینـــه هـــا ، مدل باید در چهار چوب شرایط حدی ، در حداقل ممکن کوچک ساخته شود ؛ که توجیـــه اقتـــصادی داشته باشد . با

توجه بـه مطالـــب گفتـــه شـــده و بررسی‌های صورت گرفته مقیاس مدل ۱:۴۰ انتخاب گردید . که با این مقیاس امکان تشابه چـه از نظر هندسی و چه از نظر دینامیکی ایجاد گردید .

تجهیزات اندازه گیری فشار استاتیک

پیزومتر ساده‌ترین ابزار برای اندازه‌گیری فشار می باشد. پیزومتر، فشار موجود در سیال را به صورت ارتفاع معادل از مایع نشان می‌دهد. جهت انـدازه‌گیـری فشار استاتیک در این مدل، پیزومترها در سرتاسر سرریز از نقطه شروع پایه‌های پل تا انتهای پرتاب کننده‌ی جامی در دو محور وسط و کناره نصب گردیدند. در قسمتهای منحنی شکل و یا به عبارت دیگر مناطق که تغییر ناگهانی ارتفاعی و عرضی دارند (تاج و منحنی سرریز، پرتـاب کننـده‌ی جـامی) پیزومترهـا بـا تراکم بیشتر و در مناطقی که شکل و شیب یکنواخت دارند (تنداب) با تراکم کمتر اجرا شدند. در مجموع ۱۶ ردیف پیزمتر شامل ۴۸ عدد مربوط به پرتاب کننده جامی در این مدل استفاده شد.

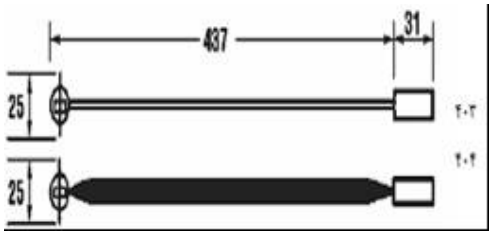
تجهیزات اندازه‌گیری

تجهیزات اندازه‌گیری در این تحقیق شامل اشل بالادست (شکل (۶)) برای قرائت تراز سطح آب در کانال تقرب ، اشـل پـایین-دست(شکل۷) برای قرائت هد آب روی سرریز مستطیلی کالیبره شده برای تبدیل به دبی (شـکل ۸) و میکرومولینـه (شـکل۹) برای اندازه‌گیری سرعت در کانال تقرب می‌باشد .

شکل (۶)-*اشل بالادست*

شکل (۷)-*اشل پایین‌دست*

شکل (۸)-*سرریز مستطیلی کالیبره شده*



شکل (۹)- *میکرومولینه برای اندازه‌گیری سرعت جریان*

خوردگی(کاویتاسیون)

برای جلوگیری از پدیده خوردگی باید موقعیت نقاطی را که در آنها ممکن است با افزایش سرعت فشار تا حد فشار بخار کاهش یابد شناسایی کرد . در این راستا ، برای دستیابی به یک معیارکمی ، معادله انرژی (معادله برنولی) را بین دو نقطه در یک جریان دائمی می توان به صورت زیر نوشت :

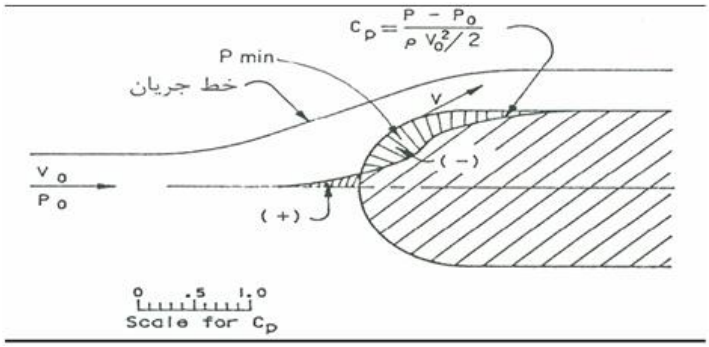
$$C_P = \frac{P - P_o}{\frac{1}{2}\rho V_o^2}$$

ضریب فشار C_P را همچنین به عنوان پارامتر فشار و یا عدد اولر **Euler Number** گویند .

اگر ضمن تعویض علامت C_P به جای P فشار بخار مایع در دمای محیط ، P_v قرار داده شود خواهیم داشت :

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_o^2} \qquad (۳)$$

که به آن ضریب خوردگی گویند . بنابراین σ نسبت افت فشار لازم برای تبخیر آب به پتانسیل کاهش فشار جریان از طریق انرژی جنبشی می‌باشد .



شکل شماره (۱۰)- *توزیع فشار بر روی یک سطح نیمکره‌ای*

این معادله را می‌توان در جریان با سطح آزاد در سرریزها با در نظر گرفتن قوس قائم در کف ، به صورت زیر نوست :

$$\sigma = \frac{\frac{P_{Am}}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + hCos(\theta) \pm (\frac{h}{g} \times \frac{V_o^2}{r})}{\frac{V_o^2}{2g}} \qquad (۴)$$

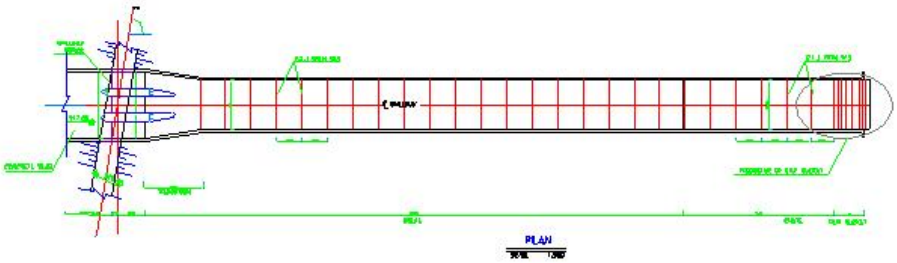
که در آن γ وزن مخصوص آب ، θ زاویه کف تنداب نسبت به افق ، r شعاع انحنای قوس قائم (علامت - در انحنای محدب و علامت + در انحنای مقعر) می باشد .

خوردگی هنگامی اتفاق می افتد که σ برابر و یا کوچکتر از ضریب بحرانی خوردگی σ_{Cr} شود . این مقدار بحرانی عمدتاً به هندسه جریان ، شکل و ارتفاع ناهمواری های سطحی و موقعیت نقطه مبنا که در آن ، فشار و سرعت اندازه‌گیری شده اند ، بستگی دارد . بر اساس نتایج حاصل از آزمایش های مدل و نمونه اصلی ، در نمودارها و روابط نیمه تجربی برای تعیین σ_{Cr} شرایط مختلفی ارائه شده است . با توجه به امکانات معمولی اجرای بتن در سازه های هیدرولیکی ، غالباً شیب ناهمواری‌های سطح بتن در طول سرریز در حد ۱:۲۰ است که با ضریب بحرانی ۰/۲ الی ۰/۲۵ متناظر می‌باشد . منظور از شیب ناهمواری های سطح بتن در حد ۱:۲۰ یعنی نسبت ارتفاع ناهمواری به طول آن معادل ۱ به ۲۰ شود که با مراجعه به جداول مختلفی که در این زمینه ارائه شده اند ، ضریب خوردگی معادل این شیب برابر ۰/۲ (برای شیب خلاف جهت جریان) و ۰/۲۵ (برای شیب

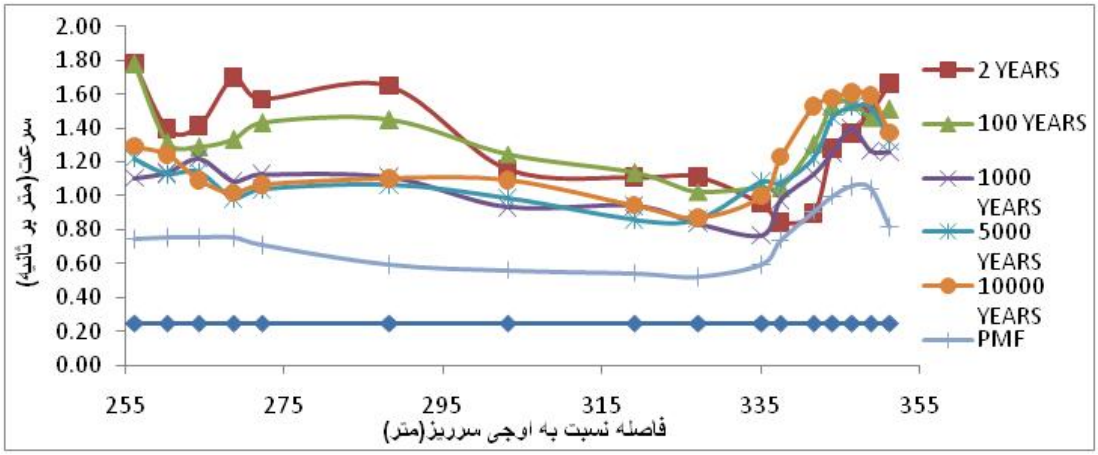
موافق جهت جریان) می‌باشد . در صورتی که σ از حد بحرانی کمتر شود ، خطر خوردگی قطعی است . طراحان به منظور شناخت پتانسیل خوردگی در سازه ها ، پروفیل سطح آب را به ازاء دبی‌های مختلف جریان محاسبه می‌نمایند . با معلوم شدن عمق و سرعت متوسط ، مقادیر ضریب خوردگی در موقعیت‌های مختلف محاسبه شده و با مقادیر σ_{Cr} در آن نقاط مقایسه می‌گردند . در هر مقطع که $\sigma < \sigma_{Cr}$ شود ، خطر خوردگی در آن محدوده وجود دارد . محاسبه ضریب خوردگی باید به ازاء دبی‌های مختلف صورت گیرد ، زیرا بحرانی‌ترین حالت لزوماً به ازاء حداکثر دبی اتفاق نمی‌افتد .

بررسی پدیده خوردگی در پرتابه جامی شکل سد بالارود

جهت بررسی و کنترل وقوع خوردگی، نیاز به اطلاعاتی نظیر سرعت متوسط و فشار وارده بر کف در قسمت‌های مختلف سازه می‌باشد . برای این منظور در طول سرریز تعداد ۱۶ ایستگاه جهت اندازه‌گیری پارامترهای مذکور در نظر گرفته شد (محل پیزومترها) . موقعیت این مقاطع در جدول شماره (۱۱) ارائه گردیده است . جهت تعیین ضریب خوردگی از رابطه که در بالا ارائه شده است، استفاده گردیده است . در قسمت پرتابه به لحاظ وجود قوس در محور طولی آنها، رابطه فوق با تمام پارامترها صادق می‌باشد . در شکل شماره (12) منحنی تغییرات ضریب خوردگی در امتداد محور طولی سرریز در دبی‌های مختلف نشان داده شده است



شکل شماره (۱۱) - *موقعیت پیزومترها بر روی جام پرتابی*



شکل شماره (۱۲)- *منحنی تغییرات ضریب خوردگی(کاویتاسیون)روی سرریز دبی در ۶ دبی*

نتیجه گیری

نتایج محاسبه ضریب خوردگی جریان ، با استناد به فشار و سرعت اندازه‌گیری شده ، نـشان داد که تغییرات ضریب خوردگی جریان بر خلاف سرعت در امتـداد جریـان روی تنـداب ، بـه صـورت کاهشی می‌باشد . حداقل ضریب خوردگی محاسبه شـده برابـر ۰,۵۲= σ مـی‌باشـد و در دبـی ۳۸۳۱ مترمکعب بر ثانیه و سپس ۰,۷۷= σ در دبی ۱۰۰۰ ساله ، در محل مقعر پرتابه (نقطه شماره۳۱) رخ می‌دهد . با توجـه بـه ضـریب خـوردگی محاسبه شده و ضریب خوردگی بحرانی که برابر ۰,۲۵ = σ_{cr} می‌باشد . بـر مبنـای نتـایج انـدازه‌گیری‌های صورت گرفته ، احتمال رخ دادن پدیده‌ی خوردگی در طول پرتابه وجـود ندارد . در این راستا استفاده از سازه‌های هواده برای پیشگری از خسارات و عواقب احتمالی حاصل از پدیده‌ی خوردگی ، ضروری به نظر نمی‌رسد . با این حال توصیه قطعی در مورد استفاده و یا عدم استفاده از سازه هواده ، بستگی به عوامل دیگری از جمله غلظت هوای موجود در مجاورت سـطوح بتنی تنداب ، کیفیت اجرای سطوح بتنی و درزهای انقباضی ، که از اهمیت زیادی برخوردار اسـت ، دارد .

تقدیر و تشکر

از دفتر تحقیقات و استانداردهای مهندسی آب سازمان آب و برق خوزستان به عنوان حمایت کننده مقاله تشکر می نماییم.

منابع

[۱]عارف پور . مسلم ، (۱۳۸۸) " بررسی هیدرودینامیک جریان و منحنی تراژکتوری جت پایین دست در پرتابه جامی شکل(مطالعه موردی سد بالارود)" تز کارشناسی ارشد ، دانشکده مهندسی علوم آب ، دانشگاه شهید چمران ، اهواز

[۲] شرکت مهندسی مشاور دز آب .(۱۳۸۳)، "گزارش مطالعات مرحله اول طرح سد مخزنی بالارود"

[۳] مرکز تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) .(۱۳۷۷)،"مدل هیدرولیکی سیستم تخلیه سیلاب سد مخزنی گاوشان" - بخش سازه های هیدرولیکی

[۴] مرکز تحقیقات آب (وابسته به وزارت نیرو) .(۷۷۳۱)،"مدل هیدرولیکی سیـستم تخلیـه سـیلاب سـد مخزنـی گاوشـان"- بخـش سـازه هـای هیدرولیکی

[۵] شمسایی، الف و خسروی، ع .(۰۸۳۱)، " آنالیز عددی پدیده کاویتاسیون در سرریز سدها"کنفرانس بین المللی سازه های هیدرولیکی ، کرمان.

[۶] بارانی ، غ و خدارحمی، م . (۰۸۳۱)، " دینامیک شکست حباب گاز در سرریز سدها" کنفرانس بین المللی سازه های هیدرولیکی ، کرمان

[۷] مرشدی، ف. (۸۷۳۱) ، " بررسی پدیده کاویتاسیون بر روی سرریز تعدادی از سدهای ایران با استفاده از مدل کامپیوتری" تـز کارشناسـی ارشـد ،

[۸] نیک صفت،غ ر. (۱۳۸۰)، " تئوری و کاربرد مدل های هیدرولیکی در طراحی سازه های آبی " ، انتشارات وزارت نیرو - کمیته ملی سد های بـزرگ ایران نشریه شماره ۱۴

[9] US Department of The Interior (1987). "Design of Small Dams" " 3rd edn (Bureau of Reclamation) Denver CO, USA

[10] U.S.Army Crops of Engineers Washington. DC , (1990) "Engineering and Design Hydraulic Design of"Spillways

[11] Chanson, H.(2004), "The Hydraulics of Open Channel Flow": An Introduction Department of Civil Engineering The University of Queensland, Australi

[12] Clifford A. Pugh (1981) "Hydraulic Model Studies of McPhee Dam Spillway" Bureau of Reclamation.Denver CO, USA

[13] Montes , J.S. (1992) “Curvature Analysis of Spillway Profiles”.Proceedings of The 11th Australasian Fluid Mechanics Conference AFMC,2, Paper 7E-7, Hobart, Australia,pp 941-944

[14] Mefford , R.A., & Dodege , B.W., (1990) “ Hydraulic Model Study of ChiliBar Dam Spillway Modifications.Bureau of Reclamation”, Denver CO, USA

[15] .Falvey , H.T .,(١٩٩٠), “Cavitation in Chutes and Spillways” Bureau of Reclamation, Denver CO, USA