

مشخصه امواج عرضی در جریان فوق بحرانی پایین دست پایه دریچه‌های سرریز سدها

محمدرضا کاویانپور^۱، سیدمجتبی موسوی‌مهر^۲ و اکرم طاهری^۳

^۱دانشیار گروه آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

kavianpour@kntu.ac.ir

چکیده: در سرریز شوت معمولاً مشکلات هوادهی، امواج عرضی، کاویتاسیون و فرسایش پیشروی طراحان می‌شود. با وجود اینکه مطالعات زیادی روی مشخصات جریان سرریزها انجام شده، اما اطلاعات کمی در مورد جریان فوق بحرانی پایین دست پایه‌های مستقر روی سرریز شوت و امواج عرضی ناشی از آن مطرح می‌باشد. در اثر برخورد جریان با پایه دریچه‌های مستقر روی سرریزها، جریان فوق بحرانی موجی شکل، معروف به جریان بالی شکل یا دم‌خروسی ایجاد می‌شود. حاصل این جریان، سه موج عرضی است که اولی پایین دست پایه، دومی وسط سرریز و سومی روی دیوار سرریز شکل می‌گیرد. اهمیت بررسی این پدیده به علت تأثیرگذاری بر میدان جریان پایین دست و ایجاد شرایط نامتعادل هیدرولیکی است. در این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی چگونگی تشکیل این امواج عرضی و پروفیل امواج ایجاد شده ارائه می‌شود. آزمایش‌ها روی مدل فیزیکی سرریز سد خیرآباد، که در مؤسسه تحقیقات آب ایران ساخته شده، انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که سه دسته موج در اثر قرارگیری پایه دریچه‌ها روی شوت ایجاد می‌شود. ارتفاع امواج فوق می‌تواند از ۲ برابر عمق آب نیز بزرگتر شده و لذا طراحی دیوارهای کناری شوت راتحت تأثیر قرار دهد. نتایج همچنین نشان داد که عدد فرود جریان و بازشدگی دریچه‌ها تأثیری قابل ملاحظه بر شکل‌گیری امواج فوق دارد. در نهایت نیز معادلاتی جهت بیان ارتفاع بیشینه و محل وقوع آن برای سه دسته امواج ایجاد شده روی سرریز مورد مطالعه، ارائه شد.

کلمات کلیدی: سرریز شوت، امواج عرضی، پایه دریچه، جریان دم‌خروسی، جریان بالی شکل.

Characteristics of Transverse Waves in Supercritical Flow behind Pier of the Dam's Spillway Gates

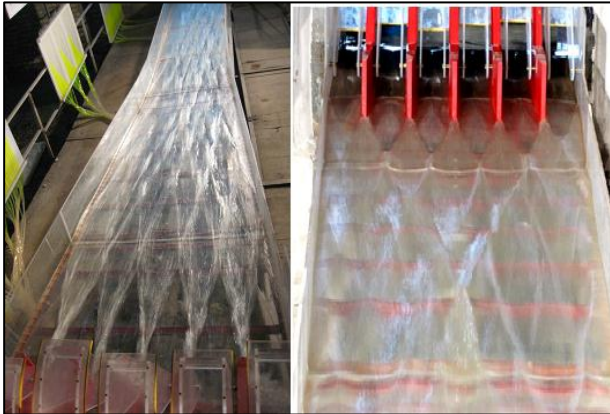
M. R. Kavianpour, S. M. Mousavimehr and A. Taheri

Abstract: Usually in the chute spillways designers are facing problems such as aeration, transverse waves, cavitations and erosion. Although many studies have been performed to determine the flow characteristics over these structures, however, little information are available on supercritical flow downstream of chutes piers and their effects on flow domain. Due to the flow interaction with the chutes piers, a supercritical and wavy flow known as rooster tail is formed. The result of this wavy flow is three kinds of transverse waves, the first one is formed downstream of the piers, the second is formed on the middle of the chute and the third is formed on the wall of the spillway. The importance of investigate this phenomenon is because of influencing on flow field and creating unbalanced hydraulics conditions. In this Study, experimental Investigation the formation of the transverse waves and its profiles are presented. Experiments were conducted on a scaled physical model of Kheirabad dam spillway, at Water Research Institute of Iran. The results showed that three types of waves are created by the placing gate's pier on the chutes. The height of these waves can be more than twice the water depth and thus impact on the design of the side walls of chute. It was realized Froude number of flow and gate opening have the main effect on wave formation. Finally, the equations used to express the maximum height of waves and location of its formation was presented for the three types of waves.

Keyword: Chute Spillway, Transverse Waves, Pier's gate, Rooster Tail flow, Wing flow.

۱- مقدمه

جریان فوق بحرانی نیز به عنوان یکی از منابع ایجاد این امواج شناخته شده‌اند که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۱- امواج عرضی حاصل از برخورد جریان فوق بحرانی به پایه‌های شوت

در پائین دست پایه، جریان عبوری از دو طرف پایه در فاصله‌ای بعد از آن به هم برمی‌خورد و امواج ایستائی در پائین دست پایه شکل می‌گیرد که به آن موج ۱ یا موج پایه می‌گویند (مقطع اول، شکل ۲). بر روی سرریز، هر پایه یک موج بالی شکل ایجاد می‌کند که در اثر کنش این امواج با یکدیگر اشکال هندسی منظمی روی سرریز شکل می‌گیرد (شکل ۲). در اثر تداخل امواج ۱ و همچنین همگرایی دیواره‌های جانبی سرریز، موجی بزرگتر از موج ۱ روی سرریز و وسط آن ایجاد می‌گردد که در اینجا موج ۲ نامیده می‌شود (مقطع دو، شکل ۲). این امواج دارای حرکت عرضی نیز می‌باشند و لذا در جهت عرضی هم گسترش می‌یابند. در پایین دست در اثر برخورد این امواج به دیواره شوت موج دیگری روی دیواره شکل می‌گیرد که در اینجا موج دیواره یا موج ۳ نامیده می‌شود (مقطع سه، شکل ۲). در طراحی سرریز شوت و یا تخلیه کننده تحتانی، محل شکل‌گیری و ارتفاع این امواج باید شناسایی شوند.

مطابق شکل ۲، پلان و مقطع طولی از الگوی جریان بالی شکل پایین دست پایه‌های متقارن و هم اندازه دریچه‌هاروی سرریز شوت ملاحظه می‌شود. در این شکل هندسه جریان و ۳ موج تشکیل شده روی سرریز برای حالت همه دریچه‌ها باز نشان داده شده است. مقطع ۱ محل تشکیل پیک موج اول یا موج پایه است. مقطع دوم محل تشکیل پیک موج دوم و مقطع سوم نیز محل تشکیل پیک موج سوم یا موج روی دیواره می‌باشد. در مقطع کنترل انتخابی کانال ($X = 0$)، پارامترهای تعریف شده عبارت از H_0 عمق جریان، v_0 سرعت جریان و

در سدها استفاده از سازه‌ها و سیستم‌های تخلیه سیلاب ضروری است. این سازه‌ها وظیفه تخلیه سیلاب از مخزن سد و جلوگیری از روگذری از آن را بر عهده داشته و در صورت عملکرد نادرست سازه، سد را با خطرات جبران ناپذیر و تخریب کلی روبرو می‌سازد. بنابراین طراحی درست آن شامل شیب مناسب، هواده‌های کافی و برقراری جریان یکنواخت باید مورد توجه طراحان قرار گیرد. وقوع کاویتاسیون، توربولانس و آشفستگی و استهلاک انرژی در پایین دست از موضوعاتی بوده که تاکنون زیاد مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. در این بین شرایط هیدرولیکی خاصی در اثر قرارگیری سازه‌های درگیر در مسیر جریان ممکن است ایجاد شود که هنوز اطلاعات کافی در مورد آنها ارائه نشده است. این تحقیق به دنبال ارائه اطلاعات در این زمینه می‌باشد.

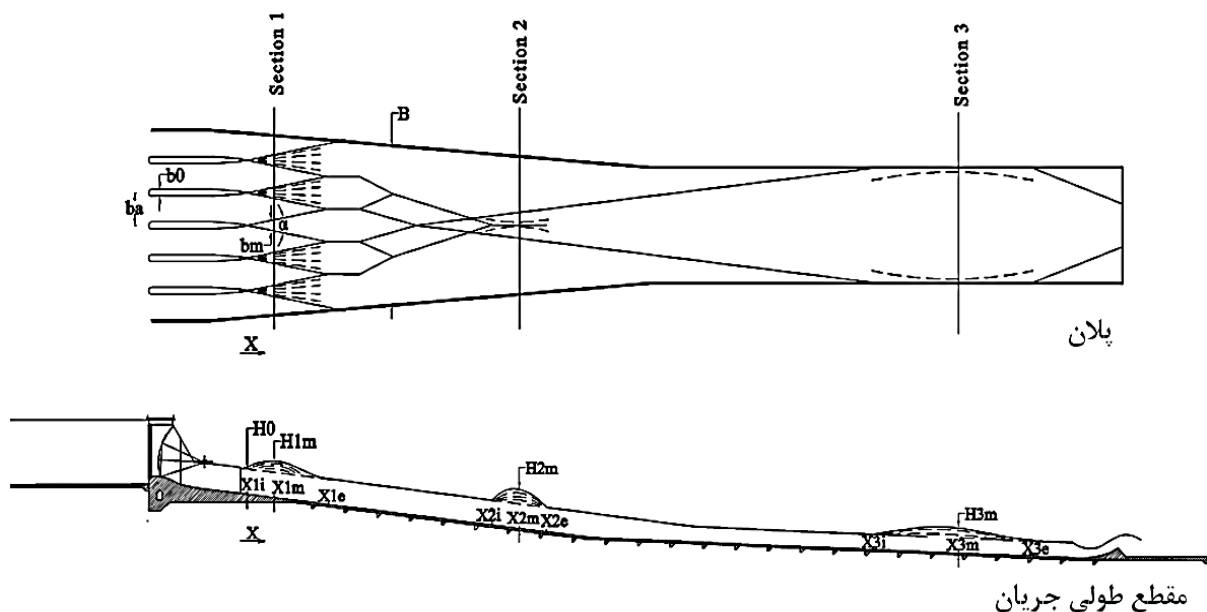
در سازه‌های هیدرولیکی به جهت نصب دریچه در سرریزها و یا استقرار پل بر روی آن، استقرار پایه در مسیر جریان اجتناب ناپذیر می‌گردد. جریان بعد از عبور از پایه عموماً فوق بحرانی می‌باشد. با قرارگیری این پایه‌ها در مسیر جریان، آشفستگی جزئی در جریان روی شوت به سرعت گسترش یافته و به صورت امواج عرضی ایجاد می‌شود. این امواج عرضی یا نوسانی الگوی خاصی از تغییرات سطح در جریان فوق بحرانی است که در آن آشفستگی ایجاد شده در امتداد جریان منتشر می‌شود [۲]. این امواج زمانی که جریان ثابت می‌ماند، اغلب دائمی بوده و به راحتی قابل مشاهده است؛ در حالی که به دلیل آثار آشفستگی در جریان با دبی بالا ممکن است به خوبی قابل مشاهده نباشد. امواج عرضی به طور مورب به طرف دیواره‌های شوت حرکت می‌کنند و موجب بالا رفتن پروفیل جریان در نزدیکی دیواره می‌شوند.

در شکل ۱ تصویری از مدل فیزیکی ساخته شده سرریز سد خیرآباد و اشکال هندسی شکل گرفته بر آن از عملکرد شش دریچه روی آن ملاحظه می‌شود. تمام دریچه‌ها باز می‌باشند و لذا جریان روی سرریز کاملاً متقارن است. مبدأ تشکیل امواج نوسانی می‌تواند هر نوع تغییر، تلاطم و نوسانات سطحی در جریان فوق بحرانی باشد که جریان روی شوت را از حالت یکنواخت خارج کند. مثال‌هایی از منابع ایجاد تلاطم و آشفستگی در هیدرولیک سد شامل انحنای موجود در شوت، تغییرات شیب کف شوت و تنگ شدگی و بازشدگی شوت می‌باشند. همچنین وجود پایه دریچه‌ها و پل مستقر روی سرریز بر سر راه

مستهلک شده و به جریان اصلی وارد می‌شود. به طور کل می‌توان بیان نمود که مطالعات کمی بر روی جریان بالی شکل انجام شده است. در بررسی‌هایی که بر روی شکل گیری جریان بالی شکل در یک کانال مستطیلی افقی توسط هگر و رینار در ۱۹۹۴ انجام شد، مشخص شد برای حالتی که عمق جریان h_0 و عرض پایه‌ها b_p ثابت باشند، ارتفاع امواج ۱ و ۲ (h_{1m} , h_{2m}) و عرض این امواج (b_{1m} , b_{2m}) با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. آنان همچنین نشان دادند که ارتفاع موج ۱ تنها به نسبت عمق جریان به عرض پایه h_0/b_p بستگی داشته و با افزایش عدد فرود، ارتفاع و طول امواج ۱ افزایش می‌یابد [۳]. در ادامه هگر و رینار در ۱۹۹۷ مطالعات قبلی خود در ۱۹۹۴ را بر روی یک سرریز شوت انجام داده و مشخص کردند در صورتی که تمامی اندازه‌گیری‌ها در جهت عمود بر سرریز شوت انجام شود، نتایج با نتایج حاصل از کانال افقی کاملاً یکسان خواهد بود [۴]. در بررسی دیگری آنالیز امواج ایستا در یک سرریز شوت انجام شد [۵]. در تحقیقی دیگر مطالعاتی بر روی امواج شوکی حاصل از جریان هوادهی شده انجام شد [۶]. در تحقیقی دیگر مطالعاتی بر روی جریان دم خروسی در یک سرریز شوت با هواده انجام شد و نشان داده شد که هواده‌ها باعث تشدید امواج دم خروسی می‌شوند و افزایش عدد فرود، امواج دم خروسی بزرگتری را تولید می‌کند [۷].

پارامترهای هندسی جریان شامل l طول موج، H_m ارتفاع بیشینه امواج، b_m عرض امواج در محل ارتفاع بیشینه و X موقعیت مکانی موج هستند. از $X=0$ تا شروع شکل‌گیری موج ۱ در مکان $X = X_{1i}$ یک حفره پشت پایه ایجاد می‌شود که بسته به سرعت جریان این حفره مستغرق و یا خشک است. در فاصله $X = X_{1i}$ تا $X = 0$ جریان عبوری از دو طرف پایه همانند دو جت به هم برخورد کرده و امواج ایستای اول را به وجود می‌آورند. در این موج که به صورت غلتشی می‌باشد. مقداری جریان از هسته اصلی جدا شده تا به ماکزیمم ارتفاع موج H_{1m} در مکان X_{1m} می‌رسد. در مکان انتهایی موج ۱ یعنی X_{1e} هسته جدا شده جت آب به سمت بالشتک‌های آبی کناری سقوط می‌کند.

امواج ۱ در اثر برخورد به یکدیگر و همچنین به علت همگرایی دیواره جانبی سرریز، جریانی موجی شکل همراه با اشکال هندسی منظم را روی سرریز تشکیل می‌دهند که در انتهای این اشکال، موج ۲ در مکان X_{2i} تشکیل می‌شود. در $X = X_{2m}$ موج دوم دارای ارتفاع بیشینه H_{2m} می‌باشد. موج روی دیواره یا موج سوم نیز در اثر تداخل امواج روی سرریز و همچنین حرکت عرضی امواج در پایین دست موج ۲ و بر روی دیواره جانبی سرریز تشکیل می‌گردد. موج ۳ از موقعیت $X = X_{3i}$ بر روی دیواره آغاز، در موقعیت $X = X_{3m}$ دارای ارتفاع بیشینه H_{3m} و در موقعیت $X = X_{3e}$



شکل ۲: امواج پایین دست پایه‌های شوت

سرریز به آن متصل می‌شود. این سرریز از دو قسمت یکی با شیب ۱۲٪ و دیگری شیب ۴٪ تشکیل شده است. عرض شوت در قسمت شیب ۱۲٪ ابتدا ۱۳۲ سانتی‌متر است که در انتها به ۸۰ سانتی‌متر می‌رسد. در قسمت شیب ۴٪، عرض سرریز ثابت و ۸۰ سانتی‌متر می‌باشد. در انتهای شوت نیز پرتاب‌کننده جامی یا باکت قرار دارد و به علت جریان زیگزاگی و موجی شکل روی سرریز جت دندان‌های روی آنتشکیل می‌شود.

به منظور محاسبه دبی جریان بر روی مدل فیزیکی از یک سرریز لبه تیز مستطیلی استفاده شد. جهت اندازه‌گیری هد آب روی این سرریز از لیمینی‌متر استفاده شد که خطای اندازه‌گیری آن ۰/۱ میلی‌متر است. با توجه به هد روی سرریز لبه تیز بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر، خطای اندازه‌گیری کمتر از ۱٪ می‌باشد. جهت اندازه‌گیری ارتفاع و پروفیل از همان لیمینی‌متر استفاده شد که با توجه به ارتفاع امواج عرضی شکل گرفته روی سرریز، خطا در حدود ۱-۲٪ برآورد می‌شود. نتایج مدل چنانچه بر مبنای شبیه‌سازی عدد فرود و رعایت محدوده عدد رینولدز جریان بالاتر از ۱۰۵ و عدد وبر بالاتر از ۱۰۰ باشد، قابل تعمیم به واقعیت خواهد بود [۹]. در تحقیق حاضر، اعداد رینولدز آزمایشات در محدوده $2.5 \times 10^5 < Re < 1.2 \times 10^5$ و عدد وبر در محدوده $7600 < W < 4100$ در محل مقطع مینا در میانه پایه‌ها به دست آمد. بنابراین در طول سرریز که سرعت جریان بسیار افزایش می‌یابد و $10^5 > Re$ است، می‌توان از تأثیر چسبندگی صرف‌نظر نمود. همچنین با توجه به اینکه همواره در طول آزمایشات حداقل ارتفاع آب روی سرریز از ۵ میلی‌متر بزرگتر است و $W > 100$ می‌باشد، لذا اثر عدد وبر ناچیز و عدد فرود به عنوان پارامتر اصلی مؤثر در نظر گرفته شده است.

مطالعات آزمایشگاهی حاضر بر اساس ۳ بازشدگی یکسان شش دریچه انجام شد. در پایین دست دریچه‌ها فاصله شروع موج اول، مقدار و محل حداکثر موج و فاصله انتهایی آن دقیقاً اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها برای موج دوم واقع در میانه سرریز و موج سوم بر روی دیواره‌ها نیز در هر آزمایش تکرار گردید. تحقیقات و بررسی نشان داد که میدان جریان بالای شکل روی سرریز تابعی از عدد فرود جریان، بازشدگی دریچه‌ها، هد روی سرریز، همگرایی سرریز و هندسه پایه است. هر یک از این عوامل می‌تواند میدان جریان را تحت تأثیر قرار دهد و شرایط نامساعد هیدرولیکی را روی سرریز به وجود آورد. در بررسی انجام شده این نتیجه حاصل شد که ارتفاع موج روی دیواره می‌تواند به ۲ برابر عمق آب برسد و موجب فرسایش دیواره‌های

مطالعات کاویانپور و همکاران در ۱۳۹۲ بر روی پروفیل طولی و عرضی امواج بالای شکل انجام گرفت و روشی برای کاهش این امواج ارائه نمود [۸]. در پژوهش فوق، صرفاً عملکرد دو دریچه وسط سرریز (از شش دریچه) بررسی شد که در آن تنها یک پایه در شکل‌گیری امواج ۳ گانه نقش دارد. تحقیقات و بررسی‌های این محققان همچنین نشان داد که میدان جریان بالای شکل روی سرریز تابعی از عدد فرود جریان، بازشدگی دریچه‌ها، هد روی سرریز، همگرایی سرریز و هندسه پایه می‌باشد و هر یک از این عوامل می‌تواند میدان جریان را تحت تأثیر قرار داده و شرایط نامساعد هیدرولیکی را روی سرریز به وجود آورد. در مقاله حاضر، هندسه جریان بالای شکل روی سرریز و پروفیل طولی و عرضی امواج ۳ گانه در حالت عملکرد شش دریچه بررسی و نتایج حاصل بر اساس مطالعات آزمایشگاهی انجام شده روی مدل فیزیکی سد خیرآباد در استان خوزستان ارائه گردیده است. در عمل سعی می‌شود که تمام دریچه‌ها به طور همزمان مورد بهره‌برداری قرار گیرند که این نکته مزیت تحقیق حاضر را در مقایسه با تحقیقات کاویانپور و همکاران در ۱۳۹۲ نشان می‌دهد. همچنین در ادامه روابطی بی‌بعد، جهت بیان ارتفاع بیشینه و محل وقوع آن برای سه دسته امواج ایجاد شده روی سرریز شوت مورد مطالعه ارائه شده است.

۲- معرفی مدل و روش تحقیق

به منظور انجام آزمایش‌ها و بررسی جریان بالای شکل، مطالعه حاضر بر روی مدل فیزیکی سرریز سد خیرآباد در استان خوزستان انجام شد. مدل فیزیکی سرریز با مقیاس ۱:۵۰ در موسسه تحقیقات آب ایران مطابق شکل ۲ ساخته شده است و برای ساختن مدل فیزیکی از پلکسی‌گلاس استفاده گردید. این مدل شامل اوجی و سرریز شوت دریچه دار با ۶ دریچه و ۵ پایه می‌باشد که در اثر برخورد جریان با پایه‌ها جریان بالای شکل یا دم خروسی تشکیل می‌شود. مقطع پایه‌ها دوکی شکل است که با سعی و خطای آزمایشگاهی و به منظور کاهش ارتفاع جریان تاج خروسی در این مقطع، حاصل شد. عرض پایه‌ها ۴/۸ سانتی‌متر است که در انتهای دوک به ۲ سانتی‌متر می‌رسد. همچنین طول پایه‌های به کار رفته در سرریز ۶۷/۶ سانتی‌متر و فاصله پایه‌ها از یکدیگر ۱۸ سانتی‌متر می‌باشد. در ابتدای سرریز قسمت اوجی وجود دارد که معادله آن به فرم $Y = -0.0592 X^{1.83}$ می‌باشد که در ادامه با شیب معادل

۱ افزایش یافته و محل ماکزیمم آن به بالا دست منتقل می-شود. مقایسه تغییرات عرضی موج ۱ نیز در نمودار ۲ همان شکل نشان داده شده است. همین روند در نمودار ۳ و ۴ شکل ۷ برای موج ۲ نیز قابل ملاحظه است. مطابق شکل ۷، موج ۲ صرفاً بخش اندکی از عرض سرریز را در مقایسه با موج ۱ در نمودار ۲ شکل ۶ تحت تأثیر قرار داده و با کاهش بازشدگی نیز کاهش یافته است. روند افزایش ارتفاع و انتقال پیک موج به بالادست با بازشدگی، در موج ۳ مطابق نمودار ۵ شکل ۸ نیز تکرار شده است. این امواج مطابق نمودار ۶ شکل ۸ صرفاً محدوده دیوارها یعنی مجموعاً ۲۵٪ عرض سرریز از دو طرف را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مشخصات جریان در حالت عملکرد شش دریچه و امواج ۱ و ۲ و ۳ نیز در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول H_m ارتفاع بیشینه امواج، B_m عرض امواج در محل ارتفاع بیشینه، X_m موقعیت مکانی ارتفاع بیشینه امواج نسبت به نقطه کنترل، L طول امواج و X_i موقعیت مکانی شروع و شکل-گیری امواج می‌باشند.

شکل ۹ مقاطع طولی امواج ۳ گانه را در طول سرریز نشان می‌دهد. در هر ۳ دسته امواج، ارتفاع امواج، محل تشکیل پیک موج و مقطع انتهایی موج با عدد فرود جریان تغییر می-کند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد فرود، امواج طویل‌تر شده و مقاطع بیشینه و انتهایی موج به پایین دست منتقل می‌شوند. به طور کل ارتفاع امواج (H) وابسته به عمق جریان ورودی و طول امواج (L) وابسته به سرعت جریان می‌باشد. در نتیجه با افزایش عمق جریان، ارتفاع امواج بزرگ‌تر و با افزایش سرعت جریان، طول امواج بزرگ‌تر و عرض امواج باریک‌تر می‌شوند. به طور کل با کاهش بازشدگی دریچه‌ها، عمق جریان کاهش و عدد فرود افزایش می‌یابد که در نتیجه آن ارتفاع امواج کوچک و طول امواج بزرگ‌تر و عرض امواج باریک‌تر می‌شوند و از نظر مکانی به پایین دست دورتری منتقل می‌شوند. همچنین مطابق شکل ۹، ارتفاع موج ۲ از بقیه امواج بزرگ‌تر است.

جانبی شوت شود و لذا ارتفاع امواج روی دیواره باید کاهش یابد. در این تحقیق بررسی ۳ موج بیشینه که می‌تواند شرایط بحرانی نظر هیدرولیکی روی سرریز بوجود آورد، مورد توجه قرار گرفت. موج ۱ در پشت پایه شکل می‌گیرد. موج ۲ در وسط طول سرریز ایجاد شده که حاصل برخورد امواج مورب و زیگزاگی روی سرریز است. موج ۳ نیز روی دیوار شوت شکل گرفته و می‌تواند طراحی دیواره شوت را تحت تأثیر قرار دهد. در شکل ۳، این ۳ موج بیشینه نشان داده شده است. شکل ۴ وضعیت حفره پشت پایه و شکل ۵ نیز وضعیت جریان دندان‌های ایجاد شده در روی جام پرتابی پایین دست سرریز شوت را نشان می‌دهند.

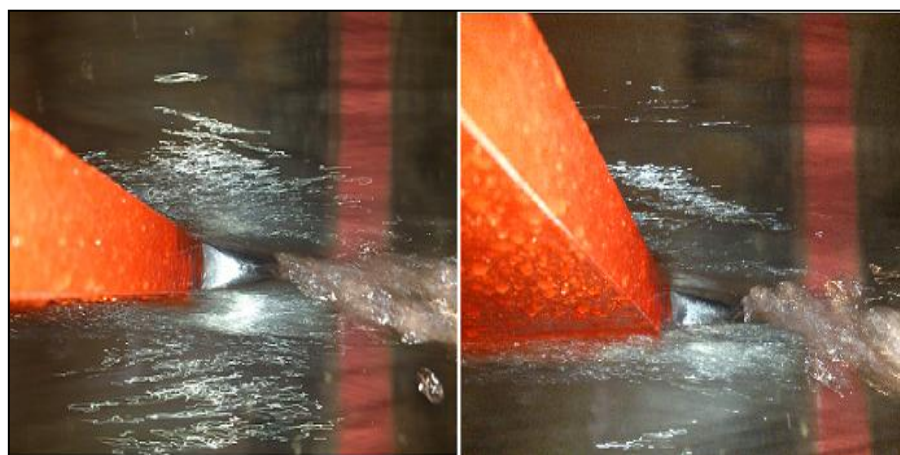
۳-ارائه و تفسیر نتایج

در این مقاله بررسی تغییرات پروفیل طولی و عرضی امواج ۳ گانه برای ۳ دبی مختلف و یا به ازای ۳ بازشدگی مختلف دریچه برای حالت عملکرد توأم و یکسان شش دریچه ارائه می‌شود. در این بررسی با استفاده از بازشدگی جزئی دریچه‌ها، عمق و سرعت جریان ورودی به سرریز تغییر می‌یابد. به عبارتی این بازشدگی جزئی دریچه‌ها برای سرریز همانند نازل عمل کرده و قابلیت افزایش سرعت، کاهش عمق و در نتیجه تغییرات عدد فرود را به شکل بهتری ارائه می‌دهد. اندازه‌گیری مقاطع طولی در راستای جریان و مقاطع عرضی در محل تشکیل ارتفاع بیشینه امواج می‌باشد. در شکل ۶ الی ۸ پروفیل‌های طولی و عرضی موج‌های به ترتیب ۱ و ۲ و ۳ در حالت عملکرد شش دریچه را نشان می‌دهد. منحنی‌های a ، b و c به ترتیب مربوط به بازشدگی‌های ۱۰۰٪، ۶۰٪ و ۳۰٪ می‌باشند. تمام اندازه‌گیری‌ها در جهت طولی از انتهای پایه است و ارتفاع امواج نیز از کف سرریز اندازه‌گیری شده است. در این شکل‌ها، X معرف مختصات در جهت طول سرریز و B مختصات در جهت عرض سرریز می‌باشد. همچنین محور قائم شکل‌ها H ارتفاع امواج را نشان می‌باشد.

مطابق شکل ۶ در نمودار ۱ با افزایش بازشدگی ارتفاع موج



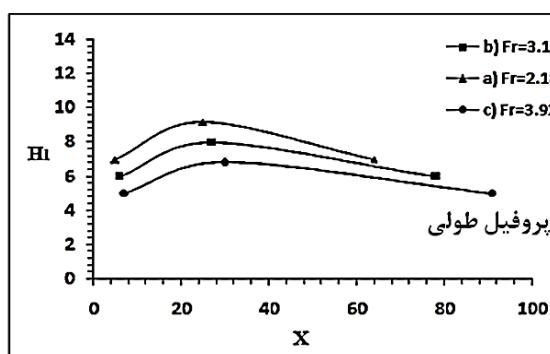
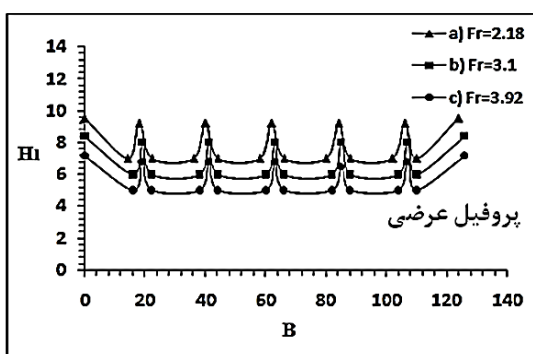
شکل ۳: امواج ایجاد شده روی مدل سرریز شوت خیرآباد
(الف) موج پایه (موج ۱) (ب) موج وسط (موج ۲) (ج) موج دیواره (موج ۳)



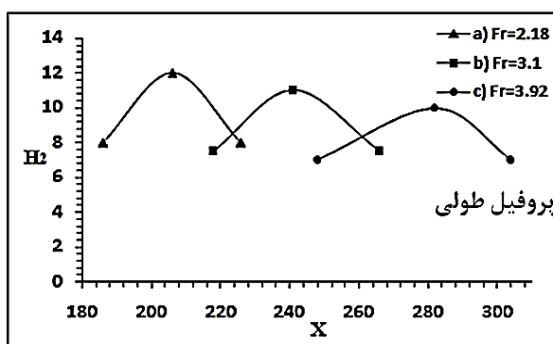
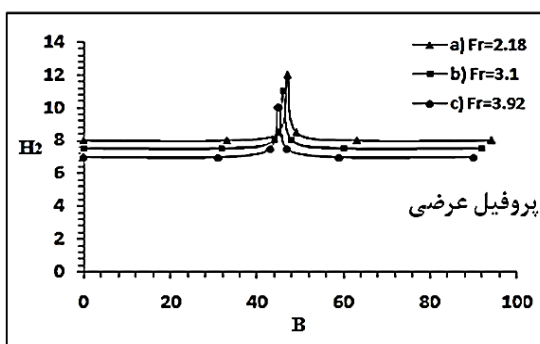
شکل ۴: حفره ایجاد شده پشت پایه



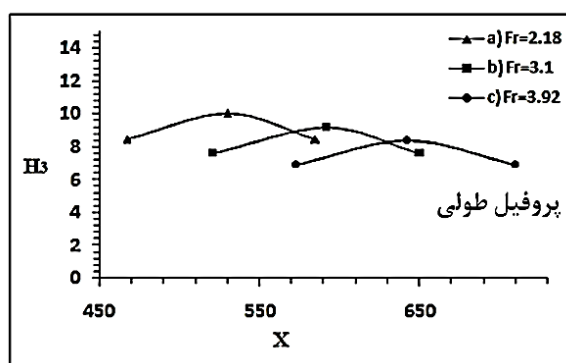
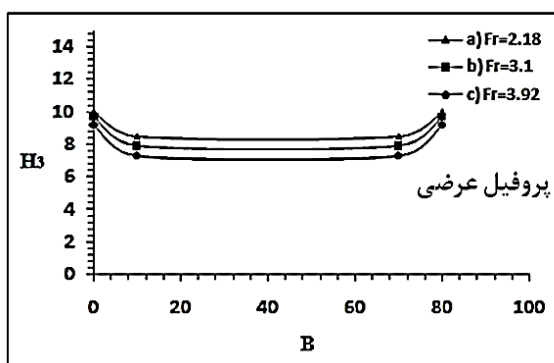
شکل ۵: جت دندانهای حاصل از تداخل امواج بالی شکل روی سرریز



شکل ۶: پروفیل موج ۱ در عملکرد شش دریچه



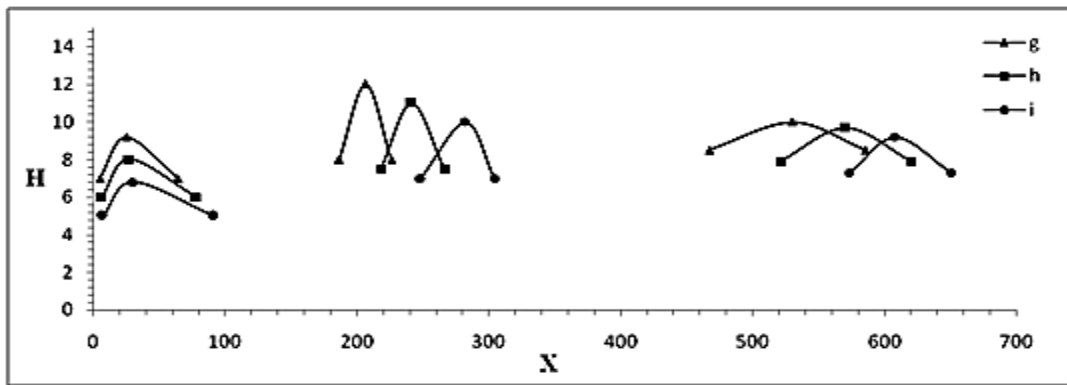
شکل ۷: پروفیل موج ۲ در عملکرد شش دریچه



شکل ۸: پروفیل موج ۳ در عملکرد شش دریچه

جدول ۱: مشخصات امواج بالای شکل در حالت عملکرد شش در بیچه

حالت	بازشدگی	امواج	F_r	Q (lit/s)	H_m (cm)	X_i (cm)	X_m (cm)	L (cm)	B_m (cm)
A	۱۰۰%	۱	۲/۱۸	۲۰۹/۶	۹/۲	۵	۲۵	۵۹	۷/۷۳
		۲			۱۲	۱۸۶	۲۰۶	۴۰	-
		۳			۱۰	۴۶۷	۵۳۰	۱۱۸	-
B	۶۰%	۱	۳/۱	۱۲۵/۸	۸	۶	۲۷	۷۲	۵/۸۸
		۲			۱۱	۲۱۸	۲۴۱	۴۸	-
		۳			۹/۷	۵۲۱	۵۷۰	۹۹	-
C	۳۰%	۱	۳/۷	۸۳/۸	۶/۸	۷	۳۰	۸۴	۳/۶۴
		۲			۱۰	۲۴۸	۲۸۲	۵۶	-
		۳			۹/۲	۵۷۳	۶۰۸	۷۷	-



شکل ۹. تغییرات امواج ۱ و ۲ و ۳ در طول سرریز در بازشدگی مختلف و یا اعداد فرود مختلف

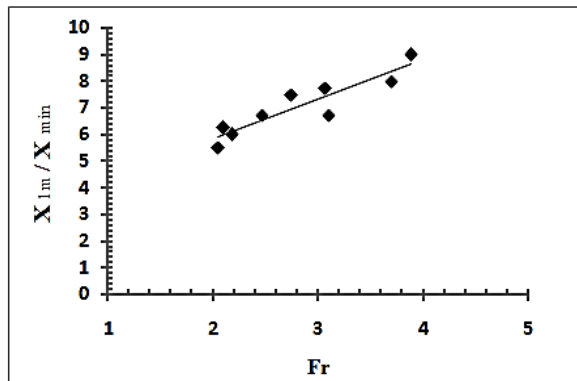
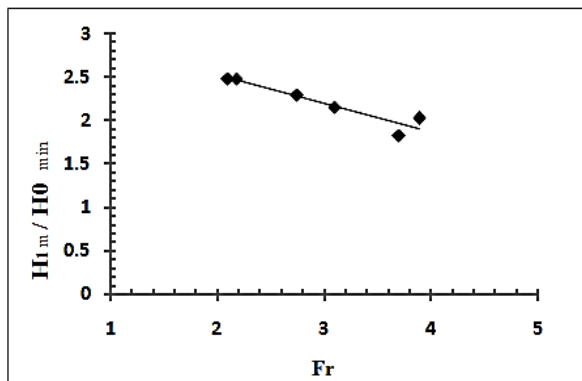
$$\frac{H_{1m}}{H_{0 \min}} = -0.327(Fr) + 3.182 \frac{X_{1m}}{X_{\min}} = 1.491(Fr) + 2.862 \quad (1)$$

$$\frac{H_{1m}}{H_{0 \min}} = -0.589(Fr) + 4.821 \frac{X_{2m}}{X_{\min}} = 0.12(Fr) + 1.399 \quad (2)$$

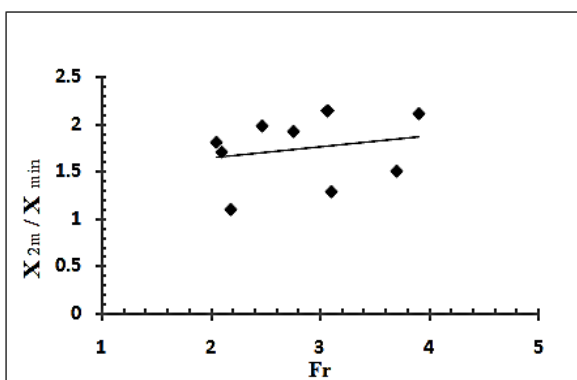
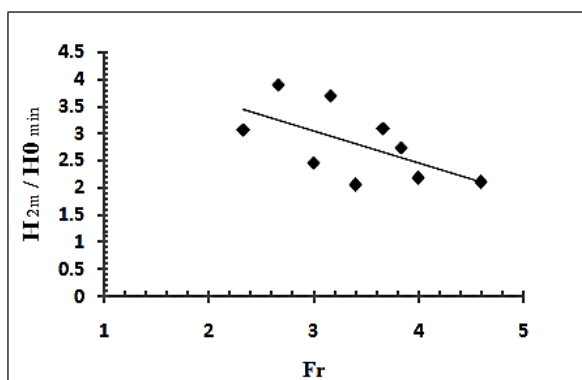
$$\frac{H_{1m}}{H_{0 \min}} = -0.687(Fr) + 4.814 \frac{X_{3m}}{X_{\min}} = 0.07(Fr) + 0.991 \quad (3)$$

در شکل ۱۰ الی ۱۲ نمودارهای بی بعد ارتفاع بیشینه و محل تشکیل آنها بر حسب عدد فرود به ترتیب برای امواج ۱ و ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این نمودارها $H_{0 \min}$ و X_{\min} به ترتیب معرف کوچکترین عمق ورودی جریان و نزدیکترین مکان شکل‌گیری امواج می‌باشند. همچنین چنانچه قبلاً نیز بیان شد، ارتفاع بیشینه امواج و X_{im} موقعیت مکانی ارتفاع بیشینه امواج نسبت به نقطه کنترلی باشند.

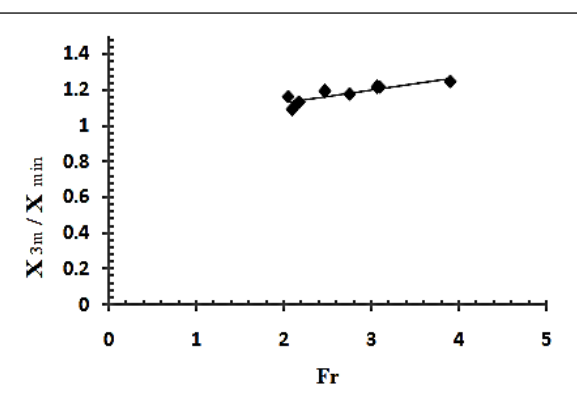
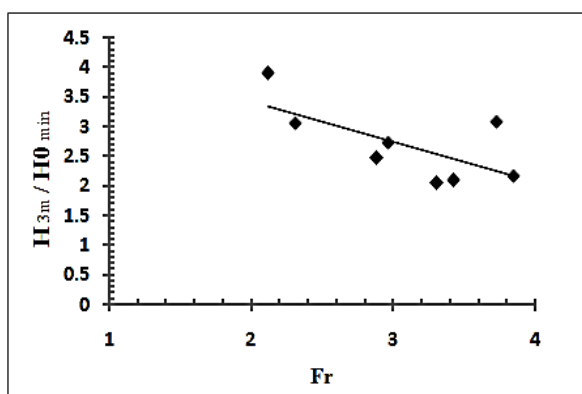
چنانچه از شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ ملاحظه می‌شود، ارتفاع تمامی امواج و مختصات طولی آنها دارای روندی مشخص و خطی بر حسب عدد فرود می‌باشند. مطابق ایده اخذ شده از این شکل‌ها، روابطی بی‌بعد بر حسب عدد فرود به منظور محاسبه ارتفاع بیشینه امواج ۱ و ۲ و ۳ و محاسبه محل شکل‌گیری امواج فوق به کمک رگرسیون خطی با روابط ۱، ۲ و ۳ قابل بیان می‌باشد.



شکل ۱۰: نمودار بی بعد تغییرات ارتفاع بیشینه و محل تشکیل ارتفاع بیشینه موج ۱ با عدد فرود



شکل ۱۱: نمودار بی بعد تغییرات ارتفاع بیشینه و محل تشکیل ارتفاع بیشینه موج ۲ با عدد فرود



شکل ۱۲: نمودار بی بعد تغییرات ارتفاع بیشینه و محل تشکیل ارتفاع بیشینه موج ۳ با عدد فرود

باشد. این امواج در سه دسته موج ۱ و ۲ و ۳ طبقه‌بندی شده و مورد بررسی قرار گرفتند. تشکیل موج ۳ روی دیواره‌های شوت حائز اهمیت بسیار است؛ زیرا طراحی دیواره شوت را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج تحقیق که بر اساس مطالعات آزمایشگاهی روی مدل فیزیکی سرریز سده خیرآباد - که در مؤسسه تحقیقات آب ایران ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته بود - نشان داد:

۴- نتیجه‌گیری

جریان فوق بحرانی پایین دست پایه دریچه‌های مستقر در تاج سرریز شوت در سده امواج ایستایی عرضی را به وجود می‌آورند که به آن جریان دم خروسی یا بالی شکل می‌گویند. جریان بالی شکل می‌تواند میدان جریان را تحت تأثیر قرار دهد و بر عملکرد هیدرولیکی سازه‌ها تأثیرگذار

مراجع

- وقوع ۳ دسته موج در پایین دست پایه دریچه بدون توجه به انتخاب شکل مناسب پایه اجتناب ناپذیر می باشد.
 - ارتفاع، محل تشکیل پیک و مقطع انتهای ۳ دسته موج با عدد فرود جریان تغییر می کند.
 - با افزایش عمق جریان، ارتفاع امواج بزرگتر و با افزایش سرعت جریان، طول امواج بزرگتر و عرض امواج باریکتر می شوند.
 - با کاهش بازشدگی دریچه ها، عمق جریان کاهش و عدد فرود افزایش می یابد که در نتیجه آن ارتفاع امواج کوچک و طول آنها بزرگتر و عرض امواج باریکتر شده و وقوع مکانی آنها به پایین دست منتقل می شود.
 - ارتفاع هر ۳ دسته موج و مختصات طولی آنها با روند خطی بر حسب عدد فرود مطابق روابط ۱ الی ۳ تغییر می کند.
- تقدیر و تشکر**
- نویسندگان این تحقیق بر خود لازم می دانند که از زحمات و پشتیبانی های مؤسسه تحقیقات آب ایران و بخصوص جناب آقای مهندس روشن مدیر بخش سازه های هیدرولیکی و مهندس خراسانی زاده پیش کسوت شناخته شده آب کشور تشکر و قدردانی نمایند و برای آنان آرزوی توفیق الهی را خواستار باشند.
- [1] Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C, and Narayanan, R., "Hydraulic Structures", Fourth edition, Taylor and Francis, 2007.
- [2] Vischer, D.L., and Hager, W. H., "Dam Hydraulics", John Wiley & Sons, Chinchester, 2003.
- [3] Reinauer, R., and Hager, W. H., "Supercritical flow behind chute piers", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 120, No.11, pp. 1292-1308, 1994.
- [4] Reinauer, R., and Hager, W. H., "Pier waves in sloping chutes", International Journal of Hydropower and Dams, Vol. 4, No. 3, pp. 100-103, 1997.
- [5] Hager, W. H., and Schleiss, A. J. "Constructions hydrauliques", Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, 2009.
- [6] Reinauer, R., and Hager, W. H., "Shockwave in air-water flows", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 22, No.6, pp. 1255-1263, 1996.
- [7] Pagliara, S., Kurdistani, S., Roshni, T., "Rooster Tail Wave Hydraulics of Chutes", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 137, pp. 1085-1088, 2011.
- [۸] کاویانپور، م.ر.، موسوی مهر، س.م.، مختارپور، آ.، روشن، ر.، خراسانی زاده، ع. "بررسی تأثیر پایه بر پروفیل جریان بالای شکل روی سرریزهای شوت دریچه دار". هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، ۱۳۹۲.
- [9] Boes R.M. and Hager, W.H., "Hydraulic Design of Stepped Spillways", ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, No. 9, pp. 671-679, 2010.