

بررسی آزمایشگاهی امواج ناشی از پایه روی سرریزهای تنداب دریچه‌دار

سید مجتبی موسوی مهر¹، محمدرضا کاویانپور^{2*}، آرمین مختاریپور¹

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

* تهران، کد پستی 1996715433

kavianpour@kntu.ac.ir

چکیده- سرریزها از مهم‌ترین و حساس‌ترین بخش‌ها در سازه سدها می‌باشند که وظیفه تخلیه دریاچه سد در مواقع اضطرابی و سیلابی را بر عهده دارند. با وجود این که مطالعات زیادی برای شناخت مشخصات جریان بر روی سرریزها انجام شده است، اما اطلاعات اندکی در مورد جریان فوق بحرانی پایین‌دست پایه‌های مستقر روی سرریز تنداب و اثر پایه دریچه بر آن موجود است. در اثر اندرکنش جریان و پایه‌های دریچه‌های مستقر در سرریز، جریان فوق بحرانی موجی شکل می‌گیرد که به آن جریان بالی شکل یا دم‌خروسی می‌گویند. حاصل این اندرکنش، تشکیل سه نوع موج بلافاصله در پایین‌دست پایه، پایین‌دست سرریز و روی دیواره‌های تنداب می‌باشد. این پدیده، میدان جریان پایین‌دست را تحت تأثیر قرار داده و شرایط نامتعادل هیدرولیکی روی سرریز را باعث می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که ارتفاع امواج روی دیواره تنداب می‌تواند به بیش از 2 برابر عمق متوسط آب رسیده و از دیواره سرریز خارج شود. بنابراین ارتفاع امواج روی دیواره، طرح دیواره‌های کناری تنداب را تحت تأثیر قرار داده و از این لحاظ پروفیل امواج بالی شکل روی دیواره نیز اهمیت می‌یابد. در این مقاله نتایج بررسی آزمایشگاهی شکل‌گیری جریان بالی شکل، پروفیل امواج ایجاد شده و راه‌کارهای کاهش ارتفاع این امواج ارائه شده و همچنین فشار استاتیکی میدان جریان بالی شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌ها بر روی مدل فیزیکی سرریز سد خیرآباد که در موسسه تحقیقات آب ایران ساخته شده، انجام و ملاحظه شد عدد فرود جریان و بازشدگی دریچه‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر این امواج دارند.

کلیدواژگان: سرریز تنداب، جریان بالی شکل، پایه، دریچه، جریان دم‌خروسی، مدل فیزیکی.

1- مقدمه

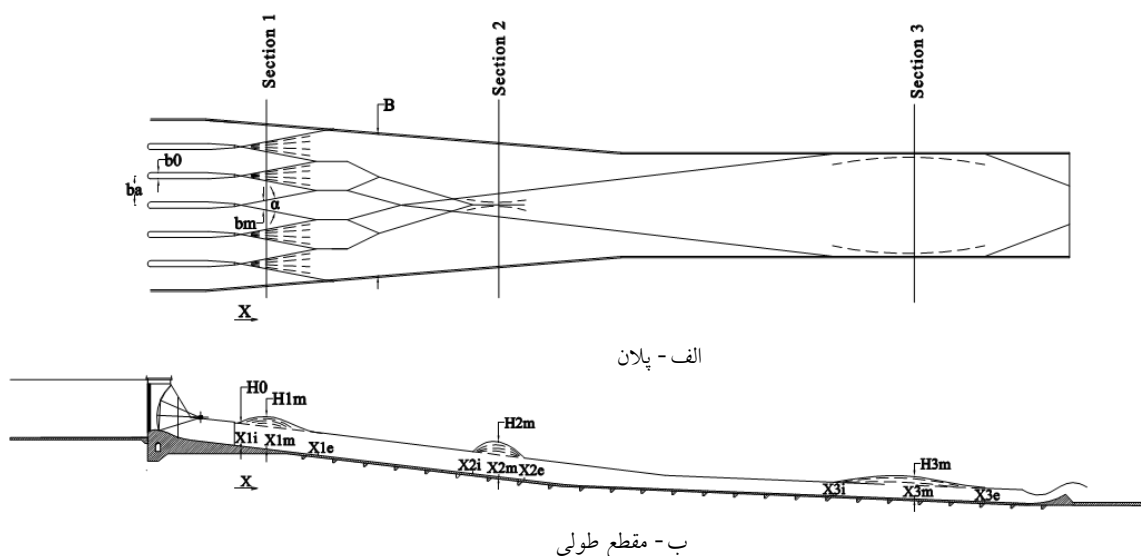
مسائل مهم این سازه‌ها بوده که توجه محققان بسیاری را به خود جلب نموده است. بنابراین انبوهی از مطالعات هیدرولیکی با موضوعات فوق بر روی این سازه‌ها در مراجع مختلف قابل ملاحظه می‌باشد (Lucas et al., 2013; Frizell et al., 2013; Pfister et al., 2011; Novak et al., 2007).

سرریزها از جمله اجزای مهم سدهای بلند و کوتاه محسوب می‌شوند که وظیفه تخلیه جریان اضافی از مخزن سد در شرایط سیلابی را بر عهده دارند. شرایط هیدرولیکی حاکم بر جریان شامل سرعت بالا و افت فشار و احتمال وقوع کاویتاسیون و هوادهی جریان از جمله

سرریزهای تونلی، ورودی تخلیه‌کننده‌های تحتانی به تونل و در تنداب‌های همگرا، در پایین‌دست دیوارهای هدایت سرریزها مشاهده می‌شود. استقرار دریچه‌ها و گذرگاه‌های پل مستقر بر روی تاج سرریز، کاربرد پایه‌ها را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. جریان بعد از عبور از تاج سد و پایه با ماهیت فوق‌بحرانی از دو طرف پایه در فاصله‌ای بعد از آن به هم برخورد و امواج ایستائی در پایین‌دست را شکل می‌دهد. این امواج، معروف به موج پایه بوده که در این تحقیق تحت عنوان موج 1 از آن یاد می‌شود. بر روی سرریز به تعداد پایه‌های میانی، امواج بالای شکل نوع 1 ایجاد شده که در اثر اندرکنش این امواج، اشکال هندسی منظم سطحی به شکل لوزی با انواع دیگری از امواج روی سطح آب سرریز را مطابق شکل 1 بوجود می‌آورد. در این شکل، پلان و مقطع طولی شماتیک جریان بالای پایین-دست مجموعه پایه‌های متقارن ملاحظه می‌شود. هندسه جریان و 3 موج شکل گرفته روی سرریز در حالت کل دریچه‌ها باز، نشان داده شده است. مقطع 1 محل پیک موج اول، مقطع 2 محل پیک موج دوم و مقطع 3 محل پیک موج سوم است.

با اضافه شدن دریچه‌های مستقر بر روی تاج سرریزهای آزاد که برای کنترل هد و دبی و افزایش حجم و تراز مخزن بکار می‌روند، مسائل پیچیده‌ای بر عناوین مطرح هیدرولیکی اضافه می‌شود که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بین مسائلی همچون ضریب دبی دریچه‌ها و محل قرارگیری دریچه روی سرریز و بحث جداسدن پروفیل جریان از روی سرریز، جریان‌ها یا امواج عرضی روی سرریز موضوع کمتر شناخته شده‌ای می‌باشد. این امواج با نام‌های مختلفی همچون امواج عرضی، جریان بالای شکل، امواج دم خروسی و امثال آن در مراجع مختلف و سازه‌های هیدرولیکی مختلف مورد اشاره قرار گرفته‌اند. ارتفاع این امواج از جریان متوسط بزرگ‌تر بوده و دارای مؤلفه عرضی سرعت نیز می‌باشند و لذا از یک طرف عرض سرریز به طرف دیگر حرکت نموده و شرایط هیدرولیکی جدیدی را به جریان تحمیل می‌نمایند.

جریان بالای شکل جریان پارابولیک و غلتشی است که در سازه‌های هیدرولیکی تحت عوامل مختلف ایجاد می‌شود. این جریان به نام امواج دم‌خروسی¹ در سرریزهای تنداب در پایین‌دست پایه دریچه‌ها، در پایین‌دست قوس‌ها در



شکل 1 امواج پایین دست پایه‌های تنداب

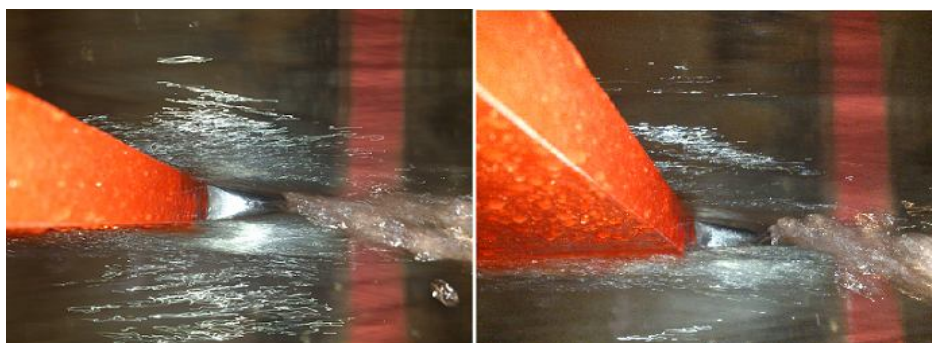
1. Rooster tail

پایه، b_a فاصله محوری پایه‌ها از هم و x موقعیت مکانی موج نسبت به نقطه کنترل می‌باشند. از مقطع $X = 0$ تا نقطه شروع موج 1 در مکان $X = X_{1i}$ ، حفره ای پشت پایه ایجاد می‌شود که بسته به سرعت جریان این حفره می‌تواند مستغرق و یا خشک باشد (شکل 2). در فاصله $X = 0$ تا $X = X_{1i}$ جریان عبوری از دو طرف پایه همانند دو جت به هم برخورد کرده و امواج ایستای نوع اول را بوجود می‌آورند. این موج که به صورت غلتشی بوده، با جداشدن مقداری از جت آب از هسته اصلی به حداکثر ارتفاع موج (H_{1m}) در مکان X_{1m} می‌رسد. در مکان انتهایی موج نوع 1 یعنی X_{1e} ، هسته جدا شده جت آب به سمت بالشتک‌های آبی کناری سقوط می‌کند. امواج نوع 1 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 نوع 2 در مکان X_{2i} تشکیل شده و در $X = X_{2m}$ ، این موج با ارتفاع بیشینه H_{2m} ملاحظه می‌شود. موج روی دیواره یا موج سوم نیز در اثر تداخل امواج روی سرریز و همچنین حرکت عرضی امواج در پایین دست موج 2 و بر روی دیواره جانبی سرریز تشکیل می‌شود. موج نوع 3 از مکان $X = X_{3i}$ بر روی دیواره آغاز شده و در $X = X_{3m}$ ، به ارتفاع بیشینه H_{3m} رسیده و در $X = X_{3e}$ مستهلک شده و به جریان اصلی می‌ریزد.

در اثر تداخل امواج 1، موجی بزرگ‌تر از موج 1 در میانه سرریز ایجاد می‌شود که در این تحقیق موج 2 نامیده می‌شود (مقطع 2، شکل 1).

این امواج در جهت عرض سرریز نیز حرکت می‌کند. در اثر برخورد این امواج به دیواره‌های تنداب در پایین دست، موجی روی دیوار شکل می‌گیرد که در این تحقیق موج دیواره یا موج 3 نامیده می‌شود (مقطع 3، شکل 1). یکی از مسائل مهم طراحی تنداب‌ها و سازه‌های در معرض این جریان‌ها باید شناسایی کمی و کیفی این امواج و اثرات مخرب آن بر عملکرد سازه سرریز و بخصوص دیواره‌های آن را شامل شود. بنابراین شناسایی محل شکل‌گیری و مشخصه‌های این امواج در کنار ارزیابی میدان فشار و تغییرات آن به عنوان پارامتر هیدرولیکی مهم طراحی، بخصوص در محل تشکیل امواج و ارزیابی تغییرات آن در مقایسه با جریان معمول روی سرریزها مد نظر قرار گرفته است. این اطلاعات کمک زیادی به طراحان این سازه‌ها خواهد کرد.

برای مطالعه این امواج مطابق شکل 1، در مقطع کنترل مورد استفاده در این تحقیق $\alpha=0$ پارامترهای جریان شامل H_0 عمق جریان، v_0 سرعت جریان و $Fr = v_0 / \sqrt{gH_0}$ عدد فرود نامیده می‌شوند. پارامترهای هندسی جریان شامل H_m ارتفاع بیشینه امواج، B_m عرض امواج در محل ارتفاع بیشینه، α زاویه شکل‌گیری موج پایه، b_p عرض



شکل 2 هندسه موج پایه و حفره ایجاد شده پشت پایه

با عبور از هر هواده تشدید شده و بر ارتفاع آنها اضافه می‌شود و لذا شدت این امواج در پایین دست تنداب‌هایی با چند هواده سطحی قابل توجه بوده و باید با دقت مورد ارزیابی قرار گرفته و با اعمال روش‌هایی تخفیف یابند. این نتایج در مطالعات کاویانپور و همکاران (1392) بر روی پروفیل طولی و عرضی امواج بالای شکل مورد اشاره قرارگرفت و روشی برای کاهش این امواج ارائه شد. تحقیقات و بررسی‌های این محققان همچنین نشان داد که میدان جریان بالای شکل روی سرریز تابعی از عدد فرود جریان، بازشدگی دریاچه‌ها، 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 بوجود آورد. شکل 3 هندسه جریان تحت اثر بازشدگی 2، 4 و 6 دریاچه وسط را نشان می‌دهد.

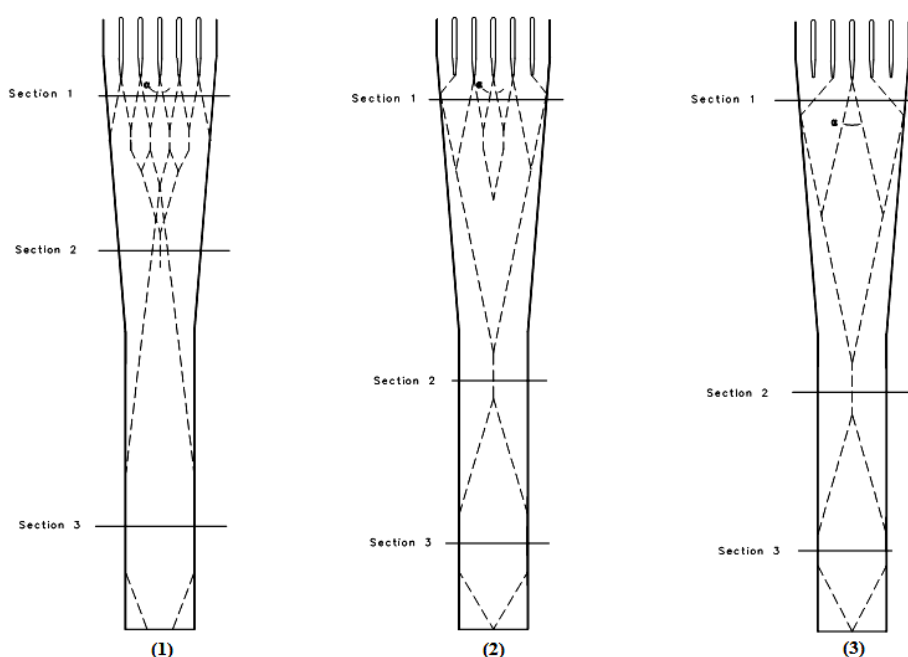
چنانچه ملاحظه می‌شود، با افزایش عملکرد تعداد دریاچه‌ها، هندسه جریان پیچیده‌تر می‌شود. در مقاله حاضر، هندسه جریان بالای شکل روی سرریز، پروفیل طولی و عرضی امواج سه‌گانه و فشار استاتیکی میدان جریان بالای شکل مورد بررسی قرار گرفته شده است.

2- معرفی مدل و روش تحقیق

به منظور انجام آزمایش و بررسی این جریان، مطالعه بر روی مدل فیزیکی سرریز سد خیر آباد در استان خوزستان انجام شد. مدل فیزیکی سرریز با مقیاس 1:50 در موسسه تحقیقات آب ایران ساخته شد. این مدل شامل اوجی و سرریز تنداب دریاچه‌دار با 6 دریاچه و 5 پایه می‌باشد که در اثر برخورد جریان با پایه‌ها جریان بالای- شکل یا دم‌خروسی تشکیل می‌شود. مقطع پایه‌ها دوکی‌شکل می‌باشد که با سعی و خطا در آزمایشگاه و به منظور کاهش ارتفاع جریان تاج‌خروسی در این مقطع حاصل شد.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که با وجود مطالعات قابل توجه بر روی هیدرولیک جریان روی سرریزهای تنداب، متأسفانه اطلاعات بسیار اندکی در مورد شکل‌گیری جریان بالای شکل روی سرریزها وجود دارد. بررسی‌های انجام شده روی شکل‌گیری جریان بالای شکل در یک کانال مستطیلی افقی توسط Reinaur and Hager (1994) نشان داد که برای حالت عمق جریان h_0 و عرض پایه b_p ثابت، ارتفاع امواج 1 و 2 (H_{2m}, H_{1m}) و عرض این امواج (B_{2m}, B_{1m}) با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. آنان همچنین نشان دادند که ارتفاع موج 1 تنها تابع نسبت عمق جریان به عرض پایه h_0/b_p است و با افزایش عدد فرود، ارتفاع و طول موج 1 نیز افزایش می‌یابد. این محققان در سال 1997 مطالعات قبلی خود در سال 1994 را بر روی یک سرریز تنداب ادامه دادند و ملاحظه نمودند، چنانچه اندازه‌گیری عمق در جهت عمود بر سرریز تنداب انجام شود، نتایج با مطالعات در کانال افقی همخوانی دارد (Reinaur and Hager, 1997). همچنین این محققان در سال 1998 تأثیر میزان همگرایی دیوار جانبی تنداب و شیب کف تنداب را بر امواج بالای شکل مورد بررسی قرار دادند و روشی برای کاهش امواج عرضی و طراحی دیواره‌های جانبی تنداب ارائه کردند (Reinaur and Hager, 1998). در بررسی دیگری، مطالعات این نوع جریان تحت عنوان آنالیز امواج ایستا در یک سرریز تنداب ارائه شد (Hager and Schleiss, 2009). مطالعات دیگری نیز بر روی جریان دم‌خروسی در یک سرریز تنداب با هواده انجام و نشان داده شد که استقرار هواده باعث تشدید امواج دم‌خروسی شده و با افزایش عدد فرود، این امواج نیز بزرگ‌تر می‌شوند (Pagliara et al., 2011).

مشاهدات انجام شده بر روی مدل‌های هیدرولیکی سرریزهای تنداب در موسسه تحقیقات آب ایران نیز این نتایج را تأیید می‌نماید (گزارش نهایی سیستم عملکرد سرریز سد خیر آباد، 1391). بر اساس این مشاهدات، امواج فوق



شکل 3 پلان هندسه جریان تحت عملکرد دریچه‌ها (1) 6 دریچه، (2) 4 دریچه وسط، (3) 2 دریچه وسط

روی آن مشخص است. در این سرریز، 3 موج بیشینه که می‌تواند شرایط بحرانی از نظر هیدرولیکی روی سرریز بوجود آورد، قابل ملاحظه است. موج 1 در پشت پایه، موج 2 در وسط طول سرریز و حاصل برخورد امواج مورب و زیگزاگی روی سرریز و موج 3 نیز روی دیواره تنداب قابل ملاحظه بوده که می‌تواند طراحی دیواره تنداب را تحت تأثیر قرار دهد. در شکل 5 برخورد امواج پایه و هندسه ایجاد شده پایین دست نشان داده شده است. شکل 6 نیز 3 موج بیشینه ایجاد شده را به صورت موضعی نشان می‌دهد.

در این مقاله بررسی تغییرات پروفیل طولی و عرضی امواج سه‌گانه معرفی شده، به ازای 3 دبی مختلف و 3 بازشدگی مختلف دریچه ارائه می‌شود.

در حالت اول تنها دو دریچه وسط باز می‌باشند. در حالت دوم چهار دریچه وسط باز بوده و در حالت سوم شش دریچه عمل می‌کنند. در این بررسی با استفاده از بازشدگی جزئی دریچه‌ها، عمق و سرعت جریان ورودی به سرریز تغییر می‌یابند.

عرض پایه‌ها $2/4$ سانتی‌متر است و در انتهای دوکی شکل به 1 سانتی‌متر می‌رسد. همچنین طول پایه‌های به کار رفته در سرریز $33/8$ سانتی‌متر و فاصله پایه‌ها از هم 9 سانتی‌متر می‌باشد. تنداب این سرریز از دو قسمت یکی با شیب 12% و دیگری با شیب 4% تشکیل شده است. عرض سرریز در قسمت شیب 12% در ابتدا 132 سانتی‌متر بوده و در انتها به 80 سانتی‌متر رسیده و در قسمت شیب 4%، این عرض ثابت و 80 سانتی‌متر می‌باشد. در انتهای تنداب، پرتاب کننده جامی قرار دارد که به علت توسعه جریان بالی شکل، جریان زیگزاگی و موجی شکلی بصورت عرضی روی آن مطابق شکل 4 قابل مشاهده است.

در بررسی انجام شده ملاحظه شد که ارتفاع موج روی دیواره می‌تواند به 2 برابر عمق آب رسیده و موجب فرسایش دیواره‌های جانبی تنداب شود. این جریان، امواج زیگزاگی بر روی تنداب تولید نمود که اشکال هندسی منظمی را بر روی سرریز ایجاد نمودند. در شکل 5 تصویری از سرریز و اشکال هندسی شکل گرفته بر



شکل 4 جت دندانهای حاصل از تداخل امواج بالای شکل روی پرتاب کننده جامی مدل حاضر



شکل 5 اشکال هندسی حاصل از امواج بالای شکل روی تنداب

تحقیق حاضر و شرایط جریان، حداکثر خطای اندازه-گیری 5% می باشد. همچنین به منظور اندازه گیری فشار استاتیکی از پیزومتر استفاده شده است که فشار سیال را به صورت ارتفاع معادل مایع نشان می دهد. لازم به ذکر است که مشخصات جریان نظیر عمق، سرعت و عدد فرود (ناشی از عملکرد دریچه ها) در بین دو پایه دریچه ها به عنوان مقطع کنترل یا مرجع با اندیس " o " (H_o, v_o)، در جدول مربوط به هر آزمایش معرفی شدند. محدوده اعداد فرود آزمایش در مقطع کنترل بین 2 الی 4 می باشد. البته محدوده اعداد فرود پایین دست سرریز بسیار بزرگ تر و در حد 8 الی 10 می باشد.

این بازشدگی جزئی دریچه ها قابلیت افزایش سرعت، کاهش عمق و در نتیجه تغییرات عدد فرود را به شکل مناسب ارائه می دهد. همچنین فشار پیزومتریکی میدان جریان روی سرریز در دو حالت عملکرد 6 دریچه و 4 دریچه وسط به ازای 3 بازشدگی مختلف برای هر حالت اندازه گیری شده و در ادامه آورده شده است. اندازه گیری ارتفاع و پروفیل امواج با خطکش مدرج انجام شد. خطای اندازه گیری عمق با خطکش مدرج تابع شرایط جریان است، در جریان یکنواخت و بدون نوسان، میزان خطا ± 1 میلی متر در مدل و در جریان نوسانی نظیر امواج بالای شکل این خطا تا حد ± 5 میلی متر در مدل بالغ می شود. بر اساس محدوده تغییرات ارتفاع امواج در



شکل 6 امواج بالای شکل عرضی روی تنداب الف- موج پایه یا موج 1، ب- موج وسط یا موج 2، ج- موج دیواره یا موج 3

قابل حذف است. با استفاده از تئوری باکینگهام و بیان ارتفاع بیشینه بی‌بعد امواج به شکل H_m/H_o و اطمینان از آشفتگی جریان در طول سرریز از اثر عدد رینولدز صرف‌نظر می‌شود. همچنین با توجه به اینکه همواره در طول آزمایش، ارتفاع آب روی سرریز از 5 سانتی‌متر بزرگ‌تر است، لذا اثر عدد وبر ناچیز فرض می‌شود. بنابراین این خواهیم داشت:

$$H_m/H_o = f(Fr_o) \quad (2)$$

همان‌طور که از رابطه بالا ملاحظه می‌شود، ارتفاع بیشینه بی‌بعد امواج نسبت به عمق ورودی جریان H_o تابعی از عدد فرود مقطع کنترل Fr_o می‌باشد. در ادامه روند تغییرات ارتفاع امواج به صورت بی‌بعد ارائه می‌شود.

در این تحقیق ارتفاع امواج بر حسب پارامترهای متغیر و مؤثر بر پدیده به صورت نمودارهایی بی‌بعد ارائه شده است. متغیرهای مهم و مؤثر بر ارتفاع بیشینه امواج H_m در سرریزهای تنداب شامل جرم حجمی سیال ρ ، لزجت دینامیکی سیال μ ، ضریب کشش سطحی آب σ ، شتاب ثقل g ، عمق جریان در مقطع کنترل H_o ، سرعت جریان در مقطع کنترل v_o ، عرض پایه b_p ، فاصله محوری پایه‌ها b_a ، شیب دیوارهای کناری سرریز θ_w و شیب کف سرریز θ_b می‌باشند.

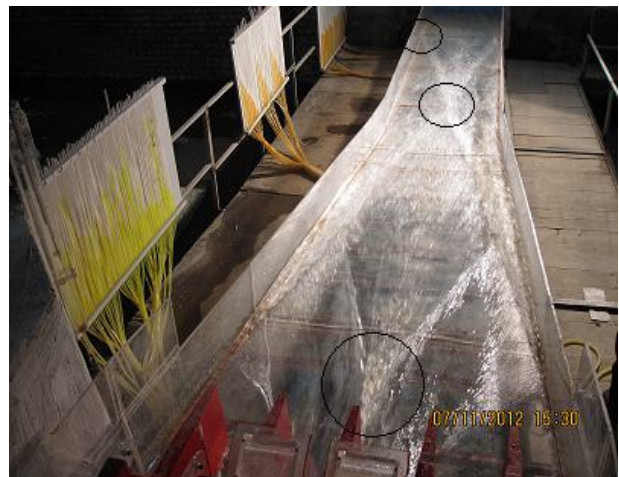
$$H_m = f(\rho, \mu, \sigma, g, H_o, v_o, b_p, b_a, \theta_b, \theta_w) \quad (1)$$

لازم به ذکر است که امکان تغییر پارامترهای هندسی b_p ، b_a ، θ_b ، θ_w در مدل فیزیکی فراهم نبوده و لذا این پارامترها از مجموعه پارامترهای مؤثر پدیده تحقیق حاضر

3- ارائه و تفسیر نتایج

3-1- پروفیل طولی و عرضی امواج

در این قسمت پروفیل طولی و عرضی امواج برای حالت عملکرد دو دریچه وسط، عملکرد 4 دریچه وسط و عملکرد 6 دریچه مورد بررسی قرار گرفت. مقاطع طولی در راستای جریان و مقاطع عرضی در محل تشکیل ارتفاع بیشینه امواج مورد توجه قرار گرفتند. شکل 7 تصویری از این جریان و امواج 3 گانه را برای بازشدگی دو دریچه وسط نشان می‌دهد. در این حالت تنها یک پایه باعث شکل‌گیری جریان بالای شکل می‌شود.



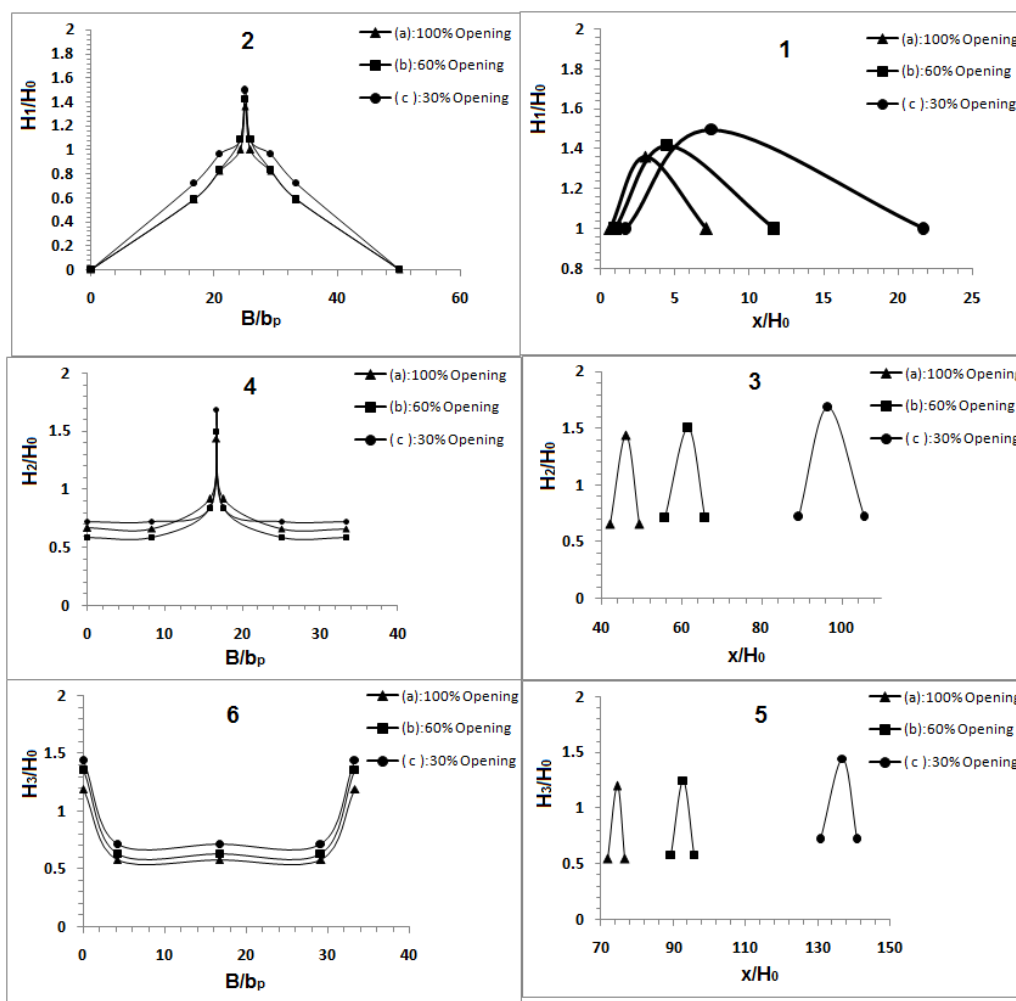
شکل 7 جریان و محل تشکیل امواج 3 گانه برای حالت دو دریچه وسط باز

شکل 8 پروفیل‌های طولی و عرضی عملکرد دو دریچه وسط را به تصویر می‌کشد؛ منحنی‌های a مربوط به بازشدگی 100% دریچه‌ها، منحنی‌های b وضعیت 60% بازشدگی دریچه‌ها و منحنی‌های c نیز بازشدگی 30% دریچه‌ها را نمایندگی می‌کنند. لازم به یادآوری است که تمامی اندازه‌گیری‌ها در جهت طولی از انتهای پایه می‌باشد و ارتفاع امواج نیز از کف سرریز اندازه‌گیری شده

است. پارامتر X مختصات در جهت طول سرریز و B مختصات در جهت عرض سرریز می‌باشد. مطابق نمودار 1 با افزایش بازشدگی ارتفاع بی‌بعد موج 1 کاهش و محل حداکثر آن به بالادست منتقل می‌شود. مقایسه تغییرات عرضی موج نیز در قسمت نمودار 2 نشان داده شده است. همین روند در نمودار 3 و 4 برای موج 2 نیز قابل ملاحظه است، با این تفاوت که موج 2 صرفاً بخش اندکی از عرض سرریز را در مقایسه با موج 1 در نمودار 2 تحت تأثیر قرار داده و طول بی‌بعد آن با افزایش بازشدگی نیز کاهش یافته است. روند کاهش ارتفاع نسبی و کاهش فاصله نسبی پیک موج به بالادست با بازشدگی، در موج 3 نمودار 5 نیز تکرار شده است. این امواج مطابق نمودار 6 صرفاً محدوده دیواره‌ها یعنی مجموعاً 25% عرض سرریز از دو طرف را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

مشخصات جریان در حالت عملکرد دو دریچه و امواج 1 و 2 و 3 در جدول 1 ارائه شده است. مطابق جدول، با افزایش بازشدگی، ارتفاع موج 1 افزایش و محل حداکثر آن به بالادست منتقل می‌شود. ارتفاع موج 2 با کاهش بازشدگی کاهش و روند افزایش ارتفاع و انتقال پیک موج 3 به بالادست با افزایش بازشدگی دریچه نیز قابل ملاحظه است.

شکل 9 مربوط به پروفیل‌های طولی و عرضی عملکرد چهار دریچه وسط می‌باشد. در این شکل منحنی‌های d ، e و f به ترتیب مربوط به بازشدگی 100%، 60% و 30% می‌باشد. مشخصات جریان در حالت عملکرد چهار دریچه وسط و امواج 1، 2 و 3 در جدول 2 نیز ارائه شده است. کلیه روندها و تغییرات ملاحظه شده در حالت دو دریچه باز برای حالت 4 دریچه باز نیز صادق است، با این تفاوت که مطابق منحنی 2 شکل 9، به جای یک موج پایه 3 موج پایه رخ داده است.

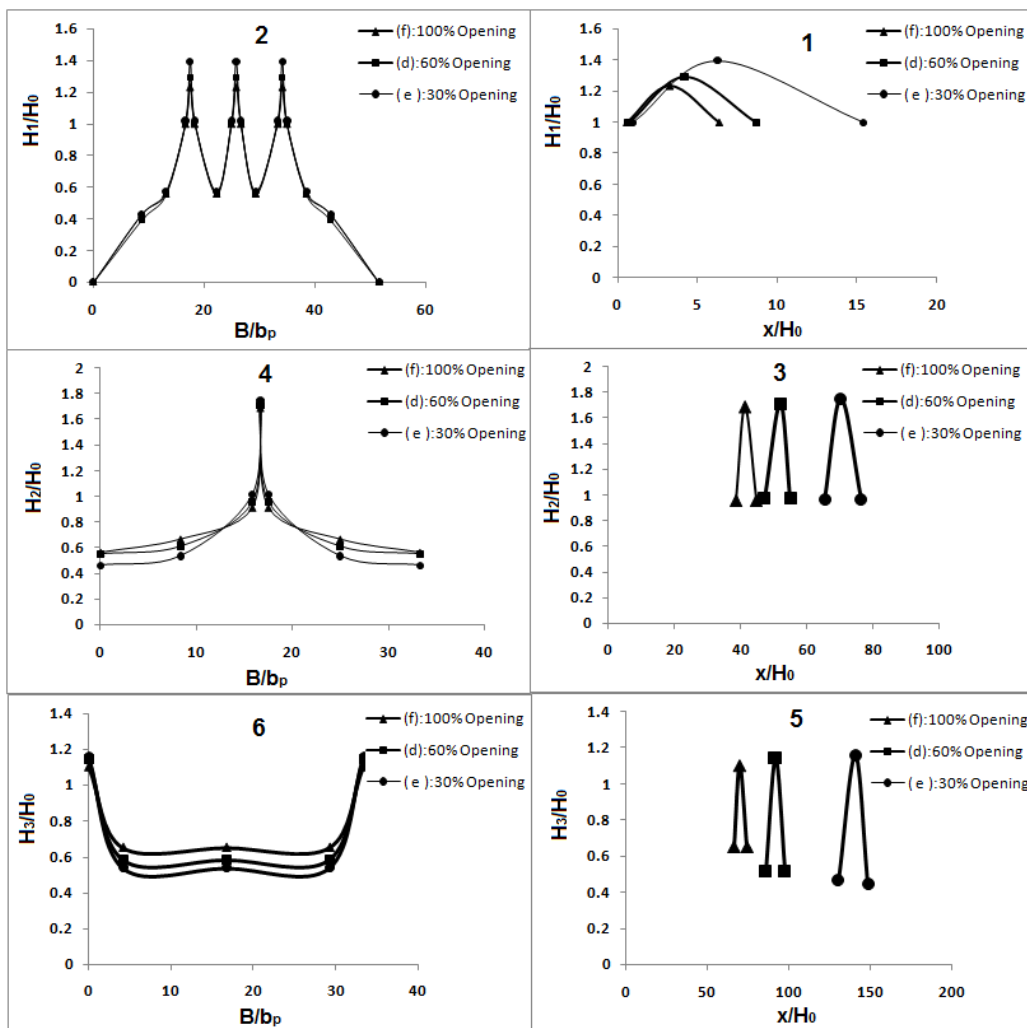


شکل 8 پروفیل بی بعد طولی و عرضی امواج در حالت عملکرد دو دریچه

- 1- پروفیل طولی موج 1، 2- پروفیل عرضی موج 1، 3- پروفیل طولی موج 2، 4- پروفیل عرضی موج 2، 5- پروفیل طولی موج 3، 6- پروفیل عرضی موج 3

جدول 1 مشخصات امواج بالای شکل در حالت عملکرد دو دریچه وسط

حالت	بازشدگی	امواج	Fr_o	Q (lit/s)	H_m (cm)	X_s (cm)	X_m (cm)	L (cm)	α (degree)	B_m (cm)
a	%100	1	2/05	91/2	9/6	5	22	47	32/42	12/5
		2			10/5	309	338	53	-	-
		3			8/6	525	543	34	-	-
b	%60	1	2/47	60/6	8/5	6	27	64	28/37	11/68
		2			9	336	370	60	-	-
		3			7/5	536	556	38	-	-
c	%30	1	3/07	44/4	6	7	31	83	25/61	11/01
		2			7	370	400	67	-	-
		3			6	542	568	42	-	-



شکل 9 پروفیل بی بعد طولی و عرضی امواج در حالت عملکرد چهار دریچه

- 1- پروفیل طولی موج 1، 2- پروفیل عرضی موج 1، 3- پروفیل طولی موج 2، 4- پروفیل عرضی موج 2، 5- پروفیل طولی موج 3، 6- پروفیل عرضی موج 3

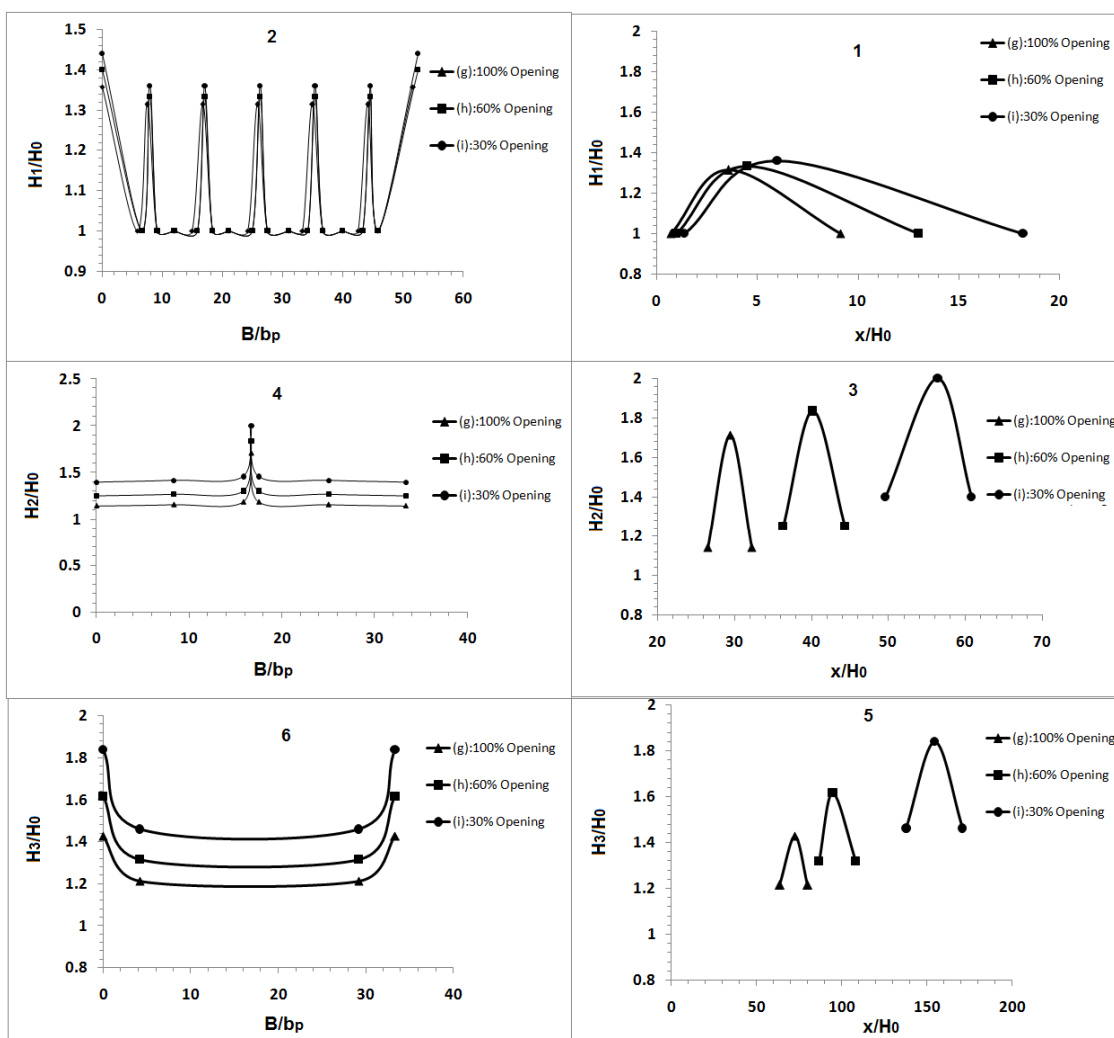
جدول 2 مشخصات امواج بالی شکل در حالت عملکرد چهار دریچه وسط

حالت	بازشدگی	امواج	Fr_o	Q (lit/s)	H_m (cm)	X_i (cm)	X_m (cm)	L (cm)	α (degree)	B_m (cm)
d	%100	1	2/1	126	9/3	4	25	45	22/62	9/8
		2			14/1	298	349	48	-	-
		3			8/9	485	510	57	-	-
e	%60	1	2/75	90/6	8/5	4/5	29	55/5	19/87	8/22
		2			11/5	326	359	54	-	-
		3			7/7	515	550	69	-	-
f	%30	1	3/9	62/4	7/5	5/5	25	80/5	17/65	6/06
		2			8	367	394	61	-	-
		3			5/5	540	584	77	-	-

است و البته ارتفاع امواج پایه نیز با افزایش پایه‌ها کاهش یافته است.

چنانچه در شکل های 8 و 9 و 10 مشاهده می‌شود، عدد فرود پارامتر مهمی در تغییرات امواج بالای شکل روی سرریز می‌باشد. از روند تغییرات نتیجه می‌شود که برای هر 3 دسته امواج تعریف شده تغییرات بر حسب عدد فرود به طور یکسان صورت گرفته، بطوری که ارتفاع و محل تشکیل پیک امواج، مقطع انتهایی موج و زاویه شکل‌گیری موج پایه با عدد فرود جریان تغییر می‌کند.

شکل 10 نیز مربوط به پروفیل طولی و عرضی عملکرد شش دریچه می‌باشد. منحنی‌های g ، h و i به ترتیب مربوط به بازشدگی‌های 100%، 60% و 30% می‌باشد. مشخصات جریان در حالت عملکرد شش دریچه باز و امواج 1، 2، و 3 نیز در جدول 3 ارائه شده است. کلیه روندها و تغییرات ملاحظه شده در حالت دو دریچه و 4 دریچه باز برای حالت 6 دریچه باز نیز صادق است، با این تفاوت که مطابق منحنی 2 شکل 10، بجای یک موج پایه برای حالت دو دریچه باز و 3 موج پایه برای حالت 4 دریچه باز، 5 موج پایه برای حالت 6 دریچه باز داده



شکل 10 پروفیل بی بعد طولی و عرضی امواج در حالت عملکرد شش دریچه

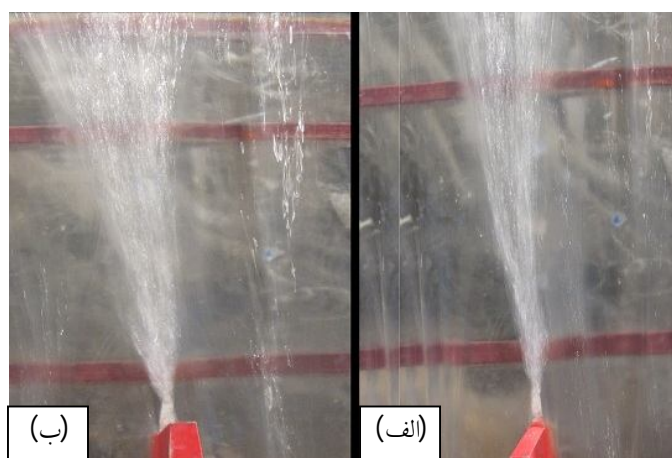
- 1- پروفیل طولی موج 1، 2- پروفیل عرضی موج 1، 3- پروفیل طولی موج 2، 4- پروفیل عرضی موج 2، 5- پروفیل طولی موج 3، 6. پروفیل عرضی موج 3

عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج می رسد. همچنین با کاهش عدد فرود ارتفاع امواج بزرگتر و طول امواج کاهش و زاویه شکل گیری موج پایه افزایش می یابد. جهت ارائه تصویری از چگونگی تغییر زاویه شکل گیری موج پایه (α) با عدد فرود، آزمایش های مجزائی انجام شد که نتایج فیزیکی آن در شکل 11 ملاحظه می شود. شکل نتایج دو عدد فرود $Fr_0 = 2.07, 3.1$ برای حالت یک پایه وسط را نشان می دهد. به ازای $Fr_0 = 2.07$ ، زاویه بازشدگی α موج قابل توجه و موج 1 پایه با عرض بیشتر ایجاد شده و در حالت $Fr_0 = 3.1$ ، زاویه شکل گیری موج 1 کوچکتر و موج باریکتر شده است.

با افزایش عدد فرود، امواج طولی تر و باریکتر شده و مقاطع بیشینه و انتهایی موج به پایین دست دورتری منتقل می شوند. در یک جمع بندی کلی و بررسی نتایج در محدوده اعداد فرود مورد مطالعه ملاحظه می شود که در حالت عملکرد شش دریچه، ارتفاع امواج 1 و 2 و 3 (مطابق جدول 3) به ترتیب به حداکثر $1/3$ و $1/5$ و $1/3$ برابر عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج، در حالت عملکرد چهار دریچه وسط (جدول 2) به ترتیب به حداکثر $1/4$ و $1/8$ و $2/2$ برابر عمق متوسط جریان در همان مقطع امواج و در حالت عملکرد دو دریچه وسط (مطابق جدول 1) به ترتیب به $1/5$ و $2/3$ و $2/5$ برابر

جدول 3 مشخصات امواج بالای شکل در حالت عملکرد شش دریچه وسط

حالت	بازشدگی	امواج	Fr_0	$Q(\text{lit/s})$	$H_m(\text{cm})$	$X_i(\text{cm})$	$X_m(\text{cm})$	$L(\text{cm})$	$\alpha(\text{degree})$	$B_m(\text{cm})$
g	%100	1	2/18	209/6	9/2	5	25	59	22/17	7/73
		2			12	186	206	40	-	-
		3			10	467	530	118	-	-
h	%60	1	3/1	125/8	8	6	27	72	16	5/88
		2			11	218	241	48	-	-
		3			9/7	521	570	99	-	-
i	%30	1	3/7	83/8	6/8	7	30	84	12/1	3/64
		2			10	248	282	56	-	-
		3			9/2	573	608	77	-	-



شکل 11 نمای پلان موج 1 الف - $Fr_0 = 3.1$ ب - $Fr_0 = 2.07$

این روش اجرایی و کاربردی نبوده و لذا تغییر هندسه پایه به شکل توصیه شده در مقاله حاضر، ضمن اجرائی بودن، ارتفاع جریان دم‌خروسی ایجاد شده را کاهش قابل ملاحظه داده و با کاهش ارتفاع موج 1، ارتفاع مهم موج دیواره نیز کاهش می‌یابد.

شکل 13 مقاطع طولی امواج سه‌گانه را در طول سرریز نشان می‌دهد. در هر 3 دسته امواج روند تغییرات بر حسب عدد فرود یکسان است و ارتفاع امواج، محل تشکیل پیک موج، مقطع انتهای موج و زاویه شکل‌گیری موج با عدد فرود جریان تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود، طول امواج بیشتر شده و ارتفاع امواج کمتر می‌شود، همچنین مقاطع پیشینه و انتهایی موج به پایین‌دست دورتری منتقل می‌شوند.

به منظور کاهش شکل جریان دم‌خروسی و عدم تأثیرگذاری بر رفتار جریان در طول تنداب، شکل پایین-دست پایه در دو گزینه تغییر یافته و با روش آزمون و مشاهده و بررسی شرایط جریان در مدل، گزینه برتر انتخاب و در مدل تثبیت شد. در شکل 12 شرایط جریان به ازای گزینه‌های مختلف انتهای پایه در دبی 5000 متر مکعب در ثانیه در واقعیت نشان داده شده است. با روش آزمون و خطا و مشاهده به ازای چندین گزینه مختلف، ملاحظه شد که با افزایش طول پایه و کاهش ضخامت انتهایی آن، شکل‌گیری و پرش جریان دم‌خروسی در مدل تثبیت می‌شود که البته به مسائل سازه‌ای و اجرائی نیز وابسته می‌باشد. بررسی تحقیقات قبل نشان می‌دهد که از تیغه‌های متصل به پایه برای کاهش ارتفاع امواج توصیه شده که در نتیجه آن نقطه برخورد جریان از دو سمت پایه به نوک تیغه منتقل شود (Reinaur and Hager, 1994).

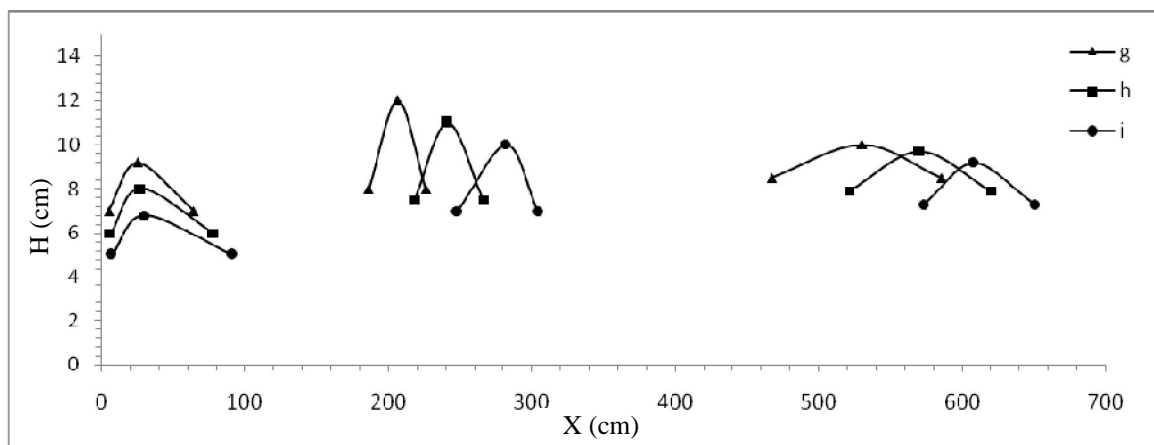


a. طرح اولیه

b. گزینه اول

c. گزینه دوم و نهایی

شکل 12 پرش دم‌خروسی به ازای گزینه‌های مختلف برای دبی 5000 متر مکعب در ثانیه



شکل 13 تغییرات امواج 1، 2 و 3 در طول سرریز به ازای بازشدگی‌های مختلف و یا اعداد فرود مختلف

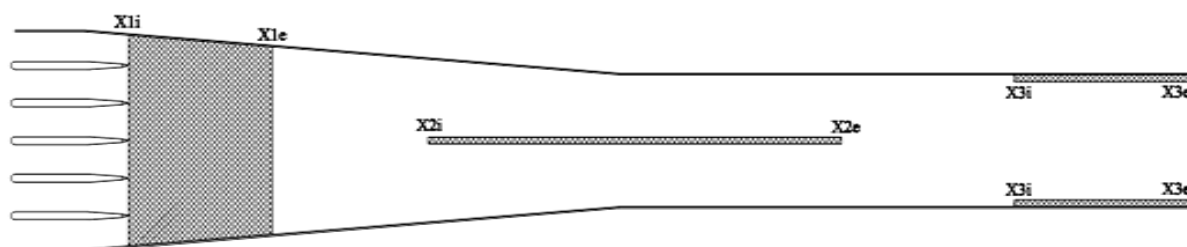
مشاهده می‌شود، برای عملکرد مختلف دریچه‌ها ارتفاع تمام امواج و مختصات طولی آنها روندی مشخص و نسبتاً خطی بر حسب عدد فرود دارند. شکل 16 نیز نمودار بی‌بعد تغییرات زاویه شکل‌گیری موج 1 بر حسب عدد فرود را نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود، زاویه α به صورت خطی کاهش یافته و امواج تیزتر و باریک‌تر می‌شوند.

3-2- فشار پیزومتری

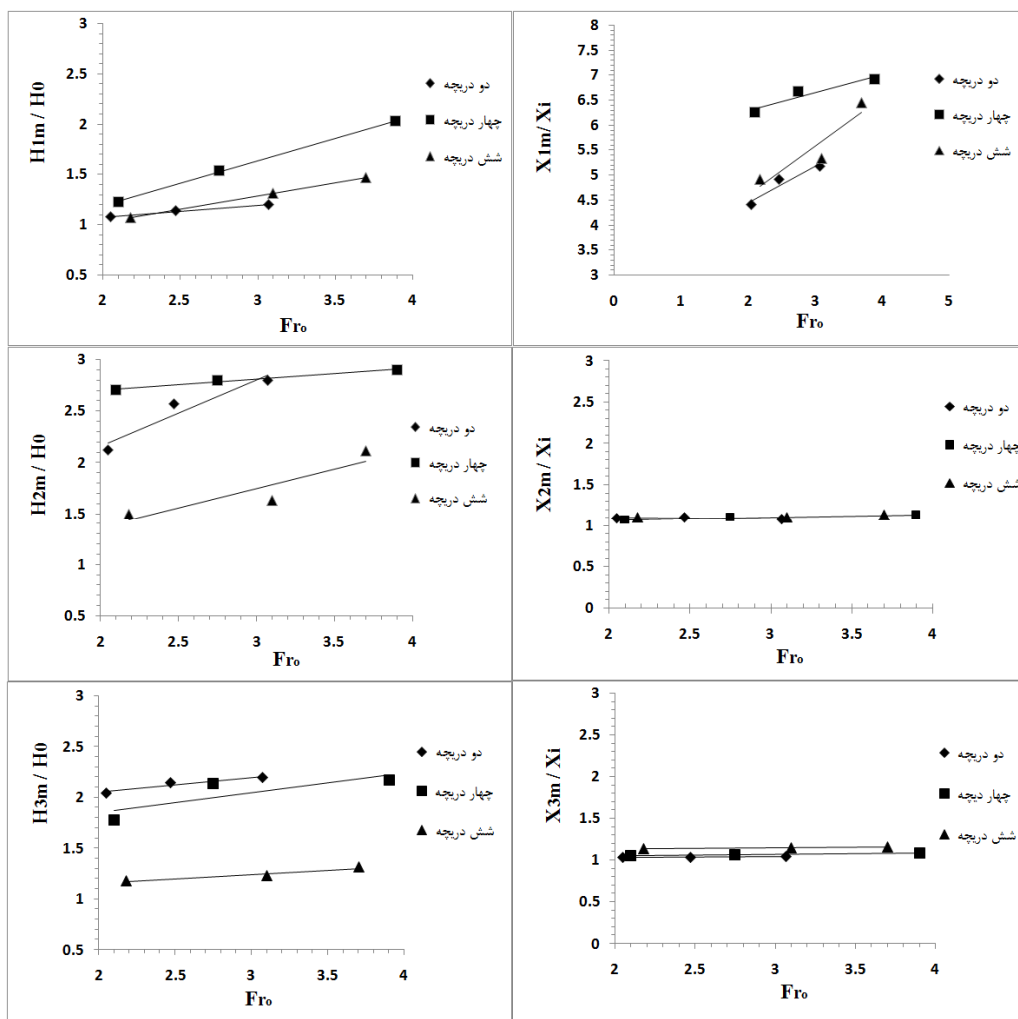
توزیع فشار پیزومتری کف سرریز در زیر ارتفاع بیشینه و نقطه فرود موج 1، زیر ارتفاع بیشینه و نقطه فرود موج 2 و همچنین محل تشکیل بیشینه موج 3 روی دیوارها اندازه‌گیری و ارائه شدند. شکل‌های 17 و 18 توزیع ضریب فشار پیزومتری برای امواج سه‌گانه در دو حالت عملکرد شش دریچه و چهار دریچه وسط برای سه بازشدگی 100%، 50% و 30% با عدد فرود ورودی متناظر را نشان می‌دهند. محور عمودی معرف ضریب فشار که نسبت به هد سرعت در مقطع کنترل به شکل $Cp = \frac{P}{\rho v_0^2} / 2g$ بی‌بعد شده و محور افق نیز فاصله طولی نقاط نسبت به ابتدای پایه‌ها را نشان می‌دهند. در این نمودارها، نقاط از سمت چپ به ترتیب مربوط به محل ارتفاع بیشینه و نقطه فرود موج 1 روی کف سرریز، محل ارتفاع بیشینه و فرود موج 2 روی کف سرریز و محل تشکیل ارتفاع بیشینه موج 3 روی دیوار سرریز می‌باشند.

ارتفاع امواج وابسته به عمق جریان و طول امواج وابسته به سرعت جریان می‌باشد و در نتیجه با افزایش عمق جریان، ارتفاع امواج بیشتر و با افزایش سرعت جریان، طول امواج بیشتر می‌شوند. همچنین با افزایش بازشدگی دریچه‌ها عمق جریان افزایش یافته و عدد فرود کاهش می‌یابد و در نتیجه ارتفاع امواج افزایش یافته و طول امواج کاهش می‌یابد و مقاطع بیشینه و انتهایی به بالا دست منتقل می‌شوند. همچنین با مشاهده مقاطع عرضی امواج مشاهده می‌شود با افزایش عدد فرود امواج باریک‌تر شده و با کاهش عدد فرود امواج پهن‌تر می‌شوند. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، امواج 2 یا امواج وسط سرریز ارتفاع بزرگ‌تری نسبت به دو موج دیگر دارند. پس از آن موج 3 و در انتها موج 1 از نظر ارتفاعی قرار دارند.

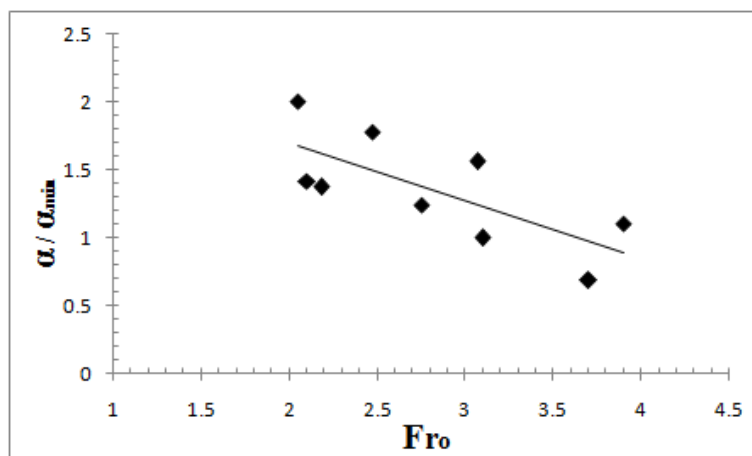
در شکل 14 محل شکل‌گیری امواج سه‌گانه بر روی پلان سرریز نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نیز ملاحظه می‌شود، موج 2 در محدوده گسترده‌تری از سرریز شکل می‌گیرد. محدوده تشکیل موج 3 حائز اهمیت بسیار است، زیرا موج دیواره موجی ضربه‌ای است و فشار دینامیکی قابل ملاحظه‌ای به دیواره‌ی کناری تنداب وارد می‌کند و از طرفی ارتفاع این امواج می‌تواند از ارتفاع دیواره تنداب نیز بزرگ‌تر شود و لذا از نقطه نظر طراحی موج 3 یا موج دیواره بسیار حائز اهمیت است. شکل 15 نمودارهای بی‌بعد ارتفاع بیشینه امواج 1 و 2 و 3 و محل تشکیل آنها بر حسب عدد فرود را برای عملکرد دو، چهار و شش دریچه نشان می‌دهد. چنانچه



شکل 14 پلان محدوده شکل‌گیری امواج 3 گانه



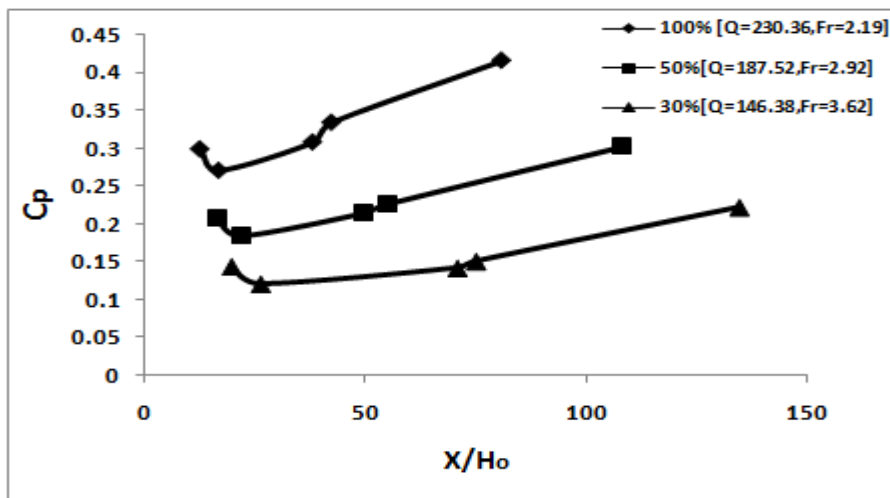
شکل 15 نمودارهای بی‌بعد تغییرات ارتفاع بیشینه و محل تشکیل ارتفاع بیشینه بر حسب عدد فرود به ازای عملکردهای مختلف درپچه‌ها



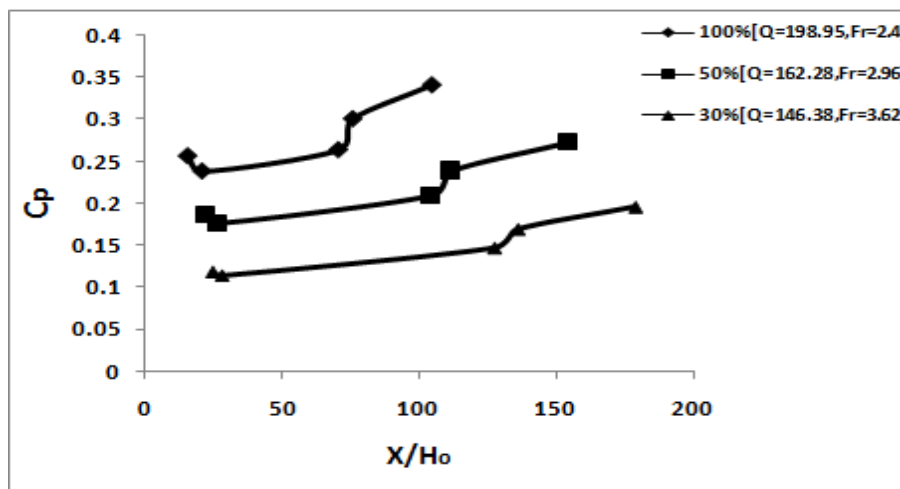
شکل 16 نمودار بی‌بعد تغییرات زاویه شکل‌گیری امواج بر حسب عدد فرود

همان‌طور که در دو نمودار ملاحظه می‌شود، در نقطه فرود موج 1 نسبت به نقطه ارتفاع ماکزیمم آن فشار پیزومتری به دلیل کاهش ارتفاع آب، کاهش یافته است. در ادامه با توجه به بالا بودن ارتفاع موج 2 نسبت به موج 1، فشار پیزومتری افزایش می‌یابد. موج 2 مطابق شکل 19 در نقطه پیک از هسته اصلی آب روی سرریز جدا شده و در نقطه فرود به دلیل افزایش ارتفاع آب، فشار پیزومتری افزایش یافته است. در محل ارتفاع بیشینه موج 3 نیز جریان با شدت به دیواره جانبی سرریز برخورد کرده و فشار

پیزومتری به حداکثر مقدار خود می‌رسد. چنانچه قبلاً بیان شد، با افزایش عدد فرود و کاهش درصد بازشدگی دریچه‌ها، ارتفاع امواج کاهش و امواج طولی‌تر می‌شوند، بنابراین مطابق شکل‌های 17 و 18، فشار پیزومتری با افزایش عدد فرود ورودی کاهش داشته است. همچنین در همه حالات عملکرد دریچه‌ها و در بازشدگی ثابت، فشار در محل بیشینه موج 1 نسبت به محل فرود موج بزرگ‌تر بوده که عکس روند موج 2 است که فشار در نقطه فرود از نقطه بیشینه موج بزرگ‌تر است.



شکل 17 توزیع هد فشار پیزومتریک امواج سه گانه برای حالت بازشدگی شش دریچه وسط



شکل 18 توزیع هد فشار پیزومتریک امواج سه گانه برای حالت عملکرد چهار دریچه وسط



شکل 19 تصویر جدا شدن موج 2 از هسته اصلی جریان آب

4- نتیجه گیری

جریان فوق بحرانی پایین دست پایه دریچه یا پل روی سرریز تنداب امواج ایستایی را ایجاد می کنند که امواج دم خروسی یا بالی شکل نامیده می شوند. این امواج در سه دسته موج 1 و 2 و 3 مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که:

- با افزایش عدد فرود، طول امواج دیواره بزرگتر، ارتفاع امواج کوتاه تر و امواج باریک تر شده و مقاطع بیشینه و انتهایی موج به پایین دست منتقل می شوند.
- با افزایش عدد فرود امواج 1 و 2 باریک تر شده و با کاهش عدد فرود امواج پهن تر می شوند.

- امواج 2 یا امواج میانی سرریز ارتفاع بزرگتری نسبت به دو موج دیگر دارند. پس از آن موج 3 و در انتها موج 1 از نظر ارتفاعی قرار دارند.

- موج 2 در محدوده گسترده تری از سرریز شکل می گیرد. موج دیواره موجی ضربه ای است و فشار دینامیکی قابل ملاحظه ای به دیواره کناری تنداب وارد می کند.

- ارتفاع تمامی امواج و مختصات طولی آنها روند خطی بر حسب عدد فرود نشان می دهند. امواج 1 دارای

بیشترین و امواج 2 دارای کمترین تغییر نسبت به عدد فرود می باشند.

- با کاهش بازشدگی دریچه ها و در نتیجه افزایش عدد فرود، فشار پیزومتریک کاهش می یابد.

- در هر یک از حالات عملکرد دریچه ها و در یک بازشدگی ثابت، فشار پیزومتریک موج 3 نسبت به دو موج دیگر بیشتر است. همچنین فشار پیزومتریک موج 2 از موج 1 بیشتر است.

6- فهرست علائم

α	زاویه شکل گیری موج پایه
B_m	عرض امواج در محل ارتفاع بیشینه
b_a	فاصله محوری پایه ها از هم
b_p	عرض پایه
B	مختصات عرضی
Fr_o	عدد فرود در مقطع کنترل
g	شتاب گرانشی
H_o	عمق جریان در مقطع کنترل
H_m	ارتفاع بیشینه امواج
Q	دبی جریان
Re	عدد رینولدز

Frizell, K., Renna, F., and Matos, J. (2013). "Cavitation potential of flow on stepped spillways", *J. Hydraul. Eng.*, 139(6), pp. 630–636.

Hager, W. H., and Schleiss, A. J. (2009). *Constructions hydrauliques*, Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, Switzerland.

Lucas, J., Hager, W., and Boes, R. (2013). "Deflector effect on chute flow", *J. Hydraul. Eng.*, 139(4), pp. 444–449.

Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., and Narayanan, R. (2007). *Hydraulic Structures*, Fourth Edition, in the USA and Canada by Taylor & Francis.

Pfister, M., Lucas, J., and Hager, W. (2011). "Chute aerators: preaerated approach flow", *J. Hydraul. Eng.*, 137(11), pp. 1452–1461.

Reinauer, R. and Hager, W. (1998). "Supercritical flow in chute contraction", *J. Hydraul. Eng.*, 124(1), pp. 55–64.

Reinauer, R., and Hager, W. H. (1994). "Supercritical flow behind chute piers", *J. Hydraul. Eng.*, 120(11), pp. 1292–1308.

Reinauer, R., and Hager, W. H. (1996). "Shockwave in air-water flows", *Int. J. Multiphase Flow*, 22(6), pp. 1255–1263.

Reinauer, R., and Hager, W. H. (1997). "Pier waves in sloping chutes", *Int. J. Hydropower Dams*, 4(3), pp. 100–103.

Stefano Pagliara, Sahameddin Mahmoudi Kurdistani, and Thendiyath Roshni (2011). "Rooster tail wave hydraulics of chutes", *J. Hydraul. Eng.* 137(9), pp. 1085-1088.

v_o سرعت جریان در مقطع کنترل

We عدد وبر

X_e مختصات طولی نقطه انتهایی موج

X_m مختصات طولی در محل ارتفاع بیشینه موج

X_i مختصات طولی نقطه شروع موج

θ_b شیب کف سرریز

θ_w شیب دیوارهای جانبی سرریز

اندیس‌های 1، 2 و 3 به ترتیب مربوط به امواج 1، 2 و 3 می‌باشند.

5- منابع

کاویانپور، م.ر.، موسوی مهر، س.م.، مختارپور، آ.، روشن، ر.، خراسانی‌زاده، ع. (1392). "بررسی تأثیر پایه بر پروفیل جریان بالای شکل روی سرریزهای تنداب دریچه دار". هفتمین کنگره ملی عمران، زاهدان.

گزارش نهایی سیستم عملکرد سرریز سد خیرآباد (1391). موسسه تحقیقات آب وزارت نیرو.