

تأثیر پارامترهای هیدرولیکی مؤثر در عملکرد سرریز نیم‌سیکل کسینوسی نسبت به سرریز مستطیلی

سعید صالحی (دکتری)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی، مشهد

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دربی ۲ - ۳۵، شماره ۱/۳، ص. ۱۲-۳

یکی از راهکارهای مناسب برای حل مشکل انباشت رسوبات در بالادست سرریزهای لبه‌تیز، تغییر شرایط هیدرولیکی سرریز است. با تغییر هندسه‌ی سرریز، شرایط هیدرولیکی بالادست آن تغییر می‌کند که عاملی بر تغییر شدت آشفستگی در پشت سرریزهاست. گرچه ایجاد آشفستگی باعث کاهش ضریب دبی سرریز می‌شود، اما می‌تواند باعث افزایش شرایط خودپالایی رسوبات ناحیه‌ی بالادست سرریز نیز شود. از این رو، پژوهش حاضر با هدف معرفی نوع جدید سرریز لبه‌تیز با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی انجام شده است. در این راستا، ابتدا سه مدل از سرریز لبه‌تیز با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی با بازشدگی‌های صفر، ۳ و ۶ سانتی‌متر ساخته و یک مدل مستطیلی نیز به عرض مشابه با ۳ سرریز دیگر به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. برداشت الگوی جریان توسط سرعت‌سنج صوتی ADV در ناحیه‌ی بالادست سرریز نشان داد که با افزایش بازشدگی سرریز، شدت آشفستگی افزایش پیدا می‌کند. بیشترین میزان شدت آشفستگی در سرریز با بازشدگی $w/b = 0.2$ مشاهده شد. همچنین ضریب دبی سرریز در جریان آزاد ارزیابی شد و نتایج نشان داد که به ازاء $h/P = 0.78$ ، ضریب دبی سرریزهای کسینوسی از سرریزهای مستطیلی کمتر می‌شود، ولی به ازاء مقدار مذکور، شدت آشفستگی که عاملی بر آب‌شستگی رسوبات است، افزایش پیدا می‌کند.

واژگان کلیدی: سرریز کسینوسی، سرعت‌سنج صوتی، ضریب دبی، شدت آشفستگی.

saeedsalehi100@gmail.com
esmaili@um.ac.ir

۱. مقدمه

سرریزهای لبه‌تیز، تاکنون مطالعه‌ی در زمینه‌ی سرریز با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی صورت نگرفته است. هدف از مطالعه‌ی حاضر، ارائه‌ی رابطه‌ی ضریب جریان و بررسی خصوصیات جریان در سرریز کسینوسی با یک نیم‌سیکل است. لذا با توجه به مطالعات گذشته، پیش‌بینی اولیه در مورد افزایش شدت آشفستگی تخمین زده شده است. همچنین در پژوهش حاضر، مطالعات با هدف تأثیر شکل سرریز در شدت آشفستگی، ارزیابی ضریب دبی و معرفی سرریز جدید برای افزایش فرسایش در بالادست سرریزهای لبه‌تیز انجام شده است.^[۱]

پس از نصب مدل‌های ساخته شده در کانال آزمایشگاهی، دبی و عمق جریان بالادست برای محاسبه‌ی ضریب دبی و همچنین نیمرخ‌های سرعت به منظور بررسی خصوصیات جریان عبوری از روی این سرریزها برداشت شده است. به منظور تعیین رابطه‌ی بار هیدرولیکی -دبی با استفاده از روابط تئوری حاکم بر جریان، رابطه‌ی به‌دست آمده به علت داشتن توابع انتگرالی، چندان مناسب اهداف عملی نبود. لذا با حذف توابع انتگرالی، رابطه‌ی کاربردی برای

امروزه سرریزهای لبه‌تیز به صورت گسترده‌ی در کانال‌های آبیاری برای اندازه‌گیری دبی در کانال‌های درجه ۳ و ۴ استفاده می‌شود. با توجه به کمبود آب و همچنین بالا رفتن حساسیت در میزان آب ورودی به مزارع، انباشت رسوبات در بالادست سرریزهای لبه‌تیز، مشکلاتی در محاسبه‌ی دبی به‌وجود می‌آید؛ چرا که با افزایش ارتفاع رسوبات در بالادست سرریزها، ضریب دبی به مقدار محسوسی کاهش می‌یابد و اندازه‌گیری سهم آب مزارع به چالش کشیده می‌شود. یکی از راهکارهای از بین بردن مشکل ذکر شده، ایجاد شرایط هیدرولیکی در کانال بالادست سرریزها برای بالا بردن آب‌شستگی رسوبات است که در سال‌های پیشین، این موضوع مورد اهمیت واقع شده است.

با وجود مطالعات گسترده در زمینه‌ی سرریزها و در میان شکل‌های متفاوت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۳/۹، اصلاحیه ۱۳۹۶/۹/۷، پذیرش ۱۳۹۶/۹/۱۴.

DOI:10.24200/J30.2019.20921

تعیین دبی جریان ارائه شده است. در رابطه‌ی بار هیدرولیکی - دبی اصلی که شامل توابع انتگرالی است، ضریب C_d با نسبت هد نسبی (h/P) تحلیل شده است. با استفاده از سرعت سنج صوتی که در ادامه به آن اشاره شده است، با اعمال شبکه‌بندی منظمی در پشت سرریز سعی در برداشت سرعت در جهت‌های مختلف شده است. این امر به منظور پی‌گیری تغییرات سرعت‌های ذکر شده بر ضریب دبی و همچنین آشفتگی جریان در پشت سرریز صورت گرفته است.^[۱]

سرریزهای طی سال‌های گذشته در شکل‌ها و مدل‌های مختلفی ارائه شده‌اند. تغییر شکل‌های صورت گرفته در ساختار ابتدایی سرریز به دلیل از بین بردن مشکلات مختلفی، که سرریزها با آن روبرو هستند، ارائه شده است که شامل:

۱. از بین بردن خطر کاویتاسیون،
۲. بالا بردن ضریب دبی برای کاهش هزینه‌ی اقتصادی ساخت سرریز،
۳. کاهش انباشت رسوبات در پشت سرریزها،
۴. بالا بردن دقت اندازه‌گیری،
۵. ارائه‌ی راهکارهایی برای کاهش خطا در اندازه‌گیری دبی در حالت‌های آزاد و مستغرق.

تمامی موارد مذکور طی سال‌های متمادی برای بهبود کارکرد سرریزها مطالعه و بررسی شده‌اند. از مهم‌ترین موارد ذکر شده، که کاربرد سرریزها را به چالش کشیده و باعث تغییر وضعیت جریان و کاهش دقت اندازه‌گیری جریان شده است، رسوب‌گذاری در بالادست سرریزهاست. برای حل مشکل مطرح شده، امروزه با پیشرفت علم هیدرولیک و شناخت ویژگی‌های جریان‌های متلاطم، به راهکارهایی برای ایجاد خودپالایی رسوبات از طریق افزایش آشفتگی در پشت سرریز توجه شده است. افزایش آشفتگی، رسوب‌گذاری در پشت سرریز را کاهش می‌دهد، اما باعث کاهش ضریب دبی خواهد شد. بنابراین لازم است اهمیت خودپالایی سرریز در مقابل کاهش ضریب دبی آن بررسی شود. برای ایجاد آشفتگی در پشت سرریزها لازم است گرادیان سرعت در جهت‌های مختلف افزایش یابد. مطالعه بر روی سرریزهای مستطیلی با فشرده‌گی جانبی نشان داده است که فشرده‌گی سرریزها باعث افزایش آشفتگی ایجاد شده می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر، با تغییر فرم فشرده‌گی سرریز به صورت تابع نیم‌سیکل کسینوسی، آشفتگی پشت سرریز تقویت شده است. در ادامه، با استفاده از روابط حاکم بر اندازه‌گیری دبی، شدت آشفتگی بررسی شده است. در سال‌های پیشین، پژوهشگران زیادی در زمینه‌ی ذکر شده مطالعاتی انجام داده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است.

۲. مطالعات انجام شده

در سال‌های گذشته افراد زیادی بر روی موضوعات خودپالایی رسوبات در بالادست انواع سرریزها با تغییر شرایط هیدرولیکی مطالعه کرده‌اند که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مطالعات باود (۲۰۰۵) اشاره کرد. وی در بررسی تأثیر جریان گردابه‌یی تشکیل شده در بالادست سرریز مستطیلی لبه تیز، تأثیر شرایط جریان بر انتقال رسوبات توسط جریان تشکیل را ارزیابی کرده و نتایج نشان داده است که به ازاء مقدار عدد فروید کمتر از ۱٫۷۵، کمترین میزان انتقال رسوبات به پایین دست رخ می‌دهد.^[۱] همچنین در مطالعات اوتا (۲۰۱۶) در رابطه با تأثیر جریان گردابه‌یی تشکیل

شده در پشت سرریز در انتقال رسوبات، نتایج نشان داده است که تغییر شرایط هیدرولیکی باعث کاهش یا افزایش قدرت جریان گردابه‌یی تشکیل شده در بالادست سرریزها می‌شود. همچنین در پژوهش مذکور با مقایسه‌ی مدل نرم‌افزاری با مدل آزمایشگاهی سرریز لبه تیز بیان شد که بیشترین مقدار آب‌شستگی بالادست در ناحیه‌یی اتفاق می‌افتد که بیشترین شدت آشفتگی وجود داشته باشد. پروفیل گودال آب‌شستگی در بالادست سدهای بتنی برداشت شد و در نهایت با ترسیم پروفیل در زمان‌های مختلف، تأثیر شرایط جریان در افزایش آب‌شستگی بررسی شده است.^[۲]

گوان (۲۰۱۴) نیز مطالعه‌یی در رابطه با تأثیر عدد رینولدز و شدت آشفتگی در گودال آب‌شستگی سرریزهای لبه تیز مستغرق در پایین دست و بالادست سرریز ارائه کرده است که در آن به تأثیر پارامترهای جریان از جمله شدت آشفتگی و تنش‌های رینولدز در افزایش ارتفاع آب‌شستگی در سرریزهای لبه تیز پرداخته و با استفاده از داده‌های سرعت‌سنجی ADV، اجزاء سرعت، اندازه‌گیری و محاسبه شده‌اند. در ادامه، نیز با استفاده از پارامترهای مذکور، مشخصه‌های جریان از جمله تنش رینولدز جریان و شدت آشفتگی از روابط ارائه شده در مراجع حساب شده و با مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با ارتفاع گودال آب‌شستگی حاصل از جریان مشخص شد که آشفتگی و تنش رینولدز در مکانی که بیشترین مقدار باشند، بیشترین عمق آب‌شستگی رخ می‌دهد. با توجه به پژوهش مذکور می‌توان این موضوع را برداشت کرد که شدت آشفتگی تأثیر زیادی در افزایش آب‌شستگی دارد و در مکان‌هایی مثل خروجی سد که نیاز به آب‌شستگی است (مطالعات اوتا)، می‌توان از راهکار ارائه شده بهره برد.^[۳]

گوان و ملوین (۲۰۱۵) نیز مطالعاتی در رابطه با سرریزهای لبه تیز در جریان مستغرق و آزاد انجام داده و با توجه به تأثیر آشفتگی در انتقال رسوبات در پایین دست و بالادست سرریزها، گودال آب‌شستگی در پایین دست و بالادست سرریز با استفاده از داده‌های سطح‌سنجی برداشت شده و روابطی برای تخمین آب‌شستگی بالادست و پایین دست سرریزهای لبه تیز ارائه کرده‌اند. مطالعات ایشان در دو بخش مستغرق و غیرمستغرق پی‌گیری شد که در حالت مستغرق به خاطر کاهش شدت آشفتگی در پایین دست و بالادست، شرایط جریان باعث کاهش رسوب‌شویی در بالادست شده است. همچنین روابط تخمین عمق آب‌شستگی در پایین دست و بالادست سرریزها با استفاده از روش آنالیز ابعادی ارزیابی و روابطی برای تخمین عمق آب‌شستگی از پارامترها و شرایط هیدرولیکی جریان ارائه شده است.^[۴]

همچنین عریضی و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی سرریزهای سینوسی در یک سیکل، با استفاده از داده‌های سرعت‌سنجی در پشت سرریز، آشفتگی جریان و آثار آن در ضریب دبی جریان را مطالعه کرده‌اند. آن‌ها با محاسبه‌ی ضریب دبی سرریزهای سینوسی شکل، روابطی با توجه به عمق بالادست سرریز برای جریان آزاد ارائه و با توجه به نتایج به دست آمده، متوسط ضریب دبی را تقریباً برابر با مقدار ۰٫۵۷^۰ پیشنهاد کرده‌اند. همچنین نتایج بررسی اغتشاش و آشفتگی بر روی سرریز سینوسی نشان داد که سرریز سینوسی نسبت به سرریز لبه تیز مستطیلی در حدود ۱۵٪ میزان شدت آشفتگی را افزایش می‌دهند و این امر باعث جلوگیری از رسوب‌گذاری در پشت بدنه‌ی بالادست سرریز می‌شود. فرق سرریز سینوسی با سرریز مورد مطالعه در پژوهش حاضر، تفاوت در تابع استفاده شده در فشرده‌گی سرریز است. بدین صورت که در سرریز سینوسی از تابع سینوس در بازه‌ی 0° تا 36° درجه از تاج سرریز تا ارتفاع بالای سرریز استفاده شده است.^[۵] در حالی که در پژوهش حاضر از تابع کسینوس با بازه‌ی 0° تا 180° درجه در دیواره‌های سرریز برای اعمال فشرده‌گی استفاده شده است. همچنین

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳. ضریب دبی

۱.۱.۳. روابط تحلیلی حاکم بر سرریزهای لبه تیز با دیواره‌ی قائم نیم‌سیکل کسینوسی

روابط حاکم بر سرریزهای لبه تیز با دیواره‌ی قائم نیم‌سیکل کسینوسی براساس معادله‌ی انرژی تجزیه و تحلیل می‌شوند. شکل ۱، نمای ساده‌ی از سرریز لبه تیز دیوار کسینوسی را نشان می‌دهد. که در آن، b طول سرریز، P ارتفاع تاج سرریز، h ارتفاع آب از تراز تاج سرریز در بالادست، y ارتفاع آب روی تاج سرریز، p فشار آب، V_1 سرعت جریان در کانال بالادست و V_2 سرعت جریان روی تاج سرریز است. کاربرد رابطه‌ی انرژی با نوشتن معادله‌ی انرژی بین سطح آب بالادست و پایین دست سرریز مطابق رابطه‌ی ۱ ارائه شده است:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (1)$$

با توجه به ثابت بودن انرژی کل در هر مقطع، می‌توان رابطه‌ی ۲ را نوشت:

$$P + h + \frac{V_1^2}{2g} = (P + y) + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2)$$

با تساوی دو رابطه‌ی ۱ و ۲، مقدار V_2 از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

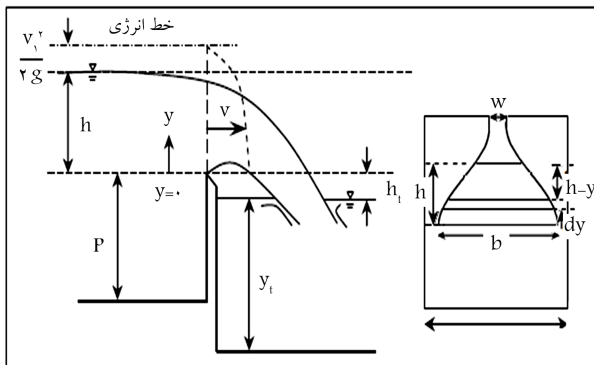
$$V_2 = \sqrt{2g(y + \frac{V_1^2}{2g})} \quad (3)$$

حال اگر در عمق y از تاج سرریز، نوار باریکی با ارتفاع dy و سطح مقطع $b dy$ انتخاب شود. عرض آن از رابطه‌ی ۴ و V_2 از رابطه‌ی ۵ به دست خواهند آمد:

$$b = w + 2b_1 \cos\left(\frac{2n\pi y}{2H}\right) \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{Q}{b \times (y)} \quad (5)$$

که در آن، n پارامتر مربوط به سیکل تابع کسینوس است که در پژوهش حاضر برابر با ۱ است. همچنین مقدار S مقیاس سطح تابع کسینوس است که در مطالعه‌ی حاضر با بزرگ کردن ۹ برابری تابع کسینوس برابر با ۸۱ است. ملاحظه می‌شود که برای محاسبه‌ی دبی سرریز با جایگزین کردن مقدار V_2 از رابطه‌ی ۳ در معادله‌ی ۵، رابطه‌ی پیچیده بر حسب Q به دست می‌آید که فقط از طریق سعی و خطا قابل محاسبه است. برای سهولت محاسبه، از عبارت $\frac{V_1^2}{2g}$ در مقابل هد جریان h



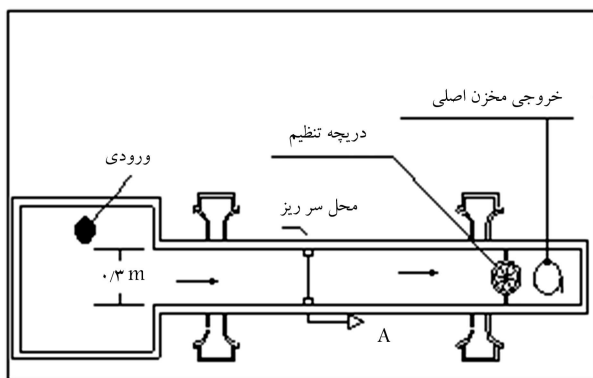
شکل ۱. سرریز لبه تیز دیوار کسینوسی و روابط حاکم.

شدت تلاطم در بالادست سرریز در شبکه‌ی پشت سرریز محاسبه شده است. ولی در مطالعه‌ی اخیر سرریز کسینوسی از نقطه‌های تصادفی برای برداشت شدت آشفتگی استفاده شده است. تعداد نقاط مذکور، ۱۵ نقطه‌ی پیشنهادی در مطالعات عربی و همکاران بوده است، ولی در پژوهش اخیر سرریز کسینوسی، برای مقایسه‌ی شدت آشفتگی دست کم ۶۶ نقطه برای ترسیم منحنی‌های شدت آشفتگی استفاده شده است. سامامورتی و همکاران (۲۰۱۳) نیز وضعیت جریان بر روی سرریزهای V شکل را مطالعه کردند و ۷ سرریز V شکل به صورت متوالی و کنار هم، عمود بر مسیر جریان برای افزایش دقت اندازه‌گیری دبی سرریز قرار دادند. پس از بررسی و تحلیل جریان عبوری از روی سرریز، نیز معادله‌ی دبی برای تعیین ضریب دبی بر روی سرریزهای V شکل ارائه کردند و بهترین زاویه‌ی رأس سرریز مثلثی برای جلوگیری از اغتشاش را پیشنهاد دادند.^[۷]

همچنین کورکسون و همکاران (۲۰۱۲)، وضعیت جریان را روی سرریزهای نوک اردکی خم‌دار بررسی و ارزیابی کردند و چند سرریز نوک اردکی بر عکس جریان و به صورت متوالی در مدل آزمایشگاهی ساختند. مجموعه‌ی سرریزهای ساخته شده به صورت خط صاف بر جریان به عنوان مدل‌های شاهد در نظر گرفته شدند و مدل‌هایی را به صورت قوس‌دار (ساخته شده بر روی کماتی از دایره) و به عنوان مدل‌های آزمایشی تجزیه و تحلیل کردند و نتایج به دست آمده نشان داد که ساختن سرریزهای مذکور بر روی کماتی از دایره، باعث کاهش آشفتگی و جدایش جریان می‌شود که به خودی خود این مسئله باعث افزایش ضریب جریان و همچنین طول مؤثر می‌شود. همچنین نتایج حاصل از تحلیل آشفتگی در دماغه‌ی سرریزهای نوک اردکی نشان داد که جدایش جریان در نوک سرریز و قسمت حمله، باعث کاهش ضریب جریان می‌شود. با تغییر شکل سرریز مذکور به صورت کماتی از دایره، مشکل ایجاد شده بهبود پیدا کرد. همچنین با توجه به تعداد سرریزهای نوک اردکی و طول موازی بر جریان آن‌ها، آزمایش‌ها بی‌گیری شدند و بهترین طول و تعداد سرریزهای مذکور مشخص شد.^[۸]

عظیمی و همکاران (۲۰۱۶)، نیز در بررسی جریان بر روی سرریز لبه تیز در حالت مستغرق، پروفیل سطح آب در پایین دست سرریز را به ۴ قسمت تقسیم‌بندی و با تغییر عمق استغراق سرریز در پایین دست سرریز، وضعیت تشکیل ۴ ناحیه‌ی ذکر شده (ناحیه‌ی برخورد جت خروجی، سطح پرش هیدرولیکی، سطح امواج و سطح جت) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد در حالتی که ارتفاع امواج کمتر از ۱۰٪ هد کلی سرریز است، منطقه‌ی جت خروجی با منطقه‌ی امواج بر هم منطبق هستند. ارائه‌ی روابطی برای برآورد ضریب دبی از دیگر نتایج پژوهش مذکور بوده است.^[۹]

همچنین نالاموتو و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی جریان بر روی سرریزهای لبه پهن با شیب بالادست و شیب پایین دست، ضریب دبی سرریزها را برداشت و اندازه‌گیری کردند. نتایج بررسی ضریب دبی بر روی سرریزهای لبه پهن ذکر شده نشان داد که با افزایش شیب در پایین دست، ضریب دبی افزایش پیدا می‌کند. ولی در بالادست، افزایش شیب باعث کاهش ضریب دبی می‌شود. همچنین با ادامه دادن سرریزهای لبه پهن، ضرایب آن‌ها برداشت و تجزیه و تحلیل می‌شد. در ادامه، در بالادست سرریز، وضعیت آشفتگی سرریز محاسبه و آثار آن در ضریب دبی تعیین شد و نتایج نشان داد در مکان‌هایی که آشفتگی افزایش پیدا کند، ضریب دبی کاهش می‌یابد. تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌ی انواع گوناگون سرریزها صورت گرفته است، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مطالعاتی در زمینه‌ی سرریزهای: لبه تیز، لبه باریک و لبه پهن اشاره کرد.^[۱۰-۱۱]



شکل ۳. پارامترهای فیزیکی.

عرض کف کانال، B عرض کف سرریز، V_{ave} سرعت متوسط آب در بالادست سرریز، σ کشش سطحی آب، ρ چگالی آب، v لزجت سینماتیک سیال آب، u' نوسان‌های سرعت در جهت محور طول‌ها، v' نوسان‌های سرعت در جهت محور عرض‌ها، w' نوسان‌های سرعت در جهت محور ارتفاع‌ها، u سرعت در جهت محور طول‌ها، v سرعت در جهت محور عرض‌ها و w سرعت در جهت محور ارتفاع‌ها هستند.

پارامترها در ۲ دسته تقسیم‌بندی شده‌اند. با توجه به رابطه‌ی ۱۰ و قضیه‌ی پی باکینگهام می‌توان تعداد ۷ گروه را به دست آورد. این اعداد در رابطه‌ی ۱۱ مشخص شده‌اند: اعداد فرود، رینولدز و وبر که در پدیده‌ی سرریز تأثیرگذار هستند. ولی با توجه به مطالعات رانگاراچو و آساوا می‌توان به دلیل ناچیز بودن، از اعداد وبر و رینولدز صرف‌نظر کرد، چرا که طبق نظر آن‌ها اعداد مذکور زمانی تأثیرگذار هستند که عمق آب بر روی سرریز از ۳ سانتی‌متر کمتر شود. در پژوهش مذکور، عمق کمینه‌ی آب ۵ سانتی‌متر برای برآورد ضریب دبی در نظر گرفته شده است. به همین منظور هدف مطالعات حاضر بر روی دیگر اعداد پی‌گیری شد. از طرفی چون جریان در کانال بالادست سرریزها غالباً زیر بحرانی است و عدد فرود کمتر و نزدیک به ۱ است، لذا عدد فرود نیز در ارائه‌ی روابطی برای ضریب دبی سرریز می‌تواند کنار گذاشته شود. البته مطالعاتی مثل مطالعات وطن‌خواه وجود دارد که ضریب دبی به عدد فرود وابسته است. به دلیل اینکه یکی از اهداف سرریز، اندازه‌گیری دقیق جریان است و برای محاسبه‌ی عدد فرود نیاز به داشتن سرعت است و چون دبی مشخص نیست، استفاده از عدد فرود به دلیل مشخص نبودن سرعت می‌تواند از ارائه‌ی رابطه‌ی کاربردی جلوگیری کند. با توجه به مطالب ذکر شده، اعداد نهایی برای استفاده در فرمول ضریب دبی در رابطه‌ی ۱۲ مشخص شده است.

$$Cd = f(h, h_r, P, w, B, v', \sigma, \rho, v, V_{ave}) \quad (10)$$

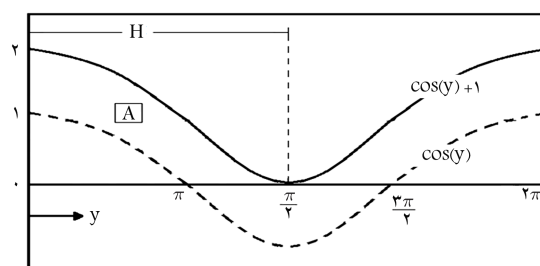
$$Cd = f\left(\frac{gh^3}{\sigma}, \frac{g^{0.5}h^{1.5}}{v}, \frac{V_{ave}}{\sqrt{gh}}, \frac{b}{B}, \frac{y}{h}, \frac{w}{P}, \frac{h}{P}\right) \quad (11)$$

$$Cd = f\left(\frac{b}{B}, \frac{y}{h}, \frac{w}{P}, \frac{h}{P}\right) \quad (12)$$

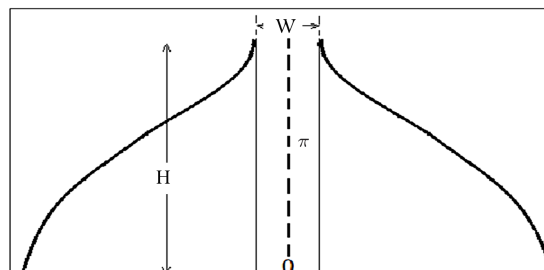
همچنین پارامترهای اجزاء سرعت که از سرعت‌سنج صوتی محاسبه می‌شوند، می‌توانند به صورت رابطه‌ی ۱۳ در شدت آشفتگی اثرگذار باشند:

$$T_v = f(u', v', w', u, v, w, V_{ave}) \quad (13)$$

که در آن، با حذف سرعت در جهات مختلف می‌توان فرمول آشفتگی و بلوکوس (۱۹۹۳) را که در برخی مراجع مشاهده می‌شود،^[۱۵] مطابق رابطه‌ی ۱۴ بازنویسی



الف) برآورد مساحت از تابع کسینوس؛



ب) برآورد مساحت سرریز.

شکل ۲. محاسبه‌ی مساحت سرریز با مقیاس یک.

صرف‌نظر می‌شود. هر چه ارتفاع تاج سرریز بیشتر باشد، استفاده از تقریب مذکور صحیح‌تر خواهد بود. همچنین با در نظر گرفتن مساحت زیر نمودار تابع کسینوس می‌توان مساحت سرریز را محاسبه کرد که در شکل ۲ به آن اشاره شده است. پس از انتگرال‌گیری از رابطه ۶، رابطه‌ی محاسبه‌ی دبی برای سرریزهای کسینوسی به صورت رابطه‌های ۷ و ۸ به دست می‌آید:

$$Q = \int_{y=0}^{y=h_1} V_r A dy = \int_{y=0}^{y=h_1} V_r b dy \quad (6)$$

$$Q = \int_{y=0}^{y=h_1} \sqrt{2g(y)} \left[w + 2b \cos\left(\frac{2n * \pi y}{2H}\right) \right] dy \quad (7)$$

$$Q = Cd \sqrt{2g} \left(y + \frac{V_r^2}{2g} \right) \times \left(wy + 2S \times \left(\sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) + y \right) \right) \quad (8)$$

لازم به ذکر است حل معادله‌ی پیوستگی در پژوهش حاضر با فرض ثابت بودن $\sqrt{2g(y)}$ از انتگرال خارج شد.

-- تحلیل ابعادی: عامل‌های اصلی تأثیرگذار در جریان از روی سرریز را می‌توان به عوامل مربوط به نوع سیال، عوامل مربوط به هندسه‌ی سازه‌ی سرریز و نیز عوامل مربوط به ویژگی جریان تفکیک کرد. در رابطه‌ی ۹، عامل‌های مؤثر که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فهرست شده‌اند.

آنالیز ابعادی پارامترها در سه قسمت تقسیم‌بندی می‌شوند: پارامترهایی که به نوع سیال بستگی دارند، پارامترهایی که به نوع جریان بستگی دارند و پارامترهایی هندسی که مربوط به ساختار و شکل سازه هستند (شکل ۳). همچنین پارامترهایی که در پژوهش حاضر پیش‌بینی شده‌اند که در شرایط هیدرولیکی تأثیرگذار هستند، در رابطه‌ی ۹ معرفی شده‌اند.

$$(h, h_r, P, w, B, \sigma, \rho, v, u', v', w', u, v, w, V_{ave}) \quad (9)$$

که در آن، h عمق آب در بالادست سرریز، h_r عمق آب در پایین دست سرریز، P ارتفاع سرریز از کف کانال، y ارتفاع آب، w عرض بازشدگی در گلوئی سرریز، b

کرد:

$$TV = \frac{(u'^2 + v'^2 + w'^2)^{1/2}}{3V_{ave}} \quad (14)$$

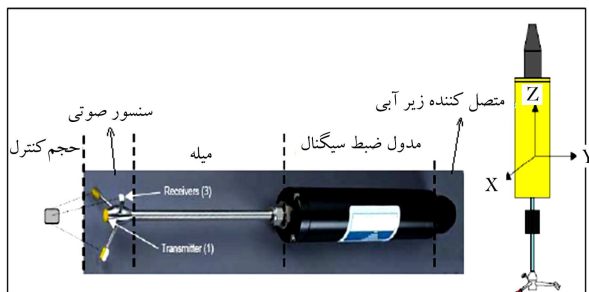
اندازه‌گیری دبی جریان توسط دبی‌سنج الکترومغناطیس در بالادست سرریز نصب شده روی لوله‌ی خروجی پمپ و همچنین به روش حجمی در پایین دست جریان انجام شده است. همچنین تراز سطح آب توسط عمق‌سنج با دقت ± 1 میلی‌متر برداشت شد. تحلیل میدان جریان و بردارهای سرعت در بالادست سرریز نیز با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی سرعت‌سنج سه‌بعدی (ADV) انجام شده است (شکل ۶).

ویژگی‌های دستگاه‌های ۵ مگاهرتزی عبارت‌اند از:

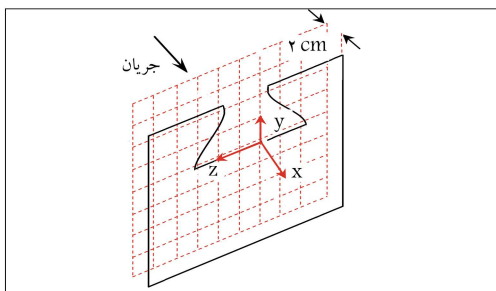
۱. تعداد قرائت در ثانیه‌ی ۰/۱ تا ۵ مگاهرتز؛
۲. حجم کنترل = ۰/۹ میلی‌متر مکعب؛
۳. فاصله‌ی فرستنده‌ی پالس تا موقعیت حجم نمونه: ۵ سانتی‌متر؛
۴. محدودده‌ی سرعت قابل برنامه‌ریزی (Cm-sec) ۳-۱۲-۳۲-۱۲۲-۲۵۲.

در پژوهش حاضر برای نشان دادن شرایط جریان سرریز بر وضعیت رسوب‌گذاری در پشت دیواره‌ی سرریز از شدت آشفتگی و نسبت سرعت قائم به سرعت متوسط در شبکه‌ی ترسیم شده در بالادست سرریز برای برداشت داده‌های سرعت در کانال سرریز استفاده شد (شکل ۷).

— آزمایش‌های انجام شده: جریان در فاصله‌ی ۴/۵ متری از ابتدای کانال (با توجه به بررسی پروفیل سرعت و یکسان شدن پروفیل در طول کانال) توسعه یافته است. از این رو سرریزها تقریباً در وسط کانال آزمایشی و در فاصله‌ی ۴/۵ متری از ابتدای کانال نصب و کلیه‌ی آزمایش‌ها در شرایط زیر بحرانی انجام شدند. این تذکر لازم است که برای برداشت مقادیر سرعت در پشت سرریز، یک شبکه‌ی فرضی به ابعاد 2×2 سانتی‌متری به فاصله‌ی ۲ سانتی‌متری از سرریز در نظر گرفته شد و در نقاط رأس شبکه، اندازه‌گیری‌ها انجام شده است. شکل ۷، نمای سرریز کسینوسی و مقطع برداشت پروفیل سرعت را نشان می‌دهد. [۱۷، ۱۶]



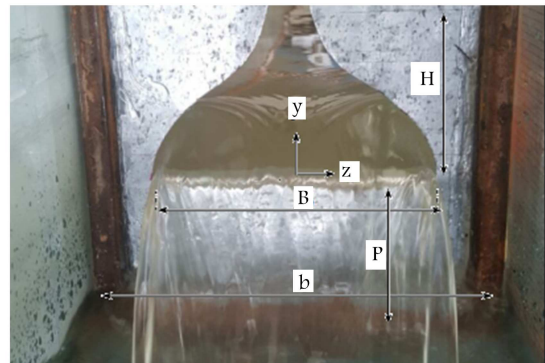
شکل ۶. تصویر دستگاه اندازه‌گیری سرعت‌سنج به روش صوتی انعکاسی ۲۵ مگاهرتز.



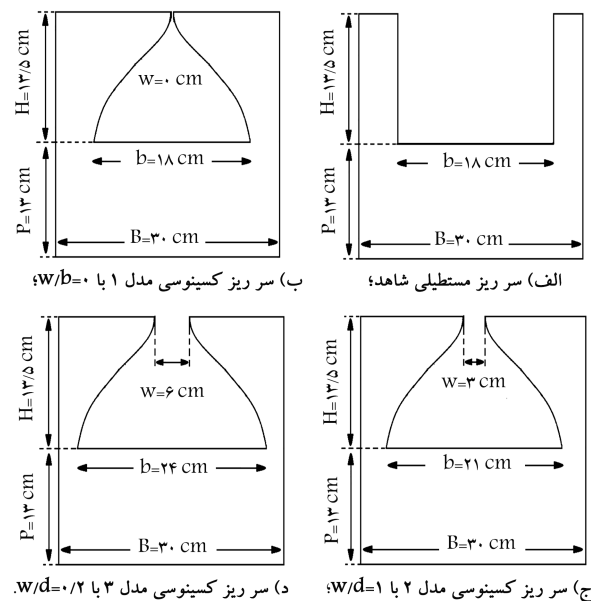
شکل ۷. وضعیت قرارگیری شبکه‌بندی سرعت.

— فلوم آزمایشگاهی: فلوم آزمایشگاهی موردنظر ابعادی به طول ۱۰ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر دارد. دیوار و کف فلوم از جنس پلکسی‌گلس شفاف به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. فلوم آزمایشگاهی به وسیله‌ی یک موتور پمپ با بیشینه‌ی ۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه شده و تغییرات دبی در آن به وسیله‌ی تغییرات توان پمپ تغذیه صورت گرفته است. شکل ۴، وضعیت فلوم را نشان می‌دهد. [۱۵]

— مدل‌های آزمایشگاهی: با توجه به ابعاد کانال، سه مدل سرریز لبه تیز با دیواره‌ی فشرددگی نیم‌سیکل تابع کسینوس با عرض بازشدگی متفاوت به عنوان مدل‌های اصلی و یک مدل سرریز مستطیلی به عنوان مدل شاهد انتخاب شدند (شکل ۵). با توجه به نیروی وارده بر سازه‌ی مذکور و نیز سهولت برش، مدل‌های آزمایشگاهی از ورق آهن با ضخامت ۲ میلی‌متر ساخته شدند. پایه‌های نگهدارنده، برای ثبات سرریز در مکان خود استفاده شدند. در شکل ۵، اندازه‌های مدل‌ها معرفی شده است.



شکل ۴. وضعیت قرارگیری سرریز در فلوم آزمایشگاهی.



شکل ۵. مدل‌های آزمایشگاهی.

تاج سرریز را ارائه می‌کند (بیس ۱۹۷۶). با برآورد سرعت در سرریز و محاسبه‌ی مساحت از رابطه‌ی ۸ و نیز مقادیر اندازه‌گیری دبی متناظر می‌توان ضریب Cd را با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ محاسبه کرد:

$$V_1 = Cd \sqrt{2gy} \quad (15)$$

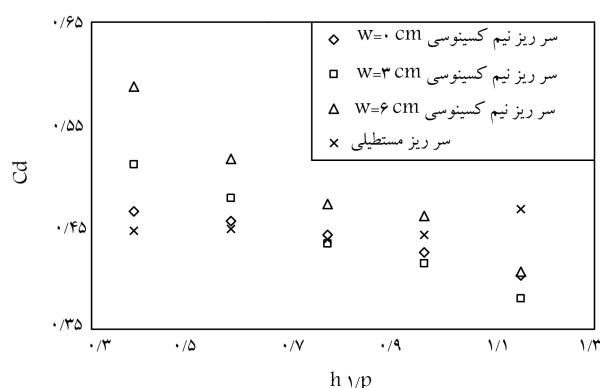
$$Q_{eq} = \sqrt{2g(y)} \times (wy + 2S \times (\sin(\frac{\pi y}{H}) + y))$$

$$Cd = \frac{Q_{ex}}{Q_{eq}} = \frac{Q_{experimental}}{(\sqrt{2gy} \times (wy + 2S \times (\sin(\frac{\pi y}{H}) + y))} \quad (16)$$

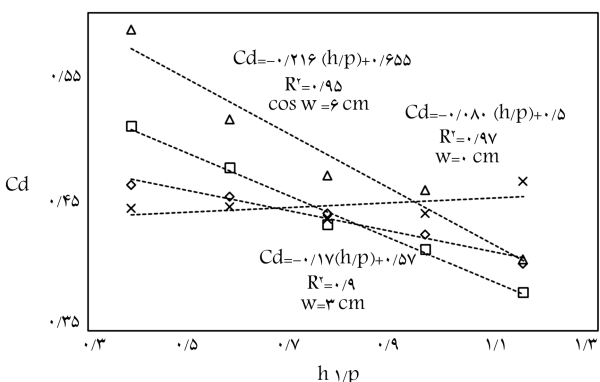
که در آن، Q_{ex} دبی واقعی و Q_{eq} دبی تئوری هستند. تغییرات ضریب دبی در برابر نسبت عمق نسبی (h/p) در شکل ۸ ترسیم شده است.

نتایج سرریز مستطیلی نشان می‌دهد که ضریب دبی اندازه‌گیری شده، تغییرات کمی نسبت به تغییرات عمق بالادست نشان نمی‌دهد. در صورتی که در مدل‌های کسینوسی، حساسیت به تغییرات ارتفاع آب زیاد است و هر چه w بزرگ‌تر باشد، به دلیل نوع مقطع جریان، میزان حساسیت بیشتر می‌شود و با افزایش ارتفاع آب در بالادست ضریب دبی کاهش می‌یابد. این نکته با توجه به شکل ۸ و مقایسه‌ی مدل‌های $w/b = 0.1$ و $w/b = 0.2$ کاملاً مشهود است. رابطه‌ی ۱۷، از رگرسیون‌گیری بین داده‌های آزمایشگاهی در بازشدگی مختلف برای محاسبه‌ی ضریب دبی برای سرریزهای با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی، با توجه به روابط شکل ۹ و استفاده از معادلات برازش داده شده به دست آمده است. برای صحت‌سنجی ضریب به دست آمده از رابطه‌ی تحلیلی ۱۷، نتایج با مقادیر ضریب مشاهداتی مقایسه شدند (شکل ۱۰).

$$C'd = -0.08 \left(\frac{h}{P}\right) - 0.025 \left(\frac{w}{P}\right) + 0.15 \quad (17)$$



شکل ۸. تغییرات ضریب سرریز در مقادیر مختلف.



شکل ۹. برازش معادلات بر ضریب سرریز با بازشدگی در مدل‌های مختلف.

آزمایش‌ها برای ۵ تراز سطح آب در بالادست سرریز (۵، ۷٫۵، ۱۰، ۱۲٫۵ و ۱۵ سانتی‌متر) انجام شدند. هم‌زمان دبی به روش حجمی در پایین‌دست اندازه‌گیری شد. همچنین تعداد ۲۰ آزمایش برای مدل‌ها طرح‌ریزی شدند، که در جدول ۱، آزمایش‌ها به صورت اجمالی و شرایط موجود توضیح داده شده‌اند. در ادامه، با توجه به روابط حاکم بر سرریز لبه تیز با دیواره‌ی نیم‌کسینوسی و دبی اندازه‌گیری شده در کانال در ارتفاع آب در بالادست سرریز ضریب دبی محاسبه و سعی در ارائه‌ی رابطه‌ی با توجه به بازشدگی و ارتفاع آب در بالادست سرریز شد. با بی‌بعد کردن سرعت در جهت قائم، تأثیر تغییر بدنه‌ی سرریز نیم‌سیکل کسینوسی بر وضعیت جریان بررسی شد. این تذکر لازم است که بررسی وضعیت جریان با استفاده از سرعت‌سنج صوتی در بیشینه‌ی ارتفاع آبگیری سرریز انجام شده است.

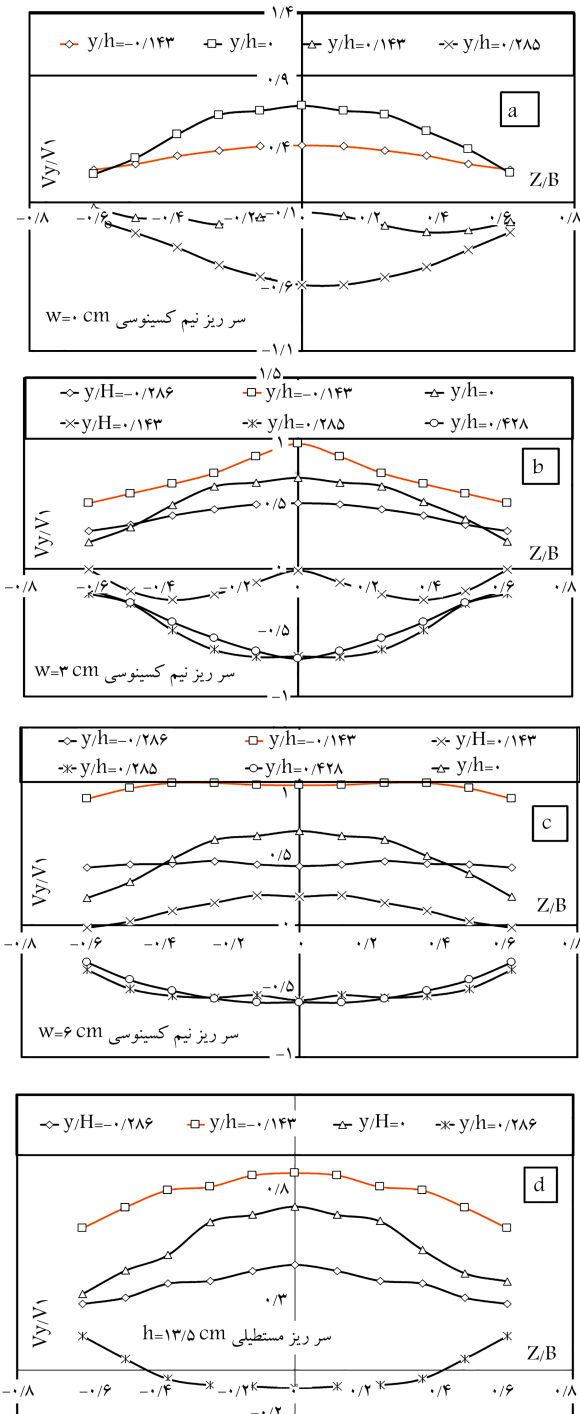
با تحلیل جریان عبوری از روی سرریزهای کسینوسی و مقایسه‌ی آن با سرریزهای شاهد مستطیلی، خصوصیات هیدرولیکی جریان و روند تغییرات جریان قائم در مجاورت سرریزها بحث و بررسی شد. تحلیل اولیه نشان می‌دهد که شکل خاص دیواره‌ی سرریزهای کسینوسی سبب تشدید تغییرات جریان‌های ثانویه و شدت آشفتگی در پشت سرریز می‌شود که در ادامه به صورت مفصل ارزیابی شده است.

۴. نتایج و بحث

ضریب سرریز: برای محاسبه‌ی ضریب دبی با تغییر هد بالادست سرریز، مقدار دبی در پایین‌دست سرریز به صورت حجمی اندازه‌گیری می‌شود. رابطه‌ی ۱۵ سرعت در

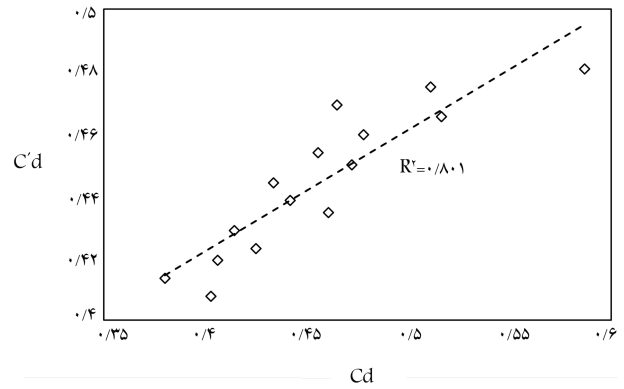
جدول ۱. آزمایش‌های انجام شده.

مدل سرریز	Q (l/s)	P (cm)	h (cm)	w/b (cm)
	۳٫۹		۵	
	۷٫۳		۷٫۵	
شاهد	۱۱	۱۳	۱۰	-
	۱۵٫۵		۱۲٫۵	
	۲۱٫۶		۱۵	
	۳٫۸		۵	
	۶٫۶		۷٫۵	
مدل ۱	۹٫۵	۱۳	۱۰	۰
	۱۲٫۲		۱۲٫۵	
	۱۴٫۳		۱۵	
	۴٫۹		۵	
	۸٫۳		۷٫۵	
مدل ۲	۱۲٫۲	۱۳	۱۰	۰٫۱
	۱۴٫۳		۱۲٫۵	
	۱۶٫۵		۱۵	
	۵٫۵		۵	
	۱۰٫۳		۷٫۵	
مدل ۳	۱۴٫۲	۱۳	۱۰	۰٫۲
	۱۸٫۷		۱۲٫۵	
	۲۰٫۷		۱۵	



شکل ۱۰. نسبت سرعت قائم به سرعت متوسط در مدل‌ها.

بازشدگی در سرریز نیم‌کسینوسی، سرعت به سمت بالا از دیوارها به مراتب افزایش پیدا می‌کند. با مقایسه‌ی مقادیر مذکور با سرریز مستطیلی می‌توان بیان کرد که سرریز نیم‌سیکل کسینوسی در نزدیکی بستر، مؤلفه‌ی سرعت رو به بالای بیشتری نسبت به سرریز مستطیلی دارد. همچنین با تبدیل دیواره‌ی سرریز به تابع نیم‌سیکل کسینوسی در دیوار کانال، مقادیر ذکر شده افزایش پیدا می‌کنند. برای مقادیر $y/h = -0.286$ این روند نیز قابل مشاهده است. همچنین در شکل ۱۲، نسبت w/V_{ave} به صورت توپوگرافی ترسیم شده است که با مشاهده‌ی آن‌ها مشخص می‌شود که افزایش

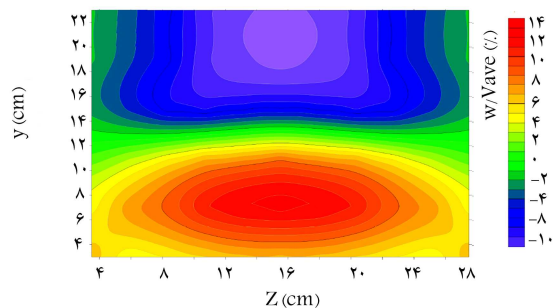
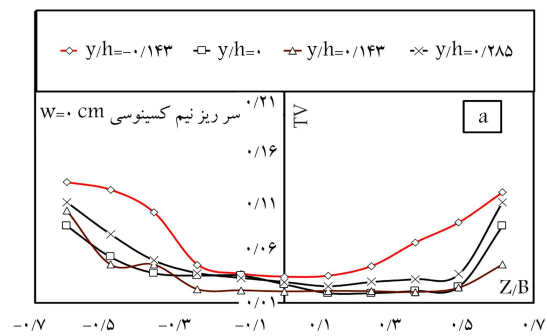


شکل ۱۱. صحت‌سنجی ضریب دبی محاسباتی.

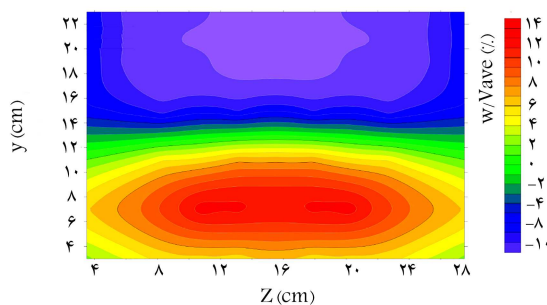
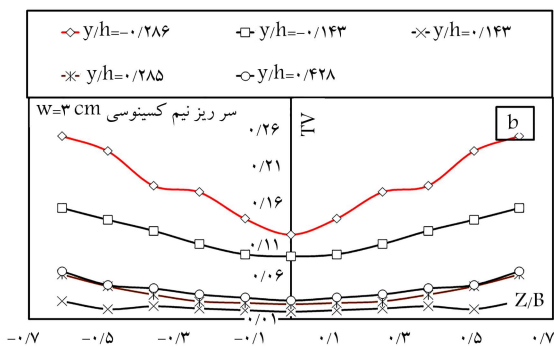
تحلیل جریان بالا دست سرریز: آزمایش‌ها، با فرض پر بودن سرریز، یعنی سطح جریان تا بالای گلوبی، انجام شدند. مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های x ، y و z با استفاده از سرعت‌سنج صوتی محاسبه شدند. سرریزها با هدف بالا بردن شدت آشفتگی و کاهش رسوب‌گذاری در پشت سرریز طراحی شده‌اند. در صفحه‌ی بالادست سرریز (۲ سانتی‌متر بالاتر)، شدت آشفتگی و همچنین نسبت سرعت در جهت قائم محاسبه شدند (همان‌طور که قبلاً اشاره شد، منظور از صفحه‌ی بالادست سرریز، صفحه‌ی است که در شکل ۷ معرفی شده است) برآورد شدت آشفتگی با استفاده از رابطه‌ی ۱۴ انجام شد. رابطه‌ی ۱۴ از متوسط نوسان‌های سرعت به سرعت متوسط جریان در یک نقطه توسط ویلکاکس (۱۹۹۳)، [۱۵] ارائه شده است که با پیشرفت علم هیدرولیک و استفاده از ابزار دقیق اندازه‌گیری در بسیاری از پژوهش‌های حاضر برای برآورد شدت آشفتگی استفاده می‌شود. در نهایت، مقادیر محاسبه شده با حالت شاهد مقایسه شد. وضعیت سرعت جریان در جهت قائم در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. هدف اصلی طراحی سرریز مذکور، جلوگیری از انباشت رسوب‌های پشت آن است. به همین خاطر در تحلیل ابعادی سرعت، مؤلفه‌ی سرعت در جهت قائم، اهمیت بیشتری نسبت به سایر جهت‌ها دارد. بدین خاطر با محاسبه‌ی مؤلفه‌ی سرعت در جهت قائم و همچنین نوسان‌های سرعت در جهت‌های مختلف در هر یک از نقاط شبکه‌بندی در بالادست سرریز، شدت آشفتگی برای حالت‌های مختلف مدل‌ها در شکل ۱۳ ارائه شده است. [۱۶-۱۸]

$$TV = \frac{(u'^2 + v'^2 + w'^2)^{1/2}}{3V_{ave}} \quad (18)$$

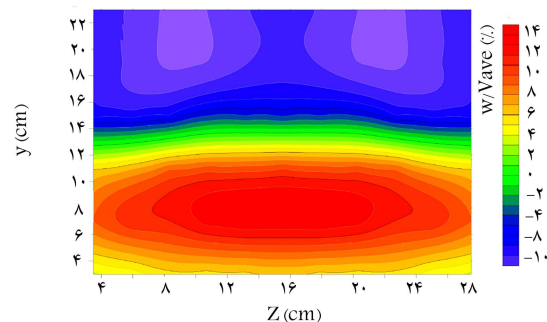
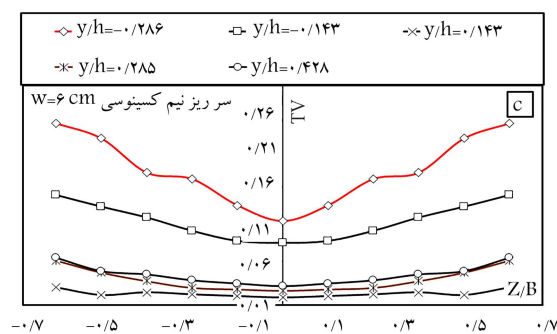
در شکل ۱۱، مقادیر نسبت سرعت قائم به سرعت متوسط در کانال بالادست ترسیم شده است. برای نمایش و مقایسه‌ی تأثیر بازشدگی سرریزها از اعداد بی‌بعد هندسی استفاده شده است، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مقدار Z/b که مقدار بی‌بعد شده‌ی نمودار در جهت افقی است و همچنین در شبکه‌بندی پشت سرریز، عدد بی‌بعد y/h که مقدار ارتفاع نقطه از تاج سرریز (شکل ۷: وضعیت قرارگیری مبدأ مختصات) بر عمق پرجریان سرریز است، اشاره کرد. با توجه به نرمالیزه کردن نمودارهای y و z پارامتر بی‌بعد w/V_{ave} در انواع سرریزها ارزیابی و بحث شده است. w/V_{ave} نمایانگر سرعت در جهت قائم در پشت سرریزهاست، لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بازشدگی سرریز کسینوسی، سرعت در جهت دیواره‌های کانال افزایش پیدا می‌کند. برای درک این موضوع اگر $y/h = -0.143$ به عنوان ارتفاعی در نزدیکی بستر در شبکه‌بندی پشت سرریز در نظر گرفته شود (منحنی خط چین)، با توجه به شکل‌های ۱۱ (الف، ب و ج) مشاهده می‌شود که با افزایش



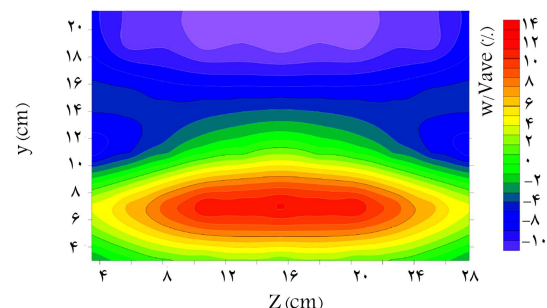
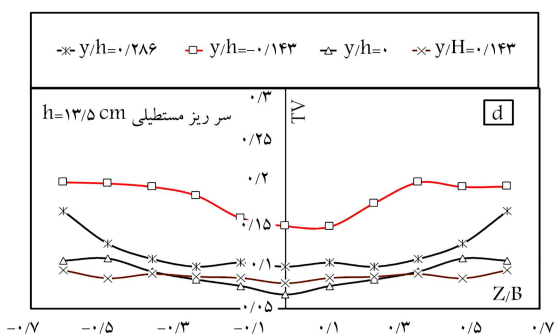
الف) سرریز نیم سیکل کسینوسی $w/b=0$



ب) سرریز نیم سیکل کسینوسی $w/b=0.1$



ج) سرریز نیم سیکل کسینوسی $w/b=0.2$



د) سرریز مستطیلی شاهد.

شکل ۱۳. شدت آشفته‌گی برای مدل‌های انتخابی.

شکل ۱۴. خطوط کنتور سرعت در جهت قائم در صفحه‌ی بالادست سرریزها.

سرریز، جریان به سمت بالا در سرریزهای کسینوسی به مراتب بیشتر از جریان رو به بالای سرریز مستطیلی است. شدت آشفته‌گی در صفحه‌ی بالادست سرریز نیز از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه و در شکل ۱۳ برای مدل‌های مختلف ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۳ (الف الی د) و با در نظر گرفتن منحنی $y/h = -0.286$ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش بازشدگی سرریز، شدت آشفته‌گی در دیوارها در

عرض گلوبی) در سرریزهای نیم‌سیکل کسینوسی باعث افزایش جریان به سمت بالا (از کف کانال به سمت تاج سرریز) می‌شود. همچنین در مدل شاهد (سرریز مستطیلی) این مقدار بیشتر متمرکز در زیر تاج است و به مراتب کمتر از سرعت در جهت قائم سرریز کسینوسی است.

با افزایش تراز سطح آب در پشت سرریز به دلیل ریزش آب به پایین‌دست، سرعت در جهت قائم منفی خواهد بود که این امر بدیهی است؛ ولی در زیر تاج

در مدل‌های سرریز کسینوسی به ازاء افزایش ارتفاع در روی تاج، ضریب دبی روند کاهشی دارد. در زمانی که $\frac{h}{p} = 0,78$ ، ضریب دبی برابر با ضریب دبی سرریز مستطیلی می‌شود. با استفاده از سرریز نیم‌سیکل کسینوسی، شدت آشفته‌گی در پایین‌دست لبه‌ی سرریز از سرریز مستطیلی بیشتر می‌شود. از طرفی شدت آشفته‌گی آن‌قدر افزایش پیدا نمی‌کند که ضریب دبی سرریزهای کسینوسی از ضریب دبی‌های مستطیلی کمتر شود. به عبارت دیگر، با این مورد به ازاء ضریب دبی یکسان بین سرریزهای کسینوسی و مستطیلی با توجه به شکل ۱۳، مقدار آشفته‌گی بیشتری در سرریزهای کسینوسی رخ می‌دهد. این عامل باعث می‌شود با ضریب دبی قابل قبول، همچنان رسوب‌شویی در پشت سرریز کسینوسی از سرریز مستطیلی بیشتر شود، که می‌تواند یکی از مزیت‌های سرریزهای کسینوسی برای استفاده به جای سرریزهای مستطیلی لبه تیز باشد. با توجه به شکل ۱۳ این مطلب قابل استحصال است، در سرریزهای کسینوسی اگرچه شدت آشفته‌گی در پشت سرریز بیشتر از مدل سرریز مستطیلی است، ولی به دلیل تشکیل شدت آشفته‌گی در نزدیک کف کانال سرریزهای کسینوسی، شدت آشفته‌گی در جت خروجی عبور کرده از روی تاج تأثیر ندارد و در زیر تاج، تأثیری در ضریب دبی نخواهد گذاشت. در صورتی که سرریز مستطیلی شدت بیشینه‌ی آشفته‌گی در زیر و نزدیک لبه‌ی تاج رخ می‌دهد که به خودی خود این عامل باعث کاهش ضریب دبی در هنگام عبور جریان نسبت به سرریزهای مستطیلی می‌شود.

در تحلیل ضریب دبی برای سرریزهای با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی، در صورتی که ارتفاع آب $0,78 \leq \frac{h}{p}$ ، ضریب دبی افزایش پیدا می‌کند، ولی در صورتی که $\frac{h}{p} \geq 0,78$ ، این امر موجب کاهش ضریب دبی در حالت‌های مختلف بازشدگی $0,72, 0,8, 0,9$ می‌شود. همچنین رابطه‌ی ۱۷ برای محاسبه‌ی ضریب دبی معرفی شد که با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد.

مقایسه‌ی سرعت قائم \bar{V}_{ave}^{w} بین مدل‌های اول تا سوم با حالت شاهد (سرریز مستطیلی) نشان می‌دهد که با بازشدگی بیشتر، نسبت $\frac{\bar{V}_{ave}^{w}}{\bar{V}_{ave}}$ برای مدل سوم نسبت به مدل‌های اول و دوم بیشتر خواهد شد. همچنین سرریز با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی، جریان رو به بالای بیشتری نسبت به سرریز شاهد (مستطیلی) خواهد داشت.

همچنین با مقایسه‌ی آشفته‌گی بین مدل‌های آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر دیواره‌ی سرریز لبه تیز مستطیلی به سرریز با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی، شدت آشفته‌گی در دیواره‌های کناری نسبت به حالت شاهد بیشتر خواهد شد. همچنین مقایسه‌ی شدت آشفته‌گی سرریز با دیواره‌ی نیم‌سیکل کسینوسی با سرریز مستطیلی نشان داد که تغییرات شدت آشفته‌گی از مرکز کانال تا دیواره‌ی کانال برای سرریز کسینوسی در صفحه‌ی اندازه‌گیری شده با شیب بیشتری نسبت به سرریز مستطیلی افزایش پیدا می‌کند. این امر باعث می‌شود که در دیواره‌های کناری سرریز نیم‌سیکل کسینوسی، اختلاط جریان بیشتر باشد.

۵. نتیجه‌گیری

به طور کلی سرریزهای کسینوسی طرح جدیدی از سرریزها هستند که با روش استفاده از بالابردن شدت آشفته‌گی در بالادست سرریز، امکان کاهش رسوب‌گذاری در بالادست سرریز را فراهم می‌کنند. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با افزایش

بستر افزایش پیدا می‌کند. اندازه‌گیری شدت نوسان‌ها و اغتشاش ایجاد شده توسط سرعت‌سنج ADV در ناحیه‌ی بالادست سرریز حاکی از این است که افزایش تلاطم به مراتب در دیواره نسبت به مرکز کانال بیشتر است. مقایسه‌ی شرایط ذکر شده با سرریز مستطیلی حاکی از آن است که سرریز با دیوار کسینوسی به مراتب تلاطم بیشتری نسبت به سرریز مستطیلی در کف و دیوارها در پشت سرریز دارد. علت این موضوع را می‌توان به دلیل افزایش نوسان‌های سرعت در جهت‌های مختلف دانست که باعث ایجاد تغییرات معناداری در مقدار نوسان‌های سرعت می‌شود. وجود دیواره‌های مذکور، جریان گردابه‌یی که در سرریزها رخ می‌دهد (باود ۲۰۰۰)^[۱] را افزایش می‌دهد.

با توجه به شکل ۱۳ و همچنین روابط حاکم بر شدت آشفته‌گی مشخص می‌شود که در سرریزهای کسینوسی، شدت آشفته‌گی به مراتب مقادیر بیشتری نسبت به حالت شاهد (سرریز مستطیلی) دارند. با توجه به فرمول شدت آشفته‌گی، این مقدار با افزایش نوسان‌های سرعت در جهت‌های مختلف افزایش پیدا می‌کند. با برداشت نوسان‌های ذکر شده و تحلیل داده‌های سرعت‌سنج ADV و نرم‌افزار WinADV شکل ۱۳ ترسیم و مشخص شد که دیوار کسینوسی در سرریزها باعث ایجاد تغییرات معناداری در مقدار نوسان‌های سرعت می‌شود. وجود دیواره‌ی کسینوسی، جریان گردابه‌یی که در سرریزها رخ می‌دهد (باود، ۲۰۰۰)، را افزایش می‌دهد. این افزایش شدت جریان گردابه به خودی خود عاملی بر افزایش نوسان‌های سرعت می‌شود. با افزایش نوسان‌های سرعت، شدت آشفته‌گی نیز افزایش پیدا می‌کند. به صورت دقیق‌تر، این پروسه در سرریزها اتفاق می‌افتد که توسط پژوهشگران مختلفی که قبلاً اشاره شد، گزارش شده است. در مطالعات پیشین، جریان گردابه در دو قسمت وجود دارد: یکی از سمت سطح آب به سمت تاج سرریز و دیگری از سمت کف کانال به سمت تاج سرریز، که جمعاً تعداد ۴ گردابه در پشت سرریزها رخ می‌دهد. سرریزهای کسینوسی با شکل هندسی منحصر به فردی که دارند باعث افزایش گردابه‌های تشکیل شده در باله‌های فشرده‌گی سرریز می‌شوند. این افزایش به خودی خود به سمت تاج سرریز برای خروج حرکت می‌کند. برخورد دو جریان گردابه در زیر تاج سرریز کسینوسی باعث می‌شود که جریان‌های ذکر شده نوسان‌های سرعت را افزایش دهند. با محاسبه‌ی شدت آشفته‌گی، به نوعی وضعیت افزایش نوسان‌ها و جریان‌های رفت و برگشتی تأیید می‌شود. با توجه به شکل ۱۳ پیش‌بینی می‌شود که این افزایش شدت آشفته‌گی در دیواره‌ها به خودی خود دلیل بر افزایش قدرت جریان گردابه‌یی در سرریزهای لبه تیز است.

در نهایت پیش‌بینی می‌شود که تلاطم ایجاد شده می‌تواند از رسوب‌گذاری در پشت دیواره‌ی سرریز جلوگیری کند و بار رسوب کف را کاهش دهد. این مطلب که افزایش شدت آشفته‌گی باعث کاهش رسوب‌گذاری می‌شود، توسط عریضی و همکاران^[۶] تأیید شده و نتایج کلی منطبق با گزارش‌های آن‌هاست. همچنین با مقایسه‌ی شدت آشفته‌گی در $y/h = 0,286$ (در ۴ سانتی‌متری بالای لبه‌ی سرریزها) توزیع شدت آشفته‌گی نشان می‌دهد که در بالای سرریزهای با دیواره‌ی کسینوسی، شدت آشفته‌گی نسبت به سرریز مستطیلی بیشتر است که این موضوع می‌تواند علت کم شدن ضریب دبی در این نوع سرریز در حالت پر باشد. اگر با افزایش آشفته‌گی، جدایش جریان در لبه‌ی سرریز رخ دهد، باعث کاهش ضریب دبی می‌شود.

لذا مشخص می‌شود که اگر بهترین ارتفاع آبرگیری سرریزهای کسینوسی، ۷۸٪ ارتفاع کل نیم‌سیکل باشد در این صورت ضریب دبی از ضریب دبی سرریز مستطیلی کمتر نمی‌شود. برای درک بهتر موضوع با توجه به شکل ۸،

و نشان داد که تغییرات ضریب دبی به میزان جریان، وابستگی زیادی دارد.

تشکر و قدردانی

با سپاس و تشکر از اعضاء هسته‌ی پژوهشی سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد، که در گردآوری پژوهش حاضر کوشش فراوان کردند.

شدت آشفتگی در قسمت زیر تاج سرریز، میزان اختلاط در جریان افزایش می‌یابد که سبب جلوگیری از رسوبگذاری در بالادست سرریزها می‌شود. نتایج بررسی آشفتگی در سرریزهای کسینوسی حاکی از افزایش مقدار مذکور نسبت به سرریز مستطیلی است. همچنین مقایسه بین مقادیر شدت آشفتگی در مدل‌های آزمایشگاهی با مدل شاهد نشان می‌دهد که شدت آشفتگی در دیوارها تا مقدار $۱۹/۲\%$ افزایش می‌یابد. ضریب دبی نیز با استفاده از تحلیل ابعادی و به کمک رگرسیون خطی به دست آمد

منابع (References)

- Baud, O. and Hager, W.H. "Tornado vortices in settling tanks", *J. Environ.*, **126**(2), pp. 189-191 (2000).
- Ota, K., Sato, T., E Arai, r. and et al. "Local scour upstream of a slit weir: Ordinary differential equation-based model under steady and unsteady flow conditions", *J. Hydraul. Eng.*, **143**(1), pp. (2016).
- Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H. "Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir", *Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(1), pp. 68-76 (2014).
- Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H. "Live-bed scour at submerged weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**(2), pp. (2015).
- Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H. "Live-bed scour at submerged weirs", *Journal of Hydraulic Research*, **54**(2), pp. 172-184 (2015).
- Oreizi, Z., Heidarpour, M. and Bagheri, S. "Hydraulic characteristics of flow over sinusoidal sharp-crested weirs", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **141**(3), pp. (2015).
- Ramamurthy, S.Y., Kai, J. and Han, S.S. "V-Shaped multisite weirs", *ASCE*, (2013).
- Crookston, B.M. and Tullis, B.T. "Arced labyrinth weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, **138**(6), pp. (June, 2012).
- Azimi, A.H., Rajaratnam, N.Z. and Zhu, D. "Water surface characteristics of submerged rectangular sharp-crested weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, **142**(5), pp. (2016).
- Azimi, A.H., Rajaratnam, N.Z. and Zhu, D. "Discharge characteristics of weirs of finite crest length with upstream and downstream ramps", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **139**(1), pp. (2016).
- ADV Field Operation Manual, SonTek Company (2001).
- Brayshaw, A.C., Frostick, L.E. and Reid, I. "Hydrodynamics of particle clusters and sediment entrainment in coarse alluvial channels", *Sedimentology*, **30**(1), pp. 137-143 (1983).
- Roy A.G. Buffin-Belanger, T. and "Effects of a pebble cluster on the structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river", *Geomorphology*, **25**(3-4), pp. 249-267 (1998).
- Cea, L., Puertas, J. and Pena, L. "Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV", *Experiments Fluids*, **42**(3), pp. 333-348 (2007).
- Wilcox, D.C. "Turbulence modeling for CFD", DCW Industries, La Canada, CA (1993).
- Chang, H.H. "Fluvial processes in river engineering", Reprint Ed. Wiley, New York (1998).
- Finelli, C.M., Hart, D.D. and Fonseca, D.M. "Evaluating the spatial resolution of an acoustic Doppler velocimeter and the consequences for measuring near-bed flows", *Limnology and Oceanography*, **44**(7), pp. 1791-1801 (1999).
- Ge, L., Lee, S.O., Sotiropoulos, F. and et al. "3D unsteady RANS modeling of complex hydraulic engineering flows", *II: Model validation and flow physics. J. Hyd. Eng.*, **131**(9), pp. 809-820 (2005).