

## مطالعه آزمایشگاهی آب شستگی ناشی از ترکیب جت‌های موازی و تأثیر فاصله جت‌ها بر نرخ فرسایش

آتوسا لطیفی<sup>۱</sup>

سید عباس حسینی<sup>۲\*</sup>

مجتبی صانعی<sup>۳</sup>

### چکیده

پروژه آب شستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی یک پدیده پیچیده بوده و پارامترهای زیادی در مقدار آن تأثیرگذار هستند. عدم کنترل این پدیده باعث ایجاد خساراتی به سد و سازه‌های هیدرولیکی وابسته به آن می‌شود. در این تحقیق، آب شستگی ناشی از ترکیب جت‌های خروجی از سرریز دریاچه دار به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و ترکیب جت‌ها به صورت مجاور هم و یا با فاصله از هم در داخل حوضچه استغراق و به به صورت غیر برخوردی آزمایش و بررسی گردید. برای این منظور ۲۵ آزمایش بر روی یک مدل آزمایشگاهی صورت پذیرفته و تأثیر پارامترهای مهمی چون دبی جریان، عدد فرود ذرات بستر، عمق پایاب و چگونگی ترکیب جت‌ها بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهند در دبی مساوی جت ترکیبی خروجی از دو دهانه غیر مجاور سرریز یا با فاصله، عمق آب شستگی و ارتفاع تل رسوب و طول کمتری را نسبت به جت خروجی ترکیبی از دو دهانه سرریز مجاور هم یا بدون فاصله دارند. ولی عرض گودال آب شستگی، در حالت ترکیب جت‌های خروجی از سرریز در حالت جت‌های غیر همجوار بیشتر از حالت‌های جت‌های مجاور است. برای مقایسه نتایج آب شستگی یک آزمایش شاهد نیز با عدد فرود مساوی از یک دهانه سرریز انجام گرفت. نتایج حاکی از آن است که میزان عمق ماکزیمم آب شستگی جت‌های همجوار در حدود ۱۷،۴ تا ۱۹،۹ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش می‌یابد و جت‌های غیر همجوار این میزان کاهش را ۳۱ درصد نسبت به حالت شاهد نشان می‌دهند. همچنین در جت‌های همجوار طول گودال آب شستگی ۱۰،۷ تا ۱۲،۷ درصد و در جت‌های غیر همجوار ۱۹،۳ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش مشاهده شد و میزان افزایش عرض آب شستگی نسبت به حالت شاهد در عملکرد سرریز با دو دهانه همجوار ۱۵ الی ۱۷،۵ درصد و در دو دهانه غیر همجوار این میزان افزایش، ۲۶،۷ درصد است.

### واژه‌های کلیدی:

جت‌های همجوار، جت‌های غیر همجوار، حوضچه استغراق، گودال آب شستگی

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، abbas\_hoseyni@srbiau.ac.ir

۳. دانشیار، گروه مهندسی رودخانه و حفاظت سواحل، پژوهشکده مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران



## مقدمه

متر)،  $x, y, z$  و  $k$  ضریب و توان‌های ثابتی هستند که مقادیر آن‌ها در روابط مختلف متفاوت هستند. مقادیر هر یک از ضرایب در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقادیر مختلف ضرایب ثابت روابط

| محقق      | k     | x    | y     |
|-----------|-------|------|-------|
| دامل A-   | ۰.۶۵۲ | ۰.۵  | ۰.۵   |
| دامل B-   | ۰.۵۴۳ | ۰.۵  | ۰.۵   |
| دامل C-   | ۰.۳۶۵ | ۰.۵  | ۰.۵   |
| ورونس-B   | ۱.۹   | ۰.۵۴ | ۰.۲۲۵ |
| مارتینز-B | ۱.۵   | ۰.۶  | ۰.۱   |
| سوفرلک    | ۲.۳   | ۰.۶  | ۰.۱   |

در هیدرولیک رودخانه، فرسایش مصالح آبرفتی و سنگ‌های ضعیف از اهمیت خاصی برخوردار است و به همین علت پیش‌بینی روند آب شستگی اطراف سازه‌های هیدرولیکی از مسائل مهم بشمار می‌رود. پدیده آب شستگی در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی سدها از موضوعات مهم در پایداری سدها است. آب شستگی پایین‌دست سدها می‌تواند ناشی از پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش و جت‌های ریزشی در حوضچه‌های استغراق باشد. در شرایط سیلابی امکان ایجاد هم‌زمان جت‌های ریزشی در سدها وجود دارد و ترکیب آن‌ها می‌تواند موجب عدم پایداری سازه‌های هیدرولیکی شود و تهدیدی بر پایداری شیب‌های سواحل و کف رودخانه در پایین‌دست سدها و سایر سازه‌های هیدرولیکی گردد. تحقیقات زیادی در مهروموم‌های گذشته در مورد خصوصیات هندسی گودال آب شستگی برای جت‌های برخوردی منفرد انجام شده است.

دامل<sup>۱</sup> (۱۹۶۶)، ورونس<sup>۲</sup> (۱۹۷۳)، مارتینز<sup>۳</sup> (۱۹۷۵)، سوفرلک<sup>۴</sup> (۲۰۰۶) یک فرم عمومی به شکل معادله (۱) را برای تخمین عمق آب شستگی در پایین‌دست جت‌های ریزشی آزاد پیشنهاد داده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش دبی و ارتفاع ریزش جت، ابعاد گودال آب شستگی افزایش می‌یابد در معادله:

(۱)

$$y_s = kq^x H^y$$

$y_s$ : حداکثر عمق آب‌شستگی از سطح اولیه بستر (متر)،  $d$ : اندازه-ی قطر مشخصه مصالح بستر (متر)،  $H$ : ارتفاع ریزش جت (متر)،  $Q$ : دبی بر واحد عرض سرریز (مترمکعب در ثانیه بر

و بری<sup>۵</sup> (۱۹۹۷)، کاپنا و هگر<sup>۶</sup> (۲۰۰۳) و پاگلیرا و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۴) نشان دادند پروسه آب شستگی به پارامترهای مختلفی مانند دبی جت خروجی، عدد فرود جریان، عمق پایاب و خصوصیات رسوب بستگی دارد. ادیریجیج<sup>۸</sup> و<sup>۹</sup> (۱۹۹۶)، قدسیان و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۶) نشان دادند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر گودال آب شستگی، عدد فرود<sup>۱۰</sup> چگالی ناشی از برخورد جت است. علی و لیم<sup>۱۱</sup> (۱۹۸۶)، صراحتی و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۸)، مهرآیین و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۰) و صانعی و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۳) نشان دادند که با افزایش عمق پایاب، ماکزیمم عمق آب شستگی ناشی از جت منفرد کاهش می‌یابد ولی یک مقدار حدی برای عمق پایاب در نظر گرفتند که با افزایش عمق پایاب تا آن حد، حداکثر عمق آب شستگی افزایش یافته و پس از آن با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آب شستگی کاهش می‌یابد. نگام<sup>۱۵</sup> (۱۹۹۵) به آنالیز خصوصیات و ضریب دبی جریان ترکیبی دو جت ریزشی از روی سرریز و زیر دریچه مستطیلی شکل با اشکال هندسی نامساوی پرداخت. در این تحقیق جت‌ها در داخل

<sup>۹</sup> Ghodsian et al<sup>۱۰</sup> Froude number<sup>۱۱</sup> Ali and Lim<sup>۱۲</sup> Sarahathi et al<sup>۱۳</sup> Mehraein et al<sup>۱۴</sup> Saneie et al<sup>۱۵</sup> Negam<sup>۱</sup> Damle<sup>۲</sup> Veronese<sup>۳</sup> Martinz-B<sup>۴</sup> Sofrelec<sup>۵</sup> Rajaratnam and Berry<sup>۶</sup> Capena and Hager<sup>۷</sup> Pagliara et al<sup>۸</sup> Aderibigbe and Rajaratnam

جت منفرد، عدد فرود ذرات بستر جت‌های برخوردی، عمق پایاب و فاصله افقی بین جت‌های برخوردی از جت دیواره‌ای وابسته است. معادله بی‌بعدی را که مشتمل بر عدد فرود جت منفرد، عدد فرود ذرات بستر جت‌های برخوردی و عمق پایاب بود برای عمق آب شستگی پیشنهاد نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با افزایش عمق پایاب و افزایش فاصله افقی بین جت‌های برخوردی از جت دیواره‌ای اول عمق آب شستگی کاهش می‌یابد و طول گودال آب شستگی و فاصله افقی بین رسوب و جت دیواره‌ای اول افزایش می‌یابد.

پاگلیرا و پالرمو<sup>۵</sup> (۲۰۱۷) آزمایش‌های خود را بر روی جت‌های ترکیبی با زاویه‌های مختلف و عمق پایاب متفاوت انجام دادند که در آزمایش‌های آن‌ها جت‌ها زیر سطح پایاب و داخل حوضچه استغراق با هم برخورد کرده و نتایج نشان داد پارامتر مهم و تأثیرگذار بر گودال آب شستگی فاصله برخورد جت‌ها از زیر سطح بستر کانال و عمق پایاب است. با مرور بر مطالعات پیشین ملاحظه می‌گردد تحقیقات در مورد تأثیر مکانیسم آب شستگی بر اثر عملکرد هم‌زمان و ترکیبی جت‌ها، بسیار محدود است. در تحقیقات قبلی عمدتاً ترکیب جت از زیر و روی دریاچه مورد توجه قرار گرفته است؛ اما در این تحقیق سعی گردیده مکانیسم آب شستگی در حالت ترکیب جت‌های ریزشی آزاد از نوع غیر برخوردی (ترکیب در حوضچه) مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گیرد و تأثیر فاصله جت‌ها بر مشخصه‌های آب شستگی مورد ارزیابی واقع شود. ترکیب جت‌ها در سرریزهای دریاچه دار که در مواقع سیلابی یک و یا چند دهانه سرریز وارد عمل می‌شوند، رخ می‌دهد. این موضوع عمدتاً در سدهایی که جریان خروجی سرریز دریاچه دار یا همان جت ریزشی از یک یا چند دهانه به پایین‌دست رها می‌شود، اتفاق افتاده و می‌توان با باز نمودن یک یا دو دریاچه سرریز، ترکیب جت‌ها یا هم‌زمانی ترکیب جت‌ها را به صورت غیر خوردی مشاهده نمود. لذا بررسی آب شستگی پایین‌دست سد در صورت وقوع هر یک از حالت‌های فوق امری ضروری بوده که تاکنون در تحقیقات انجام شده قبلی مورد توجه

حوضچه آرامش با یکدیگر برخورد می‌کردند. اویماز<sup>۱</sup> (۱۹۹۵) گودال آب شستگی پایین‌دست جریان عبوری از زیر و روی یک دریاچه را مطالعه کرد و با حالت جت منفرد از روی دریاچه مقایسه نمود و معادله‌ای برای تخمین عمق آب شستگی با دو نوع دانه‌بندی رسوب پیشنهاد کرد. وی نشان داد ماکزیمم عمق آب شستگی جت‌ها از روی دریاچه بیشتر از زیر دریاچه است. دهقانی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) مطالعه آزمایشگاهی عمق آب شستگی پایین‌دست جت عبوری از زیر و روی یک دریاچه و ترکیب جت‌ها به طور هم‌زمان را در حوضچه استغراق در حالت جریان مستغرق انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که ماکزیمم عمق و طول آب شستگی در شرایط یکسان در جت عبوری از روی سرریز بیشتر از جت ترکیبی و جت عبوری از زیر دریاچه است. پاگلیرا و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۱) به مقایسه آب شستگی پایین‌دست دو جت متقارن برخوردی با جت منفرد پرداختند. در تحقیق آن‌ها جت‌ها قبل از رسیدن به حوضچه استغراق با یکدیگر برخورد می‌کردند. نتایج نشان داد طول و عمق گودال آب شستگی به عدد فرود ذرات بستر، تغییرات عمق پایاب و زاویه بین دو جت برخوردی بستگی داشته و زاویه بین دو جت نقش مهم‌تری را در مشخصه های آب شستگی به عهده دارد. در این تحقیق جت‌ها بالاتر از سطح پایاب با یکدیگر برخورد می‌کنند و با افزایش زاویه بین جت‌ها، مؤلفه‌های سرعت دو جت در جهت‌های مخالف هم به یکدیگر برخورد کرده و باعث کاهش فرسایش و در نتیجه کاهش عمق آب شستگی نسبت به جت منفرد با همان دبی می‌شوند. مهرآیین و قدسیان<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) به مطالعه آب شستگی پایین‌دست جت‌های دیواره‌ای برخوردی با مقطع دایره‌ای پرداختند. مشاهدات آن‌ها نشان داد گودال آب شستگی بوجود آمده شامل دو قسمت بوده که اولین قسمت آب شستگی ناشی از جت دیواره‌ای منفرد و دومین قسمت آب شستگی ناشی از جت دیواره‌ای دوم که با زاویه ۹۰ درجه با جت دیواره‌ای اول برخورد می‌کند. آن‌ها نشان دادند که دو عمق ماکزیمم آب شستگی بوجود آمده از جت منفرد و برخوردی به عدد فرود ذرات بستر

<sup>۴</sup> Mehraein and Ghodsian

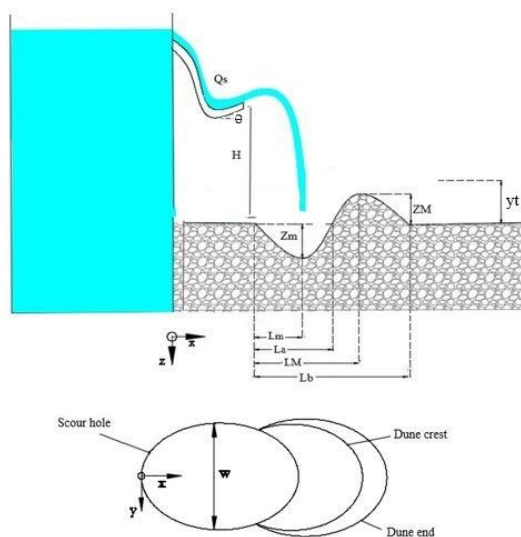
<sup>۵</sup> Pagliara and Palermo

<sup>۱</sup> Uymaz

<sup>۲</sup> Dehghani et al

<sup>۳</sup> Pagliara et al

سرریز مستطیلی که در انتهای کانال واقع است تنظیم و اندازه‌گیری می‌شود. مشخصات آزمایشگاهی در شکل شماره (۱) آورده شده است. زمان تعادل آزمایش‌های که گودال آب شستگی به تعادل می‌رسد بر اساس آزمایش‌های شاهد انجام شده، ۲ ساعت است. به منظور کفایت زمان انجام آزمایش‌ها جهت رسیدن به زمان تعادل نسبی، آزمایش‌های شاهد تا ۷ ساعت انجام شد. بعد از قطع جریان وقتی گودال زهکشی شد ماکزیمم عمق آب شستگی، طول و عرض گودال و رسوب بعد از آن به صورت سه‌بعدی برداشت شد. برای برداشت سه‌بعدی گودال و رسوب از متر لیزری استفاده شده است. به این منظور از یک قاب ثابت به ابعاد ۵,۲ متر طول، ۴ متر عرض استفاده شده و طول و عرض آن به مش‌های ۲۰ سانتی‌متر تقسیم شده و از یک ریل متحرک، مجهز به متر لیزری کمک گرفته و X, Y, Z هر نقطه از گودال و رسوب بعد از آن به فاصله هر ۲۰ سانتی‌متر یکبار اندازه‌گیری شد. بعد از اتمام هر آزمایش پمپ را خاموش کرده و شرایط هیدرولیکی و تسطیح بستر، برای آزمایش بعد آماده شد. شکل شماره (۲) نحوه تشکیل و ترکیب جت‌ها در حوضچه استغراق را نشان می‌دهد.



شکل (۱): مشخصات و پارامترهای مرتبط با آزمایش‌های تحقیق

قرار نگرفته است. این تحقیق در صدد آن است که بررسی نماید با نحوه ترکیب جت‌های خروجی از دریچه‌های سرریز چگونه می‌توان میزان و نحوه تشکیل گودال آب شستگی را کنترل و یا کاهش داد. ترکیب جت‌ها در این تحقیق به صورت ترکیب جت‌های موازی خروجی از سرریز که تنها گردابه‌های ناشی از آن‌ها در حوضچه استغراق با هم تداخل پیدا می‌کنند، است.

## روش تحقیق

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک مرکز تحقیقات آب ایران بر روی چیدمان اولیه مدل فیزیکی سد چم شیر انجام شد. ۲۵ آزمایش در یک حوضچه استغراق به طول ۸,۶ متر، عرض ۶,۴ متر و ارتفاع ۱,۱ متر انجام شد. کانال با رسوبات یکنواخت تا ارتفاع ۰,۹ متر از جنس شن درشت با قطر میانه  $d_{50}=15\text{mm}$ ، چگالی  $2,65 \text{ gr/cm}^3$  و انحراف استاندارد ۱,۱ به صورت افقی پوشانده شد. یک دریچه کشویی در انتهای کانال وجود داشته که سطح پایاب را کنترل می‌کند. این مدل دارای سیستم آب‌رسانی شامل دو پمپ سانتریفیوژ و لوله‌ها به همراه اتصالات مربوطه برای کنترل دبی جریان است. جریان از طریق لوله‌ها ابتدا به کانال آرام‌کننده مخزن وارد شده و پس از عبور از صفحات فلزی مشبک و از بین رفتن آشفتگی‌های سطحی، وارد مخزن می‌شود. مخزن در بالادست به ابعاد ۶,۸ متر طول و ۶,۵ متر عرض و ۴ متر ارتفاع است. جریان توسط کانال ورودی وارد کانال تقرب سرریز می‌شود. سرریز به صورت دریچه دار از جنس پلکسی‌گلاس<sup>۱</sup> شفاف ساخته شده و دارای سه دریچه بوده و جریان پس از عبور از سرریز، وارد شوت با شیب ثابت ۱۶ درصد شده و در انتها توسط فلیپ باکت<sup>۲</sup> با زاویه پرتاب ۲۵ درجه به پایین دست پرتاب می‌گردد. فلیپ باکت دارای سه سطح مقطع مساوی (مستطیلی) به عرض ۲۲ سانتی‌متر است. تراز فلیپ باکت ۱,۴۵ متر بالاتر از سطح حوضچه استغراق قرار دارد. بدین وسیله می‌توان دو جت موازی ریزشی را به وسیله خروج از دو دهانه سرریز ایجاد نمود. جریان به صورت مساوی بین دهانه های سرریز تقسیم می‌شود. عمق پایاب و دبی‌های ورودی توسط

<sup>۲</sup> Flip Bucket

<sup>۱</sup> Plexiglass

### تجزیه و تحلیل نتایج

جریان خروجی از سرریزها به دلیل تبدیل هد بالای جریان، تشکیل یک جریان فوق بحرانی داده که دارای سرعت و انرژی زیادی است و این انرژی در صورتی که به صورت کنترل نشده رها گردد در اثر برخورد جریان به بستر پایین دست می تواند فرسایش قابل توجهی ایجاد نماید؛ بنابراین سعی می گردد جریان خروجی از سازه های هیدرولیکی به صورت کنترل شده به داخل حوضچه استغراق در پایین دست رها شده که در این حالت جریان آشفته تشکیل یکسری گردابه در محدوده بستر را می دهد و این در کندن بستر، معلق کردن و انتقال رسوبات نقش مهمی بازی می کند. ذرات رسوبی توسط جریان به پایین دست حمل و در فاصله اندکی از محل برخورد جت ته نشین می شوند و در نتیجه تپه ای از رسوب در پایین دست گودال تشکیل می گردد. با توجه به توسعه زمانی آب شستگی باید زمانی طی شود که گودال و رسوب بعد از آن به حالت تعادل رسیده و دیگر ذرات قادر به خروج از درون گودال نباشند که این همان زمان تعادل آزمایش است. در این تحقیق آزمایش های شاهد به مدت ۷ ساعت (۴۲۰ دقیقه) جهت بررسی توسعه زمانی آب شستگی و تعیین زمان تعادل انجام پذیرفت. در تمام آزمایش ها مشاهده شد که در ۳۰ دقیقه ابتدایی آزمایش، سرعت آب شستگی بالا بوده و با گذشت زمان، به علت مستهلک شدن انرژی سیال از شدت گردابه ها و تنش برشی مؤثر بر ذرات در کف بستر و در گودال آب شستگی کاسته می شود و نهایتاً پس از دو ساعت گودال و عمق آب شستگی به تعادل می رسد. تغییرات ماکزیمم عمق آب شستگی نسبت به زمان به ازای دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه در حالت های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج مشابهی به ازای دبی های ۲۶-۳۶ و ۷۲ لیتر بر ثانیه به دست آمد. بر این اساس کلیه مشخصات آب شستگی شامل عمق طول و عرض گودال، ارتفاع تل رسوب، پروفیل های طولی و عرضی گودال و تل رسوب در حالت های مختلف برداشت گردید.

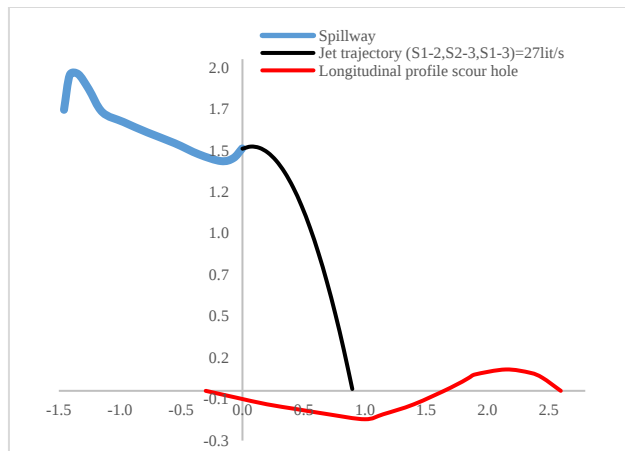
برای آگاهی از شکل جت پرتابی، پروفیل طولی جت و مشخصات هندسی جت های پرتابی، به ازای دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه برای حالت شاهد و جت های همجوار و غیر همجوار (هر دهانه ۲۷ لیتر در ثانیه) ترسیم گردید. با استفاده از این نتایج می توان برد جت ها، موقعیت برخورد جت ها به پایاب را ارزیابی نمود. در شکل های (۴) و (۵) مشاهده می شود که با عبور دبی از یک دهانه، عمق



شکل (۲): نحوه تشکیل و ترکیب جت های موازی

در شکل (۱)  $Z_m$ : ماکزیمم عمق آب شستگی،  $Z_M$ : ماکزیمم عمق تل رسوب بعد از گودال آب شستگی،  $L_m$ : طول متناظر با ماکزیمم عمق آب شستگی،  $L_a$ : طول گودال آب شستگی،  $L_M$ : طول متناظر با ماکزیمم عمق تل رسوب بعد از گودال آب شستگی،  $L_b$ : طول کل گودال آب شستگی و رسوب بعد از آن،  $W_m$ : ماکزیمم عرض آب شستگی،  $Q_s$ : دبی سرریز،  $y_t$ : عمق پایاب،  $H$ : ارتفاع خروجی جت تا محل برخورد جت با رسوبات بستر است.

۲۵ آزمایش مطابق با شرایط هیدرولیکی مختلف در حالت جت ترکیبی سرریز (ترکیب جت ها در داخل حوضچه آرامش و از نوع غیر برخوردی) انجام پذیرفت. با دبی های ۱۸،۳۶،۵۴،۷۲ لیتر بر ثانیه عبوری از دو دریچه سرریز انجام شده که دبی ها به قسمت مساوی از دو دریچه عبور کرده و یک دریچه سرریز بسته است به عبارت دیگر از هر دهانه سرریز دبی ۹،۱۸،۲۷،۳۶ لیتر بر ثانیه عبور می کند. دریچه های سرریز به ترتیب از چپ به راست  $S(1)$ ،  $S(2)$ ،  $S(3)$  نام گذاری شده اند. جریان پس از عبور از دریچه سرریز به شوت و سپس به جام پرتابی منتقل شده و تشکیل یک جت ریزشی می دهد.  $S(1-2)$  بیانگر حالتی که جریان از دریچه ۱ و ۲،  $S(2-3)$  بیانگر حالتی که جریان از دریچه ۲ و ۳ سرریز و  $S(1-3)$  حالتی که جریان از دریچه ۱ و ۳ سرریز عبور می کند؛ است. برای مقایسه نتایج خصوصیات آب شستگی آزمایش شاهد با دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه عبوری از یک دریچه سرریز انجام شد.



شکل (۵): پروفیل جت خروجی سرریز برای عملکرد دو دهانه به ازای دبی ۲۷ لیتر بر ثانیه برای هر دهانه همراه با پروفیل طولی آبشستگی

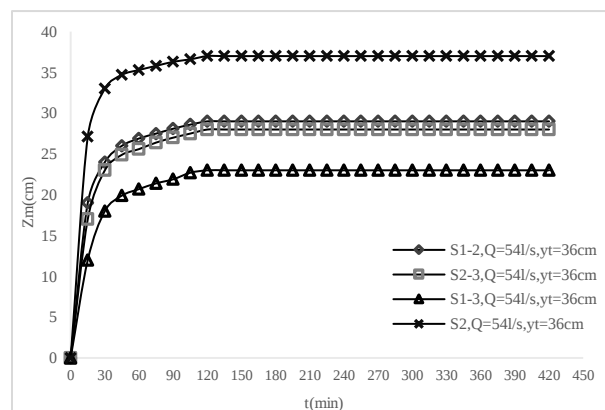
### آنالیز ابعادی

اگر  $\phi$  خصوصیات گودال آب شستگی باشد که شامل ماکزیمم عمق آب شستگی  $Z_m$ ، طول ماکزیمم گودال آب شستگی  $L_m$  و عرض گودال آب شستگی  $W_m$  اشد می‌توان نوشت:

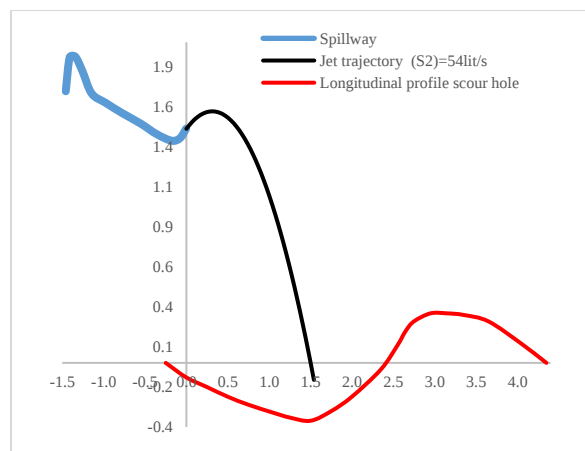
$$\phi = f(q_{s1}, q_{s2}, q_{s3}, \mu, \gamma_t, d_{50}, g, \rho_s, \rho_w, R, \cos\theta, \gamma_{s1}, \gamma_{s2}, \gamma_{s3}, h_f, H) \quad (2)$$

که در معادله (۱)  $q_{s1}$  دبی جریان در واحد عرض دریچه ۱ سرریز  $q_{s2}$  (m<sup>2</sup>/sec) دبی جریان در واحد عرض دریچه ۲ سرریز  $q_{s3}$  (m<sup>2</sup>/sec) دبی جریان در واحد عرض دریچه ۳ سرریز  $d_{50}$  (m<sup>2</sup>/sec) قطر متوسط مصالح بستر  $\theta$  (mm): زاویه فلیپ باکت،  $g$ : شتاب جاذبه  $\rho_s$  (m/sec<sup>2</sup>): چگالی رسوب بستر  $\rho_w$  (kg/m<sup>3</sup>): چگالی آب  $\mu$  (kg/m<sup>3</sup>): لزجت دینامیکی آب  $\gamma_t$  (N.m/sec): عمق پایاب  $\gamma_{s1}$  (m): عمق آب روی فلیپ باکت دریچه یک سرریز  $\gamma_{s2}$  (m): عمق آب روی فلیپ باکت دریچه دو سرریز  $\gamma_{s3}$  (m): عمق آب روی فلیپ باکت دریچه سه سرریز  $H$ : (m) فاصله ارتفاعی جت خروجی از سرریز تا سطح بستر حوضچه استغراق  $h_f$  (m): فاصله عمودی بین لبه فلیپ باکت سرریز با سطح بستر حوضچه استغراق  $R$ : (m) شعاع هیدرولیکی فلیپ باکت سرریز (m) است. با توجه به اینکه  $q_{s1} = q_{s2} = q_{s3}$  و رابط (۳)، لذا

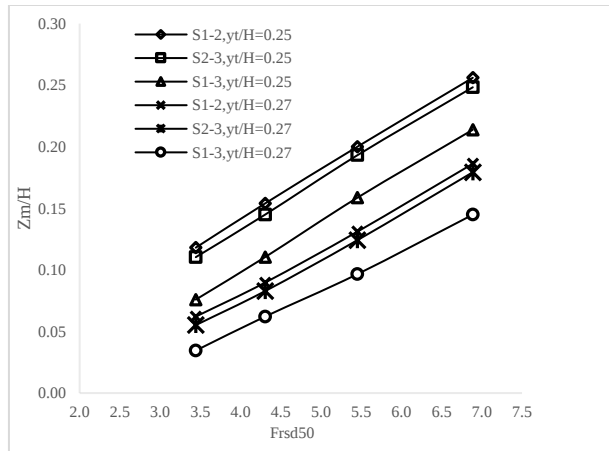
آبشستگی نسبت به حالتی که همان دبی بین دو دهانه سرریز به‌طور مساوی تقسیم می‌شود افزایش یافته و به دلیل افزایش فاصله برخورد جت با کف، محل ماکزیمم عمق آبشستگی در فاصله دورتری از سرریز تشکیل شده است. ضمناً محل ماکزیمم عمق آبشستگی تقریباً در راستای برخورد جت با کف شکل گرفته است.



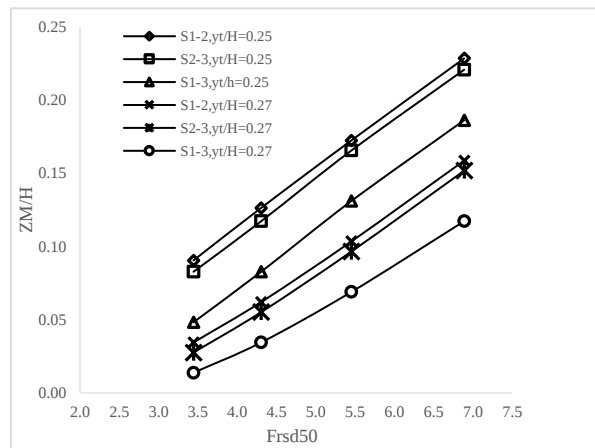
شکل (۳): تغییرات ماکزیمم عمق آبشستگی نسبت به زمان به ازای دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه در حالت‌های مختلف



شکل (۴): پروفیل جت خروجی سرریز برای عملکرد یک دهانه به ازای دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه برای هر دهانه همراه با پروفیل طولی آبشستگی



شکل (۶) ماکزیمم عمق بی بعد آب شستگی برای جت های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی بعد پایاب ۰,۲۵ و ۰,۲۷



شکل (۷) ماکزیمم ارتفاع بی بعد تپه رسوب برای جت های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی بعد پایاب ۰,۲۵ و ۰,۲۷

#### مقایسه و بحث با نتایج تحقیقات قبلی

جهت ارزیابی داده های برداشت شده آزمایشگاهی ماکزیمم عمق آبشستگی در حالت خروج جت از یک دریچه سرریز و دو دریچه سرریز با روابط پیش بینی کننده عمق ماکزیمم آبشستگی که در جدول (۱) آورده شده است از روابط دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، ورونس (B)، مارتینز (B) و سوفرلک به دلیل وجود پارامترهای مشترک نظیر هد کلی و دبی در واحد عرض استفاده شد. برای ارزیابی معادلات گزینش شده رابطه ای در قالب معادله

سرعت های جریان نیز در فلیپ باکت سه دریچه سرریز با هم برابر می شود.

$$V_{s1} = V_{s2} = V_{s3} \quad (۳)$$

$$V_{si} = 2V_{s1} \quad (۴)$$

برای محاسبه عدد فرود برای حالت ترکیب دو جت در داخل حوضچه یا جت های غیر برخوردی از جمع جبری سرعت ها استفاده شده است. با استفاده از تئوری باکینگهام<sup>۱</sup> و حذف مقادیر ثابت شامل  $h_f$ ,  $\theta$  و  $R$  در فرآیند آزمایش های این تحقیق و با صرف نظر نمودن از عدد رینولدز  $Re$  به علت آشفتگی جریان و بی تأثیر بودن آن بر خصوصیات آب شستگی، معادله (۶) حاصل می شود.

$$f\left(Fr_{sd50}, R_e, \frac{y_t}{H}, \frac{R}{H}, \frac{h_f}{H}, \cos\theta, \frac{\phi}{H}\right) \quad (۵)$$

$$\frac{\phi}{H} = f\left(Fr_{sd50}, \frac{y_t}{H}\right) \quad (۶)$$

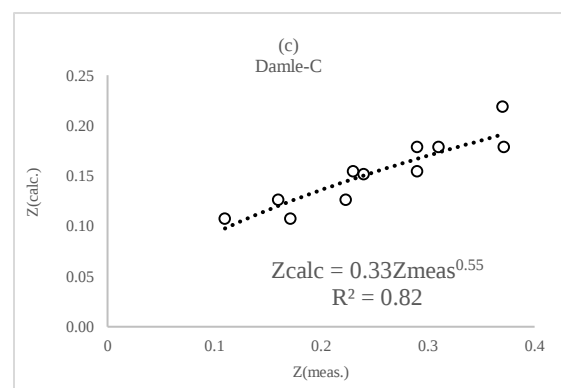
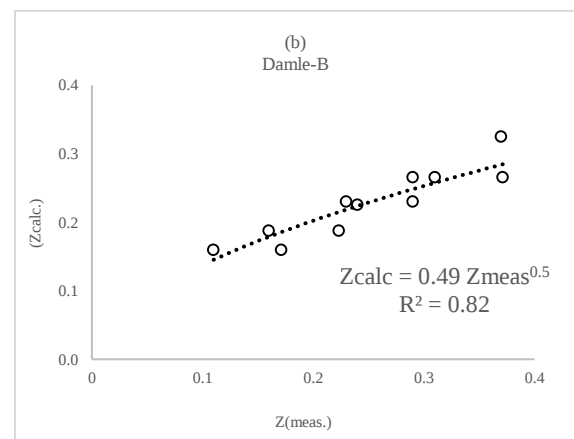
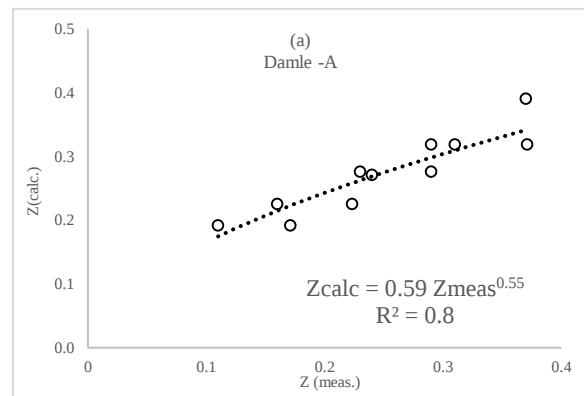
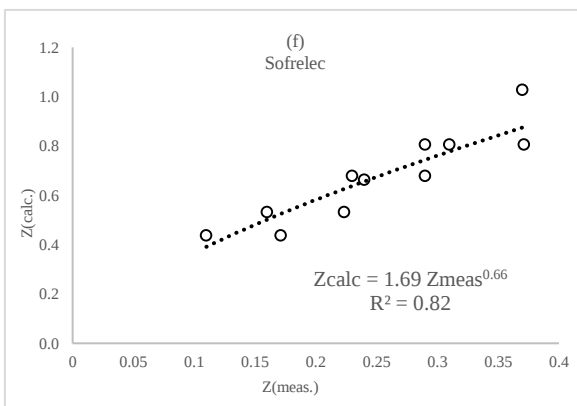
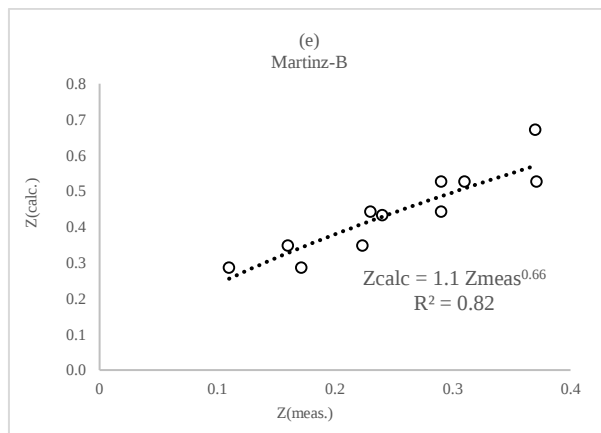
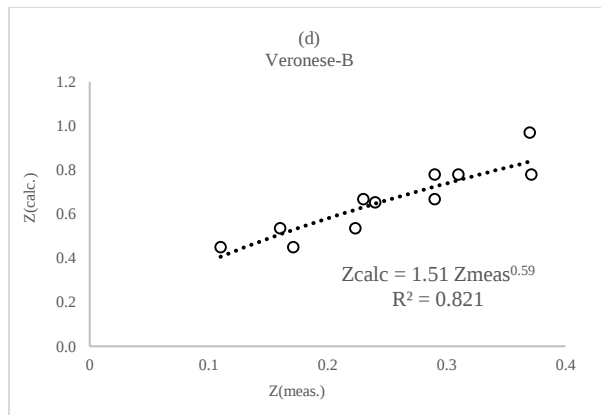
یکی از مهم ترین پارامترهای آب شستگی ماکزیمم عمق گودال آب شستگی و ارتفاع تل رسوب است. در شکل (۶) و (۷) ماکزیمم عمق آب شستگی و تل رسوب بعد از آن برای حالت های جت های ترکیبی خروجی از دو دریچه سرریز S(1-2)، S(2-3)، S(1-3) در دو عمق پایاب بی بعد ۰,۲۵ و ۰,۲۷ مقایسه شده اند. به طور کلی نتایج نشان می دهد که عمق ماکزیمم آب شستگی و ارتفاع رسوب با افزایش عدد فرود چگالی ذرات بستر افزایش می یابد. در شکل های (۶) و (۷) مشاهده می گردد که برای ترکیب جت های ریزشی خروجی از سرریز به صورت مجاور هم یا همان حالت های S1-2 و S2-3 عمق ماکزیمم آب شستگی و ارتفاع رسوب بعد از آن بیشتر از حالت S1-3 یا همان جت های غیر همجوار یا فاصله دار است.

<sup>۱</sup> Buckingham

(۷) برای مقایسه عمق آبشستگی محاسبه‌شده از روابط تجربی و مقادیر مشاهداتی آزمایشگاهی به کار گرفته می‌شود.

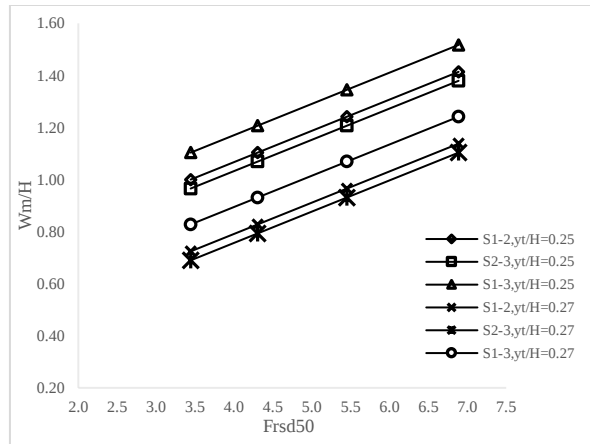
$$Z_{cal} = K(Z_{meas})^s \quad (۷)$$

شکل (۸) تخمین عمق آبشستگی با استفاده از روابط دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، ورونس (B)، مارتینز (B) و سوفرلک را همراه با مقادیر ضرایب S و K و مقادیر ضریب همبستگی  $R^2$  را نشان می‌دهد.



شکل (۸) مقایسه داده‌های آزمایشگاهی ماکزیم عمق آبشستگی نسبت به داده‌های محاسباتی از (a): رابطه دامل (A)، (b): رابطه دامل (B)، (c): رابطه دامل (C)، (d): رابطه ورونس (B)، (e): رابطه مارتینز (B)، (f): رابطه سوفرلک

با توجه به معادلات به‌دست‌آمده که دارای ضریب همبستگی خوبی می‌باشند می‌توان از روابط دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، ورونس (B)، مارتینز (B) و سوفرلک جهت محاسبه



شکل (۱۰) ماکزیمم عرض بی بعد آب شستگی برای جت های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی بعد پایاب ۰,۲۷ و ۰,۲۵

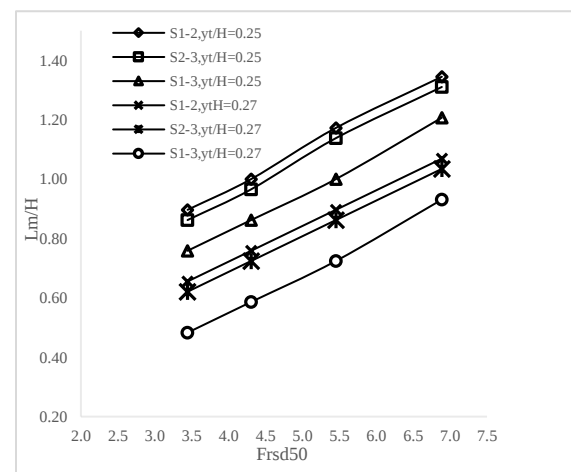
برای مقایسه نتایج آب شستگی یک آزمایش شاهد نیز با عدد فرود مساوی از یک دهانه سرریز انجام گرفت. در جدول (۲) نتایج مربوط به عمق آب شستگی و ارتفاع تل رسوب بعد از آن در حالت های مختلف نسبت به آزمایش شاهد مقایسه شده است. مشاهده می گردد در حالتی که جت ها در مجاور هم قرار گرفته میزان آب شستگی در حدود ۱۷,۴ تا ۱۹,۹ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش می یابد حال آنکه اگر جت ها به صورت غیرهمجوار خارج شوند این میزان کاهش به ۳۱ درصد نسبت بحالت شاهد می رسد. رفتار مشابهی نیز در خصوص ارتفاع تل رسوب پس از گودال نیز مشاهده می گردد. خلاصه نتایج برای حالت های مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مقایسه عمق آب شستگی و ارتفاع تل رسوب برای ترکیب جت ها در حالت های مختلف نسبت به حالت شاهد

| jet  | Fr  | yt/H | Zm/H | ZM/H | درصد کاهش عمق آب شستگی نسبت به حالت شاهد | درصد کاهش عمق آب شستگی نسبت به حالت شاهد |
|------|-----|------|------|------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| S2   | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۰,۳۱ | ۰,۲۸ | -                                        | -                                        |
| S1-2 | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۰,۲۶ | ۰,۲۳ | ۱۷,۴                                     | ۱۸,۴                                     |
| S2-3 | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۰,۲۵ | ۰,۲۲ | ۱۹,۹                                     | ۲۱,۲                                     |
| S1-3 | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۰,۲۱ | ۰,۱۹ | ۳۱                                       | ۳۳,۵                                     |

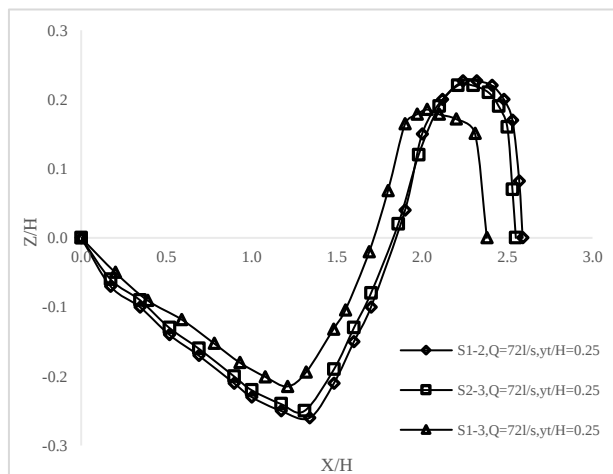
ماکزیمم عمق آب شستگی در حالتی که سرریز به صورت یک دهانه و یا دو دهانه باز عمل می کند استفاده نمود.

در شکل (۹) و (۱۰) تغییرات ماکزیمم طول گودال آب شستگی  $L_m$  و تغییرات ماکزیمم عرض گودال آب شستگی  $W_m$  برای جت های ترکیبی سرریز یا همان S1-2, S2-3, S1-3 به ازای اعداد فرود مختلف و برای دو عمق پایاب بی بعد ۰,۲۵ و ۰,۲۷ نشان داده شده است. رفتار تقریباً مشابهی با عمق گودال آب شستگی مشاهده می گردد. بدین معنی که با افزایش عمق پایاب برای جت های ترکیبی سرریز، طول و عرض گودال کاهش می یابد و با افزایش دبی جت های ریزی و به تبع آن افزایش عدد فرود ذرات بستر، طول و عرض گودال افزایش یافته است. در خصوص طول گودال آب شستگی، در حالت ترکیب جت های خروجی از سرریز در داخل حوضچه، در حالت S1-2 و S2-3 یا همان جت های مجاور و چسبیده به هم طول ماکزیمم آب شستگی بیشتر از حالت S1-3 یا غیرهمجوار است. در مورد عرض گودال آب شستگی، در حالت ترکیب جت های خروجی از سرریز در حالت S1-3 یا همان جت های غیرهمجوار عرض ماکزیمم آب شستگی بیشتر از حالت های S1-2 و S2-3 است.



شکل (۹) ماکزیمم طول بی بعد آب شستگی برای جت های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی بعد پایاب ۰,۲۷ و ۰,۲۵

از دو حالت قبل است. لیکن در حالت S1-3 که جت‌ها به صورت غیر همجوار و بافاصله از دو دهانه سرریز خارج می‌گردند مشخصه‌های طولی آب شستگی کاهش می‌یابد. به نحوی که برای دبی ۷۲ لیتر ثانیه که به صورت مساوی بین دو دهانه سرریز تقسیم می‌شود با عمق پایاب ۳۶ سانتی‌متر، میزان کاهش عمق آب شستگی و ارتفاع تل رسوبات به ترتیب ۸ و ۱۴ درصد نسبت به حالت جت‌های همجوار است. طول گودال و تل رسوبات نیز در حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. علت این موضوع آن است که زمانی که جت‌های خروجی از سرریز از هم فاصله می‌گیرند اثرات متقابل آن‌ها بر همدیگر بسیار کاهش یافته و ناچیز می‌گردد اما در جت‌های خروجی از سرریز در حالت همجوار با کاهش فاصله انرژی در داخل حوضچه استغراق اثر تقویتی بر هم داشته و باعث افزایش عمق آب شستگی می‌گردند.



شکل (۱۱): مقایسه پروفیل‌های طولی آب شستگی برای جت ترکیبی خروجی از دو دهانه سرریز با دبی مجموع ۷۲ لیتر بر ثانیه به ازای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵

در شکل شماره (۱۲) پروفیل عرضی گودال آب شستگی برای ترکیب غیر برخوردی جت‌های ریزشی سرریز به صورت همجوار و غیر همجوار یا بافاصله برای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵ ارائه گردیده است. ملاحظه می‌گردد عمق آب شستگی در حالت S1-3 کمتر از S2-3 و S1-2 است همان‌طور که قبلاً نیز بیان گردید حفظ عملکرد مستقل گردها در حالتی که جت‌های ریزشی دور از هم قرار گرفته‌اند باعث شده ماکزیمم عمق آب شستگی کاهش یابد. درحالی‌که برای جت‌های همجوار، اثر

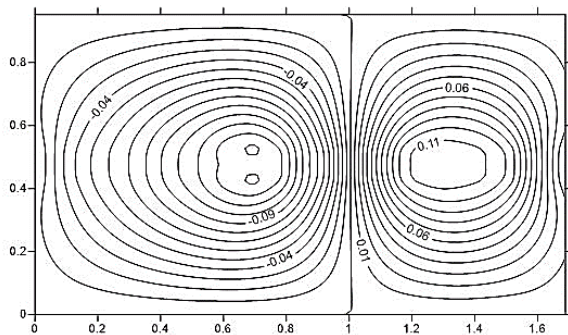
در جدول (۳) طول و عرض گودال آب شستگی در حالت جت تک بعنوان حالت شاهد با تفکیک دبی خروجی به دو جت همجوار و غیر همجوار و بافاصله مورد مقایسه قرار گرفته است. ملاحظه می‌گردد با عبور دبی خروجی سرریز به دو دهانه هم‌جوار مشخصه طول گودال آب شستگی حدوداً ۱۰,۷ تا ۱۲,۷ درصد کاهش می‌یابد. در حالتی که دو دهانه غیر هم‌جوار سرریز شروع به عملکرد می‌نماید این میزان کاهش ۱۹,۳ خواهد بود. در مورد عرض آب شستگی کاملاً قابل پیش‌بینی است که ترکیب جت‌ها عرض آب شستگی را افزایش می‌دهد و هر چقدر جت‌ها دورتر از هم قرار گیرند عرض آب شستگی افزایش بیشتری خواهد داشت. بر این اساس میزان افزایش عرض آب شستگی نسبت به حالت شاهد در عملکرد سرریز با دو دهانه همجوار حدوداً ۱۵ الی ۱۷,۵ درصد است. در حالتی که دو دهانه غیر هم‌جوار سرریز شروع به عملکرد نماید این میزان افزایش ۲۶,۷ درصد خواهد بود.

جدول (۳): مقایسه طول و عرض آب‌شستگی برای ترکیب جت‌ها در حالت‌های مختلف نسبت به حالت شاهد

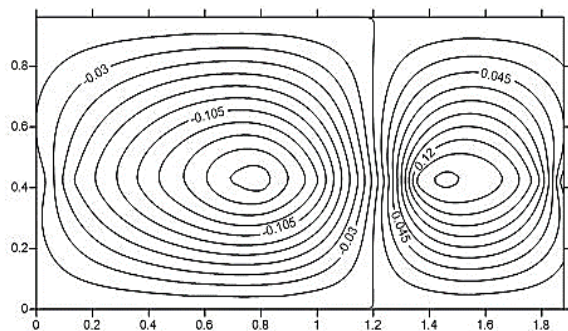
| jet  | Fr  | yt/H | Lm/H | Wm/H | درصد<br>کاهش<br>طول آب<br>شستگی<br>نسبت به<br>حالت<br>شاهد | درصد<br>افزایش<br>عرض آب<br>شستگی<br>نسبت به<br>حالت<br>شاهد |
|------|-----|------|------|------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| S2   | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۱,۵  | ۱۰,۲ | -                                                          | -                                                            |
| S1-2 | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۱,۳۴ | ۱,۴۱ | ۱۰,۷                                                       | ۱۷,۵                                                         |
| S2-3 | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۱,۳۱ | ۱,۳۸ | ۱۲,۷                                                       | ۱۵                                                           |
| S1-3 | ۶,۹ | ۰,۲۵ | ۱,۲۱ | ۱,۵۲ | ۱۹,۳                                                       | ۲۶,۷                                                         |

در شکل شماره (۱۱) پروفیل طولی آب شستگی در حالت S1-3, S1-2, S2-3 با دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه برای جت خروجی سرریز با عمق پایاب ۰,۲۵ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق آب شستگی و ارتفاع رسوب بعد از آن و طول گودال و طول تل رسوبی بعد از گودال در حالت S1-2 و S2-3 با توجه به تشابه ترکیب جت‌ها، تقریباً با هم برابر است ولی عمق آب شستگی و رسوب و طول گودال و رسوب در حالت S1-3 کمتر

در محل تل ماسه از بین رفته و رسوبات مستقل از عملکرد جت‌ها شروع به ته‌نشینی کرده‌اند؛ اما در شکل (۱۴) تنها یک گودال آب شستگی و یک تل رسوبات که ناشی از یک گردابه واحد در حوضچه استغراق است قابل مشاهده است. کاهش طول گودال و افزایش عرض آب شستگی در حالت جت‌های ریزشی غیر همجوار نسبت به حالت جت‌های ریزشی همجوار به‌خوبی در اشکال (۱۳) و (۱۴) قابل مشاهده است.



شکل (۱۳): توپوگرافی بستر حوضچه برای جت‌های ترکیبی غیر همجوار S1-3 به ازای دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه و عمق بی‌بعد پایاب ۰.۲۵

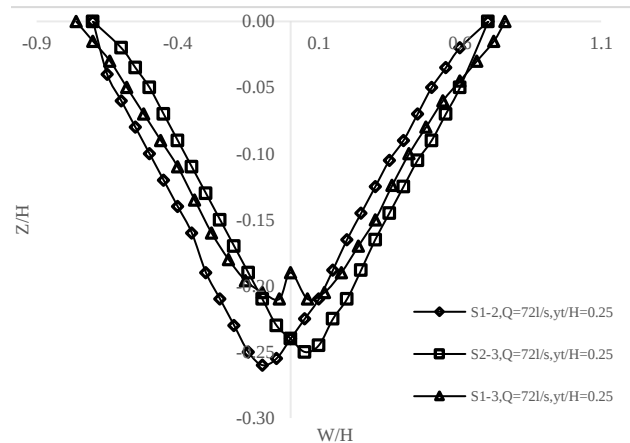


شکل (۱۴): توپوگرافی بستر حوضچه برای جت‌های ترکیبی همجوار S1-2 به ازای دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه و عمق بی‌بعد پایاب ۰.۲۵

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به کمک یک مدل آزمایشگاهی عملکرد جت‌های موازی پس از ترکیب در حوضچه استغراق مورد بررسی قرار گرفته و مشخصه‌های آب شستگی شامل عمق، عرض و طول گودال آب شستگی و همچنین ارتفاع تل رسوبات برای دو حالتی

همدیگر را تشدید و تقویت نموده لذا عمق آب شستگی افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین عرض گودال برای S1-3 به دلیل شعاع پوشش بیشتر بیش از حالت S1-2 و S2-3 است. همچنین یک تپه و بالآمدگی در وسط گودال آب شستگی برای ترکیب جت‌های غیرهمجوار در وسط گودال آب شستگی قابل مشاهده است که مؤید عملکرد نسبتاً مستقل و خلاف جهت هم در گودال آب شستگی بوده که باعث بالا آمدن بستر در وسط گودال شده است. این بالآمدگی برای جت‌های همجوار مشاهده نمی‌شود. این موضوع نشان می‌دهد در حالتی که جت‌ها مجاور هم وارد حوضچه استغراق می‌گردند گردابه‌های ایجادشده در حوضچه با هم ترکیب‌شده و ظاهراً تشکیل یک گردابه واحد با قدرت بیشتری را می‌دهند.



شکل (۱۲): پروفیل عرضی جت ترکیبی هم‌جوار و غیر هم‌جوار به ازای دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه و عمق بی‌بعد پایاب ۰.۲۵

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) بستر حوضچه همراه با شمارگرهای متناظر با گودال آب شستگی و تل رسوبات برای حالت‌های S1-3 و یا جت‌های غیر همجوار و جت‌های همجوار یا همان S1-2 نشان داده شده است. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد و در گودال آب شستگی در بستر در شکل (۱۳) نیز قابل مشاهده است دو عمق آب شستگی تقریباً برابر در راستای عرضی گودال به‌واسطه عملکرد مستقل دو گردابه ناشی از جت‌های ریزشی در داخل حوضچه تشکیل گردیده و تأثیرات متقابل آن‌ها برهم به دلیل وجود فاصله بین دو جت ناچیز بوده است؛ اما برای تپه رسوبات تنها یک تل ماسه واحد تشکیل گردیده است زیرا اثر گردابه‌ها

نموده لذا عمق و طول آب شستگی افزایش بیشتری را نشان می‌دهد.

۳- جهت ارزیابی داده‌های برداشت‌شده آزمایشگاهی ماکزیمم عمق آبشستگی در حالت خروج جت از یک دریچه سرریز و دو دریچه سرریز از روابط دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، ورونس (B)، مارتینز (B) و سوفرلک استفاده شد. با توجه به ضریب همبستگی که داده‌های محاسباتی از روابط فوق با داده‌های آزمایشگاهی داشتند ضرورت تدقیق این روابط برای جت‌های ترکیبی با انجام آزمایش‌های تکمیلی احساس می‌گردد.

۴- نتایج کاربردی این تحقیق نشان می‌دهد در مواقع سیلابی تقسیم دبی بین دهانه‌های سرریز عمق ماکزیمم آب شستگی کمتری را نسبت به حالتی که کل دبی از یک دهانه خارج شود به همراه دارد. همچنین ایجاد فاصله بین دو جت خروجی نیز عمق و طول آب شستگی کمتری را نشان می‌دهد.

که جت‌ها از دو دهانه همجوار و یا غیر همجوار خارج گردند مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند:

۱- در تمامی حالت‌های آزمایش عمق، طول و عرض ماکزیمم آب شستگی و ارتفاع تل رسوبات با افزایش عدد فرود ذرات افزایش یافته و با افزایش عمق پایاب کاهش می‌یابد.

۲- عمق ماکزیمم آب شستگی و رسوب بعد از آن و طول گودال و رسوب نیز در حالت S2-3 و S1-2 یا همان همجوار تقریباً با هم برابر است. ولی عمق ماکزیمم آب شستگی و رسوب و طول گودال و رسوب در حالت جت‌های غیر همجوار یا S1-3 کمتر از دو حالت قبل است. حفظ عملکرد مستقل گردابه‌ها در حالتی که جت‌های ریزشی دور از هم قرار گرفته‌اند باعث شده ماکزیمم عمق آب شستگی کاهش یابد درحالی که برای حالت‌های همجوار جت‌ها اثر همدیگر را تشدید و تقویت

## مراجع

- 7-Lim, S. (1995). "Scour below un-submerged full flowing culvert outlets". Proc. Inst. Civil Eng. 112(2), 136-149.
- 8-Mehraein, M and Ghodsian, M and Schleiss, A.N. (2012). "Scour formation due to simultaneous circular impinging jet and wall jet". J Hydraulic Eng Res 50(4):395-399.
- 9-Negam, A.M. (1995). "Characteristics of combined flow over weirs and under gates with unequal contractions". In advances in hydrosience and engineering, March, Tsinghua University Press, Beijing, China, 285-292.
- 10-Pagliara, S and Hager W.H and Minor, H.E. (2006). "Hydraulics of plane plunge pool scour". J. Hydraul. Eng. 132(5), 450-461.
- 11-Pagliara, S and Amidei, M and Hager, H. (2008). "Hydraulics of 3D plunge pool scour". J. Hydraul. Eng. 134(9), 275-1284.
- 1-Aderibigbe, O and Rajaratnam, N. (1996). "Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets". J. Hydraulic Res. 34(1), 19-33.
- 2-Canepa, S and Hager, W.H. (2003). "Effect of jet air content on plunge pool scour". J. Hydraul. Eng. 129(5), 358-365.
- 3- Dey, S and Sarkar, A. (2006). "Scour downstream of an apron due to submerged horizontal jets". J. Hydraulic. Eng. 132(3), 246-257.
- 4-Dehghani, A.A and Bashiri, H. (2009). "Experimental Investigation of Scouring in Downstream of Combined flow over Weirs and below Gates". 33rd IAHR Conference, Canada.
- 5- Farhoudi, J and Smith, K. V. H. (1985). "local Scour profiles Downstream of Hydraulic Jump". J. Hydr. Res. IAHR, 23(4), 343-358.
- 6-Ghodsian, M and Melvill and Coleman. (2006). "Scour Caused by Rectangular Impinging Jet in Cohesive less Beds Proceeding". Third International Conference On Scour and Erosion. Amsterdam The Netherlands, November 1-3, 2006.

- 15- Samani M.V, Jamal and Mazaheri, M. (2007). "Combined flow over weir and under gate". 7th Iranian hydraulic conference, Power and Water University of Technology, Tehran, Iran, November, 81-86.
- 16-Sarathi, P and Faruque, M, and Balachandar, R. (2008). "Influence of tailwater depth sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets". J. Hydraulic Res. 46(2), 158-175
- 17-Uyumaz, A. (1995). "Scour downstream of the vertical gate". J. Hydraulic Eng. 114(7), 890-816.
- 12-Pagliara, S and Palermo, M and Carnacina, I. (2011). "Scour process due to symmetric dam spillways crossing jets". Int. J. River Basin Manage. 9(1), 31e42.
- 13- Pagliara, S and Palermo, M. (2017). "Scour process caused by multiple subvertical non-crossing jets". J. Water Science and Engineering. 10(1), 17-24.
- 14-Rajaratnam, N and Berry, B. (1977). "Erosion by circular turbulent wall jets. J. Hydraul". Res. 15(3), 277-289.

## Experimental Study of Parallel Jets Scouring, considering the effect of jets distance on erosion rate

Atoosa latifi<sup>1</sup>

Seyed Abbas Hosseini<sup>2</sup>

Mojtaba Saneie<sup>3</sup>

### Abstract

The scouring process at downstream of the hydraulic structures is a complex phenomenon and many parameters affecting its amount. Failure to control this phenomenon causes damages to the dam and its associated hydraulic structures. In this research, the scouring caused by the combination of jets outlet from a gated spillway was investigated experimentally and the combination of jets adjacent to each other or with a distance from each other inside the plunge pool was studied. For this purpose, 25 experiments have been carried out on the experimental model and the effect of important parameters such as flow rate or discharge, densiometric Froud number, depth of tail water and how jets are combined.

The results show that in a same discharge, combined of two non-adjacent spillway jets has lower scour depth and sediment height, and the length of the scouring than the jet of a combination of two adjacent jets. The width of the scouring pit, however, is in the case of overflow jets in non-adjacent jets more than adjacent jets.

In order to compare scouring results, a control experiment was conducted with same Froud number from one span of spillway. Results indicate that the maximum depth of scouring of adjacent jets is reduced between 17.4 to 19.9 percent, and the non- adjacent jets decrease this amount to 31% in the compared to the control run. Also, in the adjacent jets, reduction of the length of the scouring was 10.7 to 12.7% and in non-adjacent jets was 19.3% in the respect to control experiment. The

---

<sup>1</sup> Ph.D Candidate, Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D, Assistance Prof. Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
abbas\_hoseyni@srbiau.ac.ir

<sup>3</sup> Assistance Prof. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

scour width increased compared to the control in the spillway operation with two openings between 15 To 17.5 percent and in two non-adjacent spans, this increase was 26.7 percent.

### **Key words**

adjacent jets, non-adjacent jets, plunge pool, scouring pit.