نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال هفتم / شماره بیست و چهارم /بهار ۹۹

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
7th Year / No. 24 / June 2020

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

آتوسا لطیفی[۱]
سید عباس حسینی[۲]*
مجتبی صانعی[۳]

چکیده

پروسه 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 دریچه دار به‌صورت آزمایشگاهی موردبررسی قرار گرفت و ترکیب جت‌ها به‌صورت مجاور هم و یا بافاصله از هم در داخل حوضچه استغراق و به به‌صورت 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 بافاصله، 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 غیرهمجوار 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 شستگ

[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، ایرانabbas_hoseyni@srbiau.ac.ir
[۳]. دانشیار، گروه مهندسی رودخانه و حفاظت سواحل، پژوهشکده مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران

علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

مقدمه

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

$$y_s = kq^x H^y \qquad (۱)$$

ys : حداکثر عمق آبشستگی از سطح اولیه بستر (متر)،d : اندازه‌ی قطر مشخصه مصالح بستر (متر)،H: ارتفاع ریزش جت (متر)،q: دبی بر واحد عرض سرریز (مترمکعب در ثانیه بر 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

و بری[۵] (۱۹۹۷)، کاپنا و هگر[۶] (۲۰۰۳) و پاگلیارا و همکاران[۷] (۲۰۰۴) نشان دادند پروسه آب شستگی به پارامترهای مختلفی مانند دبی جت خروجی، عدد فرود جریان، عمق پایاب و خصوصیات رسوب بستگی دارد. ادریبیجب و[۸] (۱۹۹۶)، قدسیان و همکاران[۹] (۲۰۰۶) نشان دادند که مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر گودال آب شستگی، عدد فرود[۱۰] چگالی ناشی از برخورد جت است. علی و لیم[۱۱] (۱۹۸۶)، صراحتی و همکاران[۱۲] (۲۰۰۸)، مهرآیین و همکاران[۱۳] (۲۰۱۰) و صانعی و همکاران[۱۴] (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 افزایش‌یافته و پس از آن با افزایش عمق پایاب حداکثر عمق آب شستگی کاهش می‌یابد. نگام[۱۵] (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

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

حوضچه آرامش با یکدیگر برخورد می‌کردند. اویماز[۱] (۱۹۹۵) گودال آب شستگی پایین‌دست جریان عبوری از زیر و روی یک دریچه را مطالعه کرد و با حالت جت منفرد از روی دریچه 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 دریچه بیشتر از زیر دریچه است. دهقانی و همکاران[۲] (۲۰۱۰) مطالعه آزمایشگاهی عمق آب شستگی پایین‌دست جت عبوری از زیر و روی یک دریچه و ترکیب جت‌ها به‌طور 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 دریچه است. پاگلیارا و همکاران[۳] (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 درنتیجه کاهش عمق آب شستگی نسبت به جت منفرد با همان دبی می‌شوند. مهرآیین و قدسیان[۴] (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 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.

پاگلیارا و پالرمو[۵] (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 دریچه موردتوجه 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) موردبررسی آزمایشگاهی قرار گیرد و تأثیر فاصله جت‌ها بر مشخصه‌های آب شستگی مورد ارزیابی واقع شود. ترکیب جت‌ها در سرریزهای دریچه 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 دریچه دار یا همان جت ریزشی از یک یا چند دهانه به پایین‌دست رها می‌شود، اتفاق افتاده و می‌توان با باز نمودن یک یا دو دریچه سرریز، ترکیب جت‌ها یا هم‌زمانی ترکیب جت‌ها را به‌صورت 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 موردتوجه

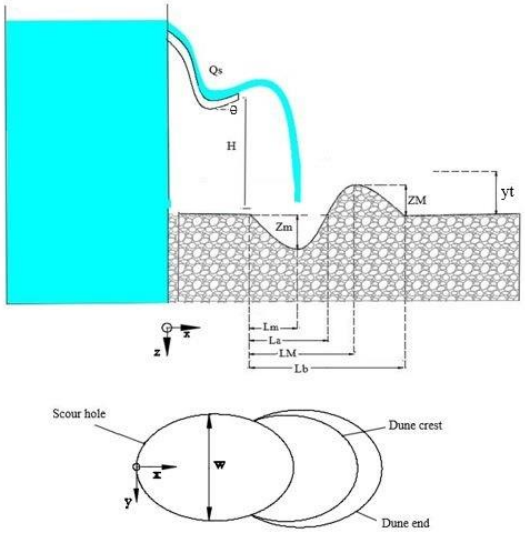
[۱] Uymaz
[۲] Dehghani et al
[۳] Pagliara et al
[۴] Mehraein and Ghodsian
[۵] Pagliara and Palermo

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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 به‌صورت 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 d50=15mm، چگالی $2,65\ gr/cm^3$ و انحراف استاندارد ۱,۱ به‌صورت 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 واردشده 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 به‌صورت دریچه دار از جنس پلکسی‌گلاس[1] شفاف ساخته‌شده 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[2] با زاویه پرتاب ۲۵ درجه به پایین‌دست 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. بدین‌وسیله می‌توان دو جت موازی ریزشی را به‌وسیله خروج از دو دهانه سرریز ایجاد نمود. جریان به‌صورت مساوی بین دهانه های سرریز تقسیم می‌شود. عمق پایاب و دبی‌های ورودی توسط 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. به‌منظور 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 به‌صورت 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 استفاده‌شده و طول و عرض آن به مش‌های ۲۰ سانتی‌متر تقسیم‌شده و از یک ریل متحرک، مجهز به متر لیزری کمک گرفته و x, y, z هر نقطه از گودال و رسوب بعد از آن به‌فاصله 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

[1] Plexiglass

[2] Flip Bucket

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

شکل (۲): نحوه تشکیل و ترکیب جت‌های موازی

در شکل (۱) Zm: ماکزیمم عمق آب شستگی،ZM : ماکزیمم عمق تل رسوب بعد از گودال آب شستگی،Lm : طول متناظر با ماکزیمم عمق آب شستگی،La طول گودال آب شستگی، LM: طول متناظر با ماکزیمم عمق تل رسوب بعد از گودال آب شستگی،Lb : طول کل گودال آب شستگی و رسوب بعد از آن،Wm ماکزیمم عرض آب شستگی،Qs: دبی سرریز،yt: 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 جت‌ها در داخل حوضچه آرامش و از نوع غیر برخوردی) انجام پذیرفت. با دبی‌های ۱۸،۳۶،۵۴،۷۲ لیتر بر ثانیه عبوری از دو دریچه سرریز انجام شده که دبی‌ها به قسمت مساوی از دو دریچه عبور کرده و یک دریچه سرریز بسته است به‌عبارت‌دیگر از هر دهانه سرریز دبی ۹،۱۸،۲۷،۳۶ لیتر بر ثانیه عبور می‌کند. دریچه‌های سرریز به ترتیب از چپ به راست S (1)، S (2)، S (3) نام‌گذاری شده‌اند. جریان پس از عبور از دریچه سرریز به شوت و سپس به جام پرتابی منتقل‌شده و تشکیل یک جت ریزشی می‌دهد. S(1-2) بیانگر حالتی که جریان از دریچه ۱ و ۲، S(2-3) بیانگرحالتی که جریان از دریچه ۲ و ۳ سرریز و S(1-3) حالتی که جریان از دریچه ۱ و ۳ سرریز عبور می‌کند؛ است. برای مقایسه نتایج خصوصیات آب شستگی آزمایش شاهد با دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه عبوری از یک دریچه سرریز انجام شد.

تجزیه‌وتحلیل نتایج

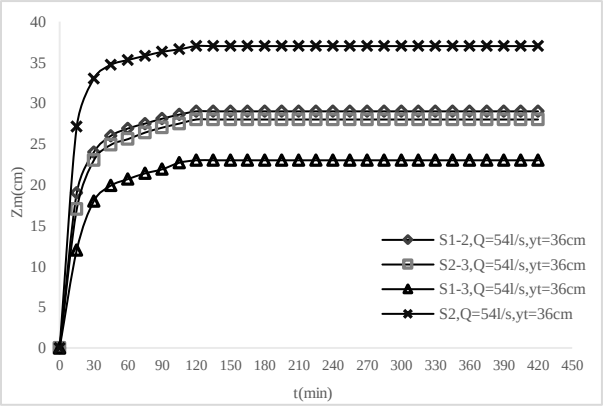
جریان خروجی از سرریزها به دلیل تبدیل هد بالای جریان، تشکیل یک جریان فوق بحرانی داده که دارای سرعت و انرژی زیادی است و این انرژی درصورتی‌که به‌صورت کنترل نشده رها گردد در اثر برخورد جریان به بستر پایین‌دست می‌تواند فرسایش قابل‌توجهی ایجاد نماید؛ بنابراین سعی می‌گردد جریان خروجی از سازه‌های هیدرولیکی به‌صورت کنترل‌شده به داخل حوضچه استغراق در پایین‌دست رهاشده که در این حالت جریان آشفته تشکیل یکسری گردابه در محدوده بستر را می‌دهد و این در کندن بستر، معلق کردن و انتقال رسوبات نقش مهمی بازی می کند. ذرات رسوبی توسط جریان به پایین‌دست حمل و در فاصله اندکی از محل برخورد جت ته‌نشین می‌شوند و درنتیجه تپه‌ای از رسوب در پایین‌دست گودال تشکیل می‌گردد. 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 آزمایش‌های شاهد به مدت ۷ ساعت (۴۲۰ دقیقه) جهت بررسی توسعه زمانی آب شستگی و تعیین زمان تعادل انجام پذیرفت. در تمام آزمایش‌ها مشاهده شد که در ۳۰ دقیقه ابتدایی آزمایش، سرعت آب شستگی بالا بوده و باگذشت زمان، به علت مستهلک شدن انرژی سیال از شدت گردابه‌ها و تنش برشی مؤثر بر ذرات در کف بستر و در گودال آب شستگی کاسته می‌شود و نهایتاً پس از دو ساعت گودال و عمق آب شستگی به تعادل می‌رسد. تغییرات ماکزیمم عمق آبشستگی نسبت به زمان به ازای دبی ۵۴ لیتر بر ثانیه در حالت‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج مشابهی به ازای دبی‌های 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، پروفیل‌های طولی و عرضی گودال و تل رسوب در حالت‌های مختلف برداشت گردید.

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

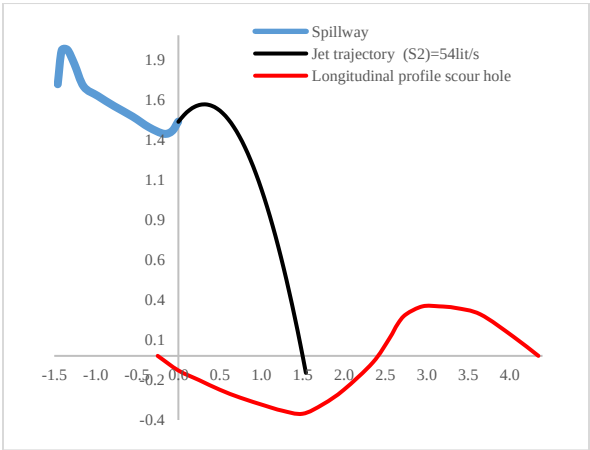
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

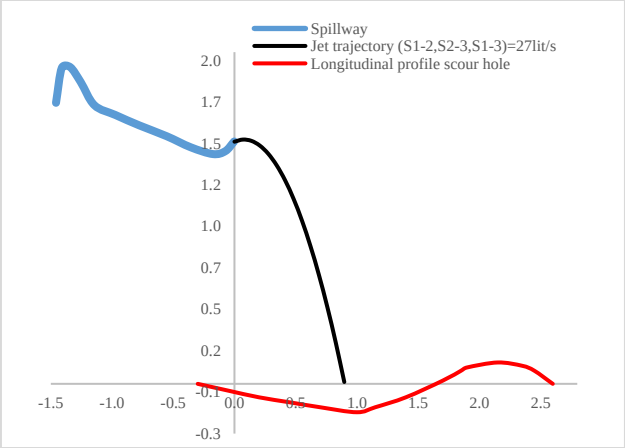
آبشستگی نسبت به حالتی که همان دبی بین دو دهانه سرریز به‌طور مساوی تقسیم می‌شود افزایش‌یافته و به دلیل افزایش فاصله برخورد جت با کف، محل ماکزیمم عمق آبشستگی در فاصله دورتری از سرریز تشکیل‌شده است. ضمناً محل ماکزیمم عمق آبشستگی تقریباً در راستای برخورد جت با کف شکل‌گرفته است.



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 (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 ϕ 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:

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

که در معادله (۱): q_{s1} دبی جریان در واحد عرض دریچه ۱ سرریز(m2/sec)، q_{s2} دبی جریان در واحد عرض دریچه ۲ سرریز(m2/sec)، q_{s3} دبی جریان در واحد عرض دریچه ۳ سرریز(m2/sec)، d_{50} قطر متوسط مصالح بستر (mm)، θ: زاویه فلیپ باکت، g: شتاب جاذبه $\left(m/sec^2\right)$، ρ_s: چگالی رسوب بستر $\left(kg/m^3\right)$، ρ_w چگالی آب $\left(kg/m^3\right)$، μ: لزجت دینامیکی آب $\left(N.m/sec\right)$، y_t: عمق پایاب (m)، y_{s1}: عمق آب روی فلیپ باکت دریچه یک سرریز (m)، y_{s2}: عمق آب روی عمق آب روی فلیپ باکت دریچه دو سرریز (m)، y_{s3}: عمق آب روی فلیپ باکت دریچه سه سرریز (m)، H: فاصله ارتفاعی جت خروجی از سرریز تا سطح بستر حوضچه استغراق (m)، h_f: فاصله عمودی بین لبه فلیپ باکت سرریز با سطح بستر حوضچه استغراق(m)، R: شعاع هیدرولیکی فلیپ باکت سرریز (m) است. با توجه به اینکه $q_{s1} = q_{s2} = q_{s3}$ و رابط (۳)، لذا

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

سرعت‌های جریان نیز در فلیپ باکت سه دریچه سرریز با هم برابر می‌شود.

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

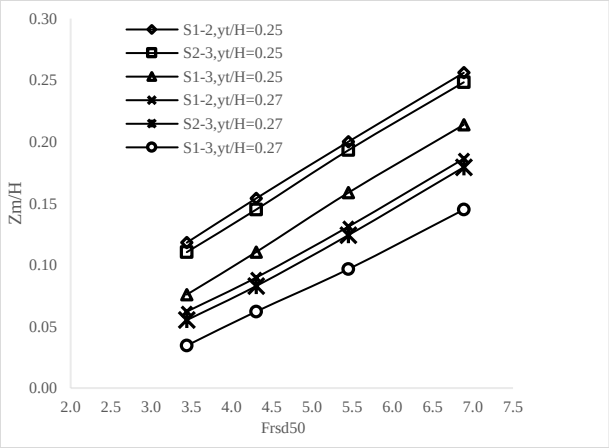
$$V_{si} = 2V_{s1} \quad (۴)$$

برای محاسبه عدد فرود برای حالت ترکیب دو جت در داخل حوضچه یا جت‌های غیر برخوردی از جمع جبری سرعت‌ها استفاده‌شده است. با استفاده از تئوری باکینگهام[۱] و حذف مقادیر ثابت شامل h_f, θ و R در فرآیند آزمایش‌های این تحقیق و با صرف‌نظر نمودن از عدد رینولدز R_e به علت آشفتگی جریان و بی‌تأثیر بودن آن بر خصوصیات آب شستگی ، معادله (۶) حاصل می‌شود.

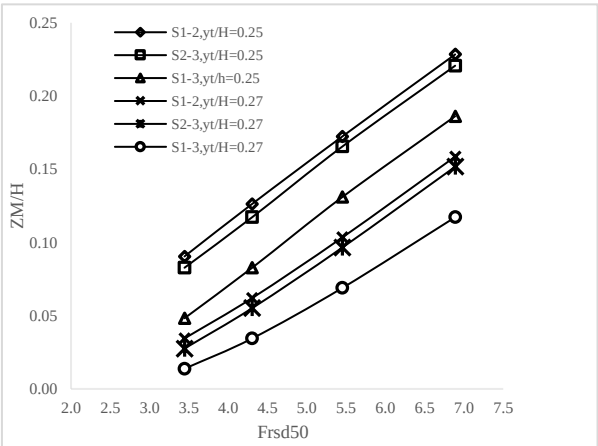
$$f\left(Fr_{sd50}, R_e, \frac{y_t}{H}, \frac{R}{H}, \frac{h_f}{H}, cos\theta, \frac{\phi}{H}\right) \quad (۵)$$

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

یکی از مهم‌ترین 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 حالت‌های جت‌های ترکیبی خروجی از دو دریچه سرریز S(1-2)، S(2-3)، S(1-3) در دو عمق پایاب بی‌بعد ۰,۲۵ و ۰,۲۷ مقایسه شده اند. به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد که عمق ماکزیمم آب شستگی و ارتفاع رسوب با افزایش عدد فرود چگالی ذرات بستر افزایش می‌یابد. در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌گردد که برای ترکیب جت‌های ریزشی خروجی از سرریز به‌صورت مجاور هم یا همان حالت‌های S1-2 و S2-3 عمق ماکزیمم آب شستگی و ارتفاع رسوب بعد از آن بیشتر از حالت S1-3 یا همان جت‌های غیر همجوار یا فاصله‌دار است.



شکل (۶) ماکزیمم عمق بی‌بعد آب شستگی برای جت‌های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵ و ۰,۲۷



شکل (۷) ماکزیمم ارتفاع بی‌بعد تپه رسوب برای جت‌های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵ و ۰,۲۷

مقایسه و بحث با نتایج تحقیقات قبلی

جهت ارزیابی داده‌های برداشت‌شده آزمایشگاهی ماکزیمم عمق آبشستگی در حالت خروج جت از یک دریچه سرریز و دو دریچه سرریز با روابط پیش‌بینی 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 گزینش‌شده رابطه‌ای در قالب معادله

[۱] Buckingham

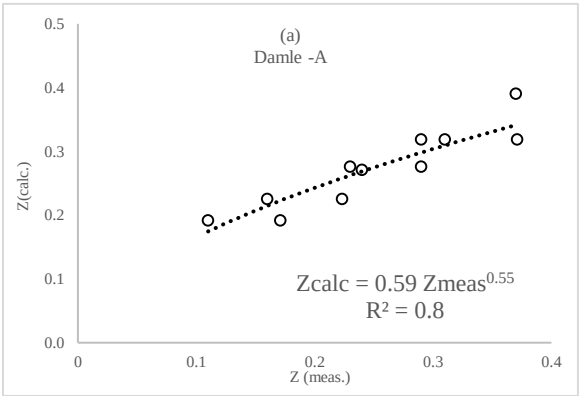
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

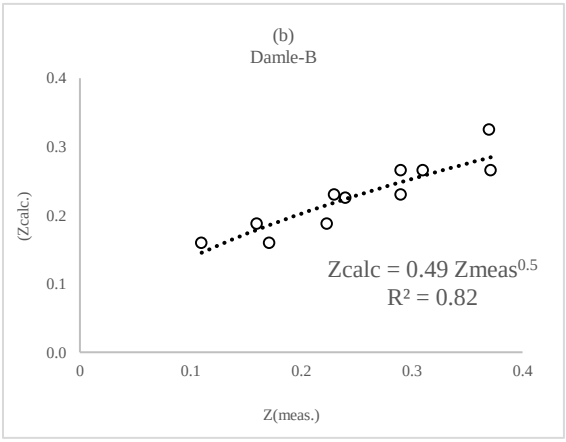
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

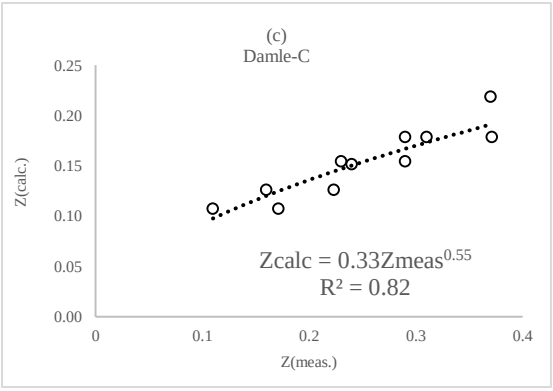
(۷) برای مقایسه عمق آبشستگی محاسبه‌شده از روابط تجربی و مقادیر مشاهداتی آزمایشگاهی به کار گرفته می‌شود.

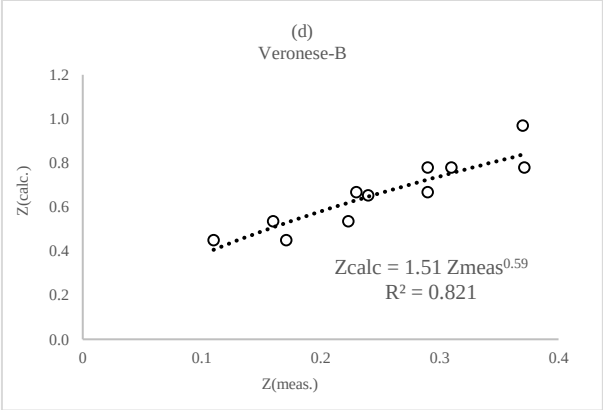
$$Z_{cal} = K(Z_{meas})^{s} \qquad (۷)$$

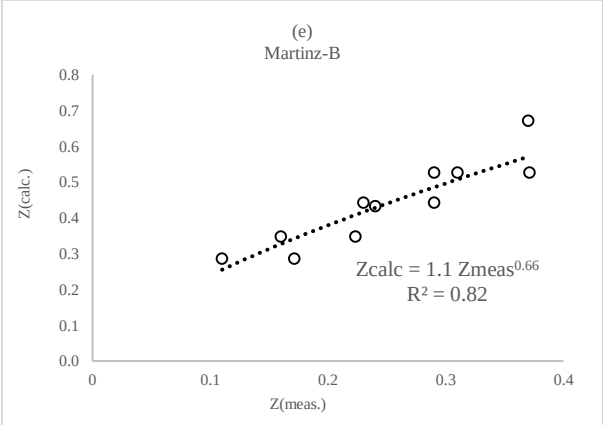
شکل (۸) تخمین عمق آبشستگی با استفاده از روابط دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، ورونس(B) ، مارتینز (B) و سوفرلک را همراه با مقادیر ضرایب S،K و مقادیر ضریب همبستگی R^2 را نشان می‌دهد.

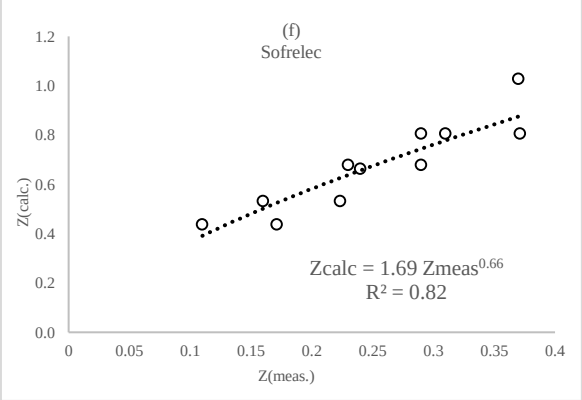












شکل (۸) مقایسه داده‌های آزمایشگاهی ماکزیمم عمق آبشستگی نسبت به داده‌های محاسباتی از (a): رابطه دامل(A)، (b): رابطه دامل(B)، (c): رابطه دامل(C)، (d): رابطه ورونس(B)، (e): رابطه مارتینز (B)، (f): رابطه سوفرلک

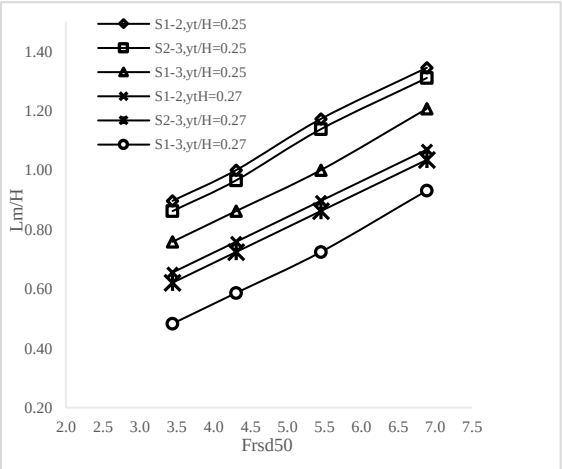
با توجه به معادلات به‌دست‌آمده که دارای ضریب همبستگی خوبی می‌باشند می‌توان از روابط دامل (A)، دامل (B)، دامل (C)، ورونس(B)، مارتینز (B) و سوفرلک جهت محاسبه

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

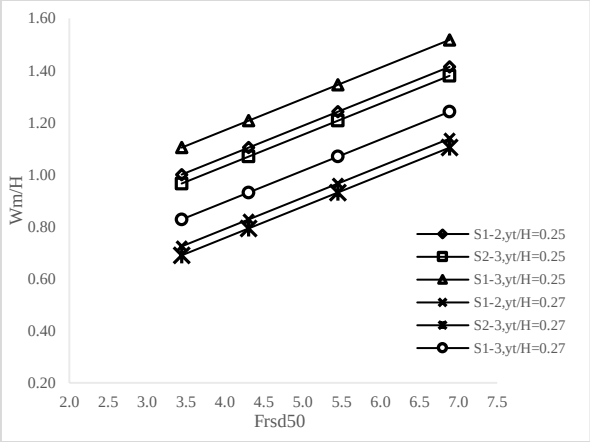
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

ماکزیمم عمق آبشستگی در حالتی که سرریز به‌صورت یک دهانه و یا دو دهانه باز عمل می‌کند 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 جت‌های ترکیبی سرریز یا همان S1-2,S2-3,S1-3 به ازای اعداد فرود مختلف و برای دو عمق پایاب بی‌بعد ۰,۲۵ و۰,۲۷ نشان داده شده است. رفتار تقریباً مشابهی با عمق گودال آب شستگی مشاهده می‌گردد. بدین معنی که با افزایش عمق پایاب برای جت‌های ترکیبی سرریز، طول و عرض گودال کاهش می‌یابد و با افزایش دبی جت‌های ریزشی و به‌تبع آن افزایش عدد فرود ذرات بستر، طول و عرض گودال افزایش‌یافته است.در خصوص طول گودال آب شستگی، در حالت ترکیب جت‌های خروجی از سرریز در داخل حوضچه، در حالت S1-2 و S2-3 یا همان جت‌های 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 جت‌های خروجی از سرریز در حالت S1-3 یا همان جت‌های غیر همجوار عرض ماکزیمم آب شستگی بیشتر از حالت‌های S1-2 و S2-3 است.



شکل (۹) ماکزیمم طول بی‌بعد آب شستگی برای جت‌های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵ و ۰,۲۷



شکل (۱۰) ماکزیمم عرض بی‌بعد آب شستگی برای جت‌های ترکیبی سرریز به ازای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵ و ۰,۲۷

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 حالت‌های مختلف نسبت به آزمایش شاهد مقایسه شده است. مشاهده می‌گردد در حالتی که جت‌ها در مجاور هم قرار گرفته میزان آب شستگی در حدود ۱۷,۴ تا ۱۹,۹ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش می‌یابد حال‌آنکه اگر جت‌ها به‌صورت غیرهمجوار خارج شوند این میزان کاهش به ۳۱ درصد نسبت بحالت شاهد می‌رسد. رفتار مشابهی نیز در خصوص ارتفاع تل رسوب پس از گودال نیز مشاهده می‌گردد. خلاصه نتایج برای حالت‌های مختلف در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مقایسه عمق آبشستگی و ارتفاع تل رسوب برای ترکیب جت‌ها در حالت‌های 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

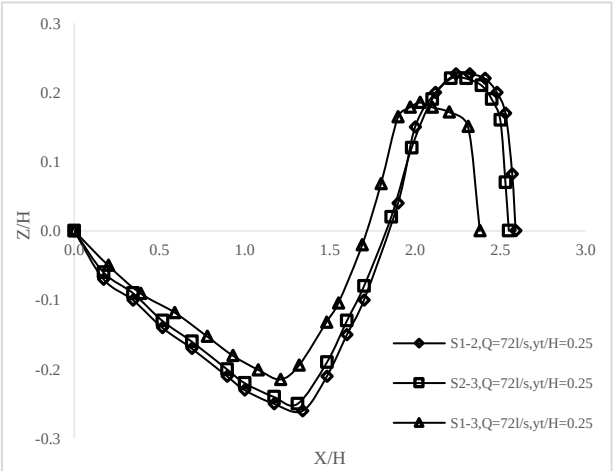
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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 حدودا ۱۰,۷ تا ۱۲,۷ درصد کاهش می یابد. در حالتی که دو دهانه غیر هم‌جوار سرریز شروع به عملکرد می‌نماید این میزان کاهش ۱۹,۳ خواهد بود. در مورد عرض آب شستگی کاملا 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 حدودا 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 کاهش طول آب شستگی نسبت به حالت شاهد	درصد افزایش عرض آب شستگی نسبت به حالت شاهد
S2	۶,۹	۰,۲۵	۱,۵	۱۰۲	-	-
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 دبی۷۲ 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 از دو حالت قبل است. لیکن در حالت S1-3 که جت‌ها به‌صورت غیر همجوار و بافاصله از دو دهانه سرریز خارج می‌گردند مشخصه‌های طولی آب شستگی کاهش می‌یابد. به‌نحوی‌که برای دبی ۷۲ لیتر ثانیه که به‌صورت 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 کاهش‌یافته 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.

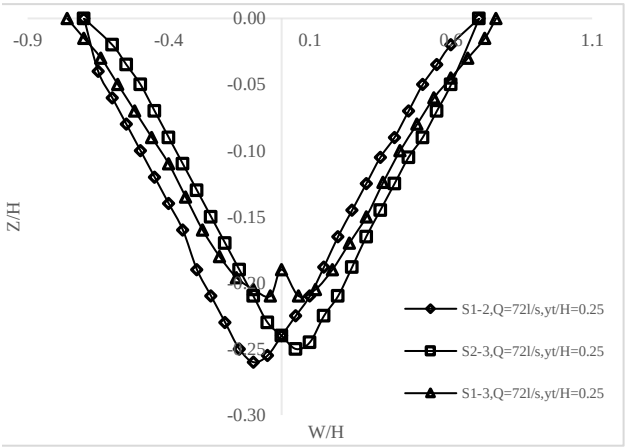


شکل (۱۱): مقایسه پروفیل‌های طولی آب شستگی برای جت ترکیبی خروجی از دو دهانه سرریز با دبی مجموع ۷۲ لیتر بر ثانیه به ازای عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵

در شکل شماره (۱۲) پروفیل عرضی گودال آب شستگی برای ترکیب غیر برخوردی جت‌های ریزشی سرریز به‌صورت 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 گردابه‌ها در حالتی که جت‌های ریزشی دور از هم قرار گرفته‌اند باعث شده ماکزیمم عمق آب شستگی کاهش یابد. درحالی‌که برای جت‌های همجوار، اثر

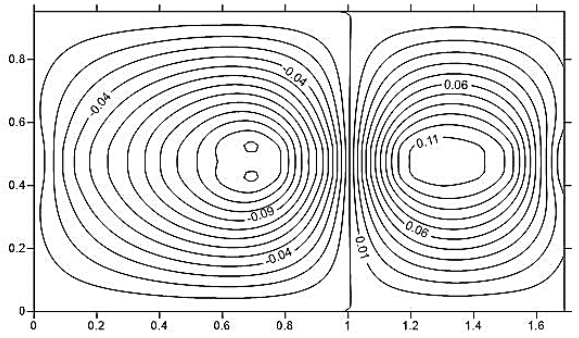
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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 بالاآمدگی در وسط گودال آب شستگی برای ترکیب جت‌های غیرهمجوار در وسط گودال آب شستگی قابل‌مشاهده 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 بالاآمدگی 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.

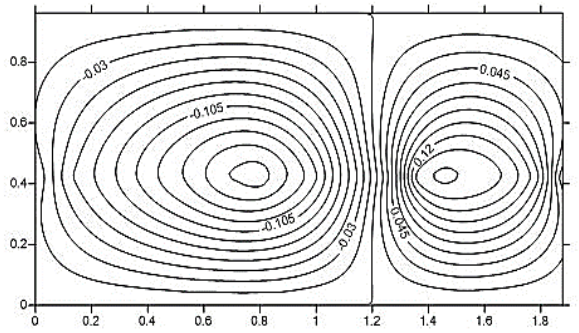


شکل (۱۲): پروفیل عرضی جت ترکیبی هم‌جوار و غیر هم‌جوار به ازای دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه و عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵

در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) بستر حوضچه همراه با شمارگرهای متناظر با گودال آب شستگی و تل رسوب 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 قابل‌مشاهده 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 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 قابل‌مشاهده 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) قابل‌مشاهده است.



شکل (۱۳): توپوگرافی بستر حوضچه برای جت‌های ترکیبی غیر همجوارS1-3 به ازای دبی ۷۲ لیتر بر ثانیه و عمق بی‌بعد پایاب ۰,۲۵



شکل (۱۴): توپوگرافی بستر حوضچه برای جت‌های ترکیبی همجوارS1-2 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 موردبررسی قرار گرفته و مشخصه‌های آب شستگی شامل عمق، عرض و طول گودال آب شستگی و همچنین ارتفاع تل رسوبات برای دو حالتی

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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 افزایش‌یافته 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 درحالی‌که برای حالت‌های همجوار جت‌ها اثر همدیگر را تشدید و تقویت 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.

مراجع

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.

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 hydroscience 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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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.

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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

Atoosa latifi[1]

Seyed Abbas Hosseini[2]

Mojtaba Saneie[3]

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

[1] Ph.D Candidate,Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

[2] Ph.D, Assistance Prof. Department of civil engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. abbas_hoseyni@srbiau.ac.ir

[3] Assistance Prof.Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-02-01]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1399.7.24.2.0]