

هیدرولیک جریان بر روی سرریز گابیونی عریض در شرایط عملکرد آزاد و مستغرق

Original Article

سعید صالحی (دانشجوی دکتری)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

علی برهوده (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

پژوهش حاضر برای بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان روی سرریز گابیونی عریض در ابعاد مختلف طرح ریزی شده است. آزمایش‌ها جمعاً برای ۱۲ مدل با سه طول ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر و دو ارتفاع ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر و دو دانه‌بندی گابیون ۱/۳۱ و ۲/۹۳ میلی‌متر انجام پذیرفته است. ابتدا با ایجاد شرایط آزاد جریان پایین دست سرریز، ضریب دبی برای سرریزهای لبه‌پهن گابیونی و صلب مقایسه شد. پس از حصول اطمینان از صحت آزمایش‌ها، با افزایش عمق پایین دست به منظور مستغرق ساختن سرریز گابیونی، رفتار جریان در استغراق‌های مختلف بررسی شده است. چهار وضعیت هیدرولیکی برای سرریز گابیونی بر اساس عدد فرود جریان در روند آزمایش‌ها تشخیص داده شد. وضعیت‌ها عبارت‌اند از: جریان آزاد، جریان با پرش پایین دست، جریان با فرم موجی بر سطح آب در پایین دست و جریان کاملاً مستغرق. نتایج نشان دادند با تغییر جریان از حالت آزاد به مستغرق پیش‌بینی می‌شود جریان درون‌گذر از گابیون کاهش یابد و جریان از روی سرریز عبور کند. این بدین معناست با افزایش عمق پایین دست جریان، رفتار هیدرولیکی سرریز گابیونی عریض تغییر می‌کند و از سرریز گابیونی به سرریز لبه‌پهن تغییر وضعیت می‌دهد. در انتها، با استفاده از میزان درجه‌ی استغراق و عدد فرود بالادست، معادله‌ی برای تعیین محدوده‌ی هیدرولیکی رژیم‌های جریان ارائه شده است.

واژگان کلیدی: رژیم جریان، سرریز توری سنگی، ضریب دبی، الگوی جریان، جریان درون‌گذر.

saeedsalehi100@gmail.com
esmaili@um.ac.ir
parmude71@gmail.com

۱. مقدمه

ذرات. این امر موجب می‌شود که مواد ارگانیک از بدنه‌ی تراوش پذیر سرریز عبور کنند و به پایین دست رودخانه نیز انتقال یابند.

۴- ساختار مشبک سرریزهای گابیونی به مرور زمان به اکوسیستم طبیعی کمک می‌کند و می‌تواند محلی برای زندگی موجودات کوچک تأمین کند.

این موارد می‌توانند به اهمیت ساخت سرریز گابیونی و احیای محیط زیست صحنه گذارد. از این رو در دهه‌ی جدید، مطالعاتی در این زمینه آغاز شده است. پژوهش حاضر با بررسی آزمایشگاهی سعی دارد که رژیم جریان عبوری از سرریز گابیونی را تشخیص دهد و بررسی کند.

سرریزهای لبه‌پهن در شبکه‌های آبیاری برای اندازه‌گیری دبی جریان و همچنین تنظیم سطح آب بالادست آبگیرها استفاده می‌شوند. معمولاً سرریزهای لبه‌پهن با استفاده از مصالح بتنی ساخته می‌شوند. برای بهبود عملکرد سرریزهای لبه‌پهن در شبکه‌های آبیاری می‌توان سرریز گابیونی را جایگزین کرد، که عموماً از مصالح سنگ و شن‌های درشت در محل ساخته می‌شود. شیوه‌ی ساختن ساده‌ی سرریز گابیونی می‌تواند به عنوان یکی از مزایای تأثیرگذار تلقی شود، که به عنوان جایگزینی آنها می‌توان استفاده کرد. مزایای سرریزهای گابیونی عبارت‌اند از:

۱- دوستاندار محیط زیست بودن؛

۲- سادگی و سهولت در ساخت و اجرای آن؛

۳- قابلیت تله‌اندازی بخشی از رسوب‌های رودخانه بر پایه‌ی اندازه‌ی خاصی از

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۲/۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۶/۲۴، پذیرش ۱۳۹۹/۱۰/۲۶.

DOI:10.24200/J30.2021.55415.2729

۲. مطالعات انجام شده

در موضوع کاربرد سرریزهای گابیونی، تاکنون مطالعاتی هم در داخل و هم خارج از کشور انجام شده است، که از جنبه‌های مختلف به ویژگی‌های هیدرولیکی جریان از

Archive of SID

همکاران (۲۰۰۸)، نشان داد که با افزایش تخلخل در پایین دست محیط متخلخل در جریان، آشفستگی کمتری مشاهده می‌شود.^[۸]

برخی پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که در زمینه‌ی سرریزهای گابیونی لبه‌پهن باید مطالعات بیشتری صورت گیرد، چانسون^۶ بیان کرد که باید ضریب تأثیر بین جریان روگذری و جریان درون‌گذری مطالعه شود. در مطالعه‌ی ایشان، روابط تجربی به عنوان نتایج اولیه ارائه شد. اگرچه رابطه‌ی برای برآورد دبی درون‌گذری و روگذری ارائه نشده است، ولی در پژوهش اخیر، دبی در حالت کلی برآورد شده و به پارامترهای به دست آمده از آنالیز ابعادی ربط داده شده است.^[۹]

صالحی و عظیمی (۲۰۱۹)، نیز در پژوهش خود با توجه کردن به ضریب تأثیر بین جریان روگذر از سرریز و جریان درون‌گذری و با معرفی پارامتری به صورت نسبت دبی بالادست سرریز به دبی‌های جداگانه‌ی عبوری از بالا و درون سرریز، رابطه‌ی بر پایه‌ی رگرسیون غیرخطی برای برآورد ضریب مذکور ارائه کردند، که به عنوان نسبتی از مقادیر دبی معرفی شده است.^[۱۱]

تعیین رژیم‌های سطح آب پایین دست سازه‌های هیدرولیکی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلفی بوده است، که برای اولین بار توسط وو و راجاراتان^۷ (۱۹۹۶) ارائه شده است. ایشان با استفاده از داده‌های ارتفاع آب در بالادست و پایین دست سرریز لبه‌ی تیز، وضعیت‌های مختلف نیمخ سطح آب به ازاء محدوده‌های هیدرولیکی مختلفی را ارائه کردند، که بر اساس نسبت استغراق موردنظر بودند.^[۱۲]

همچنین عظیمی و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از سری آزمایش‌های مختلف بر روی سرریز لبه‌تیز، رژیم جریان را در سازه‌ی سرریز مذکور به دست آوردند، که در نهایت در ۴ گروه تقسیم‌بندی شد. در ادامه، نیز روابطی برای برآورد طول موج و همچنین مقدار ارتفاع موج پایین‌رونده از سرریز پیشنهاد کرده‌اند.^[۱۳]

گوان^۸ و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۱۵)، با استفاده از عدد فرود به تقسیم‌بندی رژیم‌های نیمخ سطح آب در سرریز لبه‌ی تیز در حالت مستغرق پرداخته‌اند و تأثیر رژیم‌های تشکیل شده در عمق آب‌سستگی پایین دست سرریز را پیگیری کردند و دریافته‌اند که با تغییر رژیم جریان از حالت مستغرق کامل^۹ به جت فرورونده در جریان آب پایاب پایین دست^{۱۰}، عمق آب‌سستگی در پایین دست به صورت افزایشی و با طول کمتر توسعه پیدا خواهد کرد. این امر نشان از وضعیت تأثیر جت پایین‌رونده‌ی سرریز در وضعیت و پایداری سرریز بود و نتایج نشان داد که سرریزهایی با عمق پایین‌دستی، که رژیم جت فرورونده دارند، پایداری کمتری دارند.^[۱۴]

صفرزاده و همکاران (۲۰۱۸)، در پژوهشی با استفاده از مدل عددی به بررسی مدل سرریز گابیونی پرداختند و از مدل عددی RNG استفاده کردند. در نهایت، با استفاده از بررسی نیمخ سطح آب در روی سرریز گابیونی، ضریب دبی در حالت‌های مختلف دانه‌بندی سرریز گابیونی محاسبه شده است.^[۱۶]

خطیبی و همکاران (۲۰۱۴)، هم با استفاده از هوش مصنوعی و همچنین به کارگیری داده‌های آزمایشگاهی، یک روش عددی برای محاسبه‌ی دبی در سرریز گابیونی پلکانی ارائه و جریان را بر روی سرریز به صورت آرام تا حالت آشفته تقسیم‌بندی کردند. این حالت‌ها با استفاده از مرزهایی در گراف‌هایی مشخص شده است.^[۱۷]

همچنین الگوی جریان با استفاده از مدل‌های عددی و حل معادلات جریان در پژوهشی بررسی شد. محمدپور و همکاران (۲۰۱۳)، الگوی جریان افقی و همچنین خطوط جریان را در اطراف سرریز گابیونی بحث و بررسی کردند. ایشان نتایج حاصل از مدل‌سازی اخیر را با حالت آزمایشگاهی مقایسه کردند و دریافته‌اند که به ازاء کالیبره‌ی مدل عددی، نتایج قابل قبولی از مدل عددی در حالت‌های مختلف مدل آشفستگی قابل استحصال است.^[۱۸]

سازه‌ی مذکور پرداخته شده است. هگر و اسکوال (۱۹۹۴) به بررسی ضریب دبی سرریز گابیونی پرداختند و نتایج‌شان را در قالب نمودارهایی برای اندازه‌گیری دبی ارائه کردند.^[۱] همچنین در سال‌های بعد، عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) با رویکردهای مختلفی، از جمله شاخص کاهش دبی به ازاء دبی مستغرق به بررسی سرریز گابیونی پرداخته و ضریب دبی به ازاء انواع مختلف سرریز لبه‌پهن با لبه‌های تیز و گرد را بررسی و ارزیابی کرده‌اند.^[۲]

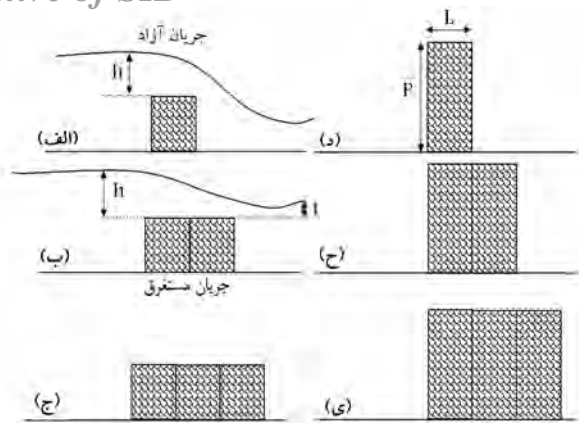
ساراگیسون و پرسی (۲۰۰۹)، نیز شیب بالادست و پایین دست سرریز لبه‌پهن را ارزیابی کردند و دریافته‌اند که افزایش شیب بالادست سرریز لبه‌پهن باعث افزایش عمق آب بالادست آن می‌شود. این امر موجب کاهش ضریب دبی در سرریز لبه‌پهن می‌شود.^[۳]

در حالت کلی، جریان‌گذرا از محیط متخلخل در دو حالت کلی جریان آرام و آشفته طبقه‌بندی می‌شود. جریان از بین فیلتر سدهای خاکی به دلیل پایین بودن عدد رینولدز از عدد ۱، از رابطه‌ی داریسی برای برآورد نشت از این محیط استفاده می‌شود؛ در حالی که جریان درون گابیون از حالت آرام به حالت جریان آشفته تغییر وضعیت می‌دهد. این امر باعث می‌شود روابط داریسی و روابط لاپلاس برای برآورد نشت امکان‌پذیر نباشد. در حالت کلی، برای برآورد مشخصات جریان در گابیون دو روش پیشنهاد می‌شود: روش اول، معادلات پایه همانند معادلات داریسی و ویسیاخ و معادله‌ی هیزن ویلیامز است. ایراد مهم در محاسبات اخیر، فرض‌های ساده‌کننده برای حل معادلات پایه است، که ارائه‌ی روابط دقیق و کاربردی برای سازه‌ی سرریز گابیونی را دشوار می‌کند. روش دوم، استفاده از روابط تجربی ارائه شده بر پایه‌ی داده‌های آزمایشگاهی است (محمد، ۲۰۱۰).^[۴]

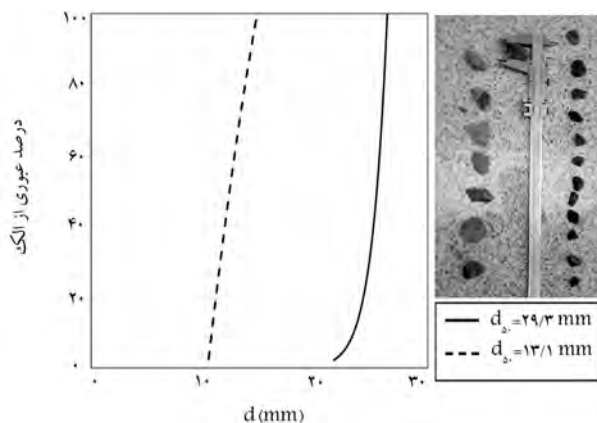
محمد (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی سرریز لبه‌پهن گابیونی و در شرایط آزاد جریان، ضریب دبی سرریز لبه‌پهن گابیونی را در دانه‌بندی‌های مختلف ارزیابی کرد و دریافت که به ازاء افزایش اندازه‌ی دانه‌بندی محیط متخلخل سرریز، ضریب دبی افزایش می‌یابد. سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ی تجربی برای برآورد ضریب دبی ارائه کرد.^[۴]

مطالعات مشابهی در مورد گذر جریان آب از محیط متخلخل به ازاء جریان آشفته در منابع وجود دارد. کلزا^۱ (۱۹۹۴)، وضعیت جریان آب را در سدهای سنگریزه‌ی^۲ در دو حالت جریان روگذر و درون‌گذر ارزیابی و مطالعه کرد و دریافت که درصد عبور جریان از درون بدنه‌ی سدهای سنگریزه‌ی در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد است.^[۵]

همچنین میخیکو^۳ و همکاران (۲۰۱۵)، به ساختار پویا خاکریزهای قله‌سنگی^۴ پرداختند. نتایج یک‌بعدی مطالعه‌ی اخیر نشان داد که پارامترهای زیادی در ساختار جریان درون‌گذر و روگذر از خاکریزهای قله‌سنگی تأثیرگذار است، که از جمله‌ی آنها می‌توان شیب پایین دست، تخلخل قله‌سنگ‌ها، قطر متوسط ذرات تشکیل‌دهنده و ارتفاع سازه اشاره کرد.^[۶] ادامه‌ی مطالعات، برای بررسی نیروهای تأثیرگذار در ساختار سازه‌ی مذکور نشان می‌دهد که تغییر پایداری بین نیروی وزن (نیروی پایداری ذرات) و نیروی مومنتوم (حاصل از جریان) باعث تغییر ساختار فیزیکی ابتدایی سازه‌ی ذکر شده می‌شود و شکل ابتدایی آن را تغییر می‌دهد. به دلیل نبودن نیروی مومنتوم در لبه‌های سازه‌ی مذکور، تغییرات در نواحی لبه‌های آن مشهودتر است. همچنین در ادامه، نیروهای برهم کنش بین ذرات در قالب مدل آزمایشگاهی بررسی شد، که نتیجه‌ی نهایی نشان داد در نقاطی که قدرت جریان‌های طولی زیاد باشد، پایداری نواحی اشاره شده کاهش محسوسی پیدا خواهد کرد.^[۷] همچنین بررسی آشفستگی‌ها در محیط‌های مختلف تخلخل صفر، ۳۴/۹ و ۴۷/۵ درصد در مطالعه‌ی لو^۵ و



شکل ۱. شمای سرریز لبه پهن گابیونی.



شکل ۲. دانه بندی مصالح محیط متخلخل سرریز لبه پهن گابیونی.

۴.۳. دانه بندی ذرات تشکیل دهنده مدل ها

در شکل ۲، منحنی دانه بندی سنگدانه های استفاده شده در سرریز گابیونی مشاهده می شود. بر اساس منحنی های ترسیم شده، قطر متوسط برای دو نوع دانه بندی ۱۳/۱ و ۲۹/۳ میلی متر بوده و همچنین شکل منحنی دانه بندی حاکی از یکنواختی مناسب سنگدانه ها در مدل های سرریز گابیونی استفاده شده است.

۵.۳. جدول آزمایش های مدل سرریز گابیونی

به منظور آماده سازی مدل های آزمایشگاهی، با استفاده از مفتول های آهنی و نوری فلزی، جعبه هایی مکعب مستطیل در ابعاد مورد نظر ساخته و در کانال آزمایشی در محل مناسب نصب شد. از سنگ های دانه بندی شده برای پر کردن جعبه های ذکر شده و ایجاد محیط متخلخل استفاده شد. با در نظر گرفتن دو اندازه دانه بندی و نحوه چیدمان جعبه های توری مطابق شکل ۱، ۱۲ حالت آزمایشی برای دبی های مختلف فراهم شد. در جدول ۱، تعداد آزمایش ها و پارامترهای اندازه گیری در هر آزمایش ارائه شده است. ابتدا در شرایط جریان آزاد، از طریق تصویر برداری پروفیل سطح آب ثبت و سپس با تغییر عمق پایاب از جریان آزاد به جریان مستغرق در گام های ۸ گانه (از حالت شکل ۳ - الف به ۳ - ح) نیمخ جریان برداشت شد. این روند برای کلیه مدل های مختلف ارائه شده در جدول ۱ مشاهده می شود. لازم به ذکر است که در آزمایش های مدل دوم برای بررسی شرایط هیدرولیکی جریان پایین دست سرریز از دستگاه سرعت سنج ADV استفاده شده است. همچنین

در پژوهش حاضر، با استفاده از نتایج به دست آمده از مطالعه بر روی مدل های آزمایشگاهی و تلفیق راهکارهای مطالعات پیشین اشاره شده به بررسی رژیم های جریان بر روی سرریز لبه پهن گابیونی پرداخته شده است.

خروج جریان از بدنه ی متخلخل سرریز گابیونی لبه پهن در هنگام استغراق شرایط ویژه یی از لحاظ هیدودینامیکی به وجود می آورد، که شناخت آن اهمیت قابل توجهی دارد. خروج جریان از بدنه ی سرریز تا حدی از به وجود آمدن جت روگذری قوی در روی سرریز جلوگیری به عمل می آورد، که می تواند در طراحی سازه هایی از جمله راه آب ماهی، اهمیت ویژه یی داشته باشد.

۳. مواد و روش ها

۱.۳. آنالیز ابعادی

در مطالعه ی هیدرولیکی سرریز گابیونی، پارامترهای ارائه شده در رابطه ی ۱ می توانند در برآورد دبی تأثیرگذار باشند:

$$Q_w = f(B, h, y, P, L, V, \rho, \mu, g, d_{50}, n, t) \quad (1)$$

که در آن، Q_w دبی سرریز گابیونی، B عرض کانال اصلی، h ارتفاع آب بر روی سرریز، y عمق آب در کانال بالادست، P ارتفاع سرریز، L طول سرریز، V سرعت جریان در بالادست، ρ وزن مخصوص سیال، μ لزجت دینامیک سیال، g شتاب گرانش زمین، d_{50} قطر متوسط ذرات تشکیل دهنده ی گابون، n تخلخل ذرات تشکیل دهنده ی گابون و t عمق پایاب هستند.

با توجه به این که در مطالعه ی جریان آزاد به دلیل آشفتگی بودن جریان و کم اهمیت بودن نیروی لزجت می توان از آثار این نیرو در مطالعات سرریز گابیونی چشم پوشی کرد، در نهایت می توان اعداد بی بعد رابطه ی ۲ را برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی مطالعه ی حاضر در نظر گرفت. دبی را می توان به صورت عوامل سرعت و سطح مد نظر قرار داد. از طرفی به علت وابسته بودن اندازه ی ذرات با تخلخل انتخاب یکی از این دو پارامتر کافی خواهد بود:

$$\frac{V}{\sqrt{gy}}, \frac{h}{L}, \frac{t}{h}, \frac{d_{50}}{P}, \frac{B}{L}, \frac{y}{h} \quad (2)$$

در ادامه ی بخش حاضر، مبانی تئوری و تجهیزات آزمایشگاهی ارائه شده است.

۲.۳. فلوم آزمایشگاهی

آزمایش های سرریز لبه پهن گابیونی در فلوم آزمایشگاهی استاندارد آرمفیلد ۱۱ مدل SPMK ۱۱، انجام شده است. عرض کانال مذکور، ۳۰۰ میلی متر، ارتفاع آن ۵۰۰ میلی متر و دبی بیشینه ی آن برابر با ۶۷ لیتر بر ثانیه بر واحد عرض با قابلیت شیب پذیری بوده است. جهت ایجاد شرایط استغراقی مختلف از دریچه ی لولایی نصب شده در پایین دست فلوم استفاده شده است.

۳.۳. مدل های لبه پهن گابیونی

تعداد ۱۲ مدل سرریز لبه پهن گابیونی (۶ مدل با دو دانه بندی) با هدف تعیین رژیم نیمخ سطح آب، که در شکل ۱ مشاهده می شود، در پژوهش حاضر استفاده شده است. تغییر ارتفاع و مسافت طی شده ی درون محیط متخلخل با جانمایی های متعدد مدل ها در شکل ۱ انجام شده است.

برای تعیین وضعیت جریان روگذر و درون‌گذر از دستگاهی برای تزریق رنگ (مخلوط آب و پرمنگنات پتاسیم) استفاده شده است.

جدول ۱. جدول آزمایش‌های مدل سرریز گابیونی (۰/۹۹ < ۰ - ۰).

مدل گابیون	دبی (Q) L/s	طول (L) (mm)	ارتفاع (P) (mm)	d _{۵۰} (mm)
۱	(۴-۱۲/۲)	۱۰۰	۱۰۰	۱۳/۱
۲	(۴-۱۲/۲)	۱۰۰	۱۰۰	۲۹/۳
۳	(۴-۱۲/۲)	۲۰۰	۱۰۰	۱۳/۱
۴	(۴-۱۲/۲)	۲۰۰	۱۰۰	۲۹/۳
۵	(۴-۱۲/۲)	۳۰۰	۱۰۰	۱۳/۱
۶	(۴-۱۲/۲)	۳۰۰	۱۰۰	۲۹/۳
۷	(۴-۱۲/۲)	۱۰۰	۲۰۰	۱۳/۱
۸	(۴-۱۲/۲)	۱۰۰	۲۰۰	۲۹/۳
۹	(۴-۱۲/۲)	۲۰۰	۲۰۰	۱۳/۱
۱۰	(۴-۱۲/۲)	۲۰۰	۲۰۰	۲۹/۳
۱۱	(۴-۱۲/۲)	۳۰۰	۲۰۰	۱۳/۱
۱۲	(۴-۱۲/۲)	۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳

مدل گابیون	h/P	F	t/h	تعداد استغراق
۱	۰/۱۱-۱/۴۳	۰-۰/۱۰۲	۰-۰/۹۹	۲۴
۲	۰/۰۷-۱/۰۵	۰-۰/۰۹۹	۰-۰/۹۹	۲۴
۳	۰/۱۲-۱/۵۱	۰-۰/۱۰۳	۰-۰/۹۹	۲۴
۴	۰/۰۸-۱/۱	۰-۰/۱۰۰	۰-۰/۹۹	۲۴
۵	۰/۰۹-۱/۲۳	۰-۰/۱۰۴	۰-۰/۹۹	۲۴
۶	۰/۱-۱۳	۰-۰/۱۰۱	۰-۰/۹۹	۲۴
۷	۰/۰۹-۱/۴۲	۰-۰/۱۰۸	۰-۰/۹۹	۲۴
۸	۰/۱۱-۱/۲۴	۰-۰/۱۰۵	۰-۰/۹۹	۲۴
۹	۰/۱-۱/۵۲	۰-۰/۱۰۹	۰-۰/۹۹	۲۴
۱۰	۰/۰۹-۱/۵۲	۰-۰/۱۰۶	۰-۰/۹۹	۲۴
۱۱	۰/۱۲-۱/۳۲	۰-۰/۱۱۰	۰-۰/۹۹	۲۴
۱۲	۰/۰۸-۱/۳۲	۰-۰/۱۰۷	۰-۰/۹۹	۲۴

۴. نتایج و بحث

در بخش حاضر، ابتدا به تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌های هیدرولیکی که شامل ضریب دبی در حالت آزاد و مستغرق (نسبت دبی مستغرق به دبی آزاد به ازاء هد سرریز یکسان) پرداخته شده و در ادامه، رژیم‌های به دست آمده از نیمرخ سطح آب بر روی سرریز لبه‌پهن گابیونی معرفی شده است. در انتها، نیز نتایج حاصل از بررسی سرعت‌های طولی و پروفیل قائم سرعت در پایین دست سرریز تجزیه و تحلیل شده است.

۱.۴. ضریب دبی سرریز لبه‌پهن گابیونی

رابطه‌ی دبی در سرریز لبه‌پهن گابیونی با کاربرد معادله‌ی انرژی به صورت رابطه‌ی ۳ خواهد بود:

$$Q_w = \frac{2}{3} BC_d \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (3)$$

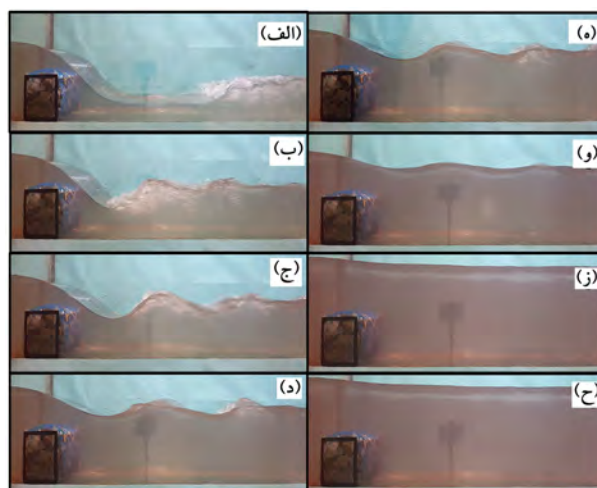
که در آن، Q_w دبی عبوری از روی سرریز لبه‌پهن، B عرض سرریز هم‌عرض کانال، h ارتفاع تراز آب بالادست سرریز و C_d ضریب دبی است. ضریب دبی در سرریز گابیونی لبه‌پهن را می‌توان با ضریب دبی در سرریزهای لبه‌پهن صلب جایگزین کرد. مشکل این است که جریان درون‌گذر و روگذر در این شرایط نیز قابل تفکیک از یکدیگر نیستند، ولی به هرحال می‌توان دبی سرریز را با دقت قابل قبولی برآورد کند. در شکل ۴ - الف، رابطه‌ی بین دبی جریان از روی سرریز را در برابر نسبت عمق بالادست به طول سرریز در شرایط آزاد جریان مشاهده می‌شود.

در شکل ۴ - ب نیز رابطه‌ی بین ضریب دبی و نسبت عمق بالادست به طول سرریز برای آزمایش‌های مختلف در شرایط آزاد و در مقایسه با سایر مطالعات مشاهده می‌شود. نتایج بررسی سرریز گابیونی نشان می‌دهد که به ازاء طول سرریز ۷ میلی‌متر، ضریب دبی سرریز گابیونی مدل محمد (۲۰۱۰)، مقادیر ۰/۶ را ارائه داده است، که از مقادیر معمول بسیار کمتر است. لذا استنباط می‌شود که دلیل کم بودن طول سرریز این نوع سرریز در سرریز لبه‌پهن دسته‌بندی نمی‌شود. از طرفی داده‌های آزمایشگاهی مدل‌های آزاد، مقادیر دبی را از مقادیر دبی سرریز لبه‌پهن صلب در آزمایش‌های عظیمی حدود ۹/۳٪ نشان می‌دهد، که این افزایش به موجب عبور جریان از داخل گابیون رخ داده و از این رو سرریز به ازاء ارتفاع آب کمتر نسبت به سرریز لبه‌پهن صلب دبی بیشتری را عبور می‌دهد. لذا افزایش ضریب دبی در این شرایط دور از انتظار نیست. [۴ د ۱۶]

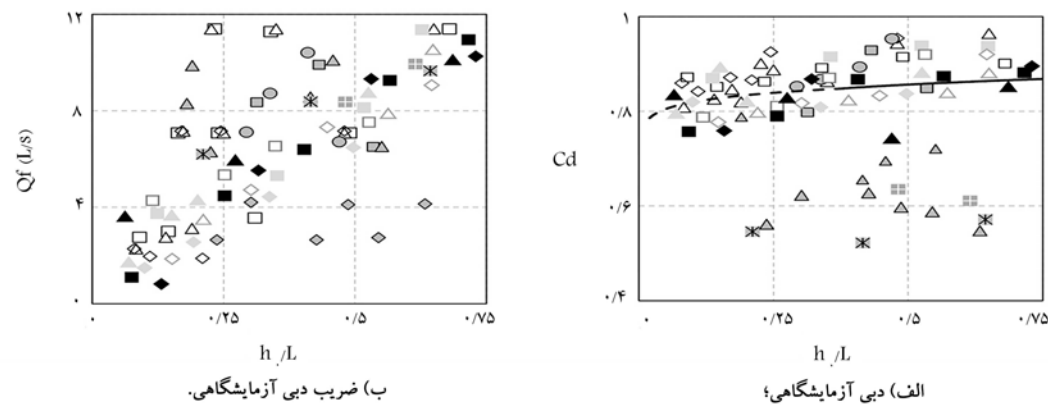
برای برآورد ضریب دبی با در نظر گرفتن داده‌های محمد (۲۰۱۰) و داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ی رگرسیونی با استفاده از نرم‌افزار متلب^{۱۲} برای برآورد ضریب دبی ارائه شده است، که ابتدا ضریب دبی آزمایشگاهی به صورت تابع ریاضی از پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی تأثیرگذار معادله‌ی ۴ مشخص شد. سپس با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، ضرایب مناسب براساس بیشترین ضریب همبستگی ۰/۸۲ انتخاب شد (معادله‌ی ۵).

$$C_d = f \left(\frac{d_{50}}{P}, \frac{h}{L} \right) \quad (4)$$

$$C_D = -0.38 \left(\frac{d_{50}}{P} \right)^{-0.2} \left(\frac{h}{L} \right)^{-0.05} + 1.05 \quad (5)$$



شکل ۳. تصویر شرایط جریان در آزمایش‌های مدل سرریز لبه‌پهن گابیونی و در استغراق‌های مختلف.



□	P=۱۰۰ mm , L=۱۰۰ mm , d _۰ =۲۹/۳ mm	△	P=۱۰۰ mm , L=۲۰۰ mm , d _۰ =۲۹/۳ mm
×	P=۱۰۰ mm , L=۳۰۰ mm , d _۰ =۲۹/۳ mm	◇	P=۱۰۰ mm , L=۱۰۰ mm , d _۰ =۱۳/۸ mm
■	P=۱۰۰ mm , L=۲۰۰ mm , d _۰ =۱۳/۸ mm	▲	P=۱۰۰ mm , L=۳۰۰ mm , d _۰ =۱۳/۸ mm
◆	P=۲۰۰ mm , L=۱۰۰ mm , d _۰ =۲۹/۳ mm	□	P=۲۰۰ mm , L=۲۰۰ mm , d _۰ =۲۹/۳ mm
△	P=۲۰۰ mm , L=۳۰۰ mm , d _۰ =۲۹/۳ mm	◇	P=۲۰۰ mm , L=۱۰۰ mm , d _۰ =۱۳/۸ mm
■	P=۲۰۰ mm , L=۲۰۰ mm , d _۰ =۱۳/۸ mm	◆	P=۲۰۰ mm , L=۳۰۰ mm , d _۰ =۱۳/۸ mm
●	P=۱۵۰ mm , L=۲۹ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)	■	P=۲۰۰ mm , L=۲۹ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)
▲	P=۱۵۰ mm , L=۷ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)	■	P=۲۰۰ mm , L=۷ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)
✱	P=۲۰۰ mm , L=۳ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)	◇	P=۱۵۰ mm , L=۳ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)
- - -	Azimi et al (۲۰۰۹) , ۰/۸ < h/L < ۰/۴	—	Azimi et al (۲۰۰۹) , ۰/۴ < h/L < ۲/۰

شکل ۴. مدل‌های سرریز گابیونی با جریان آزاد.

دبی در حالت مستغرق ارائه شده است، که به صورت تابعی از نسبت استغراق است:

$$\psi = -0.1 \exp\left(\frac{t}{h}\right)^{2.3} + 1 \quad (7)$$

پارامترهای معادله‌ی ۷ در شکل ۱ نمایش داده شده است. ضریب تعدیل در مورد انواع دیگر سرریز در شکل ۷ ارائه شده است: [۱۲، ۲۰-۲۲]

۳.۴. رژیم نیمرخ سطح آب در سرریز گابیونی

در تمامی آزمایش‌های صورت گرفته در جدول ۱، کلیه‌ی نیمرخ‌های سطح آب در قالب ۲۸۸ تصویر برداشت شد. بررسی‌ها نشان داد که به ازاء افزایش عمق پایاب سرریز گابیونی، جریان پایین دست سرریز گابیونی از حالت‌های مختلفی پیروی می‌کند، که می‌توان آنها را در ۴ دسته تقسیم‌بندی کرد، که شامل: جریان آزاد، پرش هیدرولیکی پایین دست، جریان موجی پایین دست و استغراق کامل است. لازم به ذکر است که سه حالت آخر در جریان مستغرق اتفاق می‌افتد. به همین منظور به ازاء ۶ مدل آزمایشگاهی با قطر متوسط ذرات ۲/۹۳ میلی‌متر، ۳ رژیم نیمرخ سطح آب در شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشاهده می‌شود. همچنین، با توجه به شکل ۳، که قبلاً بدان اشاره شده است؛ می‌توان روند ظاهر شدن رژیم‌های مذکور را مشاهده کرد. همان‌طور که از شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشخص است، با افزایش عمق پایین دست سرریز گابیونی عریض، جریان با گذر کردن از لبه‌ی تاج سرریز از حد بینابین جریان آزاد و مستغرق عبور کرده و در نهایت به جریان مستغرق تبدیل وضعیت داده است. با تبدیل جریان آزاد به مستغرق، پرش هیدرولیکی از سمت پایین دست به سمت تاج توسعه پیدا کرده است. این وضعیت از نیمرخ سطح جریان آب به عنوان رژیم پرش هیدرولیکی پایین دست معرفی شده است. در ادامه، با افزایش عمق آب پایاب، پرش هیدرولیکی به سمت تاج سد حرکت کرده و در نهایت، پرش هیدرولیکی در محدوده‌ی

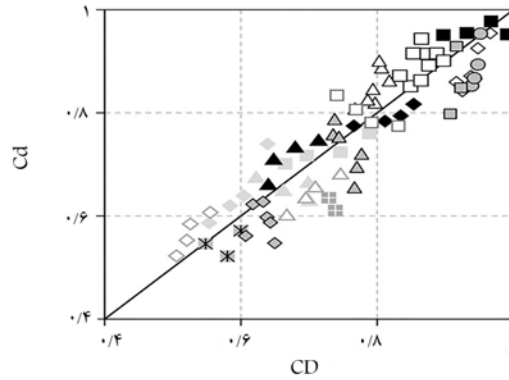
لازم به ذکر است که C_d ضریب دبی به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی است، در حالی که C_D به عنوان ضریب دبی محاسباتی که بر اساس رابطه‌ی ۴ استفاده می‌شود، تعریف می‌شود. باید توجه داشت برابر شدن مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی با ضریب دبی محاسباتی، نشانگر دقت بالای رابطه‌ی ۵ خواهد بود. در شکل ۵، میزان دقت رابطه‌ی ارائه شده با مقادیر به دست آمده از آزمایش‌ها مشاهده می‌شود، که مطابق آن رابطه‌ی ارائه شده می‌تواند با دقت قابل قبولی برای برآورد دبی در نظر گرفته شود.

۲.۴. ضریب دبی در شرایط استغراق سرریز

استغراق موجب کاهش ضریب جریان عبوری از روی سرریز می‌شود. اگر نسبت دبی در حالت مستغرق به حالت آزاد با ψ نشان داده شود، می‌توان رابطه‌ی ۶ را نوشت:

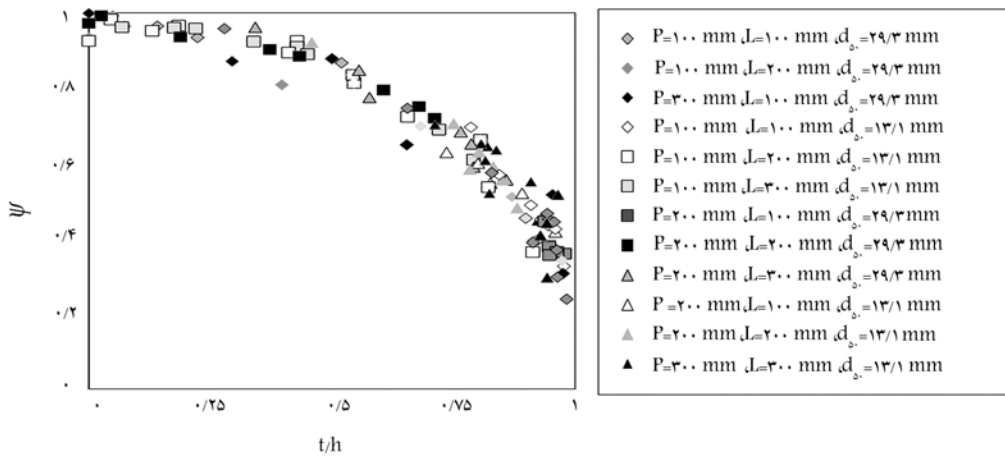
$$\psi = \frac{Q_s}{Q_f} \quad (6)$$

که در آن، اندیس f و s به ترتیب بیانگر دبی در حالت آزاد و مستغرق است. با برآورد ضریب دبی می‌توان به ازاء ارتفاع آب یکسان بر روی سرریز در حالت آزاد، دبی و سپس از نسبت استغراق (t/h) مقدار ضریب تعدیل‌کننده‌ی دبی از روابط پیشنهادی را محاسبه و از آن، دبی شرایط مستغرق را برآورد کرد. بنابراین لزوم ارائه‌ی رابطه‌ی برای ضریب کاهش دبی به ازاء نسبت استغراق ضرورت می‌یابد. در مطالعات پیشین، ضریب کاهش (ضریب در حالت مستغرق) دبی برای سرریزهای مختلف برآورد شده است. این مقدار برای سرریز گابیونی در شکل ۶ محاسبه و ترسیم شده است. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ی ۷ برای محاسبه‌ی ضریب کاهش



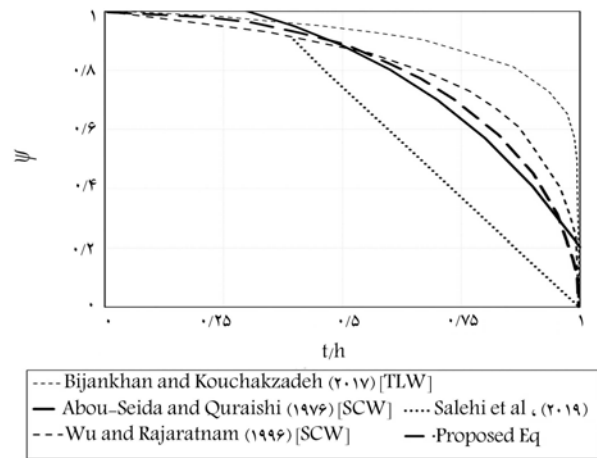
□ $P=100$ mm $L=100$ mm $d_s=29/3$ mm	△ $P=100$ mm $L=200$ mm $d_s=29/3$ mm
× $P=100$ mm $L=300$ mm $d_s=29/3$ mm	◇ $P=100$ mm $L=100$ mm $d_s=13/1$ mm
■ $P=100$ mm $L=200$ mm $d_s=13/1$ mm	▲ $P=100$ mm $L=300$ mm $d_s=13/1$ mm
◆ $P=200$ mm $L=100$ mm $d_s=29/3$ mm	□ $P=200$ mm $L=200$ mm $d_s=29/3$ mm
△ $P=200$ mm $L=300$ mm $d_s=29/3$ mm	◇ $P=200$ mm $L=100$ mm $d_s=13/1$ mm
■ $P=200$ mm $L=200$ mm $d_s=13/1$ mm	◆ $P=200$ mm $L=300$ mm $d_s=13/1$ mm
● $P=150$ mm $L=29$ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)	■ $P=200$ mm $L=29$ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)
△ $P=150$ mm $L=7$ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)	■ $P=200$ mm $L=7$ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)
✱ $P=200$ mm $L=3$ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)	◇ $P=150$ mm $L=3$ mm (Mohamed, ۲۰۱۰)

شکل ۵. مقایسه‌ی مقادیر ضریب دبی محاسبه شده رابطه‌ی ۵ و برآورد شده از آزمایش‌ها.

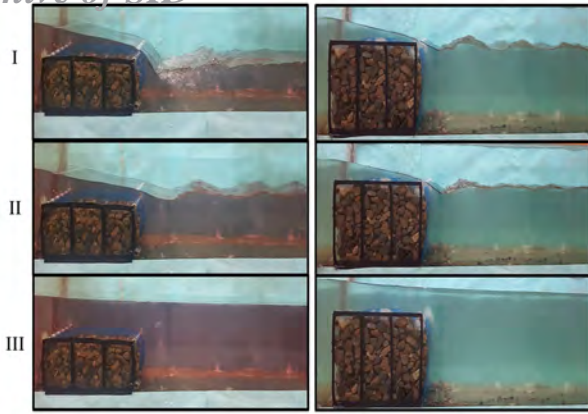


شکل ۶. ضریب کاهش دبی در حالت مستغرق سرریز گابیونی.

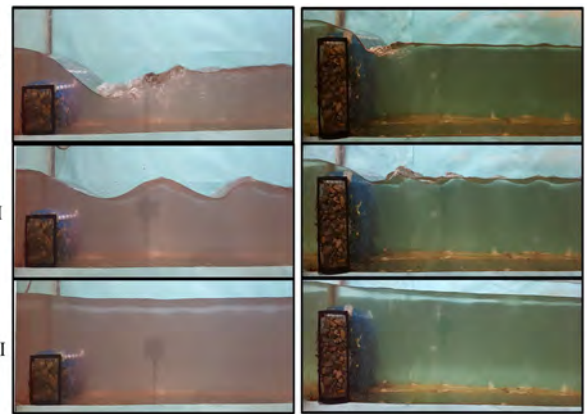
هیدرولیک مشخصی حذف شده و نیمرخ پایین دست سرریز گابیونی به حالت سری موج پایین رونده بوده است، که در شکل‌های ۸ الی ۱۰ سطر دوم شکل‌ها مشخص شده است. با بررسی این نیمرخ مشخص می‌شود که موج پایین رونده با افزایش عمق پایاب با ارتفاع موج کمتری توسعه یافته است، تا در نهایت موج پایین رونده حذف شده است. این سری موج پایین رونده به عنوان رژیم موجی پایین رونده معرفی می‌شود. نکته‌ی قابل توجه در رابطه با نیمرخ ذکر شده، این است که چنین موج‌هایی بر عکس دیگر نیمرخ‌ها به شدت به سمت پایین دست حرکت می‌کنند و جریان پایین دست سرریز گابیونی تا فاصله‌ی زیادی تحت تأثیر امواج پایین رونده است. در نهایت با افزایش استغراق، امواج پایین رونده با طول موج بیشتر و تعداد و ارتفاع کمتر پدیدار می‌شوند. در آخر امواج پایین رونده حذف شده و رژیم جایگزین این نیمرخ به عنوان نیمرخ استغراق کامل سرریز شکل گرفته است. این وضعیت در سطر آخر شکل‌های ۸ الی ۱۰ مشخص شده است.



شکل ۷. روابطه ارائه شده برای برآورد ضریب کاهش دبی.



شکل ۱۰. نمایی از رخداد رژیم‌های نیمرخ آب در پایین دست سرریز گابیونی به ازای ۳۰۰ میلی متر.



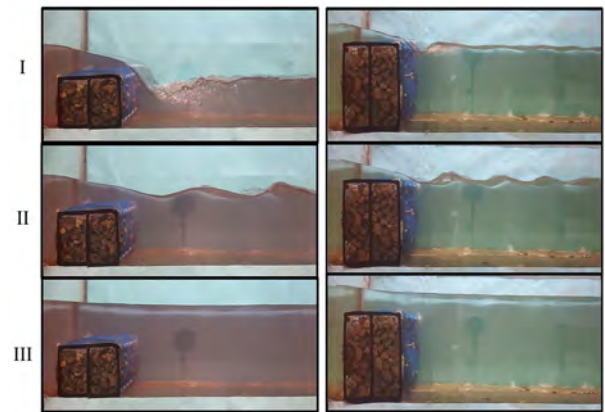
شکل ۸. نمایی از رخداد رژیم‌های نیمرخ سطح آب در پایین دست سرریز گابیونی به ازای طول ۱۰۰ میلی متر.

۵.۴. تعیین وضعیت جریان روگذر و درون‌گذر

به منظور تعیین شرایط جریان پایین دست سرریز گابیونی از دو روش استفاده شده است. روش اول با استفاده از تزریق رنگ در پایین دست گابیون؛ و روش دوم استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی سرعت توسط ADV. دو جریان در سرریز گابیونی در حالت روگذری رخ می‌دهد. اول جریانی که از روی سرریز عبور می‌کند و جریان دوم مربوط به درون گابیون است. جریان‌های مذکور در شکل ۱۲ مشاهده می‌شوند.

تزریق رنگ در پایین دست سرریز گابیونی در رژیم‌های مختلف نشان داد که با تغییر نیمرخ سطح آب در پایین دست سرریز گابیونی سرعت در پشت سرریز گابیونی در حالت پرش هیدرولیکی بالادست به مراتب بیشتر از حالت نیمرخ سطح آب موجی پایین دست است. همچنین با تزریق رنگ در پایین دست سرریز گابیونی مشخص شد که جریان در نیمرخ سطح آب کاملاً مستغرق در پشت گابیون به مقدار زیادی کاهش پیدا می‌کند. این امر بدین معناست که با افزایش استغراق رفتار سرریز گابیونی لبه پهن به سرریز لبه پهن معمولی (صلب) تغییر وضعیت خواهد داد. و یا به عبارت دیگر، جریان عبوری از گابیون ناچیز خواهد بود. از همین رو، شکل ۱۳ برای حالت نیمرخ سطح آب پرش هیدرولیکی پایین دست ترسیم شده است، که مطابق آن با گذر زمان رنگ تزریق شده در پشت سرریز با جریان زیادی به سمت پایین دست حرکت می‌کند. این امر نشانگر این مطلب است که جت تخلیه شده از سرریز با جت جریان درون‌گذر سرریز تلفیق می‌شود و مقدار قابل توجهی دبی از گابیون عبور می‌کند. با در نظر گرفتن این نکته، کنترل پلات سرعت طولی و پروفیل قائم سرعت طولی در پایین دست سرریز با استفاده از داده‌ی بردار سرعت در پایین دست سرریز از طریق سرعت سنخ صوتی ترسیم شده است. نتایج پروفیل قائم سرعت طولی نشان می‌دهد که بیشینه‌ی سرعت طولی در نزدیک کف کانال اتفاق می‌افتد و نمایانگر این مطلب است که مقدار دبی عبوری از درون گابیون قابل توجه است.

همچنین با افزایش ارتفاع آب پایین دست در کانال و تغییر رژیم پرش هیدرولیکی پایین دست به نیمرخ موجی پایین دست، تزریق رنگ نشان داد که از نظر زمانی، رنگ جابه‌جایی کمتری نسبت به حالت نیمرخ قبل دارد؛ این بدان معناست که با افزایش میزان استغراق دبی روگذری روند افزایشی و دبی درون‌گذری روند کاهش‌ی به خود خواهد گرفت. این مطلب در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن بر خلاف نیمرخ قبل، رنگ به سمت بالا حرکت کرده و روند چرخشی به خود گرفته است. این بدان معناست که دبی درون‌گذری نسبت به حالت نیمرخ پرش هیدرولیکی پایین دست کاهش پیدا کرده است.

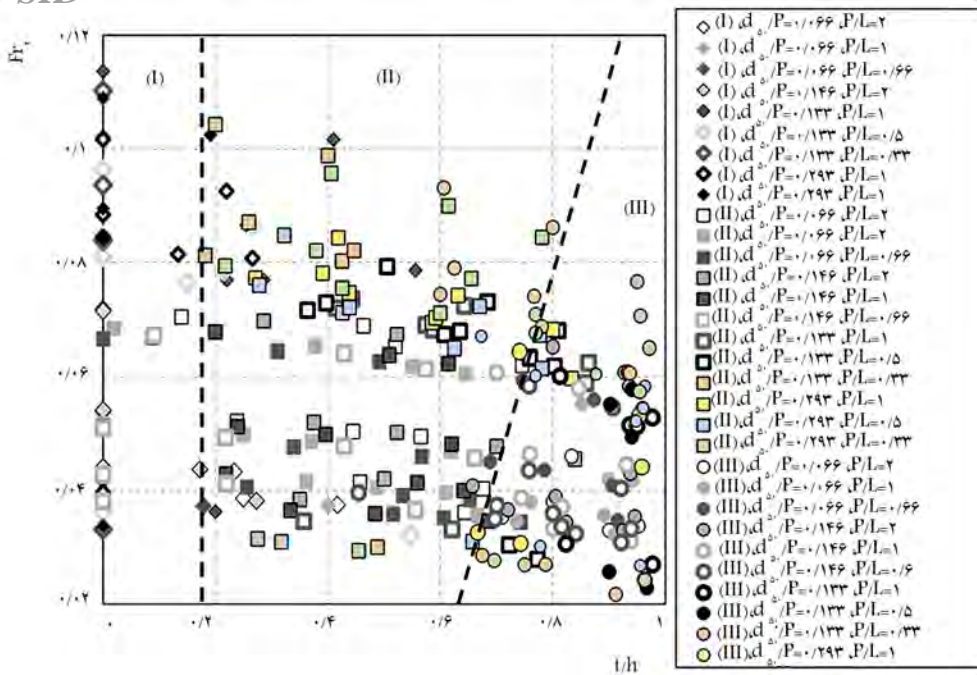


شکل ۹. نمایی از رخداد رژیم‌های نیمرخ آب در پایین دست سرریز گابیونی به ازای ۲۰۰ میلی متر.

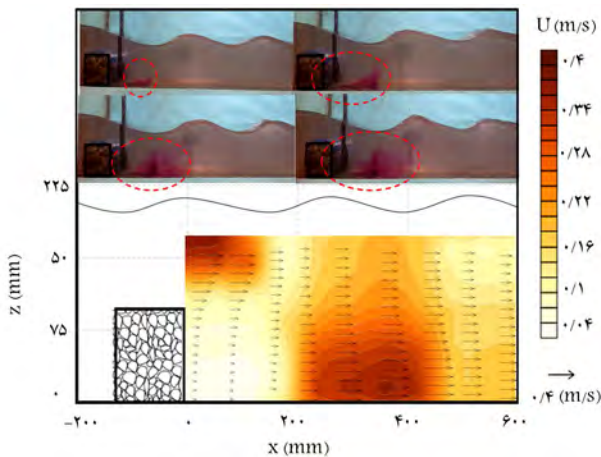
۴.۴. تفکیک رژیم‌های نیمرخ سطح آب

به منظور تفکیک و تشخیص هیدرولیکی رژیم‌های معرفی شده، از عدد فرود پایین دست برای جداسازی رژیم‌های مذکور در مقابل نسبت استغراق استفاده شده است. جداسازی رژیم‌های نیمرخ سطح آب از یکدیگر با محاسبه‌ی پارامترهای معرفی شده در شکل ۱۰ به صورت نمودار مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش نسبت استغراق نیمرخ سطح آب بر روی سرریز گابیون، نیمرخ از پرش هیدرولیک پایین دست به جریان موجی پایین دست تبدیل ساختار می‌دهد، که با توجه به عدد فرود این مقادیر و همچنین نسبت استغراق این تبدیل وضعیت در مقدار حدودی ۰/۱۸، نسبت استغراق (t/h) رخ داده است. همچنین این مرز برای جریان موجی با جریان استغراق کامل از رابطه‌ی ۸ استفاده کرد. لازم به ذکر است که این محدوده با در نظر گرفتن تعداد رژیم مساوی در دو سمت (برای مثال تعداد مربع‌ها و دایره‌ها در دو طرف مساوی شده است)، در نظر گرفته شده است. این مطلب در برخی مطالعات پیشین نیز استفاده شده است.^[۱۳] در شکل ۱۱، رژیم‌های سرریز لبه تیز برای حالت مستغرق در پژوهش گوان و همکاران (۲۰۱۵) مشاهده می‌شود.^[۱۹]

$$Fr_2 = 0.35 \frac{t}{h} - 0.2 \quad (8)$$



شکل ۱۱. مرزهای هیدرولیکی رژیم‌های تشکیل شده در سرریز گابیونی. [۲۳ و ۲۴]



شکل ۱۴. نیمرخ قائم سرعت طولی در حالت نیمرخ موجی پایین دست.

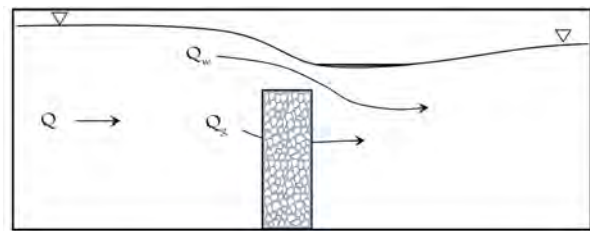
عمل خواهد کرد و جت عبور از درون سرریز لبه پهن گابیونی دارای حد استغرراق نسبت به جت بالایی سرریز به صورت ناچیزی جریان پیدا می‌کند (شکل ۱۵).

۵. نتیجه‌گیری

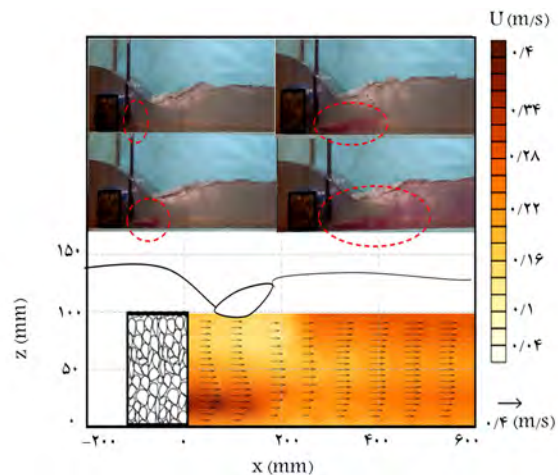
بر اساس آنچه بررسی شده است، خلاصه‌ی نتایج را می‌توان به این صورت بیان کرد:

۱- در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی سرریز لبه پهن گابیونی و با توجه به مطالعات پیشین، با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، معادله‌ی در نرم‌افزار متلب برای برآورد ضریب دبی سرریز مذکور ارائه شده است، که با دقت ۱۸٪ می‌تواند رابطه‌ی خوبی برای برآورد دبی سرریز گابیونی و معادله‌ی سرریز لبه پهن استفاده شود.

۲- نتایج نشان داد که مقادیر ضریب دبی سرریز لبه پهن گابیونی از مقادیر مربوط



شکل ۱۲. شمایی از جریان‌های عبوری از گابیون.



شکل ۱۳. نیمرخ قائم سرعت طولی نیمرخ پرش پایین دست.

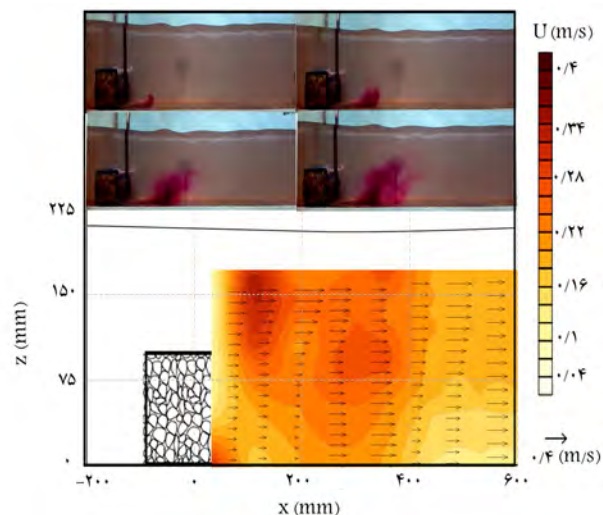
با افزایش حد استغرراق و پدیدار شدن نیمرخ استغرراق کامل، تزیق رنگ نشان داد که رنگ تزیق شده بدون حرکت طولی به سمت پایین دست باقی خواهد ماند. این مطلب همچنین با در نظر گرفتن پروفیل‌های سرعت قائم قابل استنباط است، که جریان به صورت ناچیزی در پشت گابیون برقرار است؛ و به عبارت دیگر، به ازاء افزایش عمق پایاب، سرریز گابیونی تغییر رفتار می‌دهد و همانند سرریز لبه پهن معمولی

به ضریب سرریز لبه‌پهن معمولی به صورت قابل ملاحظه‌تری بیشتر است. این مسئله به دلیل عبور جریان از درون گابیون است، که به طبع باعث گذر جریان بیشتری به ازاء ارتفاع هد سرریز یکسان است.

۳- ضریب کاهش دبی سرریز گابیونی در حالت جریان مستغرق محاسبه شد و در نهایت با استفاده از روابط ریاضی، رابطه‌ی رگرسیونی برای برآورد آن ارائه شد. با استفاده از پارامتر مذکور می‌توان دبی در حالت مستغرق سرریز گابیونی را محاسبه کرد.

۴- نیمرخ سطح آب بر روی سرریز گابیونی به ازاء نسبت استغراق مختلف معرفی شد و در نهایت روابطی برای تعیین نوع رژیم با استفاده از عدد فرود پایین دست ارائه شده است.

۵- تزریق رنگ و بررسی هیدرودینامیکی سرعت طولی در پایین دست سرریز گابیونی نشان داد که با افزایش نسبت استغراق، جریان درون‌گذری سرریز گابیونی روند کاهشی پیدا می‌کند. پیش‌بینی می‌شود که در حالت جریان سرریز کاملاً مستغرق، رفتار سرریز گابیونی لبه‌پهن همانند سرریز لبه‌پهن معمولی (جامد) باشد.



شکل ۱۵. نیمرخ قائم سرعت طولی در حالت نیمرخ استغراق کامل پایین دست.

پانویس‌ها

1. Kells
2. rockfill
3. Michioku
4. rubble-mound
5. Leu
6. Chanson
7. Wu & Rajaratnam
8. Guan
9. deeply submerged
10. impinging jet
11. Armfield
12. MATLAB

منابع (References)

1. Hager, W.H. and Schwalt, M. "Broad-crested weir", *J. Irrig. Drain. Eng.*, **120**(1), pp. 13-26 (1994).
2. Azimi, A.H., Rajaratnam, N. and Zhu, D. "Submerged flows over rectangular weirs of finite crest length", *ASCE, Journal of Irrigation and Drainage Eng.*, **140**(5), pp. 06014001-12 (2014).
3. Sargison, J.E. and Percy, A. "Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes", *J. Irrig. Drain.*, **135**(1), pp. 115-118 (2009).
4. Mohamed, H. "Flow over gabion weirs", *J. Irrig. Drain Eng.*, **136**(8), pp. 573-577 (2010).
5. Kells, J.A. "Reply on discussion of spatially varied flow over rockfill embankments", *Can. J. Civ. Eng.*, **21**, pp. 163-166 (1994).
6. Michioku, K.; Maeno, S.; Furusawa, T. and Haneda, M. "Discharge through a permeable rubble mound weir", *J. Hydraul. Eng.*, **31**(1), pp. 1-10 (2005).
7. Michioku, K.; Takehara, K. and Etoh, T. "An experimental study on flow field in and around rubble mound river structures", *J. Hydrosoci. Hydr. Eng.*, **25**(2), pp. 37-45 (2007).
8. Leu, J.M.; Chan, H.C. and Chu, M.S. "Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel", *Flow Meas. Instrum.*, **19**(6), pp. 331-337 (2008).
9. Chanson, H. "Discussion of discharge through a permeable rubble mound weir", *J. Hydraul. Eng.*, **132**(4), pp. 432-434 (2006).
10. Salehi, S. and Azimi, A.H. "Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **145**(11), pp. 04019025 (2019).
11. Wu, S. and Rajaratnam, N. "Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs", *ASCE, J. Hydr. Eng.*, **122**(7), pp. 412-414 (1996).
12. Wu, S. and Rajaratnam, N. "Impinging jet and surface flow regimes at drop", *IAHR, J. Hydr. Res.*, **36**(1), pp. 69-74 (1998).
13. Azimi, A.H.; Rajaratnam, N. and Zhu, D.Z. "Water surface characteristics of submerged rectangular sharp-crested weirs", *ASCE, J. Hydraul. Eng.*, **142**(5), pp. 06016001-9 (2016).
14. Guan, D.; Melville, B.W. and Friedrich, H. "Flow patterns and turbulence structures in a scour hole downstream of a submerged weir", *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, **140**(1), pp. 68-76 (2013).

15. Guan, D.; Melville, B.W. and Friedrich, H. "Live-bed scour at submerged weirs", *J. Hydraulic. Eng.*, **141**(2), pp. 04014071-12 (2015).
16. Safarzadeh, A. and Mohajeri, S.H. "Hydrodynamics of rectangular broad-crested porous weirs", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **144**(10), pp. 04018028 (2018).
17. Khatibi, R.; Salmasi, F.; Ghorbani, M.A. and et al. "Modelling energy dissipation over stepped-gabion weirs by artificial intelligence", *Water Resources Management*, **28**(7), pp. 1807-1821 (2014).
18. Mohammadpour, R.; Ghani, A.A. and Azamathulla, H.M. "Numerical modeling of 3D flow on porous broad crested weirs", *Applied Mathematical Modelling*, **37**(22), pp. 9324-9337 (2013).
19. Azimi, A.H. and Rajaratnam, N. "Discharge characteristics of weirs of finite crest length", *Journal of Hydraulic Engineering*, **135**(12), pp. 1081-1085 (2009).
20. Bijankhan, M. and Kouchakzadeh, S. "Unified discharge coefficient formula for free and submerged trigular labyrinth weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, **57**, pp.46-56 (2017).
21. Abou-seida, M.M. and Quraishi, A.A. "A flow equation for submerged rectangular weirs", *Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 2*, **61**(4), pp. 685-696 (Dec 1976).
22. Salehi, S.; Esmaili, K. and Azimi, A.H. "Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, **66**, pp. 99-110 (2019).
23. Guan, D.; Melville, B.W. and Friedrich, H. "Live-bed scour at submerged weirs", *Journal of Hydraulic Engineering*, **141**(2), pp. 04014071 (2015).
24. Salehi, S.; Azimi, A.H. and Bonakdari, H. "Hydraulics of sharp-crested weir culverts with downstream ramps in free-flow, partially, and fully submerged-flow conditions", *Irrigation Science*, **39**(2), pp.191-207 (2021).