

جریان عبوری درون‌گذری و روگذری در سرریز گابیونی در شرایط آزاد در بستتر ماسه‌ییبی

سعید صالحی (دانشجوی دکتری)

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

سیدعلیرضا اسماعیلی (دانشجوی دکتری)

گروه علوم و مهندسی آب - سازه‌های آبی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

نیما صادقی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۲/۴، ص. ۱۳-۳، پژوهشی)

در پژوهش حاضر، به بررسی هیدرولیک جریان عبوری درون‌گذری و روگذری در سرریز گابیونی لبه‌پهن پرداخته شده است؛ لذا از مدل آزمایشگاهی در جهت برآورد پارامترهای هیدرولیکی، از جمله: عمق آب‌شستگی پایین‌دست، ضریب دبی و میزان دبی درون‌گذری و روگذری استفاده شده است. تخمین ضریب دبی و بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی از روش رگرسیون غیرخطی بر پایه‌ی داده‌های آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. در روش اخیر، با به‌کارگیری پارامترهای هندسی و هیدرولیکی دبی جریان درون‌گذری و روگذری از سرریز گابیونی، تأثیر پارامترهایی از جمله قطر متوسط ذرات گابیون در عمق آب‌شستگی بررسی شده و نتایج نشان داده است که با افزایش اندازه‌ی ذرات درون‌گابیون، میزان عمق آب‌شستگی در پایین‌دست افزایش یافته است. همچنین مقایسه‌ی بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی با مطالعه‌ی پیشین نشان داد که استفاده از سرریز گابیونی به دلیل داشتن جریان درون‌گذر، میزان عمق آب‌شستگی در پایین‌دست کاهش پیدا کرده است. این امر به دلیل وجود جریان درون‌گذری در گابیون است، که باعث کاهش قدرت جت روگذر می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که روابط ارائه شده با خطای حدود ۱۷٪ می‌توانند در برآورد جریان درون‌گذر و روگذر از گابیون کاربرد داشته باشند.

واژگان کلیدی: جریان غیرداریسی، محیط متخلخل، افت انرژی، سرریز گابیونی، ضریب دبی.

۱. مقدمه

سرریزهای گابیونی عموماً از مصالح سنگ و شن‌های درشت در محل ساخته می‌شوند. شیوه‌ی ساخت ساده‌ی سرریزها می‌تواند به عنوان یکی از علل تأثیرگذار به جایگزینی آن‌ها با سایر سرریزها اشاره کند. مزایای سرریزهای گابیونی عبارت‌اند از:

۱. دوستدار محیط زیست بودن؛

۲. سادگی و سهولت در ساخت و اجرای آن؛

۳. استفاده از مصالح قرصه، پایداری، انعطاف‌پذیری، نفوذپذیری بالا و مقرون به صرفه بودن؛

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۲۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۵، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2021.57425.2907

saeedsalehi100@gmail.com
alirezaesmaili72@gmail.com
nimasadeghi@usa.com
esmaili@um.ac.ir

۴. قابلیت تله‌اندازی بخشی از رسوب‌های رودخانه بر پایه‌ی اندازه‌ی ذرات که این امر موجب می‌شود مواد ارگانیک از بدنه‌ی تلویش‌پذیر سرریز عبور کنند و به پایین‌دست رودخانه نیز انتقال یابند.

موارد اخیر می‌تواند به اهمیت ساخت سرریز گابیونی و احیای محیط‌زیست صحنه گذارد. از این‌رو در دهه‌ی جدید، مطالعاتی در این زمینه آغاز شده است. پژوهش حاضر با بررسی آزمایشگاهی سعی دارد که جریان عبوری از سرریز گابیونی را بررسی و اندازه‌گیری کند.

استفاده از سرریز گابیونی توسط بسیاری از پژوهشگران برای تنظیم آب در شبکه‌های آبیاری توصیه شده است. این سازه، به دلیل داشتن جریان درون‌گذری، پیش‌بینی می‌شود که نسبت به سرریزهای لبه‌پهن، عمق آب‌شستگی کمتری را در

بستر رسوبی ایجاد کند. از این رو بررسی مورد اخیر، یکی از اهداف پژوهش حاضر به شمار می‌آید.

۲. مطالعات انجام شده

موارد مشابهی در رابطه با گذر جریان آب در محیط متخلخل به ازاء جریان آشفته در منابع وجود دارد. کل^۱ (۱۹۹۳)، وضعیت جریان آب را در سدهای سنگ‌ریزی^۲ در دو حالت جریان روگذری و درون‌گذری ارزیابی و مطالعه کرده و دریافته است که درصد عبور جریان آب از درون بدنه سد سنگ‌ریزی در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد متغیر است.^۱ در موضوع کاربرد سرریزهای گابیونی تاکنون مطالعاتی که در داخل و خارج از کشور انجام شده‌اند، از جنبه‌های مختلف به ویژگی‌های هیدرولیکی جریان عبوری از سازه‌های مذکور پرداخته‌اند. هگر و اسکووال^۳ (۱۹۹۴)، به بررسی ضریب دبی سرریز گابیونی پرداخته و نتایج ایشان در قالب نمودارهایی برای اندازه‌گیری دبی ارائه شده است.^۲

تعیین رژیم‌های سطح آب در پایین دست سازه‌های هیدرولیکی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است. برای اولین بار، این موضوع توسط وو و راجاراتان^۴ (۱۹۹۶) مطرح شد. ایشان با استفاده از داده‌های ارتفاع آب در بالادست و پایین دست سرریز لبه‌تیز، وضعیت‌های مختلف نیرخ سطح آب را به ازاء مرزهای هیدرولیکی مختلف و براساس نسبت استغراق ارائه کرده‌اند.^۳ همچنین بررسی آشفستگی‌ها در محیط‌های مختلف تخلخل صفر، ۳۴/۹ و ۴۷/۵ درصد در مطالعه‌ی^۵ و همکاران (۲۰۰۸)، نشان داد که با افزایش تخلخل در پایین دست محیط متخلخل، جریان آشفستگی کمتری مشاهده می‌شود.^۴ ساراگیسون و پرسی^۶ (۲۰۰۹)، نیز شیب بالادست و پایین دست سرریز لبه‌پهن را ارزیابی کردند و دریافتند که افزایش شیب بالادست سرریز لبه‌پهن باعث افزایش عمق آب بالادست آن می‌شود که این امر موجب کاهش ضریب دبی در سرریز لبه‌پهن می‌شود.^۵

در حالت کلی، جریان گذرا از محیط متخلخل در دو حالت کلی جریان آرام و آشفته طبقه‌بندی می‌شود. در جریان از درون فیلتر سدهای خاکی به علت کمتر بودن عدد رینولدز ($Re < 1$)، می‌توان از رابطه‌ی دارسی برای برآورد نشت از محیط متخلخل استفاده کرد. این در حالی است که جریان درون گابیون آشفته است و این امر باعث می‌شود که روابط دارسی و روابط لاپلاس برای برآورد نشت امکان‌پذیر نباشد. در حالت کلی برای برآورد مشخصات جریان در گابیون دو روش پیشنهاد شده است: الف) معادلات پایه همانند معادلات دارسی - ویسباخ و معادله‌ی هیزن - ویلامز که ایراد مهم در آن‌ها فرض‌های ساده‌کننده برای حل معادلات پایه است که ارائه‌ی روابط دقیق و کاربردی برای سازه‌ی گابیونی را دشوار می‌کنند. ب) استفاده از روابط تجربی ارائه شده بر پایه‌ی داده‌های آزمایشگاهی است.

محمد (۲۰۱۰)، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی سرریز لبه‌پهن گابیونی، ضریب دبی سرریز گابیونی را در دانه‌بندی‌های مختلف ارزیابی کرد و دریافت که به ازاء افزایش اندازه‌ی دانه‌های گابیون، ضریب دبی در سرریز لبه‌پهن گابیونی افزایش پیدا می‌کند. آزمایش‌های مذکور در شرایط آزاد انجام و سپس با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، رابطه‌ی تجربی برای برآورد ضریب دبی ارائه شده است.^۶ همچنین الگوی جریان با استفاده از مدل‌های عددی و حل معادلات جریان در برخی مطالعات بررسی شده است. محمدپور و همکاران (۲۰۱۳)، الگوی جریان افقی و همچنین خطوط جریان را در اطراف سرریز گابیونی بحث و بررسی کردند. نتایج حاصل از مدل‌سازی ایشان با حالت آزمایشگاهی مقایسه شد و نتایج نشان

داد که به ازاء کالیبره‌ی مدل عددی، نتایج قابل قبولی از مدل عددی در حالت‌های مختلف مدل آشفستگی به دست آمده است.^۷

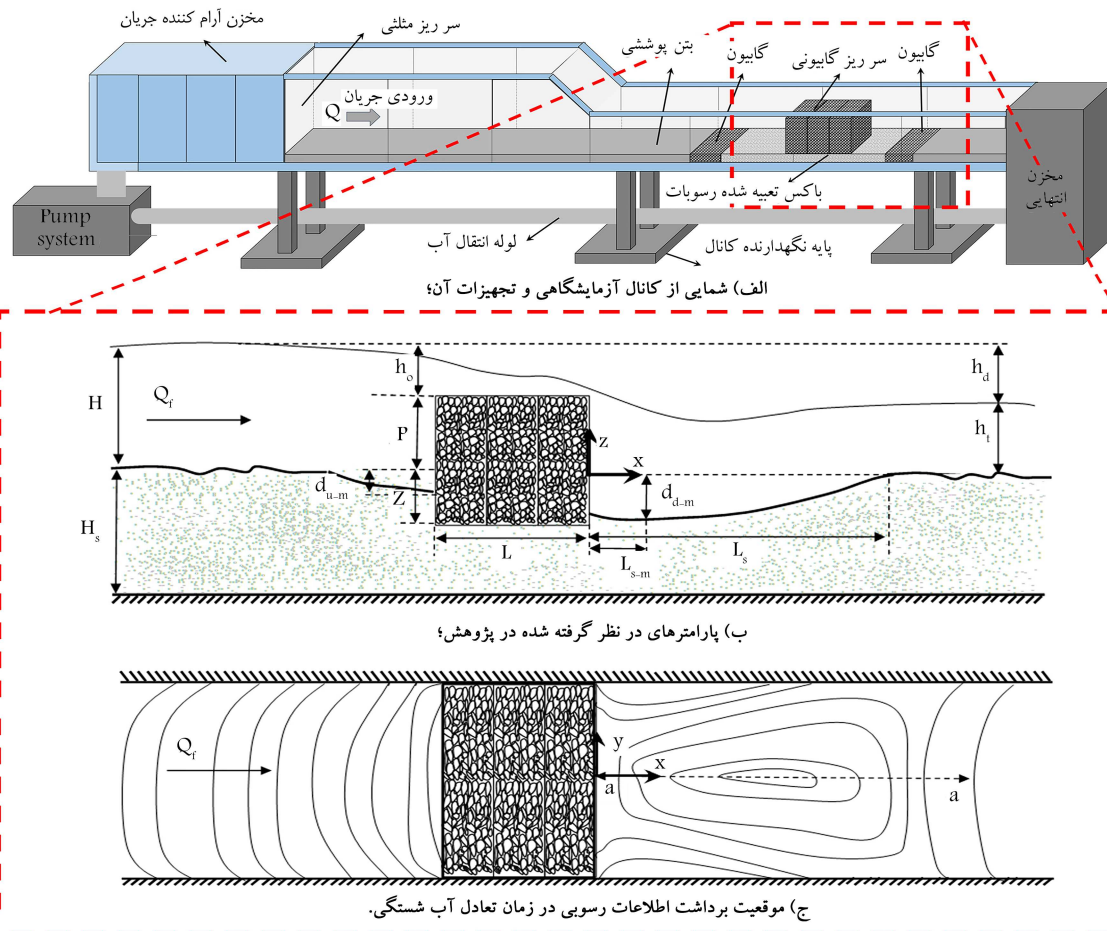
خطیبی و همکاران (۲۰۱۴)، نیز با استفاده از هوش مصنوعی و به‌کارگیری داده‌های آزمایشگاهی، یک روش عددی برای محاسبه‌ی دبی در سرریز گابیونی پلکانی ارائه کردند و با تقسیم‌بندی جریان بر روی سرریز به صورت آرام تا حالت آشفته، حالت‌های مذکور را با استفاده از مرزهایی در گراف‌هایی مشخص کردند.^۸

گون^۷ و همکاران (۲۰۱۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶)، با استفاده از عدد فرود به تقسیم‌بندی رژیم‌های نیرخ سطح آب در سرریز لبه‌تیز در حالت مستغرق پرداختند، با این هدف که تأثیر رژیم‌های تشکیل‌شده در عمق آب‌شستگی پایین دست سرریز پیگیری شود. نتایج نشان داد که با تغییر رژیم جریان از حالت مستغرق کامل^۸ به جت فرورونده^۹ در جریان آب پایاب پایین دست، عمق آب‌شستگی در پایین دست به صورت افزایشی و با طول کمتر توسعه پیدا کرده است. این امر نشان از وضعیت تأثیر جت پایین‌رونده‌ی سرریز در وضعیت و پایداری سرریز است. نتایج ایشان نشان داده است سرریزهایی که عمق جریان پایین دست با رژیم جت فرورونده دارند، پایداری کمتری دارند.^{۱۰-۱۲}

عظیمی و همکاران (۲۰۱۴)، نیز با رویکردهای مختلفی از جمله شاخص کاهش دبی به ازاء دبی مستغرق به بررسی سرریز لبه‌پهن پرداختند و ضریب دبی را به ازاء انواع مختلف سرریز لبه‌پهن، لبه‌تیز، و لبه‌گرد بررسی و ارزیابی کردند.^{۱۳} همچنین میخیکو^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۵)، به ساختار دینامیکی خاک‌ریزهای قله‌سنگی^{۱۱} پرداختند و نتایج یک‌بعدی مطالعه‌ی ایشان نشان داد که پارامترهای زیادی در ساختار جریان درون‌گذری و روگذری از سازه‌ی مذکور تأثیرگذار است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پارامترهای شیب پایین دست، تخلخل قله‌سنگ‌ها، قطر متوسط ذرات تشکیل‌دهنده‌ی سازه و ارتفاع اشاره کرد.^{۱۴}

عظیمی و همکاران (۲۰۱۶)، نیز با استفاده از آزمایش‌های مختلف بر روی سرریز لبه‌تیز، رژیم جریان را در سرریز لبه‌تیز به دست آوردند، که در نهایت به ۴ گروه تقسیم‌بندی شده است. در ادامه، روابطی برای برآورد طول موج و همچنین پیشنهادهایی برای مقدار ارتفاع موج پایین‌رونده از سرریز لبه‌تیز ارائه کرده‌اند.^{۱۵} همچنین در ادامه‌ی مطالعات، آزمایش‌هایی برای بررسی نیروهای تأثیرگذار در ساختار سازه‌ی سرریز انجام شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که تغییر پایداری بین نیروی وزن (نیروی پایداری ذرات) و نیروی مومنتوم (حاصل از جریان)، باعث تغییر ساختار فیزیکی ابتدایی سازه‌ی سرریز می‌شود و شکل ابتدایی آن را تغییر می‌دهد. به دلیل بالا بودن نیروی مومنتوم در لبه‌های سازه‌ی سرریز، تغییرات در لبه‌های آن مشهودتر است. همچنین در ادامه، نیروهای برهم‌کنش بین ذرات در قالب مدل آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج نشان داده است مکان‌هایی که قدرت جریان‌های طولی به میزان بیشینه داشته باشد، پایداری نواحی لبه‌های سازه‌ی سرریز کاهش محسوسی پیدا خواهد کرد.^{۱۶}

برخی پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که در زمینه‌ی سرریزهای گابیونی لبه‌پهن باید مطالعات بیشتری صورت پذیرد. چانسون^{۱۲} (۲۰۰۶)، بیان کرد که باید ضریب تأثیر بین جریان‌های روگذری و درون‌گذری انجام شود. در پژوهش ایشان، روابط پایه براساس روابط تجربی ارائه شده است. اگر چه رابطه‌ی برای برآورد دبی درون‌گذری و روگذری ارائه نشده است، ولی در پژوهش ایشان، دبی در حالت کلی برآورد و به پارامترهای به دست آمده از آنالیز ابعادی ربط داده شده است.^{۱۷} همچنین برای درک بهتر اثر متقابل جریان‌های روگذری و درون‌گذری از سرریز از نسبت دبی بالادست سرریز به دبی جداگانه‌ی عبوری از سرریز و جریان درون‌گذری استفاده و رابطه‌ی بر پایه‌ی رگرسیون غیرخطی برای برآورد ضریب سرریز ارائه و ضریب مذکور به‌عنوان نسبتی از مقادیر دبی معرفی شده است.^{۱۸}



شکل ۱. فلوم و مدل‌های آزمایشگاهی.

۱۱ S۶MK، واقع در دانشگاه لیکهد^{۱۴} کشورکانادا انجام پذیرفته است. عرض کانال مذکور ۶۰ و ارتفاع آن ۵۰۰ میلی‌متر و دبی بیشینه‌ی آن برابر با ۳۲ لیتر بر ثانیه بوده است. برای ایجاد شرایط استقرافی مختلف، از یک دریچه‌ی لولایی در پایین دست فلوم استفاده شده است (شکل ۱).

۲.۳. جعبه‌ی رسوب‌ها

برای کاهش میزان رسوب موردنیاز برای آماده‌سازی بستر اولیه، در بالادست و پایین دست کانال از ورقه‌های چوبی جهت بالا آوردن کف کانال استفاده شده است. همچنین با توجه به نظر مدویل و چپو^{۱۵} (۱۹۹۹)، شرایط جریان داری در رسوب‌ها برقرار است.^[۲۰] از این رو، برای تأمین جریان داری، از گابیون‌هایی در بالادست و پایین دست رسوب‌ها استفاده شده است (شکل ۱).

۳.۳. مدل‌های لبه‌پهن گابیونی

تعداد ۳۳ مدل سرریز لبه‌پهن گابیونی آزمایش و پارامترهای دانه‌بندی و عمق جای‌گذاری در بستر رسوبی در شدت جریان‌های مختلف بررسی شده است. برای کنترل تراز عمق جریان در بالادست از یک دریچه‌ی کشویی در پایین دست کانال استفاده شده است. رسوب استفاده شده در بستر دارای قطر متوسط ۱/۲ میلی‌متر و مواد

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 نیم‌رخ سطح آب در روی سرریز گابیونی، ضریب دبی در حالت‌های مختلف دانه‌بندی سرریز گابیونی محاسبه شده است.^[۱۹] در پژوهش حاضر به استفاده از نتایج به‌دست آمده از مطالعه بر روی مدل‌های آزمایشگاهی و تلفیق راهکارهای مطالعات پیشین اشاره شده است. استفاده از سرریز گابیونی توسط بسیاری از پژوهشگران برای تنظیم آب در شبکه‌های آبیاری توصیه شده است. سرریز گابیونی به دلیل داشتن جریان درون‌گذری، پیش‌بینی می‌شود که نسبت به سرریزهای لبه‌پهن، عمق آب‌شستگی کمتری را در بستر رسوبی ایجاد کند؛ از این رو بررسی مورد اخیر، یکی از اهداف پژوهش حاضر به‌شمار می‌آید، که به نحوی نوآوری پژوهش حاضر نیز محسوب می‌شود.

۳. مواد و روش‌ها

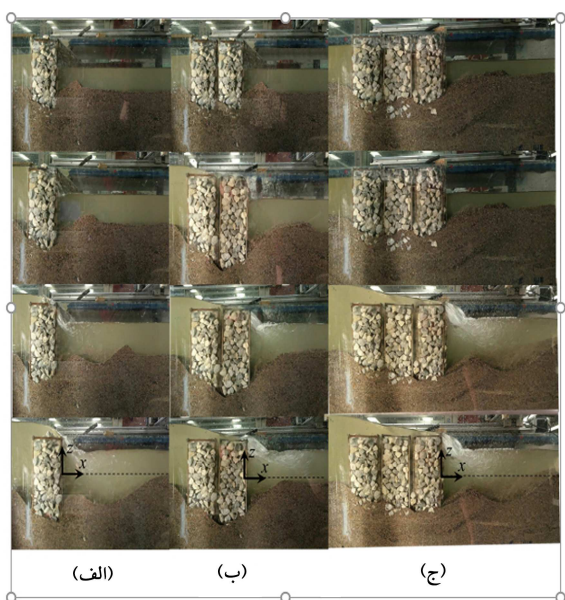
در بخش کنونی، مبانی تئوری و تجهیزات آزمایشگاهی ارائه شده است.

۱.۳. فلوم آزمایشگاهی

آزمایش‌های سرریز لبه‌پهن گابیونی در فلوم آزمایشگاهی استاندارد آرم‌فیلد^{۱۳} مدل

جدول ۱. آزمایش‌های سرریز گابیونی با بستر رسوبی.

مدل گابیون	دبی (Q) L/s	طول (L) (mm)	ارتفاع (P) (mm)	d_{50} (mm)	Z (mm)
۱، ۲، ۳	۳/۹	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۱۰۰
۴، ۵، ۶	۵/۷	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۱۰۰
۷، ۸، ۹	۱۷/۷	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۱۰۰
۱۰، ۱۱، ۱۲	۲۸/۵	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۱۰۰
۱۳، ۱۴، ۱۵	۳/۹	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۱۳/۱	۱۰۰
۱۶، ۱۷، ۱۸	۵/۷	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۱۳/۱	۱۰۰
۱۹، ۲۰، ۲۱	۱۷/۷	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۱۳/۱	۱۰۰
۲۲، ۲۳، ۲۴	۲۸/۵	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۱۳/۱	۱۰۰
۲۵، ۲۶، ۲۷	۳/۹	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۲۰۰
۲۸، ۲۹، ۳۰	۵/۷	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۲۰۰
۳۱، ۳۲، ۳۳	۱۷/۷	۱۰۰-۳۰۰	۲۰۰	۲۹/۳	۲۰۰



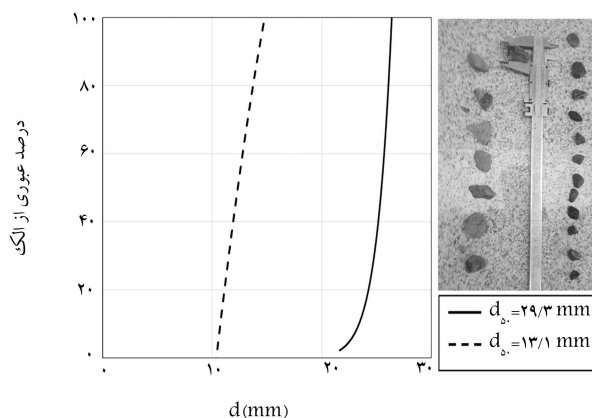
الف) طول گابیون ۱۰۰ mm، ارتفاع گابیون ۲۰۰ mm و قطر متوسط ذرات گابیون ۲۹/۳؛
 ب) طول گابیون ۱۰۰ mm، ارتفاع گابیون ۱۰۰ mm و قطر متوسط ذرات گابیون ۲۹/۳؛
 ج) طول گابیون ۱۰۰ mm، ارتفاع گابیون ۲۰۰ mm و قطر متوسط ذرات گابیون ۲۹/۳.

شکل ۳. آزمایش‌های مدل سرریز لبه‌پهن گابیونی به ازاء تغییرات دبی در حالت جریان آزاد.

همچنین به دلیل مجرای بسته در درون گابیون از عدد رینولدز جریان استفاده شده است.

$$\frac{Q_{gc}}{(\sqrt{g}H^{3/2})} = f\left(\left[\frac{d_{50}}{H + d_u - m}\right], \left[\frac{H + d_u - m}{L}\right], [Re]\right) \quad (1)$$

لازم به ذکر است پارامترهای استفاده شده در رابطه ۱، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. همچنین Q_{gc} ، دبی تخمین زده شده‌ی درون‌گذری و $[Re]$ عدد رینولدز است.



شکل ۲. دانه‌بندی مصالح سرریز لبه‌پهن گابیونی.

درشت‌دانه‌ی درون‌گابیون شامل دو نوع سنگ‌دانه با قطر متوسط ۱۳/۲ و ۲۹/۳ میلی‌متر بوده است (شکل ۲).

طول جعبه‌ی رسوبی در آزمایشگاه در حدود ۲/۸ متر در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی سرریز گابیونی از لبه‌ی بالادست جعبه‌ی رسوبی در حدود ۱/۵ متر و از لبه‌ی پایین‌دست ۱/۳ متر در نظر گرفته شد. همچنین جهت جلوگیری از شسته شدن رسوب‌ها در لبه‌ی بین جعبه‌ی رسوبی و کف چوبی نصب شده در بالادست و پایین‌دست از گابیونی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر استفاده شده است که علاوه بر مزیت یاد شده، طبق نتایج مطالعه‌ی ملویل و چیود (۱۹۹۹)، جریان نشت در محیط رسوبی را نیز تا حد قابل قبولی تأمین می‌کند. [۲۰] این امر باعث می‌شود که جریان عبوری در درون رسوب‌ها تا حد قابل قبولی تأثیر خود را در پروسه‌ی آب‌شستگی بگذارد که در طبیعت نیز پارامتر مذکور وجود دارد.

۴.۳. آزمایش‌های مدل سرریز گابیونی

در مجموعه‌ی آزمایش‌های انجام شده، مدل‌های سرریز گابیونی به صورت جعبه‌های آماده در اندازه‌های مختلف تولید و سپس درون کانال برای فرایند آزمایش‌ها قرار گرفته و به ازاء یک دانه‌بندی دبی معین جریان در کانال برقرار شده است. به ازاء دانه‌بندی‌های در نظر گرفته شده در جدول ۱، دبی‌های مشخصی در کانال، جریان داده شده است.

محدوده‌ی دبی استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۱ درج شده است. آزمایش‌ها در شرایط جریان آزاد، از طریق تصویربرداری پروفیل سطح آب ثبت و سپس با تغییر دبی، شرایط سرریز گابیونی و گودال آب‌شستگی پایین‌دست به ازاء شرایط هیدرولیکی ارزیابی شده است. روند اخیر برای کلیه‌ی مدل‌های مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، در شکل ۳، روند پروفیل سطح آب و تغییرات تراز بستر به ازاء افزایش دبی در شرایط مختلف سرریز گابیونی مشاهده می‌شود.

۵.۳. آنالیز ابعادی

به منظور تخمین دبی درون‌گذری، میزان دبی درون‌گذری به صورت تابعی از پارامترهای بی‌بعدی که در رابطه ۱ به آن‌ها اشاره شده، در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است، پارامترهای هیدرولیکی مربوط به هندسه‌ی گابیون، مانند: طول، ارتفاع و دانه‌بندی گابیون به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در برآورد دبی درون‌گذری تعیین شده‌اند.

سطح آب و عمق آب‌شستگی بستر مشاهده می‌شوند. برای سنجش عمق مناسب رسوب‌های بستر در آزمایش‌ها، میزان عمق آب‌شستگی ارزیابی شده است. لازم به ذکر است با توجه به نظر ملویل و همکاران^[۲۰] زمان بیشینه‌ی برای ایجاد شرایط تعادل گودال آب‌شستگی، در حدود ۶ ساعت مدنظر قرار گرفت، و پروفیل‌ها با به تعادل رسیدن تقریبی بستر از طریق تصویربرداری برداشت شدند. آنگاه با استفاده از دیجیتایز کردن تصاویر برداشتی، نمودارهای موردنظر ترسیم شدند. روش برداشت نیمرخ سطح آب و بستر رسوب‌ها بعد از پایدار شدن، بدین صورت بود که دوربینی با کیفیت ۴۸ مگاپیکسل در روبروی تاج سرریز و با کادر مشخصی در زمان انتهایی، تصویری را تهیه می‌کرد. با استفاده از نرم‌افزار پلات دیجیتایز می‌توان با درنظرگرفتن سه نقطه، که طول و عرض آن‌ها از مبدأ فرضی (۰، ۰) (در پژوهش حاضر محل تلاقی خط کف رسوب‌ها و وجه پایین دست سرریز گابیونی در نظر گرفته شده است) مشخص است، نیمرخ سطح آب و رسوب‌ها را به صورت نقطه به نقطه ترسیم کرد. از آنجا که یک عدد متر در طول و ارتفاع کادر عکس‌برداری روی شیشه‌ی کانال آزمایشگاهی نصب شده بود، با کالیبراسیون تصویر در نرم‌افزار یاد شده، می‌توان با دقت قابل قبولی یک میلی‌متر پروفیل رسوب‌ها را ترسیم کرد. همچنین برای بالا بردن دقت در آزمایش‌ها، پروفیل دوبعدی سطح آب‌شسته رسوب‌ها در پایین دست سرریز گابیونی در شبکه‌ی ۱ × ۱ سانتی‌متر برداشت شد. مقایسه‌های اولیه نشان داد دو روش یاد شده، نتایج تقریباً یکسانی دارند. مزیت استفاده از تصویر این است که در زمان استفاده از پوینت‌گیج، احتمال به هم خوردن تعادل بستر رسوبی وجود دارد، در حالی که در روش استفاده از تصویر، مورد اخیر برطرف می‌شود.

۳.۴. دبی درون‌گذر

به‌منظور برآورد میزان دبی درون‌گذر با استفاده از آنالیز ابعادی، اعداد بی بعد با توجه به شکل (۱) و با استفاده از روش پای باکینگهام به فرم رابطه‌ی ۱ به‌دست آمدند. با توجه به داده‌های آزمایشگاهی برگرفته از شکل‌های ۵ الی ۷، مقادیر اعداد مذکور محاسبه شدند و سپس با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی، رابطه‌ی برای برآورد دبی درون‌گذری به‌دست آمد. داده‌های اطلاعاتی به‌کار رفته در تولید مدل دبی فقط مربوط به حالت درون‌گذری جریان بوده و جریانی از روی سرریز وجود نداشته است.

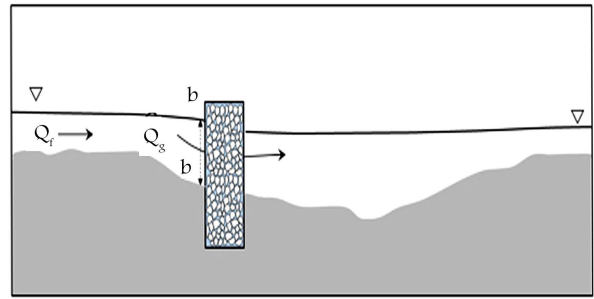
$$\frac{Q_{gc}}{\sqrt{g}H^{\frac{5}{4}}} = f \left(\left[\frac{d_{50}}{H + d_u - m} \right], \left[\frac{H + d_u - m}{L} \right], [Re] \right) \quad (2)$$

$$\frac{Q_{gc}}{\sqrt{g}H^{\frac{5}{4}}} = 10^{10} \left(\left[\frac{d_{50}}{H + d_u - m} \right]^{0.4}, \left[\frac{H + d_u - m}{L} \right]^{0.5}, [Re]^5 \right) \quad (3)$$

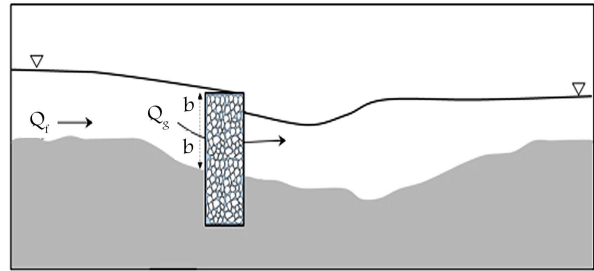
رابطه‌ی ۲ برای مبنای گروه‌های بدون بعد و رابطه‌ی ۱، معادله‌ی غیرخطی برای دبی درون‌گذر استخراج شده است. مقادیر حاصل از رابطه‌ی اخیر با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

۴.۴. دبی روگذر

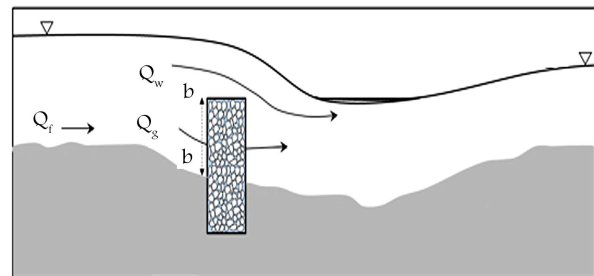
در آزمایش‌های سرریز گابیونی، آزمایش‌هایی که در آن جریان روگذر وجود داشت، با اندازه‌گیری دبی بالادست سرریز و مقدار دبی درون‌گذر از رابطه‌ی ۱ تعیین شده است. برای برآورد دبی روگذر، معادله‌ی دبی سرریز لبه‌پهن مدنظر قرار گرفته و سپس مقدار ضریب دبی سرریز لبه‌پهن محاسبه شده است. رابطه‌ی ۳، مقدار دبی کل را



الف) عبور جریان از بخشی از گابیون؛



ب) عبور جریان از کل گابیون؛



ج) عبور جریان از درون و روی سرریز گابیونی.

شکل ۴. دسته‌بندی جریان عبوری از درون و روی سرریز گابیونی.

۴. نتایج و بحث

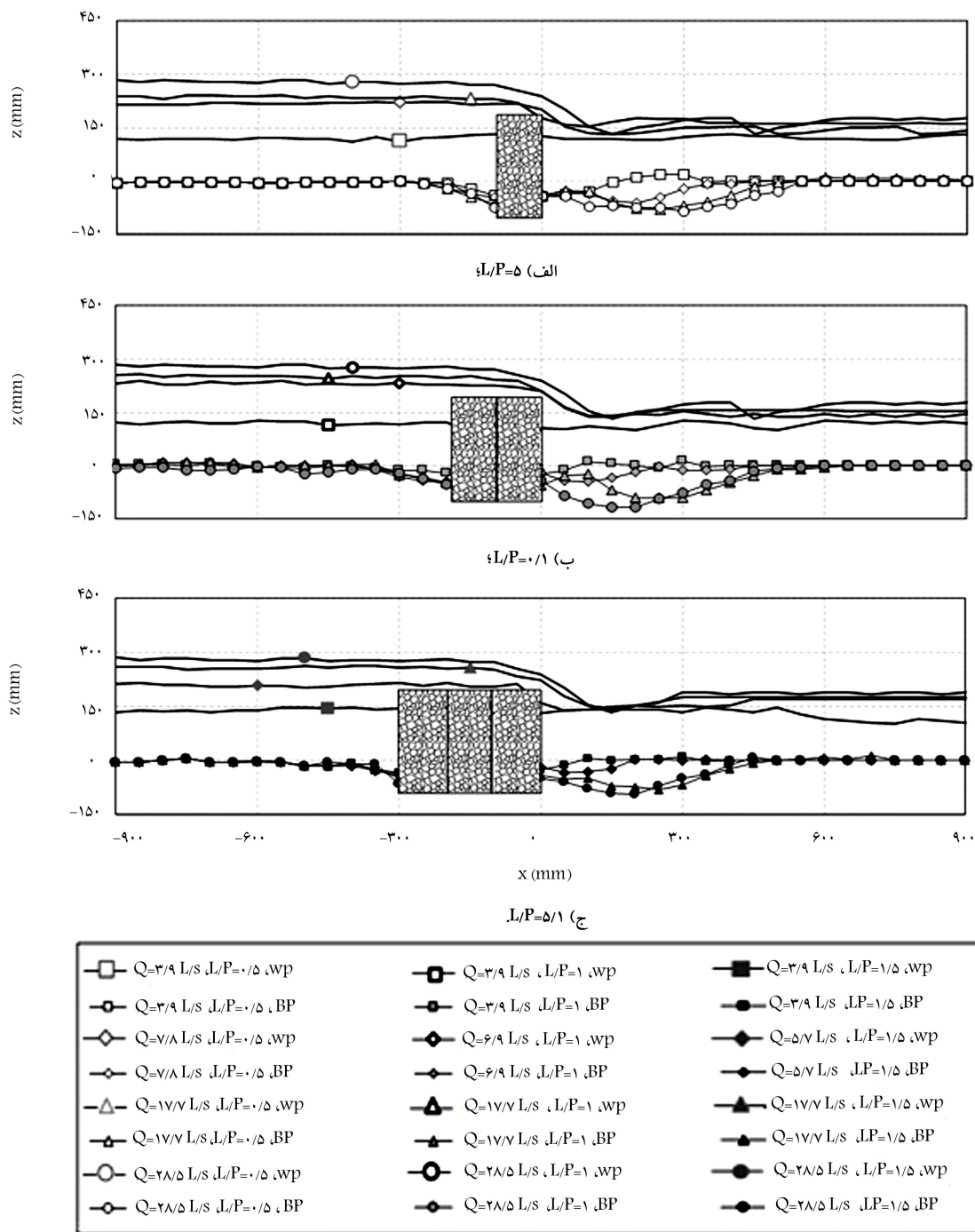
در بخش حاضر، ابتدا به تجزیه و تحلیل نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های هیدرولیکی، شامل ضریب دبی در حالت آزاد پرداخته شده است. در ادامه، به برآورد دبی عبوری از سرریز گابیونی در حالت‌های مختلف هیدرولیکی پرداخته شده است. در انتها، نتایج حاصل از گودال آب‌شستگی و روابط تخمین آن، تجزیه و تحلیل شده است.

۱.۴. جریان روی سرریز گابیونی

با توجه به نمادهای شکل ۱، شرایط جریان عبوری از درون و روی سرریز گابیونی به سه دسته‌ی کلی تقسیم‌بندی می‌شود: ۱. عبور جریان از بخشی از بدنه‌ی سرریز گابیونی ($H < P$) (شکل ۴ الف)؛ ۲. عبور جریان از کل سرریز گابیونی ($H = P$) (شکل ۴ ب)؛ ۳. عبور جریان از درون و روی سرریز گابیونی ($H > P$) (شکل ۴ ج). به ازاء موارد ذکر شده، دبی عبوری از سرریز با استفاده از روابط تجربی و آماری تخمین زده شده است.

۲.۴. آزمایش‌های سرریز گابیونی

در شکل‌های ۵ الی ۷، نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها (جدول ۱) برای پروفیل



شکل ۵. پروفیل سطح آب و رسوب‌های سرریز گابیونی در بستر رسوبی به ازا ارتفاع $(Z = 100 \text{ mm})$ و قطر متوسط $29/3$ میلی‌متر.

می‌توان دبی روگذر را محاسبه کرد. با محاسبه‌ی دبی روگذر می‌توان مقدار ضریب دبی آزمایشگاهی را محاسبه کرد. با استفاده از روابط تجربی و ارتباط ضریب دبی آزمایشگاهی به پارامترهای هیدرولیکی در نهایت رابطه‌ی برای محاسبه‌ی ضریب دبی ارائه شده است. با این حال، می‌توان دبی روگذر را از رابطه‌ی ۴ و به‌کارگیری ضریب دبی مطابق معادله‌ی ۵ محاسبه کرد.

$$C_D = -9/7 \left[\frac{d_{50}}{P} \right]^{2/3} - 0/67 \left[\frac{h_o}{L} \right]^{0.1} + 1/27 \quad (6)$$

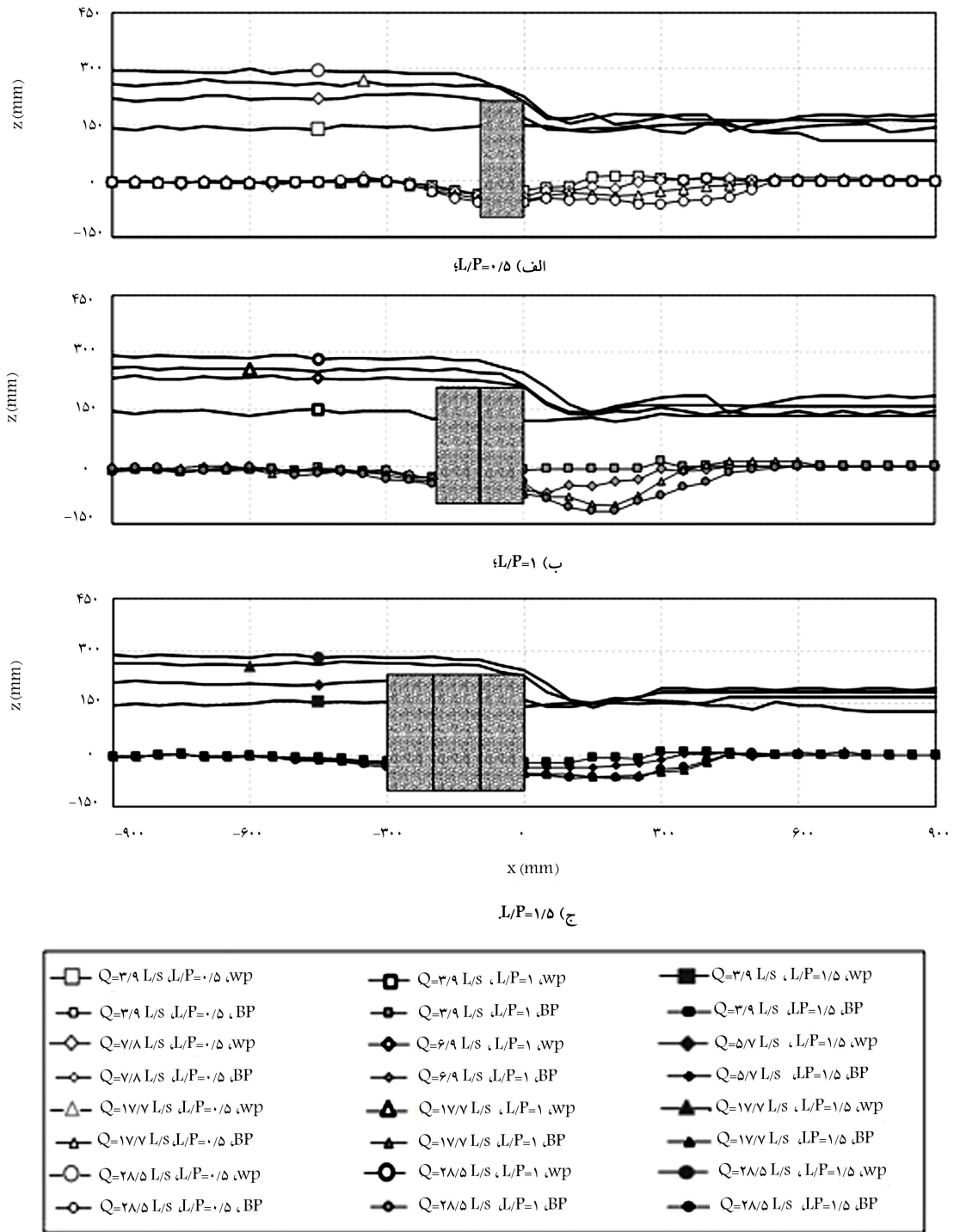
نشان می‌دهد. Q_g دبی درون‌گذر و Q_w به عنوان دبی روگذر است.

$$Q_f = Q_g + Q_w \quad (4)$$

همچنین برای محاسبه‌ی دبی سرریز لبه‌پهن می‌توان رابطه‌ی ۴ را نوشت: [۱۶]

$$Q_w = \sqrt{\frac{\lambda g}{15}} C_d B H^{1.5} \quad (5)$$

که در آن، C_d ضریب دبی سرریز لبه‌پهن گابیونی و همچنین B نمایانگر عرض کانال آزمایشگاهی است. با برقراری رابطه‌های ۳ و ۴، و همچنین محاسبه‌ی دبی درون‌گذر،



شکل ۶. پروفیل سطح آب و رسوب‌های سرریز گابیونی در بستر رسوبی به ازا ارتفاع $(Z = 200 \text{ mm})$ و قطر متوسط $29/3$ میلی‌متر.

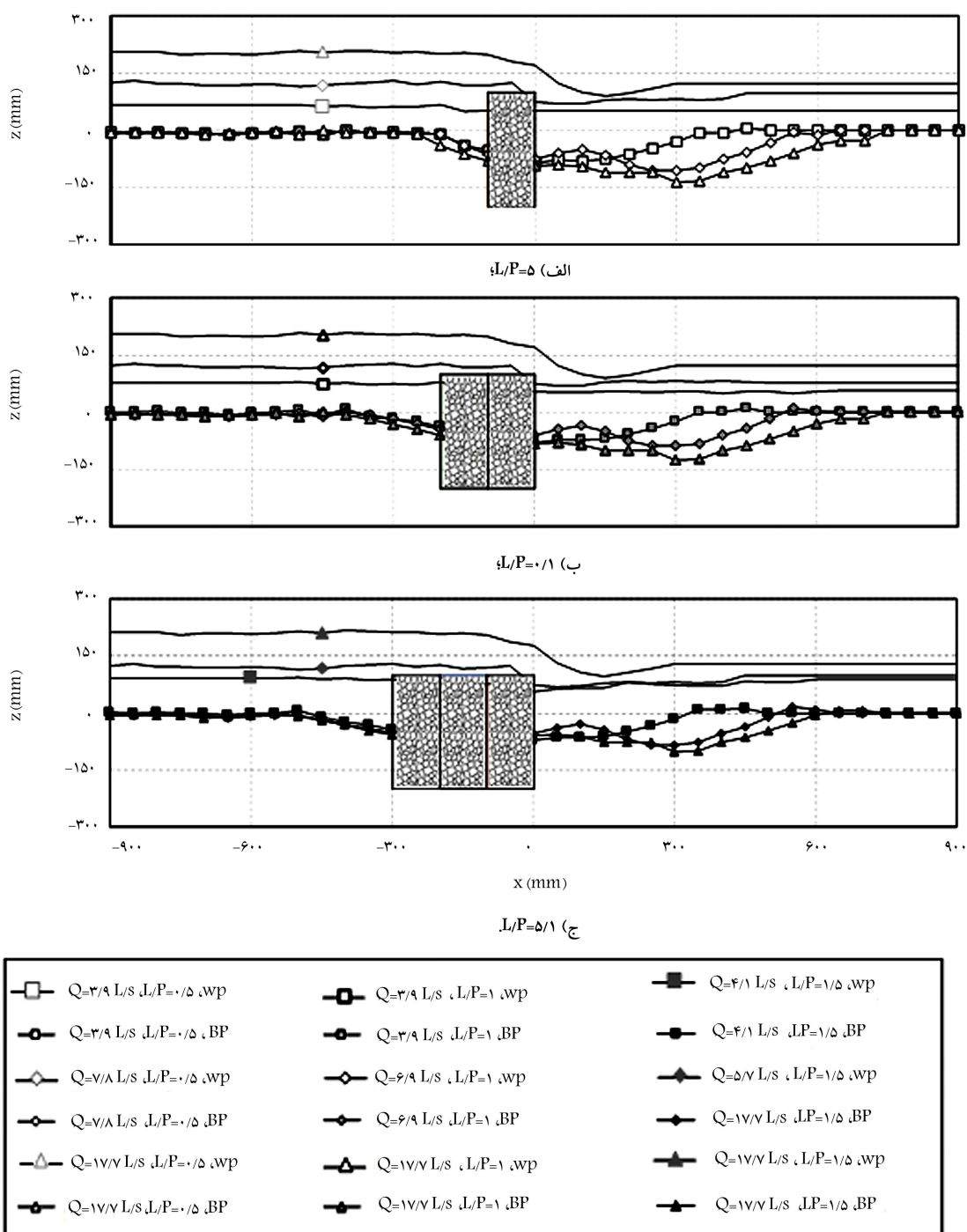
که در آن، C_D ضریب دبی محاسباتی برای سرریز گابیونی است. همچنین سایر

پارامترها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. برای ارزیابی روابط ارائه شده، دبی آزمایشگاهی با دبی محاسبه شده مقایسه شده (شکل ۹) و نتایج آن نشان داده است که روند ارائه شده برای برآورد ضریب دبی در دبی‌های پایین، به مراتب دقت بالاتری نسبت به دبی‌های بیشتر با ارتفاع آب روی سرریز دارد. این امر به این دلیل است که با افزایش ارتفاع آب در بالادست سرریز گابیونی، دبی درون‌گذر کاهش پیدا کرده است، و به نحوی رابطه‌ی ۲ دارای مقداری خطاست. لذا برای برآورد دبی روگذر،

روش دیگری نیز بررسی شد که در ادامه به آن پرداخته شده است.

۵.۴. دبی درون‌گذری داریسی و سیماخ

در حالت کلی، مقدار افت انرژی در لوله‌ها از معادله‌ی داریسی مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود. باید توجه داشت که رابطه‌ی اخیر برای لوله‌ها کاربرد دارد، اما به نحوی می‌توان خلل و فرج درون گابیون را به تعداد زیادی لوله در نظر گرفت. بدین



شکل ۷. پروفیل سطح آب و رسوب‌های سرریز گابیونی در بستر رسوبی به ازاء ارتفاع $(Z = 100 \text{ mm})$ و قطر متوسط $13/1$ میلی‌متر.

در نظر گرفتن روابط ۷ الی ۹، می‌توان رابطه‌ی داریسی و سیباخ را به صورت دیگری بازنویسی کرد. همچنین می‌توان سرعت را به عنوان سرعت سطحی که با استفاده از روش جسم شناور قابل محاسبه است، به رابطه‌ی ۶ اضافه کرد:

$$f_P = f\left(\frac{n C_1}{d_0}\right) \quad (8)$$

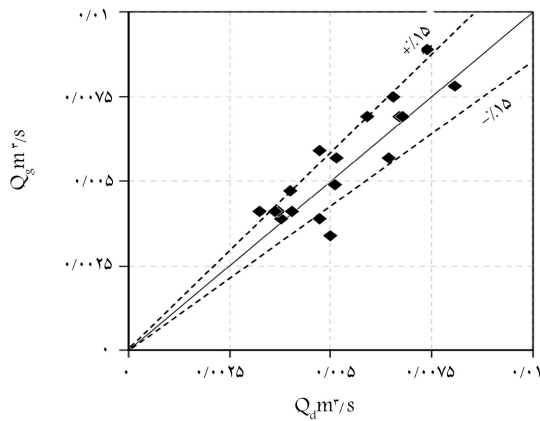
$$L_P = C_2 L C_3 d_0^{C_4} \quad (9)$$

$$D_P = n C_5 d_0^{C_6} \quad (10)$$

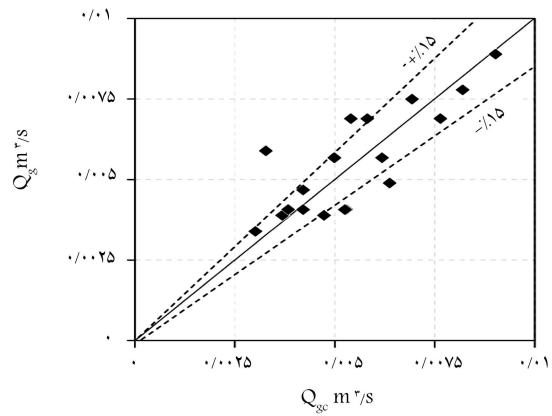
صورت می‌توان رابطه‌ی داریسی را به پارامترهای هیدرولیکی گابیون از جمله تخلخل، طول، و قطر ذرات نسبت داد.

$$h_f = f \frac{L_P}{D_P} \frac{V^2}{2g} \rightarrow Q_d = \sqrt{\frac{h_f D_P 2g A^3}{f L_P}} \quad (7)$$

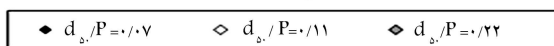
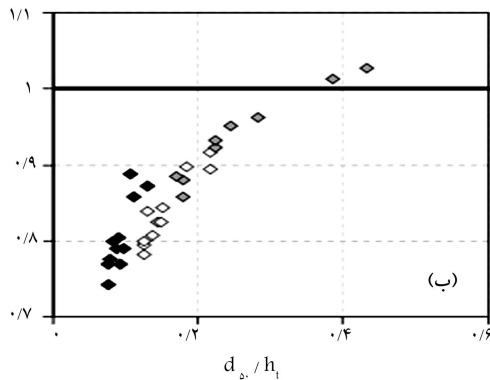
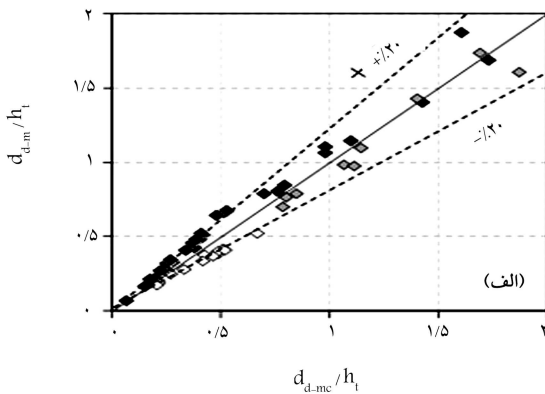
که در آن، نمایه‌ی P ، معادله‌ی داریسی و سیباخ در حالت لوله است. بدین صورت اگر پارامترهای معادله‌ی داریسی به نحوی به پارامترهای هیدرولیکی نسبت داده شوند، با استفاده از معادله‌ی ۶ می‌توان میزان دبی درون‌گذر را برآورد کرد. از این رو با



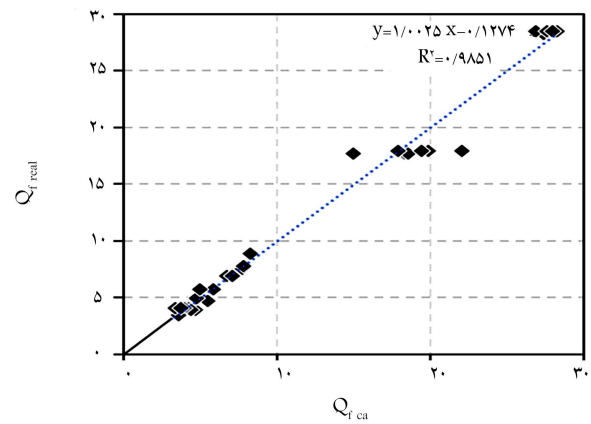
شکل ۱۰. برآورد خطای دبی محاسباتی درون‌گذری از رابطه‌ی ۱۰ و دبی واقعی برای سرریز گابیونی.



شکل ۸. مقایسه‌ی دبی درون‌گذری محاسباتی با مقادیر آزمایشگاهی.



شکل ۹. مقایسه‌ی دبی کلی سرریز گابیونی با روش محاسباتی (واحد لیتر بر ثانیه است).



شکل ۹. مقایسه‌ی دبی کلی سرریز گابیونی با روش محاسباتی (واحد لیتر بر ثانیه است).

که در آن‌ها، n ، تخلخل گابون و همچنین پارامترهای C_1 تا C_6 ضرایب معادله هستند و با جایگذاری روابط اخیر و همچنین قرار دادن مقادیر آزمایشگاهی، در نهایت معادله‌ی به دست آمده ارزیابی شده است. برای تخمین ضرایب از نرم‌افزار Mathematical استفاده شده است. نحوه‌ی به دست آوردن ضرایب مذکور در نرم‌افزار بدین صورت است که مقادیر هیدرولیکی در معادله قرار می‌گیرند و به ازاء آن‌ها، بهترین تخمین برای ضرایب در نرم‌افزار برآورد می‌شود.^[۱۶] در نهایت رابطه‌ی ۱۰، برای تخمین دبی روگذری ارائه شده است:

$$Q_d = \frac{n^{2/25} 120 L d_{s0} V^2}{d_{s0} n d_{s0} 2g} \rightarrow Q_d = 120 \frac{n^{2/25}}{d_{s0}} L \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

در نهایت در شکل ۱۰، مقایسه‌ی بین دبی درون‌گذر محاسبه شده از رابطه‌ی ۱۰ و مقادیر آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که مطابق آن، به مراتب رابطه‌ی ۱۰ نسبت به رابطه‌ی ۲، پراکندگی کمتری در تخمین میزان دبی دارد.

۴.۶. تخمین میزان گودال آب‌شستگی

همچنین در ادامه‌ی پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن ایده‌ی مطالعات پیشین از جمله مطالعات گوان و همکاران،^{[۱۱]۱۰} رابطه‌ی ۱۱ برای برآورد میزان عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی در پایین دست سرریز لپه‌پهن گابیونی ارائه شده است که در آن V_o و V_c به ترتیب متوسط سرعت و سرعت بحرانی ذرات و رسوب‌های بستر هستند. پارامتر اول از روابط ارائه شده‌ی اخیر، به دست می‌آید. همچنین سرعت بحرانی به

نوع ذرات بستگی دارد.^[۱] در پژوهش حاضر، مقدار سرعت بحرانی برای ماسه‌ی یکنواخت در حدود ۰/۲۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در نهایت میزان عمق آب‌شستگی از رابطه‌ی ۱۱ قابل تخمین است. همچنین میزان خطای رابطه‌ی ۱۱ با توجه به اطلاعات آزمایشگاهی، در حدود قابل قبولی برآورد شد، که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود.

$$\frac{d_{d-mc}}{h_t} = \left(\frac{z}{h_t}\right)^{0.95} \left(\frac{d_{s0}}{h_t}\right)^{0.1} \left(\frac{V_o}{V_c}\right)^{0.1} \quad (12)$$

در شکل (۱۱الف)، اندیس c نمایانگر مقدار محاسباتی است. همچنین در شکل (۱۱ب) مشاهده می‌شود که به ازاء افزایش مقدار متوسط ذرات، دقت

۷.۴. مقایسه‌ی بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی با دیگر مطالعات

در شکل ۱۲، مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی در پایین دست سرریز گابیونی با در نظر گرفتن عدد فرود، با نتایج مطالعات سایر پژوهشگران در زمینه‌ی سرریزهای لبه‌تیز مشاهده می‌شود که مطابق آن، به ازاء استفاده از سرریز گابیونی، به مراتب عمق آب‌شستگی کمتری در حالت جریان آزاد به وجود آمده است. همچنین، با بحرانی تر شدن جریان، میزان عمق آب‌شستگی در پایین دست افزایش پیدا کرده است. لازم به ذکر است روابط بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی دیگر مدل‌ها از جدول ۲ در نوشتار گوان و همکاران (۲۰۱۶)،^[۱۱] استخراج شده است.

۵. نتیجه‌گیری

خلاصه‌ی یافته‌های به دست آمده از پژوهش حاضر را می‌توان در چند مورد بیان کرد:

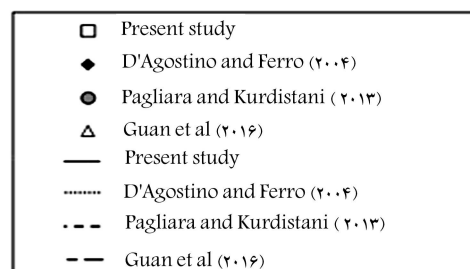
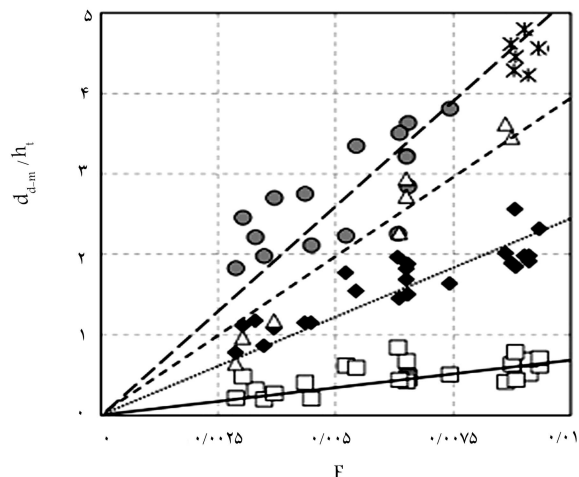
۱. اگر عمق جریان در بالادست سرریز برابر با h و ارتفاع سرریز از کف برابر با p باشد، حالت‌های مختلف ($h > p, h = p, h < p$) جریان در یکی از سه حالت اخیر رخ می‌دهد که در هر حالت، خصوصیات جریان درون‌گذر و روگذر در یکدیگر اثر متقابل دارند و در نهایت، در ضریب دبی عبوری از سرریز تأثیرگذار هستند.

۲. با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی و اعداد بی بعد به دست آمده از تحلیل ابعادی، روابطی برای برآورد دبی جریان در حالت روگذر و درون‌گذر ارائه شده است. ارزیابی دقت روابط حاصل از طریق مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته و نتایج مقایسه‌های انجام شده نشان داده است که روابط ارائه شده با خطای حدود ۱۷٪ می‌توانند در برآورد جریان درون‌گذر و روگذر از گابیون کاربرد داشته باشند.

۳. به دلیل کاهش میزان دقت برآورد دبی درون‌گذر سرریز گابیونی در زمان روگذری، با تمهیداتی از رابطه‌ی داریسی - ویسیاخ برای برآورد دبی استفاده شده و نتایج نشان داده است که رابطه‌ی مذکور دقت مناسب و بهتری نسبت به روابط بر پایه‌ی تجربی دارد.

۴. نتایج عمق آب‌شستگی بیشینه در پایین دست سرریز گابیونی عریض نشان داد که به ازاء استفاده از سرریز گابیونی در کانال با بستر رسوبی، عمق آب‌شستگی در پایین دست سرریز در حالت جریان آزاد به مراتب کمتر از سرریز لبه‌تیز مستطیلی است. این امر به دلیل جریان درون‌گذر در گابیون و کاهش قدرت جت فرورونده در پایین دست بوده است.

۵. با استفاده از داده‌های مربوط به نتایج گودال آب‌شستگی، رابطه‌ی برای برآورد میزان عمق گودال آب‌شستگی ارائه شده و بررسی‌ها نشان داده است که به ازاء افزایش قطر متوسط ذرات، رابطه‌ی مذکور، دقت بیشتری پیدا کرده است.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی عمق آب‌شستگی پایین دست سرریز گابیونی لبه‌پهن با دیگر مطالعات انجام شده.^{[۱۱]، [۲۲]}

رابطه افزایش پیدا کرده و برای مقادیر $\frac{d_{d-mc}}{p} = 0.22$ ، دقت بیشتری داشته است در حالت کلی باید از روش ملویل برای برآورد سرعت بحرانی رسوبها استفاده کرد. باید توجه داشت که به دلیل برخورد جت روی سرریز با بستر پایین دست، همواره سرعت جریان از سرعت بحرانی ماسه بیشتر می‌شود. از این رو همواره آب‌شستگی در پایین دست سرریز رخ خواهد داد. باید در نظر داشت زمانی که جریان بر روی سرریز در حالت استغرق قرار داده شود، سرعت بحرانی ذرات بستر به علت کم بودن سرعت جریان و استهلاك جت فرورونده در پایین دست سرریز گابیونی که به علت عمق جریان اعمال شده است، اهمیت پیدا می‌کند. همچنین در صورتی که سرعت برشی جریان از سرعت بحرانی کمتر شود، رسوب‌های کف بستر پایدار خواهند ماند و آب‌شستگی رخ نخواهد داد. باید در نظر داشت که جریان در آزمایش‌های انجام شده آزاد بوده و همواره آب‌شستگی رخ داده است. در پژوهش‌های گوان و همکاران (۲۰۱۶-۲۰۱۴)، نیز به موارد ذکر شده کاملاً توجه شده است.^[۱۱-۱۲]

$$\frac{d_{d-mc}}{h_t} = \left(\frac{z}{h_t}\right)^{0.95} \left(\frac{d_{50}}{h_t}\right)^{0.1} \left(\frac{U_o}{U_c}\right)^{0.1} \quad (13)$$

پانوشتها

1. Kells
2. Rockfill

3. Hager & Schwalt
4. Wu & Rajaratnam
5. Leu
6. Sargison & Percy
7. Guan

8. deeply submerged
9. impinging jet
10. Michioku
11. Rubble-mound
12. Chanson
13. Armfield
14. Lakehead
15. Melville & Chiew

منابع (References)

1. Kells, J.A. "Reply on discussion of spatially varied flow over rockfill embankments", *Can. J. Civ. Eng.*, **21**, pp. 163-166 (1994).
2. Hager, W.H. and Schwalt, M. "Broad-crested weir", *J. Irrig. Drain. Eng.*, **120**(1), pp. 13-26 (1994).
3. Wu, S. and Rajaratnam, N. "Submerged flow regimes of rectangular sharp-crested weirs", *ASCE, J. Hydr. Eng.*, **122**(7), pp. 412-414 (1996).
4. Wu, S. and Rajaratnam, N. "Impinging jet and surface flow regimes at drop", *IAHR, J. Hydr. Res.*, **36**(1), pp. 69-74 (1998).
5. 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. 1-7 (2008).
6. Sargison, J.E. and Percy, A. "Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes", *J. Irrig. Drain.*, **135**(1), pp. 115-118 (2009).
7. Mohamed, H. "Flow over gabion weirs", *J. Irrig. Drain Eng.*, **136**(8), pp. 573-577 (2010).
8. Mohammadpour, R., Ghani, A.A. and Azamathulla, H.M. "Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs", *Applied Mathematical Modelling*, **37**(22), pp. 9324-9337 (2013).
9. 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).
10. 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 (2014).
11. Guan, D., Melville, B. and Friedrich, H. "Local scour at submerged weirs in sand-bed channels", *Journal of Hydraulic Research*, **54**(2), pp. 172-184 (2016).
12. Guan, D., Melville, B.W. and Friedrich, H. "Live-Bed Scour at Submerged Weirs", *J. Hydraulic. Eng.*, **141**(2), pp. 04014071-12 (2015).
13. 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).
14. Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T. and et al. "Discharge through a permeable rubble mound weir", *J. Hydraul. Eng.*, **31**(1), pp. 1-10 (2005).
15. 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).
16. Michioku, K., Takehara, K. and Etoh, T. "An experimental study on flow field in and around rubble mound river structures", *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, **25**(2), pp. 37-45 (2007).
17. Chanson, H. "Discussion of discharge through a permeable rubble mound weir", by Kohji Michioku, Shiro Maeno, Takaaki Furusawa, and Masanori Haneda, *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(4), pp. 432-433 (2006).
18. 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).
19. Safarzadeh, A. and Mohajeri, S.H. "Hydrodynamics of rectangular broad-crested porous weirs", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **144**(10), pp. 04018028 (2018).
20. Melville, B.W. and Chiew, Y.M. "Time scale for local scour at bridge piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**(1), pp. 59-65 (1999).
21. Bijankhan, M. and Kouchakzadeh, S. "Unified discharge coefficient formula for free and submerged triangular labyrinth weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, JFMII346 (2017).
22. D'Agostino, V. and Ferro, V. "Scour on alluvial bed downstream of grade-control structures", *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(1), pp. 24-37 (2004).
23. Pagliara, S. and Kurdistani, S.M. "Scour downstream of cross-vane structures", *Journal of Hydro-Environment Research*, **7**(4), pp. 236-242 (2013).