

مدلسازی عددی دبی جریان روگذر و درون گذر در سرریزهای لبه پهن گابیونی با شیب جانبی

محمد توکل صدرآبادی^۱، منوچهر فتحی مقدم^{۲*}، رضا محمدپور^۲

^۱ دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان، استهبان، فارس

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ اسفند ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۵ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۵ مرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۴ شهریور ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

جریان روگذر و درون گذر
ضریب دبی
سرریز گابیونی
سرریز لبه پهن گابیونی
شیب‌سازی عددی

چکیده: سرریزهای گابیونی به دلیل سازگاری با محیط‌زیست و تأثیر مستقیم بر پارامترهای کیفی رودخانه‌ها و از طرفی در دسترس بودن و سادگی اجرا و طراحی، طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی سرریز گابیونی لبه پهن با شیب‌های جانبی در حالت جریان آزاد شامل ضریب دبی، پروفیل سطح آب و حجم دبی درون گذر از محیط متخلخل به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مجموع ۲۱ مدل مختلف شامل ۷ هندسه‌ی مختلف سرریز با سه تخلخل مختلف ۴۳٪، ۴۴٪ و ۴۶٪ و هر کدام در ۶ تا ۱۰ دبی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش قطر ذرات به افزایش هم‌زمان دبی درون گذر، ضریب دبی جریان و در نتیجه افزایش افت منجر می‌شود. همچنین اینکه افزایش مساحت محیط متخلخل که در نتیجه تغییر زوایای خارجی بالادست و پایین دست سرریز از ۶۰ تا ۰ درجه هستند، باعث کاهش ضریب دبی و نیز دبی درون گذر خواهد شد. در انتها با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی چند متغیره روابطی تجربی برای محاسبه ضرایب دبی و دبی درون گذر از این سرریزها ارائه شده است.

۱- مقدمه

سرریزها یکی از انواع سازه‌هایی هستند که می‌توانند با اهدافی چون افزایش ارتفاع و یا اندازه‌گیری جریان به کار روند. سرریزها را بر اساس ضخامت تاج آن‌ها می‌توان به دو دسته کلی سرریزهای لبه تیز و سرریزهای لبه پهن تقسیم کرد [۱]. سرریزهای معمولی از یک بدنه‌ی نفوذناپذیر و معمولاً از جنس بتن ساخته می‌شود ولی امروزه سازه‌های ساخته شده از سنگ مانند سرریزهای گابیونی ترجیح داده می‌شوند. از دیدگاه کیفیت آبی، مواد فیزیکی و شیمیایی مانند رسوبات و مواد ارگانیک معلق در آب می‌توانند از درون یک بدنه‌ی متخلخل به سمت پایین دست عبور کنند. این موضوع باعث می‌شود که رسوب‌گذاری و تجمع آب پشت سازه به حداقل برسد. همچنین آشفستگی ایجاد شده در محیط دانه‌ای این سازه باعث هوادهی آب شده و عاملی برای تصفیه و پالایش رودخانه می‌باشد. با توجه به این جنبه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که سرریزهای گابیونی، سازه‌هایی با حداقل اثرات منفی بر محیط‌زیست بوده و سازگاری بسیار بهتری با طبیعت و محیط‌زیست، نسبت به سرریزهای نفوذناپذیر دارند [۲].

تاکنون مطالعات بسیاری در مورد این سرریزها صورت گرفته است که بسیاری از آن‌ها مربوط به سرریزهای پلکانی بوده و بحث افت انرژی در آن‌ها مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این مطالعات می‌توان به عزیزی و همکاران اشاره کرد که آزمایشاتی را روی سرریز پلکانی گابیونی دارای

سه پله انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که با افزایش تخلخل، مقدار افت نسبی انرژی جریان کاهش می‌یابد و در تخلخل‌های بالاتر از ۳۸ درصد، کاهش افت انرژی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد که این امر به دلیل افزایش جریان درون گذر نسبت به جریان روگذر می‌باشد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که در دبی‌های پایین که قسمت عمده جریان درون گذر است، افزایش تخلخل باعث کاهش یکنواخت انرژی می‌گردد در حالی که در دبی‌های زیاد افزایش تخلخل باعث کاهش جریان روگذر می‌شود و با توجه به اینکه جریان درون گذر باعث افت اندکی نسبت به جریان روگذر می‌شود، افت نسبی انرژی در دبی‌های بالا به صورت ناگهانی کاهش پیدا می‌کند [۳]. در مورد عملکرد هیدرولیکی سرریزهای لبه پهن نیز مطالعات بسیاری صورت گرفته است. از این جمله می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط گاکس و همکاران [۴]، هاگر و اشوالت [۵]، انسار و گونزالس-کاسترو [۶]، لی و کارگه [۷] و محمدپور و همکاران [۸] اشاره کرد. سارجیسن و پرس [۵] مطالعاتی در زمینه‌ی اثر شیب بالادست و پایین دست سرریز لبه پهن انجام دادند و نتیجه گرفتند که افزایش شیب بالادست باعث کاهش ارتفاع پروفیل سطح آب و بنابراین کاهش فشار استاتیک تاج و در نتیجه کاهش ضریب دبی

1 Göğüş., et al.

2 Hager, W. H., and Schwalt

3 Ansar, M., and Gonzalez-Castro

4 Li, B., and Garga

5 Sargison, J. E., and Percy

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mfathi@scu.ac.ir

تخلخل متفاوت با سه اندازه ذرات مختلف در دو فلوم به طول ۱۰ و ۱۷ متر مورد بررسی قرار داد و نتایج آن‌ها را با نتایج به دست آمده از سرریزهای صلب مقایسه کرد و نتیجه گرفت که استفاده از فرمول‌های موجود برای سرریزهای صلب در محاسبه دبی جریان روی سرریزهای گابیونی منجر به ایجاد خطاهای بزرگ می‌شود چرا که ضرایب دبی سرریزهای گابیونی بزرگتر از ضرایب دبی سرریزهای صلب هستند. همچنین با افزایش قطر ذرات سازنده سرریز گابیونی، ضریب دبی آن افزایش می‌یابد. در انتها نیز روابط رگرسیونی جهت تخمین ضرایب دبی و حجم دبی گذرنده از سرریز در دو حالت آزاد و مستغرق ارائه شده است [۲]. خیرایی و فتحی مقدم (۱۳۹۵) عملکرد هیدرولیکی سرریزهای مثلثی شکل گابیونی را در حالت جریان آزاد به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. در این تحقیق آنها ۸ نمونه سرریز توری-سنگی و سه نمونه سرریز صلب را در دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که در شرایط جریان آزاد با افزایش زاویه بالادست و پایین‌دست سرریز با راستای عمود، بار آبی روی سرریز افزایش و ضریب دبی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش اندازه ذرات، بار آبی روی سرریز کاهش یا فته و ضریب دبی افزایش می‌یابد [۱۸].

بررسی مجموع تحقیقات صورت گرفته در این موضوع نشان می‌دهد که تا کنون تحقیق جامعی در خصوص اثر شیب‌های بالادست و پایین دست بر مجموع رفتار هیدرولیکی این سرریزها شامل اثر آن‌ها بر حجم جریان درون‌گذر و الگوهای جریان اطراف سرریز صورت نگرفته است. هدف از این تحقیق بررسی اثر تغییر قطر ذرات و شیب‌های کناری بر عددی عملکرد هیدرولیکی، حجم جریان درون‌گذر و نیز الگوی حرکتی جریان اطراف و درون سرریزهای لبه پهن گابیونی می‌باشد. در این تحقیق از سه نوع تخلخل متفاوت برای بررسی پروفیل سطح آب، ضریب دبی و نیز میزان دبی درون‌گذر استفاده شده است. در ادامه عملکرد سرریزهای متخلخل با تغییر زوایای خارجی بالادست و پایین دست سرریز مورد بررسی قرار گرفته است و در انتها روابط رگرسیونی جهت تخمین موارد بررسی شده در حالات مختلف ارائه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی پایه کالیبراسیون

نتایج حاصل از مدل عددی در این تحقیق با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده توسط مرادی (۱۳۹۴) در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز و در یک فلوم با عرض ۳۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته است. بدین ترتیب که یک مدل سرریز گابیونی لبه‌پهن مستطیلی با ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر معادل عرض فلوم و طول ۱۵ سانتی‌متر ساخته شده و در فاصله ۴ متری از بالادست فلوم قرار داده شده است. در این آزمایشات جهت چسباندن سرریز به کف فلوم، یک صفحه صلب با ارتفاع ۱ سانتی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر و عرض معادل با عرض فلوم، در کف

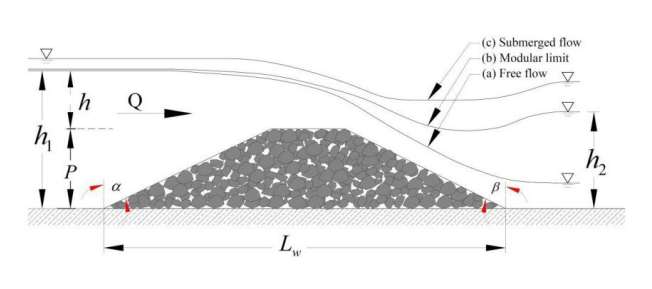
جریان می‌باشد [۹]. کلز، جریان متغیر تدریجی از روی بندهای سنگریزه‌ای را برای شرایط ریزش جزئی و ریزش کامل از روی بند مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که نسبت جریان درون‌گذر نسبت به جریان روگذر در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۵ می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. لئو و همکاران^۱ به بررسی تغییرات سرعت و آشفتگی در جریان بر روی سازه‌های متخلخل پرداختند. آن‌ها با ثبت تغییرات متوسط سرعت و شدت آشفتگی بر روی سازه‌های متخلخل و صلب نتیجه گرفتند که توزیع عمودی سرعت در بالای سازه‌های متخلخل با توجه به سرعت لغزش در سطح مواجهه‌ی آب و سازه یکنواخت‌تر از سازه‌های صلب می‌باشد. همچنین مؤلفه‌ی سرعت در راستای جریان با کاهش تخلخل افزایش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که شدت آشفتگی در بالای سازه‌های با تخلخل بزرگ اندکی بیشتر از سازه‌های با تخلخل ریز است و همچنین اینکه شدت آشفتگی اطراف سازه‌های متخلخل کمتر از سازه‌های صلب است. به‌طور کلی آن‌ها نشان دادند که تخلخل موجب افزایش شدت آشفتگی و در پی آن کاهش شدت آبستتگی مربوط به سازه مربوطه خواهد شد [۱۲ و ۱۳]. میچیوکو و همکاران^۲ (۲۰۰۵) با انجام تحلیل یک‌بعدی روی جریان ماندگار غیریکنواخت از درون سرریز متخلخل نشان دادند که دبی تابعی از پارامترهایی مانند عمق جریان بالادست و پایین‌دست، تخلخل، اندازه و نیز طول سرریز می‌باشد [۱۴]. عباسپور و همکاران به شبیه‌سازی عددی جریان روی سرریز لبه پهن مستطیلی با وجوه شیب‌دار بالادست و پایین‌دست با کمک مدل فلونت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل آشفتگی K-ε به‌منظور مدل‌سازی جریان روی سرریزهای لبه پهن و برآورد دبی مناسب می‌باشد. همچنین اینکه حداکثر خطای نسبی برای بار هیدرولیکی و ضریب دبی به ترتیب برابر ۴ و ۶٪ محاسبه گردید [۱۵]. سارکر و رودز^۳ (۲۰۰۳) به شبیه‌سازی پروفیل جریان روی یک سرریز لبه پهن به کمک یک نرم‌افزار تجاری سه‌بعدی و روش یک‌بعدی جریان غیر ویسکوز پرداختند. مقایسات آن‌ها نشان داد که پروفیل سطح آب، بالادست و جریان متغیر سریع روی تاج سرریز با دقت بسیار بالایی توسط مدل سه‌بعدی تخمین زده شد. درحالی‌که دقت روش یک‌بعدی بسیار پایین و با خطای زیاد همراه بوده است [۱۶]. ورجاوند و همکاران به شبیه‌سازی جریان در سرریزهای استوانه‌ای با مدل فلونت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که خطای نسبی مدل فلونت در شبیه‌سازی عمق آب بالادست معادل ۰/۹۱ درصد، عمق آب بر روی سرریز ۱/۳۹ درصد و برای ضریب دبی جریان معادل ۰/۴٪ می‌باشد. آن‌ها همچنین نشان دادند که مدل RNG در قیاس با مدل K-ε، نتایج بهتری به همراه داشته است [۱۷]. محمد^۴ (۲۰۱۰) به بررسی هیدرولیک جریان آزاد و مستغرق بر روی سرریزهای مستطیلی گابیونی پرداخت. در این تحقیق او دو مدل سرریز با نسبت‌های متفاوت عرض تاج به ارتفاع سرریز را در سه

- 1 Kells
- 2 Leu, et al.
- 3 Michioku, et al
- 4 Sarker & Rhodes
- 5 Mohamed

همانطور که مشاهده می‌شود، سرریزهای بررسی شده در این تحقیق دارای شیب‌های جانبی عمودی، ۴۵ و ۶۰ درجه با خط قائم می‌باشند. دلیل انتخاب این زوایا را می‌توان در دو مورد خلاصه کرد. نخست از منظر هیدرولیکی و سپس از منظر سازه‌ای. از منظر هیدرولیکی تحقیقات گذشته بر روی سرریزهای صلب و گابیونی پلکانی همگی حاکی از تاثیر مستقیم شیب‌های بالادست و پایین دست بر عملکرد سرریزها و کارایی آن‌ها می‌باشد. بدین ترتیب سه زاویه انتخاب شده در این تحقیق، زوایایی هستند که در سرریزهای صلب بیشتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند و انتخاب آن‌ها به منظور فراهم کردن امکان مقایسه بیشتر با سرریزهای صلب در تحقیقات آتی است. همچنین از منظر سازه‌ای سرریز با زوایای خارجی بالادست و پایین دست معادل ۶۰ درجه دارای بیشترین پایداری سازه‌ای و طولانی‌ترین شیب و سرریز مستطیلی دارای کمترین پایداری می‌باشد لکن دارای مزیت ساخت ساده‌تر است. بدین ترتیب امکان انتخاب سرریز مناسب با شرایط هر محل از نقطه نظر سازه‌ای-هیدرولیکی و اجرایی فراهم خواهد شد.

همچنین جهت بررسی اثر تخلخل سه نوع مصالح با دانه‌بندی متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است که در جدول ۲ مشخصات آن‌ها قید شده است.

فلوم قرار داده شد و پس‌از آن، مدل‌های آزمایشگاهی بر روی این صفحه تثبیت گردیده است [۱۹] که همگی این جزئیات جهت کالیبراسیون مدل در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. در این تحقیق پس از کالیبراسیون مدل عددی برای بررسی اثر شیب بر روی سرریزهای متخلخل، زوایای خارجی ۴۵ و ۶۰ درجه به بالادست و پایین‌دست این سرریز اضافه شده است (شکل ۱). به‌طور کلی ۷ نوع مدل سرریز لبه پهن در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته که مشخصات هندسی و دانه‌بندی آن‌ها در جدول ۱ و ۲ قید شده است.



شکل ۱: مدل سرریز لبه پهن شبیه‌سازی در تحقیق
Fig. 1. Simulated broad crested weir model

جدول ۱: مشخصات سرریزهای لبه پهن

Table 1. Broad crested weirs dimensional characteristics

شماره	نوع سرریز لبه پهن	نماد سرریز	ارتفاع (P)	زاویه بالادست (α)	زاویه پایین‌دست (β)
۱	مستطیلی	BCGW	۱۶	۰	۰
۲	شیب‌دار دو طرفه	BCGCW-UD1	۱۶	۴۵	۴۵
۳	شیب‌دار یک طرفه	BCGCW-U1	۱۶	۴۵	۰
۴	شیب‌دار یک طرفه	BCGCW-D1	۱۶	۰	۴۵
۵	شیب‌دار دو طرفه	BCGCW-UD2	۱۶	۶۰	۶۰
۶	شیب‌دار یک طرفه	BCGCW-U2	۱۶	۶۰	۰
۷	شیب‌دار یک طرفه	BCGCW-D2	۱۶	۰	۶۰

جدول ۲: مشخصات مصالح با تخلخل متفاوت

Table 2. Characteristics of filling materials

شماره زبری	تخلخل	قطر متوسط ذرات (d_{50} (cm))
۱	٪۴۳	۳/۱۳
۲	٪۴۴	۲/۲
۳	٪۴۶	۱/۷۵

۲-۲- معادلات حاکم بر مدل عددی

این معادله در ترکیب با معادله شماره ۳، با اعمال افت‌های خطی و غیرخطی در افت فشار به ازای طول واحد به‌عنوان تابعی از سرعت ظاهری به شرح زیر خواهد بود:

$$-\nabla p = A \cdot |u_{bulk}| \mu \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} + B \cdot |u_{bulk}|^2 \rho \frac{(1-\phi)}{\phi^3} \quad (5)$$

و B به شرح زیر مربوط به ضرایب تجربی a و b هستند:

$$A = \alpha \frac{\phi^3}{\mu(1-\phi)^2}, \quad B = b \frac{\phi^3}{\rho(1-\phi)} \quad (6)$$

معادله ۶ می‌تواند برای همگرایی نتایج عددی با اطلاعات آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد که به آن‌ها ضرایب افت مخصوص محیط^۲ گویند. زمانی که اطلاعات آزمایشگاهی موجود نباشد، این ضرایب می‌تواند به شرح زیر تخمین زده شود:

$$A = \frac{\alpha}{d_{fiber}^2}, \quad B = \frac{\beta}{d_{fiber}} \quad (7)$$

که در این معادله α یک ضریب ثابت برابر با ۱۸۰، β ضریب زبری که معمولاً در بازه‌ی بین ۱/۸ تا ۴ (از سطوح صاف ذرات تا سطوح زبر) است و d_{fiber} قطر متوسط معادل‌سازی شده با کره‌ی فیبرها یا ذرات سازنده‌ی محیط متخلخل است. برای ذرات کروی که به‌صورت اتفاقی توزیع شده‌اند، معادله‌ی ارگون، ضرایب معادل $\alpha=150$ و $\beta=1/75$ را توصیه می‌کند [۲۰].

۲-۴- مدل‌سازی‌های آشفتگی

شبیه‌سازی آشفتگی در FLOW-3D با استفاده از یکی از ۶ مدل آشفتگی مورد استفاده توسط این نرم‌افزار صورت می‌گیرد که عبارت‌اند از: طول اختلاط پراندتل^۳، مدل یک معادله-انرژی آشفتگی^۴، مدل دو معادله‌ای (k- ϵ)^۵، مدل دو معادله‌ای (k-w)^۶، مدل گروه‌های نرمال شده (RNG) و مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۷ می‌باشد مدل‌های آشفتگی استفاده شده در این تحقیق عبارت‌اند از سه مدل RNG، k- ϵ و k- ω . مدل k- ϵ یک مدل پیچیده و با طیف گسترده‌ای از کاربرد در انواع مختلف جریان است. این مدل از دو معادله انتقال یکی برای انرژی سینماتیک آشفتگی (k) و یکی معادله برای ترم پخشیدگی آن (ϵ) که در نتیجه این مدل با نام k- ϵ شناخته می‌شود. معادلات سه‌بعدی حاکم شامل انرژی سینماتیک توربولنت و ترم پخشیدگی آن به شرح زیر است:

جهت مدل‌سازی عددی و نیز محاسبه پارامترهای دیگر هیدرولیکی، از نرم‌افزار Flow-3D استفاده شده است. معادلات حاکم بر این مدل شامل پیوستگی و معادلات مومنتم می‌باشد. معادله ۱ رابطه پیوستگی را با صرف نظر کردن از قابلیت تراکم سیال در قالب مختصات کارتزین (x, y, z) نشان می‌دهد:

$$V_F \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (1)$$

که در اینجا (u, v, w) مؤلفه‌های سرعت در راستای (x, y, z) و (A_x, A_y, A_z) کسرهای سطحی برای جریان در جهت‌های x, y, z هستند. V_F کسر حجمی جریان، ρ دانسیته سیال و R_{SOR} منبع جرم می‌باشد. معادله ۲ معادله مومنتم را نشان می‌دهند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + Gx + fx \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + Gy + fy \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + Gz + fz \end{aligned} \quad (2)$$

که در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب‌های بدنه و (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های ناشی از لزجت در جهت‌های مختلف هستند [۲۰].

۲-۳- مدل درگ اشباع فرشهایمیر^۱

معادله فرشهایمیر، افت‌های درون یک محیط متخلخل را به‌صورت ترکیبی از ترم‌های درگ خطی (ویسکوز) و نمایی توضیح می‌دهد. درگ نمایی زمانی مهم می‌شود که رینولدز حفره به بیش از ۱۰ تجاوز کند. در معادله فرشهایمیر، افت فشار به شرح زیر است:

$$-\nabla p = (a + b |u_{bulk}|) u_{bulk} \quad (3)$$

که در این معادله a و b ضرایبی هستند که توسط اطلاعات آزمایشگاهی مشخص می‌شوند. u_{bulk} سرعت ظاهری جریان در محیط متخلخل و ∇p گرادیان فشار در محیط متخلخل است. معادلات افت خطی (داریسی) و غیرخطی (غیر-داریسی) به‌صورت زیر به‌عنوان یک معادله برای توضیح F_d ترکیب می‌شوند:

$$F_d u_{microscopic} = -\frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{\mu}{\rho} \frac{1-\phi}{\phi} \left[A \frac{1-\phi}{\phi} + B \frac{Re_p}{d_{pore}} \right] u_{microscopic} \quad (4)$$

که در این معادله A ضریب درگ خطی، B ضریب درگ غیرخطی، μ ویسکوزیته و ρ برابر چگالی سیال است.

1 Forchheimer Saturated Drag Model

2 Media-specific loss coefficients

3 Prandtel Mixing Length

4 one-equation, turbulent energy model

5 Two-equation (k- ϵ) model

6 Two-equation (k-w) model

7 Renormalization-Group

8 Large Eddy Simulation

یک شبکه مش با تعداد ۲۱۶، ۲۰ و ۶۷ به ترتیب در راستاهای X، Y و Z برای مدل استفاده شد.

۲-۶- مش لایه‌مرزی

در زمانی که مدل‌های شبیه‌سازی آشفتگی فعال شوند، اولین سلول در نزدیکی دیواره یا جسم جامد، پروفیل سرعتی لگاریتمی (log-law region) خواهند داشت. بر این اساس اندازه‌ی اولین سلول در طول دیواره به گونه‌ای تعیین شود که زیر لایه‌ی ویسکوز (آرام) را در بر بگیرد و به خوبی در درون منطقه توزیع لگاریتمی سرعت لایه‌مرزی تمام شود.

یافتن یک بازه مناسب برای اندازه سلول لایه‌مرزی، مستلزم تخمین دقیق ارتفاع (ضخامت) لایه‌مرزی عمود بر سطوح جامد و دیواره‌هاست. یک شاخص مؤثر و بسیار کمک کننده در این راه، فاصله عمودی بدون بعد از دیواره یا شاخص (Y^+) است که بعضاً به آن طول ویسکوز نیز می‌گویند و به شرح زیر محاسبه می‌شود:

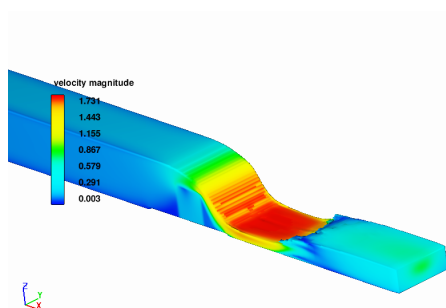
$$y^+ = \frac{u_\tau y \rho_f}{\mu_f} \quad (11)$$

که در معادلات بالا u_τ معادل سرعت برشی، y ارتفاع عمودی از سطح جسم، ρ_f چگالی سیال و μ_f معادل ویسکوزیته دینامیک سیال است. به‌طور کلی بر اساس توصیه راهنمای نرم‌افزار، مقدار شاخص y^+ باید بیشتر از ۳۰ باشد تا لایه داخلی به آرامی به منطقه لگاریتمی وارد شود و نیز باید از یک مقدار که به عدد رینولدز جریان و ضخامت لایه‌مرزی وابسته است کوچکتر باشد [۲۰]. بر اساس توصیه برخی محققین این مقدار باید عددی بین حد پایین ۱۱/۲۲۵ تا حد بالای ۳۰ را شامل شود [۸].

۳- تحلیل و بررسی نتایج

۳-۱- کالیبراسیون نتایج آزمایشگاهی و عددی:

در شکل ۳ مدل عددی سرریز متخلخل و جریان عبوری روی آن نشان داده شده است. داده‌های استخراج شده از مدل شامل عمق آب بالادست و پایین دست و نیز پروفیل سطح آب در حالات مختلف می‌باشد.



شکل ۳: مدل عددی سرریز متخلخل و جریان گذرنده روی آن

Fig. 3. Simulated model of the porous weir and passing flow

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

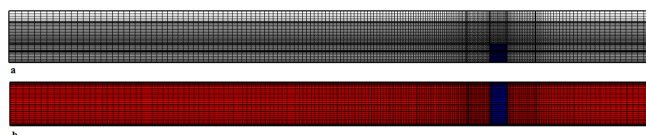
که در اینجا μ_t می‌تواند به شرح زیر بیان شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

که در اینجا G_k و G_b ترم‌های انرژی سینماتیکی توربولنت مرتبط با شناوری و گرادیان‌های متوسط سرعت هستند. $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ و $C_{3\varepsilon}$ ضرایب ثابت و معادل با ۱/۴۴، ۱/۹۲ و ۰/۰۹ هستند. σ_ε و σ_k اعداد آشفتگی پранدتل برای k و ε هستند و به ترتیب معادل با ۱ و ۱/۳ می‌باشند. مدل RNG از روابط نظیر روابط موجود در مدل k - ε استفاده می‌کند، با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل k - ε ، که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند. به‌طور کلی مدل RNG کاربرد گسترده‌تری نسبت به مدل استاندارد k - ε دارد. به‌ویژه مدل RNG به جهت ارائه نتایج دقیق در جریان‌های با شدت آشفتگی کم و جریان‌های با تنش برشی قوی، معروف است [۱۵].

۲-۵- شرایط مرزی و شبکه‌بندی

در تحقیق حاضر از یک میدان مش کلی به منظور شبیه‌سازی کانال استفاده شده است. همچنین به منظور افزایش دقت محاسبات در نزدیکی سرریز، اندازه مش‌های مورد استفاده در این قسمت کوچک شده و به طبع آن تعداد محاسبات و دقت افزایش خواهد یافت.



شکل ۲: مقطع طولی (a) و پلان میدان حل (b) کانال و سرریز
Fig. 2. Longitudinal section (a) and Plan view (b) of the weir and the computational domain

شکل ۲ میدان حل و چگالی مش‌بندی را در نقاط مختلف نشان می‌دهد: همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، اندازه مش در راستای طولی و به سمت محل قرارگیری سرریز ریز شده و در فاصله ۲۰ سانتی‌متر قبل و ۲۵ سانتی‌متر پس از سرریز حداکثر چگالی مش در این راستا مشخص است. همچنین به جهت افزایش دقت در تخمین پروفیل سطح آب بر روی سرریز، مش‌بندی در راستای ارتفاع از ۷ سانتی‌متر پایین‌تر از سرریز تا ارتفاع حداکثر جریان، ریز شده و در نتیجه حداکثر چگالی مش دقیقاً در محل قرارگیری و بالای سرریز ایجاد شده است. پس از چندین مرتبه سعی و خطا

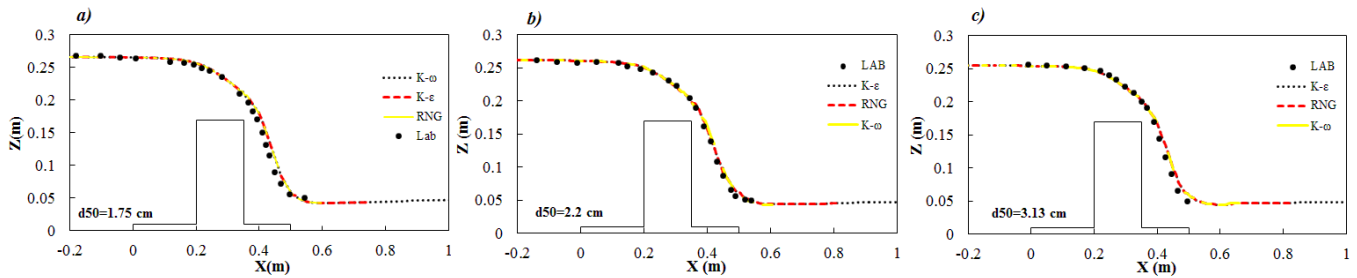
جدول ۳: مقایسه میانگین خطای مدل‌های آشفتگی برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب

Table 3. Error indicators for surface profile estimation

Run-Time (s)	R2	%RMSE	%MAE	شاخص ارزیابی مدل آشفتگی
۱۷۴۶۴	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۷۴	K-ε
۱۹۸۲۱	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۷۳	RNG
۱۷۹۹۲	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۷۶	K-ω

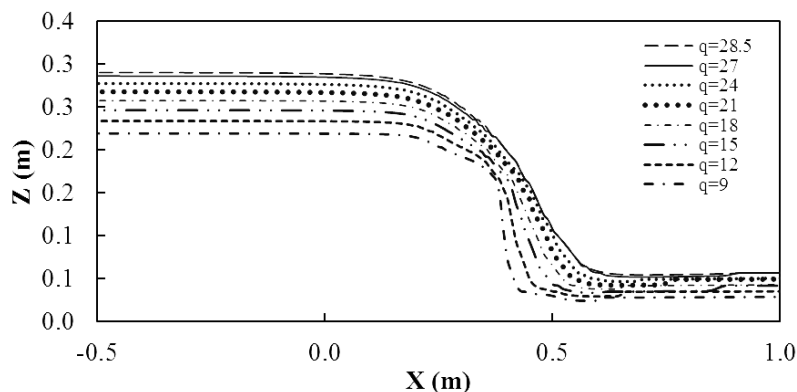
در ابتدا برای واسنجی مدل پروفیل جریان آب بر روی سرریز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است از سه مدل آشفتگی برای این بررسی استفاده شده است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است تمامی مدل‌های آشفتگی دارای جواب‌های کاملاً قابل قبولی می‌باشند اما بر اساس نتایج حاصل از جدول ۳ و با توجه به معنی‌دار نبودن تفاوت نتایج مدل‌های آشفتگی مختلف، و با توجه به زمان شبیه‌سازی و همگرایی کوتاه‌تر مدل (K-ε)، این مدل به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد.

در شکل ۵ پروفیل سطح آب در دبی‌های مختلف برای سرریز لبه پهن مستطیلی BCGW با تخلخل ۴۴٪ و قطر متوسط ذرات معادل ۲۲ میلی‌متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دبی میزان عمق جریان در پایین‌دست این سازه‌ها افزایش می‌یابد.



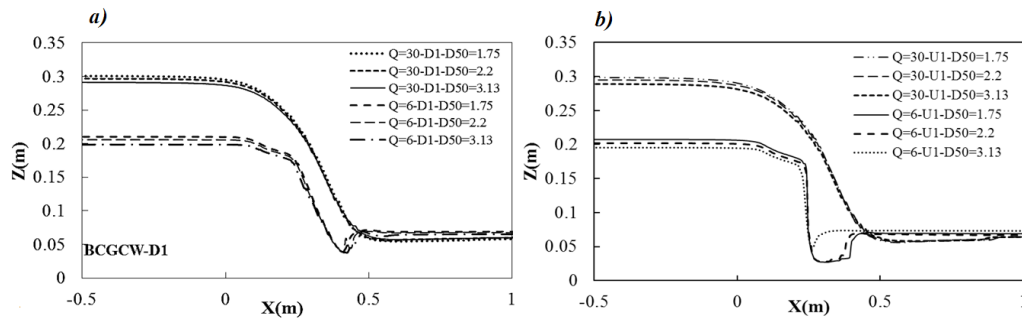
شکل ۴: واسنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای پروفیل سطح آب برای (a) تخلخل ۴۶٪، (b) تخلخل ۴۳٪، (c) تخلخل ۴۴٪

Fig. 4. Validation of numerical results with the experimental data of free surface profile for various porosities of a) 46% b)43% and c)44%



شکل ۵: پروفیل سطح آب روی سرریز لبه پهن مستطیلی در دبی‌های مختلف با قطر ذرات معادل ۲۲ میلی‌متر

Fig. 5. Water surface profile above rectangular broad crested weir filled with 22mm particles in various discharges



شکل ۶: پروفیل سطح آب در دبی‌های ۳۰ و ۹ لیتر برای سرریز لبه پهن الف با شیب پایین دست ۴۵ و ب) شیب بالادست ۴۵ درجه

Fig. 6. Water surface profile in discharges of 30 and 9 L/s over broad crested weirs with a) downstream slope of 45 and b) upstream slope of 45°

در این اشکال محور افق نمودار نسبت عمق جریان (H) به طول لبه سرریز در راستای جریان (L_{crest}) و محور قائم ضریب دبی سرریز می‌باشد. طبق انتظار سرریزهای با قطر ذرات بزرگ‌تر ضریب دبی بزرگ‌تری دارند. بدین معنی که در هر هندسه مجزا، با افزایش قطر ذرات ضریب دبی افزایش می‌یابد. در سرریزهای گابیونی این موضوع به معنی افزایش دبی درون گذر و نیز افزایش میزان افت انرژی سرریز است. نکته دیگر اینکه در هر هندسه مشخص سرریز، با کاهش زوایای خارجی α و β ، از ۶۰ تا ۰ درجه (عمودی)، ضریب دبی افزایش می‌یابد. بدین ترتیب ضریب دبی برای سرریزهای با زاویه α و β معادل ۶۰ درجه کمترین ضریب دبی در تحقیق حاضر است. به‌طور کلی می‌توان این‌گونه برداشت کرد که افزایش مساحت محیط متخلخل باعث کاهش ضریب دبی می‌گردد.

مشاهده می‌شود که با افزایش هد آب پشت سرریز، ضرایب دبی برای تمامی هندسه‌های سرریز به هم نزدیک می‌شوند. این موضوع بدین معنی است که با هندسه و قطر ذرات تشکیل دهنده سرریز به تدریج کاهش می‌یابد به‌گونه‌ای که مشاهده می‌شود که اختلاف حداکثر و حداقل ضرایب دبی برای هندسه‌ها و تخلخل‌های مختلف مورد آزمایش از حدود ۰/۵ تا حدود ۰/۲ به ترتیب در نسبت هد آب به عرض تاج سرریز معادل ۰/۳ تا ۱ کاهش یافته است.

همچنین مقایسه ضرایب دبی سرریزهای ۶۰ و ۴۵ درجه در شکل ۸، به‌روشنی بالاتر بودن ضرایب دبی برای سرریز با زاویه خارجی ۴۵ نسبت به زاویه ۶۰ را در هر اندازه قطر متوسط ذرات نشان می‌دهد. جهت صحت سنجی نتایج حاصله در شکل ۴، ضرایب دبی‌های سرریزهای گابیونی مستطیلی (BCGW) و صلب ساده حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در شکل ۹ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج عددی و آزمایشگاهی انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند و این امر دقت و اعتبار نتایج بعدی مدل عددی را تایید می‌نماید.

در ادامه پروفیل سطح آب بر روی سرریزهای شیب‌دار یک‌طرفه مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت از سرریزهای BCGCW-D1 و BCGCW-U1 به ترتیب با شیب‌های ۴۵ درجه در پایین دست و بالادست استفاده شده است. نتایج برای دو نوع دبی حداقل و حداکثر (مقادیر ۳۰ و ۹ لیتر بر ثانیه) در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند با افزایش قطر ذرات در محیط متخلخل پروفیل سطح آب قبل از سرریز کاهش می‌یابد که نشان دهد افزایش جریان عبوری از محیط متخلخل می‌باشد. از طرفی در دبی‌های کم معمولاً در پایین دست، جریان دارای یک پرفیل هیدرولیکی خواهد بود.

۳-۲- ضریب دبی

برآورد و تعیین دبی عبوری از روی سرریزها یکی از مسائل مهم در هیدرولیک می‌باشد. در این میان تعیین ضریب دبی دارای اهمیت بالایی می‌باشد. برای محاسبه دبی عبوری از روی سرریزهای لبه پهن می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

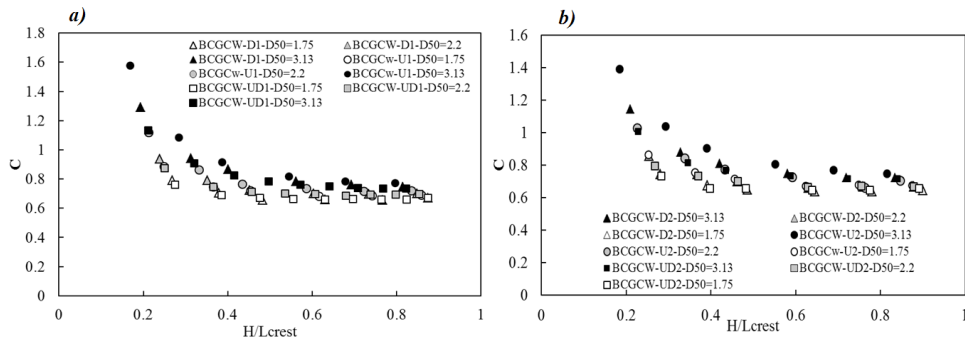
$$Q = \frac{2}{3} C_d B \sqrt{2gH}^{1.5} \quad (12)$$

که می‌تواند به شرح زیر خلاصه شود:

$$Q = CB\sqrt{gH}^{1.5} \quad (13)$$

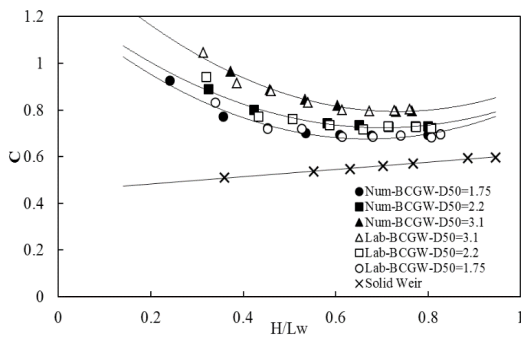
که در اینجا:

C: ضریب دبی بدون بعد، B: معادل عرض کانال برحسب (m)، g: معادل شتاب جاذبه زمین (m/s^2) و H: معادل هد کل روی سرریز برحسب (m) است [۲]. همچنین به جهت ایجاد یک هماهنگی و کاربردی بودن نتایج و مقایسات، جهت محاسبات ضریب دبی سرریزهای با شیب جانبی، طول همه‌ی سرریزها یکسان و برابر با طول قسمت مکعبی شکل ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب ضریب دبی برای ۶ هندسه سرریز و سه تخلخل برای هر سرریز به شرح شکل ۷ محاسبه گردیده است



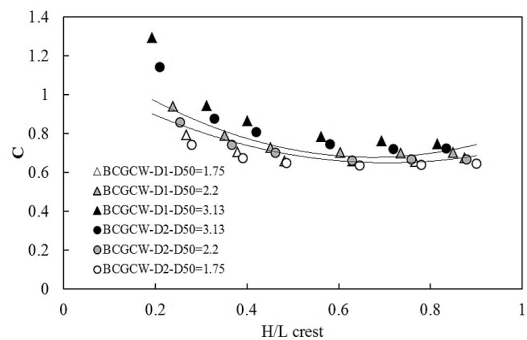
شکل ۷: ضرایب دبی محاسبه شده برای سرریزهای لبه پهن (الف) با شیب جانبی ۴۵ درجه و (ب) شیب جانبی ۶۰ درجه

Fig. 7. Calculated discharge coefficients for BC weirs with side slopes of (a) 45 and (b) 60°



شکل ۹: مقایسه ضرایب دبی آزمایشگاهی و عددی سرریزهای لبه پهن گابیونی

Fig. 9. Comparison of experimental and numerical Cd for gabion BC weirs



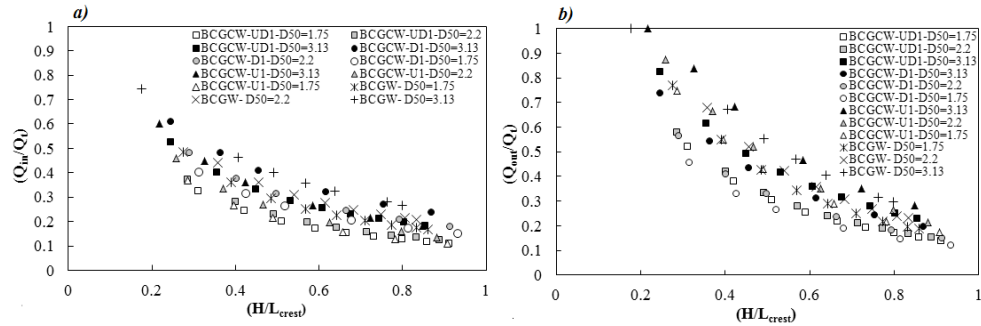
شکل ۸: مقایسه ضرایب دبی سرریزهای گابیونی با شیب پایین دست ۴۵ و ۶۰

Fig. 8. Comparison of Cd for gabion weirs with downstream slopes of 60 and 45

سه اندازه ذرات به ازای ارتفاع متفاوت آب در پشت سرریز مشخص شده‌اند. طبق انتظار حجم دبی درون گذر با افزایش قطر متوسط ذرات افزایش داشته است. این موضوع همچنین در بررسی ضرایب دبی نیز مشخص گردید که با افزایش قطر متوسط ذرات، ضریب دبی سرریز افزایش می‌یابد. این موضوع حاصل افزایش جریان درون گذر و افت ارتفاع آب پشت سرریز است. در اشکال ۱۰ و ۱۱ تمامی حالت‌های مختلف شیب‌های یک طرفه و دوطرفه تشریح شده در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین دبی ورودی به محیط متخلخل از سطح جلو در قطر ذرات ثابت، مربوط به سرریزهای با دیواره عمودی بالادست و پایین دست است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که افزایش زاویه α و β از ۰ تا ۶۰ درجه باعث کاهش دبی ورودی به محیط متخلخل از سطح جلو می‌شود. همچنین بیشترین دبی خروجی از انتها مربوط به سرریز (U2) با شیب بالادست ۶۰ درجه است. بدین ترتیب مشخص می‌شود که افزایش زاویه بالادست از ۰ تا ۶۰ درجه باعث افزایش دبی درون گذر خروجی هرچند به میزان محدود خواهد شد. همچنین اینکه افزایش زاویه پایین دست باعث کاهش دبی خروجی از انتهای سرریز خواهد بود.

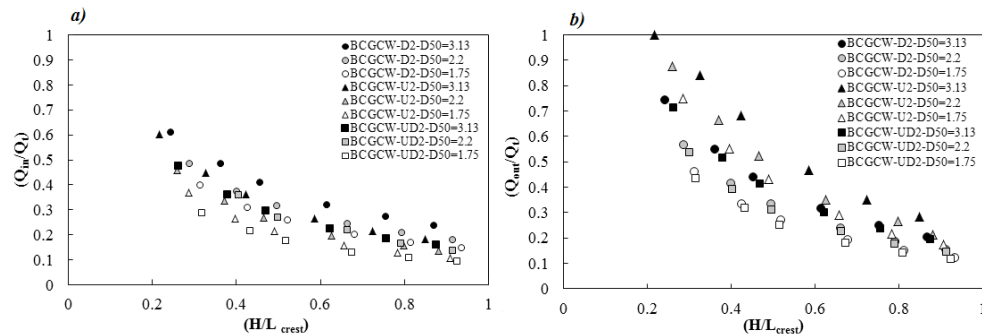
۳-۳- دبی درون گذر

تعیین دبی درون گذر محیط‌های متخلخل در جریان‌های غیر داری همواره جزء موضوعات مورد علاقه‌ی محققین بوده است. همچنین به جهت شرایط هیدرولیکی حاکم بر سرریزهای گابیونی، تعیین دقیق حجم دبی درون گذر و نسبت آن به دبی کل موضوعی مهم و غیرقابل اجتناب است. با توجه به اینکه در آزمایشگاه عملاً نمی‌توان جریان درون گذر را اندازه‌گیری کرد، در این تحقیق با استفاده از مدل عددی جریان گذرنده از درون سرریزهای متخلخل که شامل دو قسمت است اندازه‌گیری شده است. قسمتی از این جریان مستقیماً از وجه بالادست رو به جریان وارد سرریز می‌شود و قسمتی دیگر از تاج سرریز وارد محیط متخلخل می‌گردد. بدین ترتیب حجم دبی وارد شده به سرریز از قسمت جلو رو به جریان و دبی خارج شده از انتهای سرریز به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین می‌توان با کسر این مقادیر از هم، حجم دبی وارد شده به سرریز از بالای تاج در هر حالت را نیز به دست آورد در شکل ۱۰ نسبت دبی ورودی به سرریز متخلخل از قسمت جلو و میزان دبی خروجی از انتها به میزان دبی کل برای سرریز لبه پهن مستطیلی و سرریز با شیب جانبی ۴۵ درجه در هر



شکل ۱۰: نسبت دبی درون گذر از سرریز لبه پهن با شیب جانبی ۴۵ به نسبت کل دبی به ازای هد آب پشت سرریز (الف) دبی ورودی به محیط متخلخل از سطح جلو و (ب) دبی خروجی از انتهای سرریز

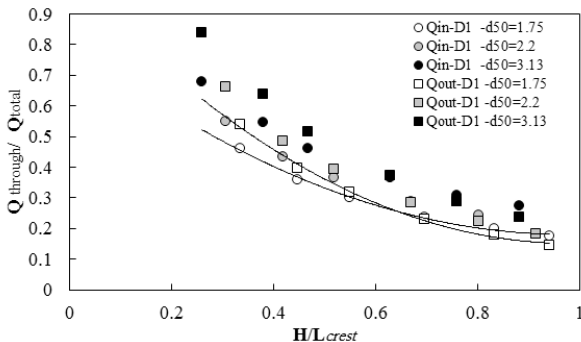
Fig. 10. Ratio of through flow to total discharge for weirs with side slopes of 45 vs upstream head for a) upstream face inflow and b) downstream face outflow



شکل ۱۱: نسبت دبی درون گذر از سرریز لبه پهن با شیب جانبی خارجی ۶۰ به نسبت کل دبی به ازای هد آب پشت سرریز (الف) دبی ورودی به محیط متخلخل از سطح جلو و (ب) دبی خروجی از انتهای سرریز

Fig. 11. Ratio of through flow to total discharge for weirs with side slopes of 60 vs upstream head for a) upstream face inflow and b) downstream face outflow

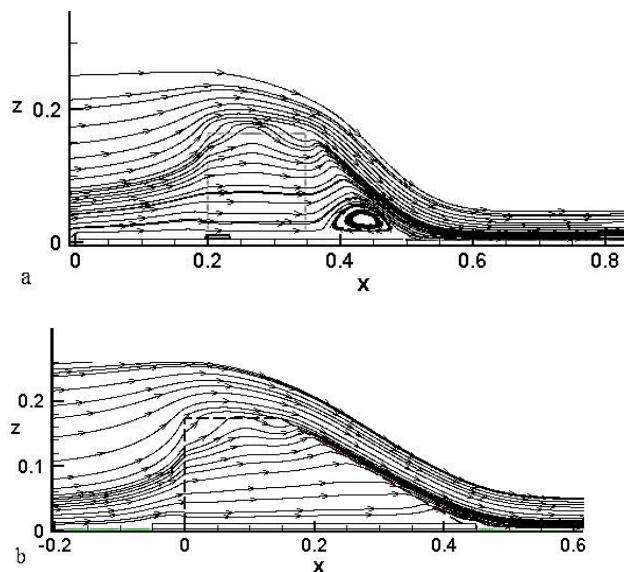
گرفتن دبی ورودی از دبی خروجی نیاز باشد.



شکل ۱۲: مقایسه دبی ورودی از سطح جلو و دبی خروجی از انتهای سرریز متخلخل برای سرریز با شیب پایین دست ۴۵ درجه

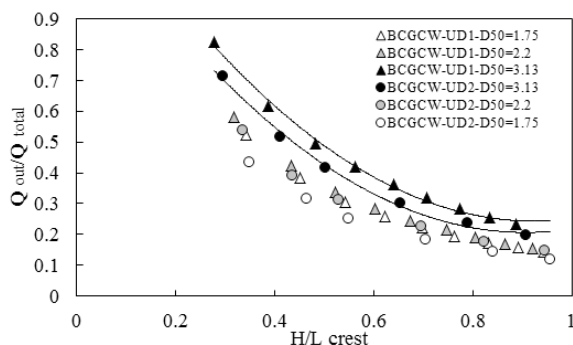
Fig. 12. Comparison of upstream face inflow with the downstream face outflow for weirs with downstream slope of 45

در اینجا یک استثنای جالب وجود دارد. طبق انتظار باید در تمامی حالات دبی خروجی از انتهای سرریز بیشتر از دبی ورودی به محیط متخلخل باشد لکن در سرریزهای با شیب منحصراً پایین دست (D2 و D1) شرایطی عکس این موضوع اتفاق می افتد. بدین ترتیب در شکل ۱۲ مقایسه دبی ورودی به محیط متخلخل و دبی خروجی از انتهای آن برای سرریز با شیب پایین دست ۴۵ آمده است. مشاهده می شود که در ابتدا و برای هدهای کم آب پشت سرریز، حجم دبی خروجی از سرریز بیشتر از دبی ورودی به آن از سطح جلوی سرریز است. در ادامه و با افزایش نسبت هد آب پشت سرریز به عرض تاج سرریز تا حدود ۰/۶، اختلاف دبی ورودی و خروجی کاهش یافته و در نسبت $H/L_{crest} = 0.65$ این روند معکوس شده و دبی ورودی به سرریز از دبی خروجی از انتهای آن پیشی می گیرد. نکته آنکه با افزایش قطر متوسط ذرات، این نقطه عطف در نسبت بالاتری از هد آب به عرض تاج سرریز شکل می گیرد. دلیل این موضوع نیز بیشتر شدن اختلاف بین دبی ورودی به محیط متخلخل و دبی خروجی از آن با افزایش قطر متوسط ذرات است که باعث می شود به هد بیشتری از آب جهت ایجاد نقطه عطف و پیشی



شکل ۱۳: الگوی جریان اطراف سرریزهای متخلخل گابیونی (الف) مربعی (شکل و ب) دوزنقه‌ای با شیب پایین دست

Fig. 13. Flow behavior around gabion weirs with a) square and b) trapezoidal cross section



شکل ۱۴: مقایسه دبی خروجی از محیط متخلخل برای سرریزهای با شیب هم‌زمان بالا و پایین دست

Fig. 14. crossing discharge from porous domain of weirs with varying side slopes

در ادامه با استفاده از تحلیل ابعادی و آنالیز رگرسیونی چند متغیره غیرخطی روابطی به منظور محاسبه ضریب دبی و نسبت دبی درون گذر به دبی کل کانال به دست آمده است. با توجه به اینکه دبی عبوری از سرریزهای متخلخل تابعی از عمق آب، ابعاد سرریز و مشخصات جریان می‌باشد بنابراین بر مبنای آنالیز ابعادی می‌توان رابطه زیر را نوشت:

$$\left[C_d, \frac{Q_{Through}}{Q_{Total}} \right] = f \left(\frac{H}{L_{crest}}, \frac{d_m}{P}, Re, \tan \alpha, \tan \beta \right) \quad (14)$$

که C_d ضریب دبی، H هد آب روی سرریز، L_{crest} طول لبه سرریز در

در جستجوی دلیل ایجاد این حالت باید به بحث الگوی جریان در هنگام ورود به محیط متخلخل و درون خود محیط متخلخل پرداخت. شکل ۱۳ الگوی جریان اطراف سرریز متخلخل گابیونی مستطیلی و سرریز با شیب پایین دست را نشان می‌دهد. جریانی که از سطح مقابل وارد محیط متخلخل می‌شود بلافاصله به دو قسمت تقسیم می‌گردد. یک قسمت از جریان به صورت مستقیم در درون محیط متخلخل به مسیر خود ادامه می‌دهد و یک قسمت دیگر به سمت بالا حرکت کرده و از تاج سرریز خارج می‌شود. دلیل حرکت جریان به سمت بالا را می‌توان در مفهوم فشار جستجو کرد. جریان روگذر با نزدیک تر شده به نقطه ریزش افزایش سرعت داده و به سمت بحرانی شدن پیش می‌رود. در نتیجه یک منطقه با سرعت بالا و کم فشار در بالای سرریز ایجاد می‌شود و همین موضوع و به علاوه مقاومت محیط متخلخل در برابر جریان، باعث می‌شود که قسمتی از جریان به سمت بالا حرکت کرده و از تاج سرریز خارج شود. بدین ترتیب در تاج سرریز دو جریان شکل می‌گیرد. در ابتدای تاج یک جریان رو به بالا و در قسمت دوم آن جریان رو به پایینی شکل می‌گیرد که همان دبی وارد شده به داخل محیط متخلخل از بالاست.

همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، جریان پس از سرریز مستطیلی شکل به سرعت ریزش کرده و انحنای شدیدی در پروفیل سطح آب ایجاد می‌شود. همین موضوع باعث داخل شدن مقدار بیشتری از جریان از تاج سرریز به داخل محیط متخلخل می‌شود. در نتیجه مقدار دبی وارد شده به تاج سرریز از دبی خارج شده بیشتر است بنابراین حجم دبی خروجی از انتهای سرریز مستطیلی از میزان دبی ورودی به آن از سطح جلوی سرریز بیشتر خواهد بود. در مورد سرریزهای با شیب پایین دست مشاهده می‌شود که حجمی از جریان درون گذر که از تاج سرریز خارج شده است به وسیله‌ی جریان روگذر حمل و از روی شیب پایین دست سرریز ریزش می‌کند. در واقع وجود پروفیل ریزشی ملایم در انتهای سرریز و نیز سرعت جریان روگذر باعث می‌شود که آن حجم دبی که از تاج سرریز خارج می‌شود نتواند به داخل سرریز بازگردد و در نتیجه دبی ورودی به محیط متخلخل از دبی خروجی آن بیشتر خواهد بود.

در شکل ۱۴ مقایسه‌ای بین دبی خروجی از سرریز با شیب هم‌زمان بالادست و پایین دست معادل ۶۰ و ۴۵ درجه انجام شده است. دبی خروجی از سرریز با شیب جانبی ۴۵ درجه در هر اندازه قطر متوسط ذرات، از دبی خروجی از سرریز ۶۰ درجه بیشتر است. بدین ترتیب همان‌طور که در قسمت مربوط به ضرایب دبی شرح داده شد، با کاهش زوایای α و β از ۶۰ تا ۰ درجه، میزان دبی درون گذر افزایش یافته است. این موضوع کاملاً با افزایش ضریب دبی این سرریزها در نتیجه کاهش مساحت محیط متخلخل منطبق می‌باشد.

توسط نرم افزار FLOW-3D شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

افزایش قطر متوسط ذرات باعث افزایش حجم دبی درون گذر و کاهش بار آبی پشت سرریز می شود و نهایتاً منجر به افزایش افت جریان و افزایش عمق پایین دست این سازه ها شده است. در تمامی مدل های بررسی شده، افزایش زوایای جانبی α و β باعث افزایش هد آب پشت سرریز و نتیجتاً کاهش ضریب دبی شده است. نتیجه اینکه سرریزهای با شیب هم زمان بالادست و پایین دست کمترین ضرایب دبی و کمترین نسبت دبی درون گذر را دارا می باشند. همچنین با افزایش هد آب بالادست ضرایب دبی و نسبت دبی درون گذر به دبی کل در کلیه مدل های متخلخل و نیز صلب به یکدیگر نزدیک شده و نشان می دهد که با افزایش هد آب بالادست اثر شکل هندسی و دانه بندی محیط متخلخل سرریز کاهش می یابد. در تمامی مدل ها به جز مواردی که تنها دارای شیب پایین دست می باشند، حجم دبی ورودی به محیط متخلخل از دبی خروجی از انتهای آن کمتر بوده است که این موضوع ناشی از ایجاد میدان سرعت و کم فشار بالای سرریز است. اثر شیب بالادست و پایین دست بر دبی درون گذر خلاف جهت یکدیگر بوده است. به طوری که افزایش شیب بالادست باعث کاهش دبی ورودی و افزایش دبی خروجی از سرریز خواهد شد.

جدول ۴: برآورد مقادیر پارامترهای محاسبه خطا برای روابط ارائه شده

Table 4. Error indicators for presented equations

پارامتر	R2	RMSE	MAE
C	۰/۹۴	۰/۰۳۷۴	۰/۰۲۹۷
Q_{in}/Q_{total}	۰/۹۵	۰/۰۲۶۳	۰/۲۰
Q_{out}/Q_{total}	۰/۹۶	۰/۰۴۲۲	۰/۰۳۱۷

راستای جریان، Re عدد رینولدز بالادست، d_m قطر متوسط ذرات، و α و β به ترتیب معادل زوایای شیب بالادست و پایین دست با خط قائم هستند. با کمک آنالیز چند متغیره رگرسیونی معادلاتی به شرح زیر جهت تخمین ضریب دبی (C_d) و نسبت دبی درون گذر به کل دبی ($\frac{Q_{Through}}{Q_{Total}}$) پیشنهاد گردیده است.

$$C_d = -1.342 + 3.263 \log(Re) - 12.962 \left(\frac{H}{L_{crest}}\right)^{0.151} - 0.972 \left(\frac{d_m}{P}\right) - 0.006 \tan(\alpha) + 0.012 \tan(\beta) \quad (14)$$

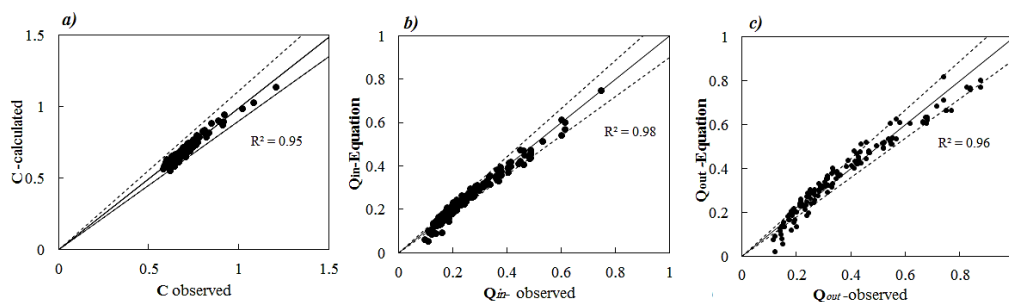
$$\frac{Q_{In}}{Q_{Total}} = -0.987 + 0.921 \log(Re) - 3.2 \left(\frac{H}{L_{crest}}\right)^{0.249} + 0.305 \left(\frac{d_m}{P}\right) - 0.04 \tan(\alpha) + 0.016 \tan(\beta) \quad (15)$$

$$\frac{Q_{out}}{Q_{Total}} = -0.717 + 1.547 \log(Re) - 6.315 \left(\frac{H}{L_{crest}}\right)^{0.208} - 0.093 \left(\frac{d_m}{P}\right) + 0.03 \tan(\alpha) - 0.048 \tan(\beta) \quad (16)$$

در شکل ۱۵ مقادیر محاسبه شده نسبت دبی درون گذر ورودی و خروجی به دبی کل و ضرایب دبی توسط مدل عددی با مقادیر تخمین زده شده توسط روابط فوق با یکدیگر مقایسه شده اند. با توجه به پارامترهای آماری محاسبه شده در جدول ۴، نتایج نشان می دهد که روابط ارائه شده قادر به پیش بینی مقادیر ذکر شده با دقت بالا هستند.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مجموعاً ۲۱ مدل سرریز هر کدام در ۶ تا ۱۰ دبی مختلف



شکل ۱۵: مقایسه مقادیر محاسباتی و مشاهده شده برای الف) ضریب دبی ب) دبی ورودی از بالادست ج) دبی خروجی از سرریز متخلخل

Fig. 15. Calculated vs measured values of a) C_d , b) inflow discharge and c) outflow discharge of porous weir

1 Root-mean-square error
2 Mean absolute error

- [11] J.A. Kells, Reply on Discussion of Spatially varied flow over rockfill embankments, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 21(1) (1994) 163-166.
- [12] J.M. Leu, H.C. Chan, M.S. Chu, Comparison of turbulent flow over solid and porous structures mounted on the bottom of a rectangular channel, *Flow Measurement and Instrumentation*, 19(6) (2008) 331-337.
- [13] J.-M. Leu, W.-C. Huang, H.-C. Chan, Hydraulic Characteristics of Flow over a Highly Permeable Porous Structure, (2008).
- [14] K. Michioku, Maeno, S., Furusawa, T., and Haneda, M., Discharge through a Permeable Rubble Mound Weir, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1) (2005) 1-10.
- [15] A. Abbaspour, Abdolapour, M., Salmasi, F., Numerical Simulation of Flow over Rectangular Broad-crested Weir with Upstream and Downstream Side Slopes Using Fluent Model, *Soil and Water Sciences*, 23(4) (2013) 265-276. (in persian)
- [16] M.A. Sarker, D.G. Rhodes, Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir, *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(4) (2004) 215-219.
- [17] P. Varjavand, Farsadizadeh, D., Khosravinia, P., Rafieey. Z., Simulation of Flow Over Cylindrical Weirs Using Fluent Model and Comparison with Experimental Data, *Soil and Water Sciences*, 20/1(2) (2009). (in persian)
- [18] M. KHEYRAEI, M. FATHI MOGHADAM, HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF THE CRUMP GABION WEIRS FOR FREE FLOW CONDITIONS, *Water resources Engineering*, 9(29) (2016) 75-86. (in persian)
- [19] M. Moradi, Experimental investigation of Flow over Broad-Crested Gabion weirs, *Shahid Chamran University of Ahvaz, School of Water Sciences engineering*, 2015. (in persian)
- [20] Flow Science Inc, *Flow-3D User Manual*, V11, 2015.
- [1] M. Ghomeshi, S. Emamgholizadeh, *Fluid Mechanics and Hydraulics*, 1 ed., Shahid Chamran University of Ahvaz Press, Ahvaz, 2010. (in persian)
- [2] I. Mohamed, Flow over gabion weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(8) (2010) 573-577.
- [3] A. Azizi, Meftah-Helghi, M., Ziatabar Ahmadi, M., Golmaei, H., Investigation of the effect of porosity of materials on Energy dissipation in Gabion stepped weirs, *Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(1) (2008). (in persian)
- [4] M. Göğüş, Z. Defne, V. Özkandemir, Broad-Crested Weirs with Rectangular Compound Cross Sections, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(3) (2006) 272-280.
- [5] W.H. Hager, M. Schwalt, Broad-Crested Weir, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1) (1994).
- [6] M. Ansar, J. Gonzalez-Castro, Submerged Weir Flow at Prototype Gated Spillways, in: *World Water & Environmental Resources Congress 2003*, 2003, pp. 1-6.
- [7] B. Li, V.K. Garga, Theoretical Solution for Seepage Flow in Overtopped Rockfill, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(2) (1998).
- [8] R. Mohammadpour, A.A. Ghani, H.M. Azamathulla, Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs, *Applied Mathematical Modelling*, 37(22) (2013) 9324-9337.
- [9] J. Sargison, A. Percy, Hydraulics of Broad-Crested Weirs with Varying Side Slopes, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1) (2009) 115-118.
- [10] J.A. Kells, Spatially varied flow over rockfill embankments, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(5) (1993) 820-827.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Tavakol-Sadrabadi, M. Fathi-Moghadam, R. Mohammadpour, Numerical Simulation of the over and through flow Discharge in Broad-Crested Gabion Weirs with side Slopes, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 619-630.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12637.5238

