

## مدل سازی عددی جریان آزاد در سرریزهای کرامپ گابیونی

محمد توکل صدر آبادی\*<sup>۱</sup>، منوچهر فتحی مقدم<sup>۲</sup> و رضا محمدپور<sup>۳</sup>

(۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران آب و سازه های هیدرولیکی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(۲) استاد، گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

(۳) استادیار، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [mohammad.tavakol@outlook.com](mailto:mohammad.tavakol@outlook.com)

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۷/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۳۰

### چکیده

سرریزهای گابیونی به دلیل سازگاری با محیط زیست و تأثیر مستقیم بر پارامترهای کیفی رودخانه و از طرفی در دسترس بودن و سادگی اجرا و طراحی، طی سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. در این تحقیق پارامترهای هیدرولیکی سرریز گابیونی کرامپ با حالت جریان آزاد شامل ضریب دبی، پروفیل سطح آب و حجم دبی درون گذر از محیط متخلخل به صورت عددی با استفاده از مدل سه بعدی Flow 3D بررسی شده اند. در این تحقیق در مجموع ۱۸ مدل مختلف شامل ۶ هندسه ی مختلف سرریز با سه تخلخل مختلف مصالح (۴۳، ۴۴ و ۴۶ درصد) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که افزایش قطر ذرات به افزایش همزمان دبی درون گذر، ضریب دبی جریان و در نتیجه افزایش افت منجر می شود. همچنین اینکه افزایش زوایای خارجی بالادست و پایین دست سرریز باعث کاهش ضریب دبی و نیز دبی درون گذر خواهد شد. به علاوه اینکه مشخص شد که تأثیر تغییرات شیب پایین دست بر ضریب دبی و شیب بالادست بر دبی درون گذر بیشتر است. در انتها با استفاده از رگرسیون غیر خطی چند متغیره روابط تجربی برای محاسبه ضرایب دبی و دبی درون گذر از این سرریزها ارائه شده است.

واژه های کلیدی: تفکیک جریان روگذر و درون گذر، ضریب دبی، سرریز گابیونی کرامپ و شبیه سازی عددی.

## 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 ثابت تقسیم کرد (قمشی و امامقلی‌زاده، ۱۳۸۷). از دیدگاه کیفیت آبی، مواد فیزیکی و شیمیایی مانند رسوبات و مواد ارگانیک معلق در آب می‌توانند از درون یک بدنه‌ی متخلخل به سمت پایین‌دست عبور کنند. این موضوع باعث می‌شود که رسوبگذاری و تجمع آب پشت سازه به حداقل برسد. همچنین آشفته‌گی 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 محیط زیست بوده و سازگاری بسیار بهتری با طبیعت و محیط زیست، نسبت به سرریزهای نفوذناپذیر دارند. (Mohamed, ۲۰۱۰) درمورد عملکرد هیدرولیکی سرریزهای لبه پهن مطالعات بسیاری صورت گرفته است. از این جمله می‌توان به مطالعات صورت گرفته توسط Mohammadpour و همکاران (۲۰۱۳)، Göğüş و همکاران (۲۰۰۶)، Hager و Ansar، (۱۹۹۴) و Gonzalez-Castro (۲۰۰۳)، Li و Garga (۱۹۹۸) اشاره کرد. Percy و Sargison (۲۰۰۹) 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 می‌گردد که نتیجه آن کاهش ضریب دبی جریان می‌باشد. همچنین آنها دریافتند که تغییرات در شیب پایین دست این سازه‌ها اثر اندکی بر پروفیل سطحی و فشار روی سازه داشته و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. Kells (۱۹۹۳) 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. میشیکو و همکاران (۲۰۰۵) با انجام تحلیل یک بعدی روی جریان ماندگار غیر یکنواخت از درون سرریز متخلخل نشان دادند که دبی تابعی از پارامترهایی مانند عمق جریان بالادست و پایین دست، تخلخل، اندازه و نیز طول سرریز می‌باشد. حمزئی و همکاران (۱۳۹۱) به بررسی اثر شیب بالادست و پایین دست سرریز لبه پهن بر جریان به کمک نرم افزار فلونت پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با شیب دار کردن وجه بالادست سرریز، محدوده جدایی جریان ابتدای تاج کاهش یافته و در نتیجه ضریب دبی افزایش می‌یابد. تغییر شیب وجه پایین دست موقعیت تشکیل عمق بحرانی را تغییر نمی‌دهد اما با ملایم کردن شیب پایین دست با کاهش میزان فشار منفی به دلیل کاهش انحنای خطوط جریان و همچنین از بین رفتن ناحیه جدایی جریان ابتدای وجه پایین دست، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون کاهش می‌یابد. در مورد سرریزهای کرامپ هرچند که مطالعات کمتری صورت گرفته است لکن میتوان به موارد زیر اشاره کرد. عظیمی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی مشخصات هیدرولیکی سرریزهای با

شیب بالادست و پایین دست در شرایط جریان آزاد پرداختند. آنها دریافتند که در سرریزهای مثلثی کرامپ با شیب بالادست و پایین دست و یا شیب همزمان، با افزایش شیب پایین دست، ضریب دبی افزایش می‌یابد لکن ضریب دبی با افزایش شیب بالادست کاهش می‌یابد. کلر (۱۹۹۳) به بررسی آزمایشگاهی یک سرریز کرامپ شیبدار واقعی در مقایسه‌های ۱:۱۰ و ۱:۳ پرداخت. این سازه از اتصال دو مثلث غیر هم اندازه در دو سمت رودخانه به یکدیگر ساخته می‌شود. او پی برد که در هدهای نسبتاً زیاد، سازه همانند نصف یک سرریز کرامپ مسطح V شکل با شیب معادل شیب معکوس پوسته عمل میکند. در هدهای کمتر، سطح مقطع جریان به شدت غیر متقارن شده و ضریب دبی به شدت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه تاکنون مطالعات جامعی پیرامون میزان دبی درون‌گذر در سرریزهای کرامپ انجام نشده است، لذا در این تحقیق به بررسی این موضوع پرداخته خواهد شد.

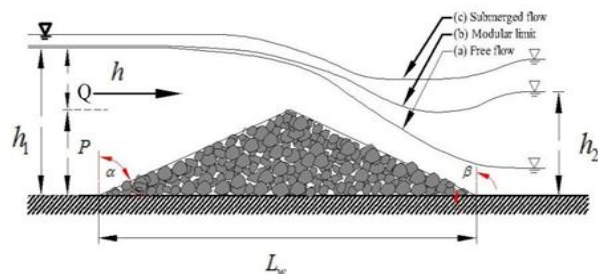
هدف از این تحقیق بررسی عددی عملکرد هیدرولیکی سرریز کرامپ گابیونی با شیب کناری در شرایط آزاد و با تخلخل‌های مختلف مصالح می‌باشد. بدین ترتیب پارامترهایی از قبیل پروفیل سطح آب، ضریب دبی و نیز میزان دبی درون‌گذر در هر حالت به تفکیک مشخص شده است.

## مواد و روش‌ها

### مدل آزمایشگاهی و عددی

نتایج حاصل از مدل عددی در این تحقیق با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده توسط مرادی مقدم (۱۳۹۳) در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی هیدرولیکی دانشگاه شهید چمران اهواز و در یک فلوم با عرض ۳۰ سانتی متر، ارتفاع ۵۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفته است. بدین ترتیب که یک مدل سرریز گابیونی لبه پهن مستطیلی با ارتفاع ۱۶ سانتی متر، عرض ۳۰ سانتی متر معادل عرض فلوم و طول ۱۵ سانتی متر 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 یک سانتی متر و طول ۵۰ سانتی متر و عرض معادل با عرض فلوم، در کف فلوم قرار داده شد و پس از آن، مدل‌های آزمایشگاهی بر روی این صفحه تثبیت گردیده است. تمامی این جزئیات جهت کالیبراسیون مدل در نرم افزار مدل‌سازی شده اند. در تحقیق حاضر اثر شیب با مقایسه شیب‌های کناری بالادست و پایین دست ۴۵ و ۶۰ درجه بررسی شده است. هندسه‌های کرامپ شامل یک مثلث با ارتفاع ۱۶ سانتی متر، با شیب‌های جانبی بالادست، پایین دست و همزمان و در ۳۰ سانتی متر عرض کانال، می‌باشد (شکل ۱). به طور کلی ۶ مدل سرریز کرامپ در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته که مشخصات هندسی و دانه بندی آنها در جدول ۱ قید شده است. در این جدول D1 و D2 به ترتیب برای شیب‌های ۴۵ و

۶۰ درجه در پایین دست و  $U1$  و  $U2$  همین مقادیر برای شیب های بالادست می باشد. از طرفی UD برای سرریزهایی استفاده شده است که در پایین دست و بالادست بطور همزمان دارای شیب می باشند.



شکل ۱: مدل سرریز لبه پهن شبیه سازی در تحقیق

جدول ۱: مشخصات مدل های کرامپ شبیه سازی شده

زاویه پایین دست ( $\beta$ )	زاویه بالادست ( $\alpha$ )	ارتفاع	نماد سرریز
۴۵	۴۵	۱۶	GCW-UD1
۰	۴۵	۱۶	GCW-U1
۴۵	۰	۱۶	GCW-D1
۶۰	۶۰	۱۶	GCW-UD2
۰	۶۰	۱۶	GCW-U2
۶۰	۰	۱۶	GCW-D2

جدول ۲: تخلخل و دانه بندی مصالح مورد استفاده در ساخت مدل های گابیونی

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

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

### معادلات حاکم بر مدل عددی

معادلات حاکم بر این مدل شامل پیوستگی و معادلات مومنتم می باشد. (رابطه ۱) رابطه پیوستگی را با صرف نظر کردن

از قابلیت تراکم سیال در قالب مختصات کارتزین ( $x, y, z$ ) نشان می دهد:

$$V_F \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad \text{رابطه ۱:}$$

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،  $\rho$  دانسیته سیال و  $R_{SOR}$  منبع جرم می‌باشد. رابطه ۲ رابطه مومنتم را نشان می‌دهند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad \text{رابطه ۲:}$$

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.

### مدل درگ اشباع فرشهایمر

رابطه فرشهایمر، افتهای درون یک محیط متخلخل را به صورت 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 رابطه فرشهایمر، افت فشار به شرح زیر است:

$$-\nabla p = (a + b |u_{bulk}|) u_{bulk} \quad \text{رابطه ۳:}$$

که در این رابطه  $a$  و  $b$  ضرایبی هستند که توسط اطلاعات آزمایشگاهی مشخص می‌شوند.  $u_{bulk}$  سرعت ظاهری جریان در محیط متخلخل و  $\nabla p$  گرادیان فشار در محیط متخلخل است. معادلات افت خطی (دارسی) و غیر خطی (غیردارسی) به صورت زیر به عنوان یک رابطه برای توضیح  $F_d$  ترکیب می‌شوند:

$$F_d u_{microscopic} = -\frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{\mu}{\rho} \frac{1-\phi}{\phi} \left[ A \frac{1-\phi}{\phi} + B \frac{Re_p}{d_{pore}} \right] u_{microscopic} \quad \text{رابطه ۴:}$$

که در این رابطه  $A$  ضریب درگ خطی،  $B$  ضریب درگ غیر خطی،  $\phi$  معادل تخلخل،  $\mu$  ویسکوزیته و  $\rho$  برابر چگالی سیال است.

### مدل‌سازی‌های آشفتگی

مدل‌های آشفتگی استفاده شده در این تحقیق عبارتند از سه مدل K-ε، RNG و K-ω. مدل K-ε یک مدل پیچیده و با طیف گسترده‌ای از کاربرد در انواع مختلف جریان است. این مدل از دو رابطه انتقال یکی برای انرژی سینماتیک آشفتگی ( $k_T$ ) و یک رابطه برای ترم پخشیدگی آن ( $\epsilon_T$ ) که در نتیجه این مدل با نام K-ε شناخته می‌شود. معادلات سه بعدی حاکم شامل انرژی سینماتیکی توربولنت و ترم پخشیدگی آن به شرح زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad \text{رابطه ۵:}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \epsilon u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad \text{رابطه ۶:}$$

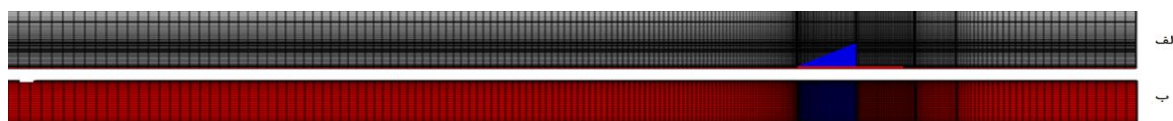
که در اینجا  $\mu_t$  میتواند به شرح زیر بیان شود:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{رابطه ۷:}$$

که در اینجا  $G_k$  و  $G_b$  ترم‌های انرژی سینماتیکی توربولنت مرتبط با شناوری و گرادیانهای متوسط سرعت هستند.  $C_{1\epsilon}$  و  $C_{2\epsilon}$  و  $C_{3\epsilon}$  ضرایب ثابت و معادل با ۱/۴۴، ۱/۹۲ و ۰/۰۹ هستند.  $\sigma_\epsilon$  و  $\sigma_k$  اعداد آشفتگی پراندتل برای  $\epsilon$  و  $k$  هستند و به ترتیب معادل با ۱ و ۱/۳ می‌باشند.

### 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) میدان حل و چگالی مش بندی را در نقاط مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص است اندازه مش در راستای طولی اطراف محل قرار گیری سرریز ریز شده است بطوریکه در فاصله ۱۰ سانتی متر قبل و ۳۰ سانتی متر پس از سرریز حداکثر چگالی مش وجود دارد. پس از چندین مرتبه سعی و خطا بهترین شبکه مش‌ها با تعداد ۲۱۶، ۲۰ و ۶۷ به ترتیب در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  بدست آمده و برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲: مقطع طولی (الف) و پلان میدان حل (ب) کانال و سرریز

### مش لایه مرزی

یافتن یک بازه مناسب برای اندازه سلول لایه مرزی، مستلزم تخمین دقیق ارتفاع (ضخامت) لایه مرزی عمود بر سطوح جامد و دیواره هاست. یک شاخص موثر 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 (رابطه ۸) محاسبه می‌شود:

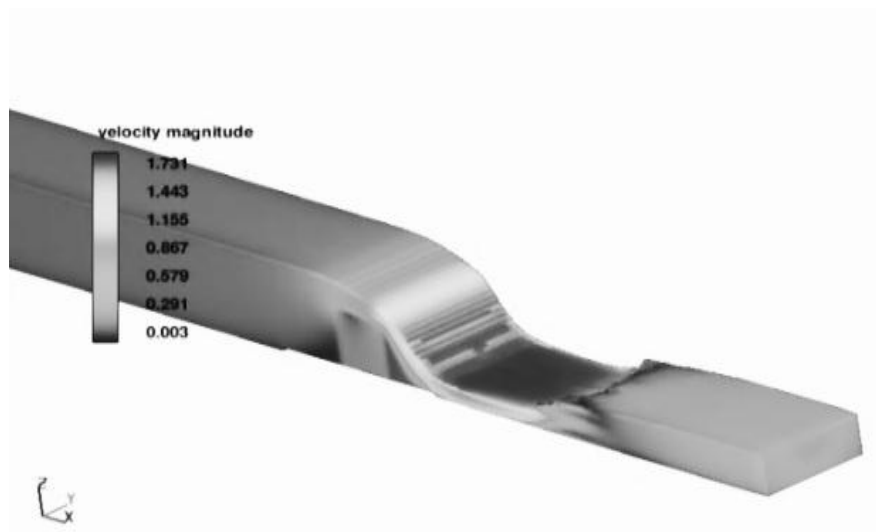
$$y^+ = \frac{u_{\tau} y \rho_f}{\mu_f} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در معادلات بالا  $u_{\tau}$  معادل سرعت برشی،  $y$  ارتفاع عمودی از سطح جسم،  $\rho_f$  چگالی سیال و  $\mu_f$  معادل ویسکوزیته دینامیک سیال است. بر اساس توصیه برخی محققان این مقدار باید عددی بین حد پایین ۱۱/۲۲۵ تا حد بالای ۳۰ را شامل شود. (Mohammadpour *et al.*, 2013).

### نتایج و بحث

#### 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. جهت 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. مشخص است که تمامی مدل‌های آشفتگی دارای جواب‌های کاملاً قابل قبولی می‌باشند اما بر اساس نتایج حاصل از جدول ۳ و با توجه به معنی دار نبودن تفاوت نتایج مدل‌های آشفتگی مختلف، و با توجه به زمان شبیه‌سازی و همگرایی کوتاه‌تر مدل (K-ε)، این مدل به عنوان مدل بهینه انتخاب شد.

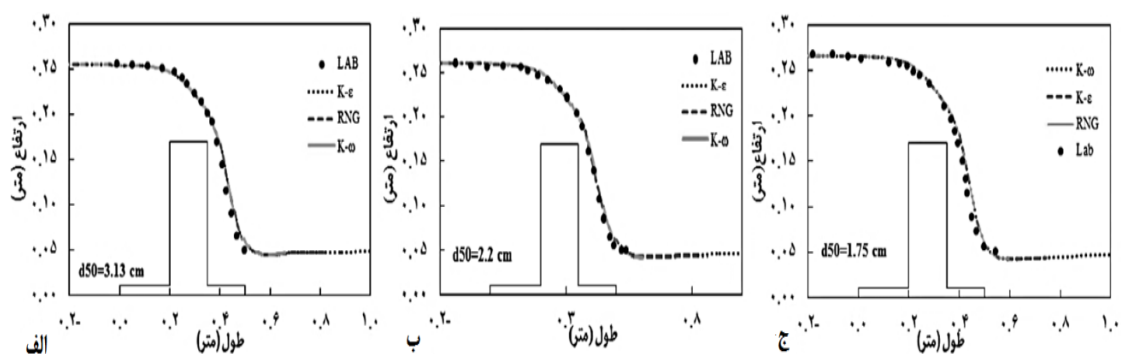


شکل ۳: مدل عددی سرریز متخلخل و جریان گذرنده روی آن

جدول ۳: مقایسه میانگین خطای مدل های آشفتگی برای پیش بینی پروفیل سطح آب

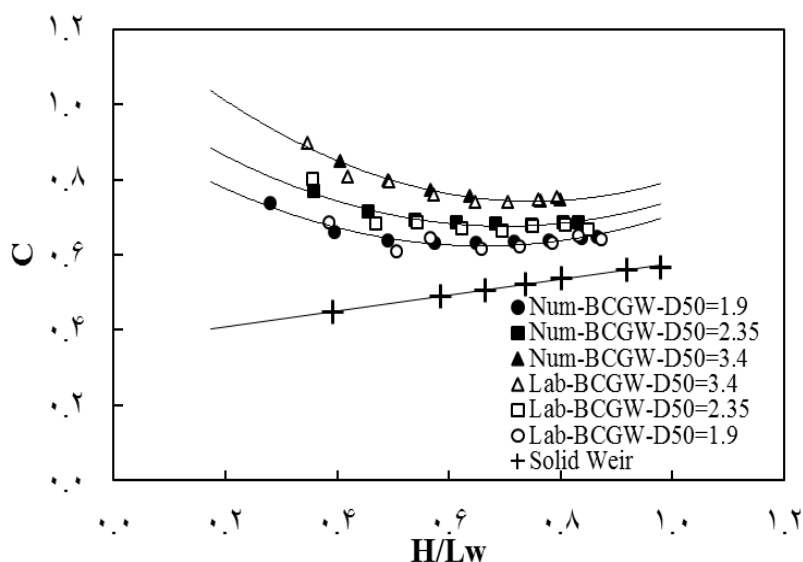
مدل آشفتگی	MAE (درصد)	RMSE (درصد)	R <sup>2</sup>	Run Time (S)
K-ε	۰/۷۴	۰/۹۶	۰/۹۹	۱۷۴۶۴
RNG	۰/۷۳	۰/۹۵	۰/۹۹	۱۹۸۲۱
K-ω	۰/۷۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۱۷۹۹۲

در ادامه ضرایب دبی های سرریزهای گابیونی و صلب مربعی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی های عددی به شرح شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود هماهنگی بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار است و این امر دقت و اعتبار نتایج بعدی و در حالات دیگر هندسه سرریزها را تایید می نماید.



شکل ۴: واسنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی برای پروفیل سطح آب برای تخلخل ۴۳ درصد؛ (ب) تخلخل

۴۴ درصد و (ج) تخلخل ۴۶ درصد

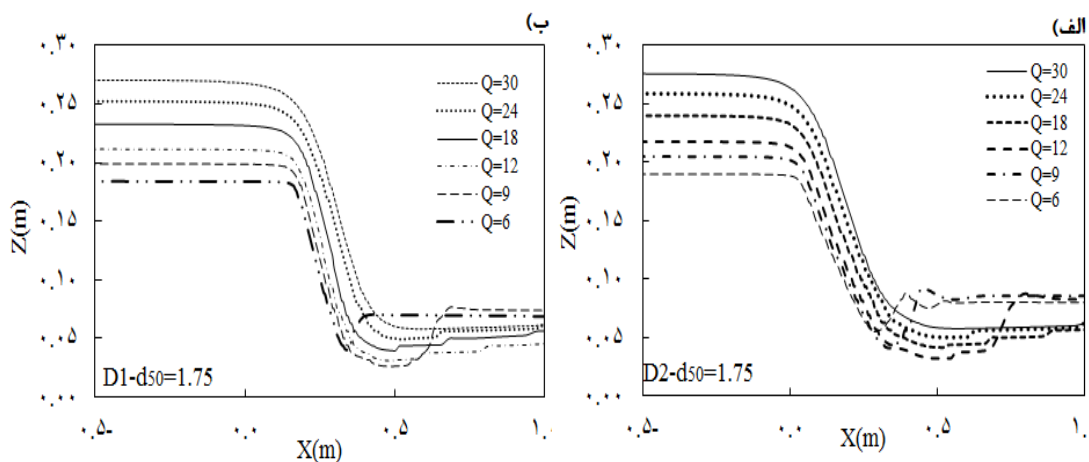


شکل ۵: ضرایب دبی آزمایشگاهی و عددی سرریزهای لبه پهن گابیونی



## پروفیل سطح آب

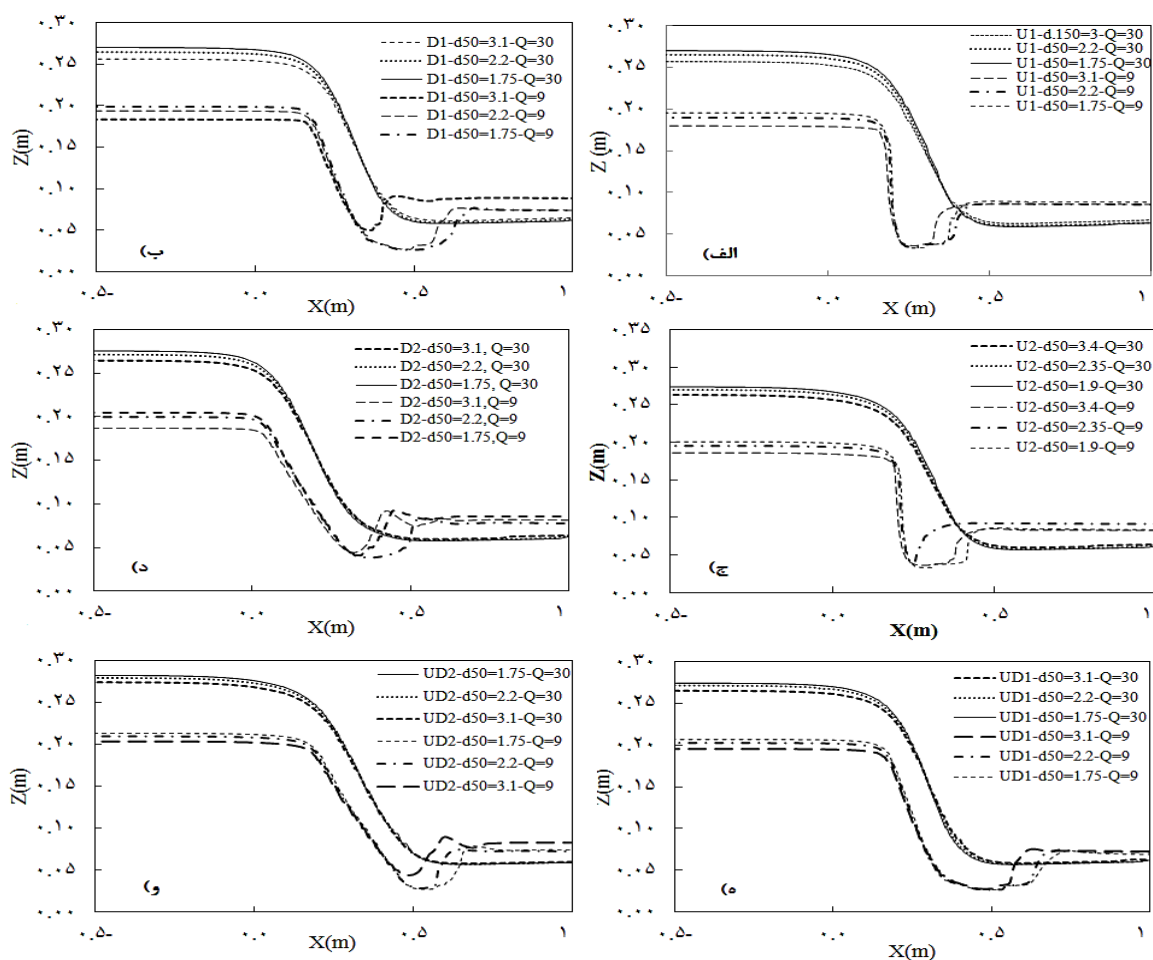
پروفیل سطح آب برای سرریزها با شیب منحصرآ پایین دست در شش دبی مورد بررسی قرار گرفته و در (شکل ۶) است. همانطور که مشاهده می‌شود، ارتفاع آب بالادست در سرریز با زاویه  $\beta=60^\circ$  در هر دبی مشخص از ارتفاع آب پشت سرریز با زاویه  $\beta=45^\circ$  درجه بیشتر است. این موضوع علاوه بر تاثیر شیب پایین دست، تحت تاثیر افزایش مساحت محیط متخلخل نیز می‌باشد. همچنین در دبی های ۲۴، ۳۰ و ۱۸ عمق آب پایین دست برای هر دو سرریز یکسان است. لکن در دبی های کم‌تر شامل دبی ۹ و ۶ لیتر بر ثانیه، مشاهده می‌شود که عمق آب پایین دست سرریز  $\beta=60^\circ$  (D2)، بیشتر از عمق پایین دست D1 با زاویه  $\beta=45^\circ$  است. همچنین در دبی ۱۲ لیتر بر ثانیه در سرریز D2 پس از سرریز پرش رخ داده است در حالیکه در سرریز D1 جریان به صورت فوق بحرانی باقی مانده است. بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که در یک تخلخل ثابت، سرریز با شیب پایین دست کمتر (زاویه جانبی بزرگتر) افت انرژی بیشتری ایجاد کرده است.



شکل ۶: پروفیل سطح آب در سرریزهای گابیونی با شیب پایین دست (الف) ۶۰ و (ب) ۴۵ درجه در تمامی دبی‌های مورد

### بررسی

در شکل ۷ پروفیل سطح آب برای تمامی هندسه‌ها و تخلخل‌های ذکر شده، برای دو دبی ۹ تا ۳۰ لیتر بر ثانیه بررسی شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی سرریزها در دبی ۹ لیتر بر ثانیه پرش هیدرولیک تشکیل شده است. به صورت کلی انتظار می‌رود که با افزایش قطر ذرات تشکیل دهنده، حجم دبی درون‌گذر از سرریزهای گابیونی افزایش یابد. همچنین با کاهش هد آب پشت سرریز، اتلاف انرژی جریان تحت تاثیر گذر از درون محیط متخلخل افزایش یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این موضوع فقط در دبی‌های بالا صادق بوده و ارتفاع آب پایین دست برای دانه بندی درشتتر، در همه هندسه‌ها بیشتر است لیکن این موضوع در سرریزهای U1، U2 و D2 در دبی‌های پایین‌تر صادق نبوده است. دلیل این موضوع را می‌توان در تاثیر همزمان هندسه و تخلخل بر افت انرژی سرریزها جستجو کرد.



شکل ۷: پروفیل سطح آب در هندسه ها و تخلخل های مختلف سرریز های کرامپ در دبی های ۹ و ۳۰ لیتر بر ثانیه

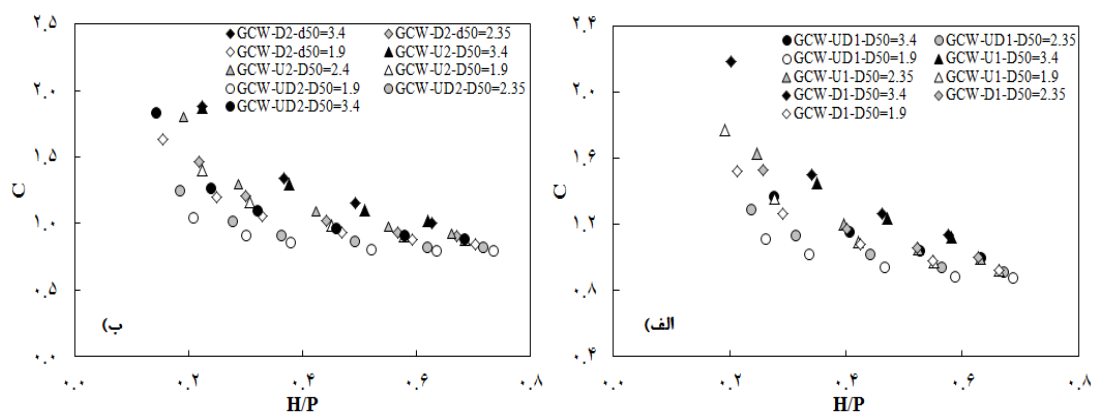
### ضریب دبی

ضریب دبی سرریزهای کرامپ مشابه با ضریب دبی سرریزهای لبه پهن و به صورت زیر محاسبه می شود:

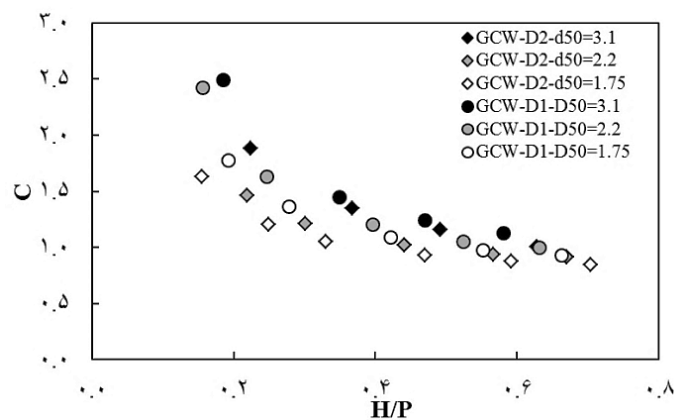
$$Q = CB \sqrt{gH}^{1.5} \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

که در اینجا C ضریب دبی بدون بعد، B معادل عرض کانال و H معادل هد کل روی سرریز است. در این تحقیق ارتفاع تمامی مدل ها برابر و معادل با ۱۶ سانتی متر در نظر گرفته شده است. همچنین به جهت هماهنگی و جلوگیری از جمع شدگی نقاط در یک سمت نمودارها تحت اثر افزایش طول سرریزها، مقایسه های معمول برای ضریب دبی و نیز دبی درون گذر با نسبت H/P انجام شده اند. که در این تحقیق H برابر با عمق آب روی سرریز و P برابر با ارتفاع سرریز می باشد (شکل ۱). بدین ترتیب ضرایب دبی برای تمامی سرریزهای مورد بررسی به شرح (شکل ۸) می باشد. 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 می یابد. به طور کلی در سرریزهای گابیونی این موضوع به معنی افزایش دبی درون گذر و نیز افزایش میزان

افت انرژی سرریز است. نکته دیگر اینکه با کاهش زوایای جانبی (افزایش شیب) ضریب دبی افزایش می‌یابد. این موضوع در مورد هر دوزاویه بالادست و پایین دست صادق است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش هد آب پشت سرریز و بالارفتن نسبت  $H/P$ ، ضرایب دبی سرریزها کاهش یافته و به یکدیگر نزدیک می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در هدهای بالاتر اثر هندسه سرریز و قطر ذرات تشکیل دهنده سرریز به تدریج کاهش یافته و ضریب دبی تمام سرریزها به یکدیگر و نهایتاً به سرریز صلب نزدیک خواهد شد. مشخص است که اختلاف ضرایب دبی سرریزهای مختلف از نسبت  $H/P \approx 0.2$  تا نسبت  $H/P \approx 0.7$ ، از حدود یک به حدود  $0.3$  کاهش یافته است. البته باید توجه داشت که ضریب دبی سرریزهای متخلخل به دلیل وجود دبی درون‌گذر همواره از سرریزهای صلب بالاتر خواهد بود. از طرف دیگر در تمامی تخلخل‌های مورد بررسی، ضریب دبی برای سرریزهای با شیب پایین دست همواره بیش‌تر از ضریب دبی سرریزهای با شیب بالادست است. دلیل این موضوع وجود سطح عمود بر جریان در امتداد طول کانال در ابتدای محیط متخلخل است که باعث می‌شود حجم بیش‌تری از دبی از درون محیط متخلخل عبور کند و هد آب پشت سرریز کاهش یابد.



شکل ۸: ضرایب دبی محاسبه شده برای سرریزهای گابیونی (الف) با شیب جانبی ۴۵ و (ب) شیب ۶۰ درجه



شکل ۹: مقایسه ضرایب دبی سرریزهای گابیونی با شیب پایین دست ۴۵ و ۶۰ درجه

با توجه به شکل ۸ همچنین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب دبی سرریزهای با زوایای کم‌تر در بالادست و پایین دست، بیش‌تر می‌باشد. بدین ترتیب هرچه زوایای جانبی کاهش یابد، ضریب دبی افزایش خواهد یافت که این موضوع در قسمت قبل مورد اشاره قرار گرفت. همچنین مشاهده می‌شود که کمترین ضرایب دبی مربوط به سرریزهای با شیب همزمان بالادست و پایین دست می‌باشد. این موضوع طبق انتظار بوده و دلیل آن نیز وجود همزمان دو شیب بالا دست و پایین دست و نیز افزایش مساحت محیط متخلخل و متعاقب آن افزایش مقاومت محیط متخلخل به عبور جریان دانست. بنابراین در سرریزهایی با شیب در هر دو طرف دبی درون‌گذر کاهش یافته و هد آب پشت سرریز افزایش می‌یابد و در نتیجه ضریب دبی کاهش خواهد یافت. در (شکل ۹) مقایسه‌ای بین ضرایب دبی سرریزها با شیب پایین دست ۶۰ و ۴۵ درجه صورت گرفته است. همانطور که مشخص است، با افزایش شیب (کاهش زوایای خارجی)، ضریب دبی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص است که ضرایب دبی این سرریزها در حال نزدیک شدن به یکدیگر هستند. به عبارت دیگر نرخ کاهش ضریب دبی برای سرریز با شیب ۴۵ درجه بیش‌تر از نرخ کاهش آن در سرریز با شیب ۶۰ درجه است. با بررسی هندسه‌های دیگر سرریز مشخص گردید که این موضوع در تمامی حالات دیگر اعم از شیب بالادست و یا شیب همزمان بالادست و پایین دست نیز صادق است. این موضوع نشان می‌دهد که هرچه زاویه‌ی جانبی این گونه سرریزها افزایش یابد، با افزایش هد آب بالادست، ضریب دبی این سرریزها کندتر کاهش می‌یابد و به طو کلی به سرریز صلب نزدیک‌تر خواهد بود. دلیل این امر افزایش مساحت محیط متخلخل و متعاقباً افزایش مقاومت سرریز در برابر عبور جریان از درون محیط متخلخل می‌باشد که باعث کاهش دبی درون‌گذر و نزدیک‌تر شدن عملکرد هیدرولیکی این سرریز به سرریز صلب خواهد شد.

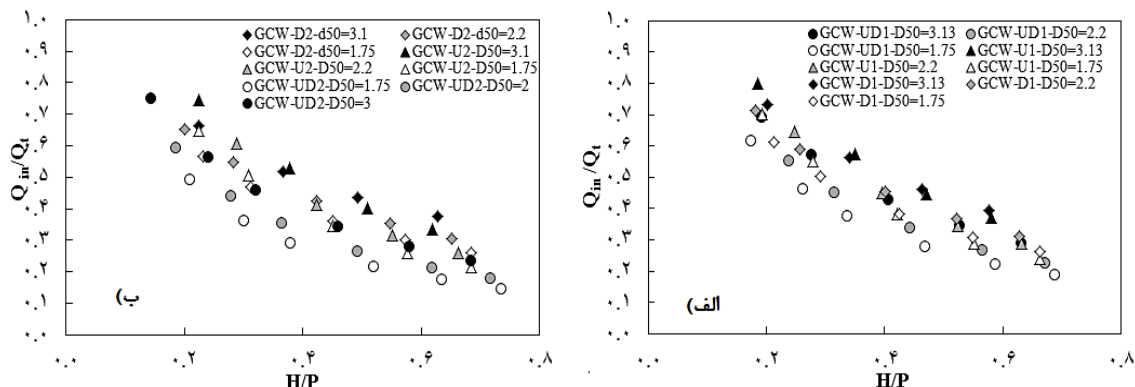
### دبی درون‌گذر از محیط متخلخل

تعیین دبی درون‌گذر از درون محیط‌های متخلخل درشت دانه که به آنها جریان‌های غیر داری گفته می‌شود همواره یکی از موضوعات جالب برای محققین بوده است. همچنین از لحاظ ویژگی‌های هیدرولیکی و محیط زیستی، در این سرریزها تعیین دقیق حجم دبی درون‌گذر و نسبت آن به دبی کل، موضوع مهمی می‌باشد. بدین ترتیب در تحقیق حاضر حجم دبی گذرنده از درون این سرریزها بررسی شده است. برآورد حجم دبی درون‌گذر در این نوع سرریزها به کمک استقرار صفحاتی به نام بفل<sup>۱</sup> در مدل عددی انجام شده است. این صفحات در محل وجه عمودی سرریزها در نظر گرفته شده است. به این ترتیب امکان سنجش شار جریان از هر مقطع دلخواه در درون قلمرو محاسباتی امکان پذیر شده و حجم دبی گذرنده از مقطع عمودی سرریزهای بدست آمده است. برای تمامی مدل‌ها، نسبت دبی درون‌گذر به دبی کل کانال ( $Q_i/Q_t$ ) به ازای نسبت هد آب به ارتفاع سرریز ( $H/P$ ) در (شکل ۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشخص

<sup>۱</sup> Baffle

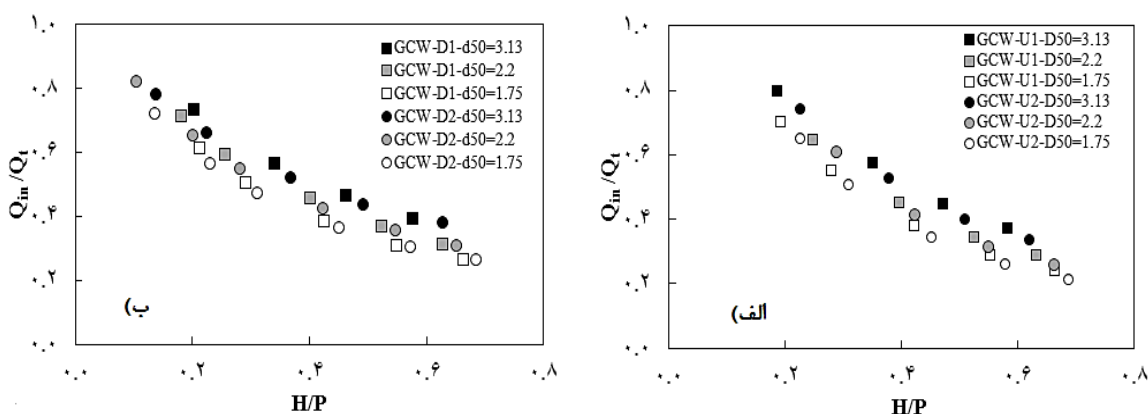
است با افزایش هد آب پشت سرریز، نسبت دبی درون‌گذر به دبی کل روند کاهشی را طی می‌کند. این موضوع به دلیل بیشتر بودن افزایش دبی کل نسبت به افزایش دبی درون‌گذر تحت تاثیر افزایش هد بالادست است. همچنین با افزایش قطر ذرات تشکیل دهنده سرریز، نسبت دبی درون‌گذر افزایش می‌یابد که این موضوع باعث افت سطح آب بالادست و افزایش ضریب دبی خواهد بود. کم‌ترین نسبت دبی درون‌گذر مربوط به سرریزهای با شیب همزمان بالادست و پایین دست است که البته این موضوع منطقی بوده و به دلیل تاثیر همزمان شیب‌های بالادست و پایین دست که جریان را به سمت تاج سرریز هدایت کرده و نیز تاثیر افزایش مساحت محیط متخلخل و افزایش مقاومت آن در برابر جریان می‌باشد. همچنین مشخص است که تا حدود نسبت  $H/P=0.4$ ، حداکثر حجم دبی درون‌گذر مربوط به سرریز با شیب بالادست ۴۵ درجه (U1) می‌باشد. لکن با افزایش بیش‌تر هد آب، نسبت دبی درون‌گذر از سرریز با شیب پایین دست ۴۵ درجه (D1) افزایش بیشتری یافته و از سرریز دیگر بیش‌تر شده است. علت این امر تاثیر الگوی جریان آب اطراف این سرریزها در دبی‌های مختلف می‌باشد. باید توجه داشت که جریان آب پس از رسیدن به تاج سرریزهای با شیب بالادست، ریزش کرده و جریان فوق بحرانی پایین دست را تشکیل می‌دهد. در دبی‌های کم، این حالت ریزشی و نیز ماهیت متخلخل سرریز باعث می‌شود که حجم بیش‌تری از دبی روگذر وارد محیط متخلخل سرریز شده و در نتیجه در هدهای کم، حجم دبی درون‌گذر سرریزهای با شیب بالادست بیشتر خواهد بود. لکن در هدهای بیشتر، سرعت جریان روگذر و نیز میزان انحنای آن کاهش یافته و نسبت افزایش دبی درون‌گذر به ازای افزایش هد آب، برای سرریزهای با شیب بالادست کمتر از سرریزهای با شیب پایین دست شده و باعث می‌شود که حجم دبی درون‌گذر از سرریزهای با شیب پایین دست بیشترین مقدار را در بر بگیرد. در (شکل ۱۱) به مقایسه حجم دبی درون‌گذر برای سرریزهای با دو شیب متفاوت در بالادست (شکل ۱۱-الف) و پایین دست (شکل ۱۱-ب) پرداخته شده است. حجم دبی درون‌گذر برای سرریزهای با شیب ۴۵ درجه نسبت به سرریزهای با شیب ۶۰ درجه بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش زاویه جانبی سرریزهای متخلخل، دبی درون‌گذر را افزایش خواهد داد. همچنین مشاهده می‌شود که اختلاف دبی درون‌گذر بین زوایای مختلف سرریز با شیب بالادست اندک بوده لکن این اختلاف بین سرریزهای با شیب پایین دست مشهود و قابل توجه است. این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات شیب پایین دست اثر بیش‌تری روی حجم دبی درون‌گذر و ضریب دبی این نوع سرریزها خواهد گذاشت. همانطور که در مقدمه تحقیق اشاره شد Azimi و همکاران (۲۰۱۱) دریافتند که در سرریزهای مثلثی کرامپ با شیب بالادست و پایین‌دست و یا شیب همزمان، با افزایش شیب پایین دست، ضریب دبی افزایش می‌یابد لکن ضریب دبی با افزایش شیب بالادست کاهش می‌یابد. لکن باید اشاره کرد که این تحقیق بر روی سرریزهای صلب صورت گرفته است. بنابراین نتیجه حاصل اینست که در سرریزهای گابیونی بر خلاف سرریزهای صلب، اثر شیب بالادست و پایین دست در

خلاف جهت یکدیگر نبوده و افزایش هر دو شیب بالادست و پایین دست (کاهش زاویه خارجی) در سرریزهای گابیونی، باعث افزایش ضریب دبی و نیز افزایش حجم دبی درون گذر خواهد شد.



شکل ۱۰: نسبت دبی گذرنده از درون سرریز به دبی کل کانال به ازای هدهای مختلف آب بالادست برای الف) سرریز

باشیب ۴۵ درجه و ب) سرریزهای باشیب ۶۰ درجه



شکل ۱۱: مقایسه دبی درون گذر برای سرریزهای الف) شیب بالادست و ب) شیب پایین دست

### ارائه روابط برای سرریز متخلخل

در این قسمت با استفاده از تحلیل ابعادی و آنالیز رگرسیونی چند متغیره غیر خطی به ایجاد روابطی به منظور محاسبه ضریب دبی و نسبت دبی درون گذر به دبی کل کانال ارائه شده است. در سرریزهای متخلخل با توجه به (شکل ۱) و بر مبنای تحلیل ابعادی می توان رابطه زیر را ارائه نمود:

$$[C_d, \frac{Q_{Through}}{Q_{Total}}] = f\left(\frac{H}{L_w}, \frac{H}{P}, \frac{d_m}{P}, Re, \tan \alpha, \tan \beta\right) \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

که  $C_d$  ضریب دبی،  $H$  هد آب روی سرریز،  $L_w$  طول کف سرریز در راستای جریان،  $Re$  عدد رینولدز بالادست،  $d_m$  قطر متوسط ذرات و  $p$  ارتفاع سرریز عمود بر راستای جریان است. با کمک آنالیز چند متغیره رگرسیونی معادلاتی به شرح زیر جهت تخمین ضریب دبی ( $C_d$ ) و نسبت دبی درون‌گذر به کل دبی ( $Q_{Through} / Q_{Total}$ ) پیشنهاد شده است:

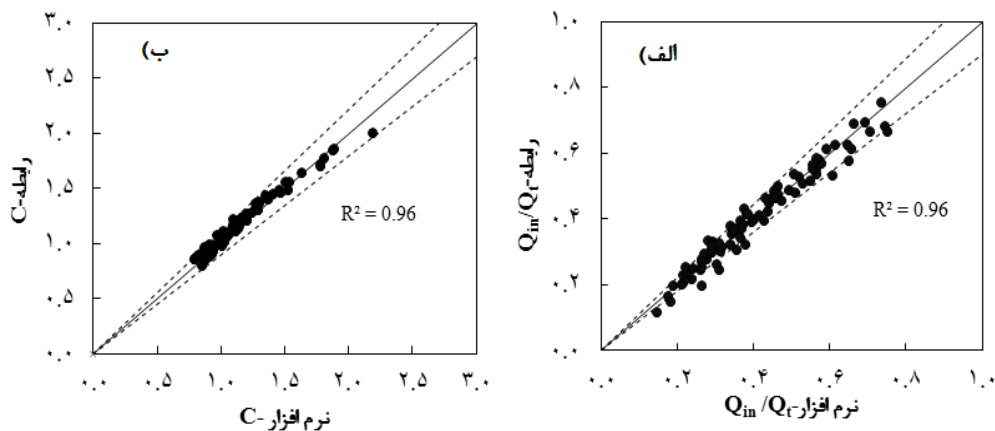
$$C = -0.827 + 0.126 * \text{Exp} [\text{Log}_{10}(\text{Re})] - 17.075 \left(\frac{H}{P}\right)^{0.491} + 5.557 \left(\frac{H}{L_w}\right)^{0.251} - 6.319 \left(\frac{d_m}{P}\right) + 0.03 \text{Tan}(\alpha) + .055 \text{Tan}(\beta) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\frac{Q_{Through}}{Q_{Total}} = -0.54 + 0.861 * \text{Log}_{10}(\text{Re}) - 3.487 \left(\frac{H}{P}\right)^{0.217} + 0.22 \left(\frac{d_m}{P}\right) - 0.013 \text{Tan}(\alpha) - 0.009 \text{Tan}(\beta) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

در شکل ۱۲ مقادیر محاسبه شده و مقادیر بدست آمده توسط مدل عددی با یکدیگر مقایسه شده اند. نتایج بیانگر همبستگی خوب نتایج حاصل از معادلات و دقت بالای آنها می‌باشد. همچنین پارامترهای همبستگی ( $R^2$ )، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و پارامتر خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به منظور تعیین میزان خطای مقادیر پیش بینی شده توسط فرمولها نسبت به مقادیر اصلی در جدول ۴ محاسبه شده اند. مقدار محاسبه شده بیانگر دقت بالای معادلات بخصوص برآورد دبی با خطای بسیار کم ( $RMSE=0.027$ ,  $MAE=0.021$ ) می‌باشد.

جدول ۴: پارامترهای برآورد خطای معادلات سرریز کرامپ

پارامتر	$R^2$	RMSE (درصد)	MAE (درصد)
$C_d$	۰/۹۷	۰/۰۶	۰/۰۵۵
$Q_{in}/Q_t$	۰/۹۷	۰/۰۲۷	۰/۰۲۱



شکل ۱۲: پراکندگی مقادیر محاسبه شده توسط نرم افزار در مقابل مقادیر محاسبه شده توسط معادلات ارائه شده

برای الف) دبی درون‌گذر و ب) ضریب دبی

## نتیجه گیری

در این تحقیق مجموعاً ۱۸ مدل سرریز کرامپ گابیونی هرکدام در شش دبی مختلف توسط مدل عددی شبیه سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج به دست آمده به این شرح است: به طور کلی افزایش قطر ذرات سازنده 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 سازه های گابیونی خواهد شد. البته موارد استثنا نیز در این حالات مشاهده می شود که مربوط به سرریزهای با شیب بالادست می باشند. در تمامی مدل های بررسی شده، افزایش زوایای جانبی  $\alpha$  و  $\beta$  باعث افزایش هد آب پشت سرریز و نتیجتاً کاهش ضریب دبی و دبی درون گذر شده است. با افزایش هد آب بالادست ضرایب دبی و دبی درون گذر در کلیه مدلها 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. هرچه زوایای جانبی سرریزهای کرامپ بیشتر افزایش یابد، نرخ کاهش ضریب دبی آنها در برابر افزایش هد آب کمتر می باشد. در انتها نیز روابطی جهت تخمین حجم دبی درون گذر و نیز ضریب دبی این گونه سرریزها در دانه بندی های مختلف و نیز در حالات مختلف شیب جانبی ارائه شده است.

## منابع

- حمزئی، م.، جوان، م.، اقبال زاده، ا. (۱۳۹۲). بررسی اثر شیب وجوه بالادست و پایین دست سرریز لبه پهن بر مشخصات جریان با استفاده از نرم افزار فلوئنت. مجله پژوهشهای حفاظت آب و خاک، جلد بیستم، شماره دوم.
- قمشی، م. و امامقلی زاده، ص. (۱۳۸۹). مکانیک سیالات و هیدرولیک، چاپ اول، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- مرادی، م. (۱۳۹۴). بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان سرریزهای لبه پهن گابیونی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم آب.

**Ansar, M., and Gonzalez-Castro, J. A. (2003).** Submerged weir flow at prototype gated spillways. Proc., World Water Congress, ASCE, Reston, Va.

**Azimi, A. H., Rajaratnam, N., Zhu, D. Z. (2013).** Discharge Characteristics of Weirs of Finite Crest Length with Upstream and Downstream Ramps. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139, 1.

**Göğüş, M., Defne, Z., and Özkandemir, V. (2006).** Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections. Journal of Irrigation and Drainage Engineering., 132, 3, pp: 272–280.

**Hager, W. H., and Schwalt, M. (1994).** Broad-crested weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering., 120, 1, pp: 13–26.



- Keller, R. J. (1989).** SLOPING CREST CRUMP WEIR. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 115, 2, pp: 1-11
- Kells, J. A. (1993).** Spatially varied flow over rock fill embankments. *Can. J. Civ. Eng.*, 20, pp: 820-827.
- Kells, J. A. (1994).** Reply on discussion of spatially varied flow over rock fill embankments. *Can. J. Civ. Eng.*, 21, pp: 163-166.
- Li, B., and Garga, V. K. (1998).** Theoretical solution for seepage flow in overtopped rock fill. *J. Hydraul. Eng.*, 124, 2, pp: 213-217.
- Michioku, K., Maeno, S., Furusawa, T., and Haneda, M. (2005).** Discharge through a permeable rubble mound weir, *J. Hydr. Eng.*, 131, 1, pp: 1-10.
- Mohamed, H. I. (2010).** Flow over gabion weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136, 8, pp: 573-577.
- Mohammadpour, R., Ghani, A. A. and Azamathulla, H. M. (2013).** Numerical modeling of 3-D flow on porous broad crested weirs. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 22, pp: 9324-9337
- Sargison, J. E., and Percy, A. (2009).** Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135, 1, pp: 115-118.