



مطالعه آزمایشگاهی و عددی مشخصات هیدرولیکی جریان عبوری از سرریز لبه‌تیز در اثر بالا آمدگی بستر بالادست

داود داود مقامی^۱، * حسین بانژاد^۲، مجتبی صانعی^۳ و سیداسدالله محسنی موحد^۴

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک
تاریخ دریافت: ۹۵/۳/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۱۹

چکیده

سابقه و هدف: سرریزهای لبه‌تیز یکی از سازه‌های اندازه‌گیری، انحراف و کنترل سطح آب در پروژه‌های هیدرولیکی، آبی و زیست‌محیطی هستند. بنابراین بررسی ویژگی و خصوصیات آن‌ها از جمله خصوصیات هیدرولیکی از مباحث مهم در طراحی این سازه‌ها می‌باشد. تاکنون مطالعات متنوع و زیادی در خصوص سرریزهای لبه‌تیز صورت پذیرفته است. در خصوص تأثیر ناهمترایی طرفین رقوم بستر روی خصوصیات هیدرولیکی سرریزها، مطالعات محدودی انجام شده است. در سرریزهای لبه‌تیز نیز هم‌چون سایر سرریزها ناهمترایی طرفین (نظیر آبشار تنظیم‌کننده^۱) باعث تغییر در خصوصیات هیدرولیکی شده که باید مورد مطالعه قرار گیرند.

مواد و روش‌ها: آزمایش‌های پژوهش صورت گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری (وزارت جهاد کشاورزی) انجام گردید. آزمایش‌ها در فلوم به طول ۱۴ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. سرریز لبه‌تیز دارای جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت ۶ میلی‌متر، لبه‌تیز به ضخامت ۲ میلی‌متر، ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و طول ۶۰ سانتی‌متر بود. با مصالح مناسب رقوم بستر بالادست سرریز در سه مرحله تا ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر بالا آورده شد و در هر مرحله مقادیر رقوم تاج سرریز و سطح آب در بالادست و پایین‌دست در دبی‌های مختلف برداشت و مشخصات هیدرولیکی به‌دست آمد. در ادامه برای تعمیم نتایج از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۲) استفاده شد. بدین‌منظور در مدل‌سازی جریان با سطح آزاد از روی سرریز از نرم‌افزار FLOW 3D استفاده شد. در این نرم‌افزار سرریز به‌عنوان مانعی با استفاده از روش نمایش کسری از مساحت یا حجم مانع (FAVOR^۳) و سطح آزاد آن با استفاده از روش اصلاح‌شده حجم سیال (VOF^۴) محاسبه شد. معادلات حاکم در شبیه‌سازی نیز معادلات ناویر استوکس و پیوستگی جریان‌های تراکم‌ناپذیر بودند. جهت مدل کردن آشفتگی نیز از مدل دو معادله‌ای $k - \epsilon$ حالت اصلاح‌شده RNG^۵ استفاده شد.

* مسئول مکاتبه: hossein_banejad@yahoo.com

- 1- Check Drop
- 2- Computational Fluid Dynamics
- 3- Fractional Area Volume Obstacle Representation
- 4- Volume of fluid
- 5- Re-Normalization Group

یافته‌ها: نتایج تطابق خوبی بین مقادیر آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی نشان داد. روند تغییرات ضریب آبگذری از دو روش یکسان بود. حداکثر اختلاف در مقادیر H به دست آمده در دبی‌های برابر از دو روش فوق ۰/۱۱٪ بود که قابل قبول می‌باشد. مشاهده شد که با افزایش رقوم بستر بالادست عمق جریان بالادست کاهش، سرعت و عدد فرود جریان افزایش خواهد یافت اما در نسبت‌های بالادستی کمتر از ۰/۷۵ ($Z/P < 0.75$)، افزایش رقوم بستر بالادست تأثیر معنی‌داری روی ضریب آبگذری نداشت. در روش عددی انجام شده، ضریب آبگذری در مقادیر نسبت‌های بلندای جریان (نسبت هد آب به ارتفاع سرریز) بیش‌تر از ۰/۵ ($H/P > 0.5$) را با اندکی اغماض می‌توان برای تمامی موارد مقدار متوسط ۰/۷۳ را در نظر گرفت. با افزایش دبی در نسبت‌های مختلف از بالادستی بستر بالادست اعداد فرود همگرا می‌شوند. در حالت خاصی که بستر بالادست هم‌تراز تاج باشد (دراپ عمودی یا $Z/P = 1$) مقدار ضریب آبگذری برابر مقدار ثابت ۰/۶ خواهد بود که کم‌ترین ضریب از بین حالت‌های بررسی شده می‌باشد که با ضریب آبگذری سرریزهای لبه‌پهن مطابقت دارد و بنابراین در این حالت رقوم سطح آب نسبت به حالت‌های دیگر در دبی‌های یکسان افزایش خواهد یافت که با افزایش دبی این اختلاف‌ها بیش‌تر خواهد بود. در این حالت عدد فرود نیز برابر مقدار ثابت $F_r = 0.94C_d$ خواهد بود.

نتیجه‌گیری: به‌طور خلاصه می‌توان چنین نتیجه گرفت با افزایش رقوم بستر بالادست عدد فرود افزایش خواهد یافت و در نتیجه تیغه ریزشی افقی‌تر می‌شود. در محدوده ($H/P \geq 0.5$)، به‌استثنای زمانی که Z/P به سمت یک میل می‌کند، در بقیه موارد افزایش رقوم بستر بالادست و همچنین افزایش H/P تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای روی ضریب دبی ندارند. در دامنه ($Z/P < 0.75$) تغییرات رقوم بستر بالادست روی ضریب آبگذری تأثیر ندارند. در حالت خاص $Z/P = 1$ نیز هر دو مقادیر ضریب آبگذری و عدد فرود همواره ثابت و به‌ترتیب ۰/۶ و ۰/۵۶ هستند.

واژه‌های کلیدی: دراپ عمودی، سرریز لبه‌تیز، ضریب آبگذری، عدد فرود، آبشار تنظیم‌کننده

مقدمه

کومار و همکاران (۲۰۱۱) بیان داشتند سرریزها به‌طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری جریان، انحراف آب و کنترل جریان در کانال‌های باز استفاده می‌شوند (۱۱). از جمله این سرریزها، سرریزهای لبه‌تیز هستند. سرریزهای لبه‌تیز به‌طور معمول از یک صفحه عمودی نصب شده در کانال و داشتن یک تاج تیز به سمت بالادست جریان تشکیل یافته‌اند. ساده‌ترین شکل از این سرریز متشکل از صفحه عمود بر جریان در یک کانال مستطیلی می‌باشد که لبه بالایی افقی آن با عرض کانال یکسان است. این بدین معنی است که جریان دو بعدی است و اثر فشردگی ندارد (۸). در اثر تجمع رسوب در پشت سرریز و یا هنگام استفاده از سازه

چک دراپ رقوم بستر بالادست و پایین‌دست متفاوت بوده که در نتیجه روی خصوصیات هیدرولیکی جریان مانند عمق، هد آب روی سرریز، سرعت متوسط، عدد فرود و ضریب آبگذری تأثیرگذار بوده که باید مورد توجه و بررسی قرار گیرد. باس (۱۹۸۹) مطرح کرد که معادله عمومی سرریزها به‌صورت زیر می‌باشد (۴).

$$Q = KH^n \quad (1)$$

که در آن، Q دبی جریان، H ارتفاع هیدروستاتیک روی سرریز، K ضریب وابسته به اندازه و شکل سرریز و n عدد بدون بعد با توجه به شکل سرریز است که برای سرریزهای مستطیلی و مثلثی به‌ترتیب برابر ۱/۵ و ۲/۵ می‌باشد (۸). هندرسون (۱۹۶۴)

معادله دبی برای سرریزهای لبه‌تیز مستطیلی با عرض برابر کانال را به صورت زیر ارائه کرد (۸).

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{1.5} \quad (2)$$

که در آن، Q دبی جریان، H ارتفاع هیدروستاتیک روی سرریز، L طول تاج سرریز، C_d ضریب آبگذری و g شتاب ثقل می‌باشد. سوامی (۱۹۸۸) یک معادله تعمیم‌یافته برای سرریزهای لبه‌تیز و لبه‌پهن با استفاده از ترکیب معادلات استخراجی از کارهای پیشین به دست آورد. معادلات پیشنهادی بر اساس هد آب روی سرریز، ارتفاع سرریز و عرض سرریز بود (۱۶). خسروجردی و کاویانپور (۲۰۰۲) رابطه‌ای برای C_d در سرریزهای لبه‌پهن ارائه کردند که به صورت تابعی از بلندای جریان یعنی نسبت هد آب به ارتفاع سرریز (H/P) و نسبت ضخامت تاج سرریز به هد آب بالادست سرریز بود و با جایگذاری آن در رابطه ۲ می‌توان دبی را در اینگونه سرریزها را به دست آورد (۱۰). رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷) با یک طیفی از $0 < H/P < 10$ آزمایش‌هایی را انجام دادند آن‌ها با استفاده از اصل مومنتم و نتایج تجربی توانستند به یک رابطه بین C_d و H/P دست پیدا کنند. همچنین توزیع سرعت و فشار در تیغه ریزشی روی سرریز را بررسی کردند (۱۳). باقری و حیدرپور (۲۰۱۰) مطالعات خود را در این زمینه بر پایه انتگرال‌گیری مقادیر سرعت بر اساس حرکت گردابی آزاد در پروفیل‌های لبه‌های بالا و پایین تیغه ریزشی انجام دادند (۳). ردا (۲۰۱۱) جریان از روی سرریز لبه‌تیز را مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که تغییر ارتفاع سرریز تأثیر معنی‌داری روی ضریب آبگذری ندارد (۱۴). کومار و همکاران (۲۰۱۱) مطرح کردند که C_d به خصوصیات جریان و هندسه کانال و سرریز وابسته است (۱۱). کومار و همکاران (۲۰۱۲) سرریز لبه‌تیز در پلان دایره‌ای را مورد بررسی قرار دادند و

رابطه‌ای را بین C_d ، H/P و زاویه گردش‌دگی استخراج کردند (۱۲). اروناغی و ناصحی‌اسکویی (۲۰۱۲) تأثیر ارتفاع سرریز را روی ضریب آبگذری در سرریزهای لبه‌تیز با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج CFD تشابه خوبی برقرار است و در مقدار H/P برابر ۰/۶ مقدار C_d ثابت و برابر ۰/۷ می‌شود (۱). نادری و همکاران (۲۰۱۴) نیز نتایج اروناغی و ناصحی‌اسکویی را در مورد ثابت ماندن ضریب آبگذری در مقدار H/P برابر ۰/۶ و بیش‌تر از آن مورد تأیید قرار دادند (۱۵). در ارتباط با تأثیر بالآمدگی در بالادست سرریزها بر خصوصیات هیدرولیکی مطالعات محدود است. دستورانی و نصرانی (۲۰۱۲) تأثیر ته‌شینی رسوبات در پشت سرریز اوجی بر شرایط جریان را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش ارتفاع رسوبات، عمق آب نسبت به تاج و سرعت آب در بالادست افزایش و ضریب آبگذری کاهش می‌یابد و ضریب دبی (C) در رابطه از ۲/۲۵ در حالت بدون رسوب به ۱/۶۵ در حالت پرشدگی مخزن می‌رسد (۵). در حالت کلی در سه حالت در سرریزها رقوم بستر بالادست از پایین‌دست بالاتر قرار خواهد گرفت: ۱- تلفیق سازه چک و دراپ به نام سازه چک دراپ، ۲- بالا آمدن بستر بالادست در اثر ته‌نشینی رسوبات، ۳- پایین رفتن بستر پایین‌دست در اثر آبشستگی.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های پژوهش صورت‌گرفته در آزمایشگاه هیدرولیک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری انجام گردید. آزمایش‌ها در فلوم به طول ۱۴ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر انجام شد. فلوم در شکل ۱ نشان داده شده است.

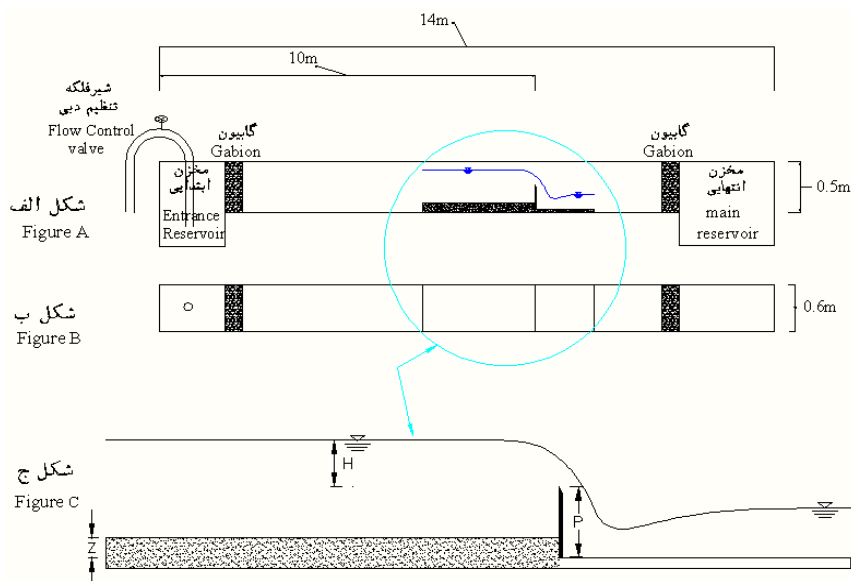


شکل ۱- فلوم آزمایشگاهی.

Figure 1. Flume Laboratory.

مناسب رقوم بستر در بالادست سرریز در سه مرحله تا ارتفاع ۵، ۱۰ و ۱۵ سانتی‌متر بالا آورده شد و آزمایش‌ها تکرار شد و در هر آزمایش با استفاده از دستگاه ژرف‌سنج با دقت 0.1 mm رقوم سطح آب در بالادست و همچنین رقوم سرریز قرائت گردید. شکل ۲ نمای شماتیک جریان از روی سرریز لبه‌تیز در حالت ناهم‌ترازی بالادست و پایین‌دست سرریز و پارامترهای مربوطه را نشان می‌دهد. شکل (۲-الف)، (۲-ب) و (۲-ج) به ترتیب معرف پروفیل طولی، پلان و جزئیات جریان می‌باشند.

برای اندازه‌گیری دبی در انتهای فلوم از یک سرریز مثلثی لبه‌تیز با زاویه راس 90° درجه استفاده شد. ابعاد حوضچه آرامش قبل از سرریز مثلثی انتهای فلوم به ترتیب دارای طول $1/5$ متر، عرض 0.6 متر و ارتفاع معادل 1 متر بود. در پژوهش حاضر سرریز لبه‌تیز از جنس پلکسی‌گلاس به ضخامت 6 میلی‌متر، لبه‌تیز به ضخامت 2 میلی‌متر، ارتفاع 20 سانتی‌متر و طول 60 سانتی‌متر در کارگاه ساخته و در فلوم کارگذاری شد. آزمایش‌ها تا دبی 36 لیتر در ثانیه (دبی در واحد عرض حدود 60 لیتر در ثانیه بر متر) با بستر صلب در دو طرف سرریز انجام شد و سپس با مصالح



شکل ۲- جانمایی پارامترهای مربوط به بالآمدگی بستر بالادست.

Figure 2. layout of parameters related to rising of the upstream bed level.

شبکه‌ای از المان‌های حجمی تقسیم شده است. در مدل‌سازی جریان با سطح آزاد از روی سرریز، سرریز به‌عنوان مانعی با استفاده از روش نمایش کسری از مساحت یا حجم مانع (FAVOR) و سطح آزاد آن با استفاده از روش اصلاح‌شده (VOF) محاسبه می‌شود. معادلات کلی حاکم بر مسأله، معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز ناویر استوکس (RANS¹) و پیوستگی برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر می‌باشند. این معادلات با در نظر گرفتن VOF و FAVOR به شکل معادلات مومنتوم (رابطه‌های ۳، ۴ و ۵) و معادله پیوستگی (رابطه ۶) بیان می‌شوند (۶).

با توجه به این‌که دامنه مطالعات آزمایشگاهی محدود بوده بنابراین در ادامه برای تعمیم نتایج از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شد. FLOW 3D یک نرم‌افزار قدرتمند در زمینه هیدرودینامیک محاسباتی است. یکی از قابلیت‌های عمده این برنامه برای آنالیز هیدرولیکی، توانایی مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد با روش حجم مایع (VOF) است. این روش توسط هیرت و نیکولز (۱۹۸۱) گزارش شده است (۹).

در نرم‌افزار FLOW 3D، ناحیه محاسباتی به‌وسیله دستگاه مختصات کارتزین و یا قطبی به

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left[R \frac{\partial p}{\partial y} \right] + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (5)$$

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = 0 \quad (6)$$

می‌باشد. (G_x, G_y, G_z) شتاب ثقل در جهات (x, y, z) و (f_x, f_y, f_z) شتاب‌های لزجت می‌باشند. در المان‌های پر از مایع مقادیر V_F و همچنین A_x, A_y, A_z برابر ۱ می‌باشند در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال نیز از یک تابع به‌نام جزء حجم سیال F استفاده می‌شود. شکل دیفرانسیلی تابع F در حالت سه‌بعدی در رابطه ۷ استفاده می‌شود.

که در آن، (V_F) مقدار نسبت حجم باز به جریان، ρ جرم مخصوص سیال، (u, v, w) به ترتیب سرعت در راستای (x, y, z) ، (A_x, A_y, A_z) به ترتیب مقادیر کسرهای سطحی برای جریان در راستای (x, y, z) ، R و ξ مربوط به سیستم مختصات انتخابی می‌باشد که با توجه به انتخاب سیستم مختصات کارتزین (مستطیلی)، R برابر ۱ و ξ برابر صفر

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

مدل استاندارد، برای تعیین آشفتگی پراختل از رابطه تحلیلی استفاده می‌شود. به همین دلیل از این مدل در تعیین مقادیر آشفتگی جریان، در میدان‌های دارای انحناء یا پیچیدگی هندسی استفاده می‌شود (۶).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(a_k \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (۸)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(a_\varepsilon \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (۹)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0}) \varepsilon^3}{1 + \beta \eta^3} K \quad (۱۰)$$

این معادله در نواحی که نرخ کرنش زیاد می‌باشد شده است. ثابت‌های مورد استفاده در روابط فوق در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

در رابطه ۱۰ مقدار η برابر است با $\frac{SK}{\varepsilon}$ و S نیز بیانگر کرنش نرخ متوسط می‌باشد که رابطه آن بر حسب نوع کرنش متوسط در رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ ذکر شده است (۲).

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (۱۱) \quad S = \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (۱۲)$$

جدول ۱- ضرایب ثابت برای مدل RNG.

Table 1. Constant Coefficients of RNG.

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	β	η_0
0.0845	1.68	1.42	1.00	0.012	4.38

یک سیستم با مشخصاتی شامل پردازشگر مرکزی COREI7 با قدرت 3.1GH، حافظه 8GB و پردازنده گرافیکی 2GB استفاده شد. حساسیت‌سنجی شبکه محاسباتی (استقلال حل از شبکه مش) نیز انجام شد. توصیه می‌گردد در نواحی با شیب بالا از المان‌های کوچک‌تری استفاده گردد (۶). بنابراین در محل سرریز از المان‌های کوچک‌تری استفاده شد.

جهت مدل کردن آشفتگی نیز از مدل دومعادله‌ای $k - \varepsilon$ حالت اصلاح‌شده RNG (رابطه‌های ۸ و ۹) استفاده شد. این مدل نسبت به حالت استاندارد، در جریان چرخشی، کارایی بیشتری دارد و بر خلاف

در روابط اخیر μ_{eff} عبارتست از لزجت گردابه‌ای مؤثر، a_k و a_ε نیز مقادیر معکوس عدد پراختل آشفتگی هستند که در جریان‌های با عدد رینولدز بالا تقریباً معادل $1/363$ می‌باشند. G_b و G_k نیز به ترتیب عبارتند از چشمه معادله k و ε که به ترتیب اثر گرادیان و شناوری سرعت میانگین را در معادله اعمال می‌کنند. عبارت R_ε اضافه شده به معادله ε در مدل RNG نسبت به مدل حالت استاندارد، باعث اصلاح

مدل RNG از روابطی مانند روابط موجود در مدل $k - \varepsilon$ استفاده می‌کند. با این تفاوت که ضرایب ثابت موجود در مدل $k - \varepsilon$ که به روش تجربی استخراج می‌شدند، در مدل RNG به صورت صریح محاسبه می‌شوند (۷).

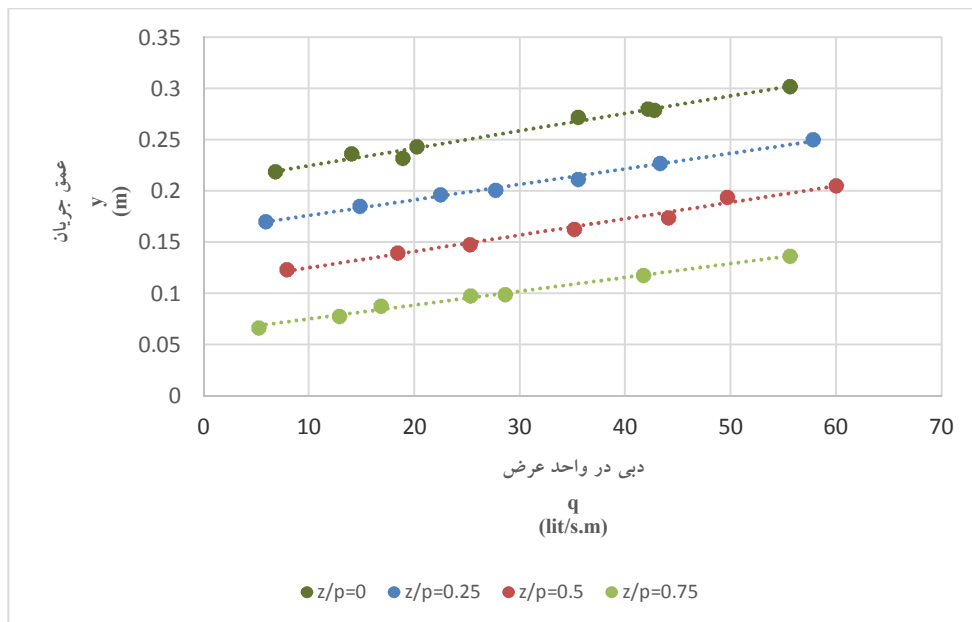
از تأثیر کشش سطحی نیز در معادلات حاکم مورد استفاده صرف‌نظر شده است. جهت مدل‌سازی از

شد و بنابراین در طرف مقابل دیواره فلوم که از شرط (Wall) استفاده شده بود از شرط مرزی تقارن (Symmetry) استفاده شد.

نتایج و بحث

جهت تحلیل داده‌های آزمایشگاهی نمودار مقادیر عمق را در مقابل دبی در واحد عرض ترسیم شد (شکل ۳). ملاحظه گردید که در اثر بالا آمدن بستر بالادست عمق جریان کاهش می‌یابد.

شرایط مرزی شامل شرایط مقطع ورودی، مقطع خروجی، دیواره‌ها و سطح آزاد جریان است، در ورودی جریان از شرایط مرزی عمق جریان (Specified pressure)، در مقطع خروجی از شرایط مرزی جریان خروجی (Out flow)، در دیواره‌ها و کف از شرایط مرزی دیواره (Wall) و در نهایت در سطح آب از شرایط مرزی تقارن (Symmetry) استفاده شده است. به جهت این‌که بتوان تعداد مش را کاهش داد از نصف عرض فلوم در شبیه‌سازی استفاده



شکل ۳- تغییرات عمق جریان بالادست در مقابل دبی در واحد عرض.

Figure 3. Changes of flow upstream depth against the discharge per unit width.

محاسبه میزان خطا در اندازه‌گیری نسبت به مدل آزمایشگاهی استفاده شد. در مقادیر کم هد جریان، اثر کشش سطحی وجود دارد بنابراین روابط مقادیر ۱۳ و ۱۴ در $H/P \geq 0.2$ محاسبه شدند. که در رابطه‌های زیر، Cd_0 و Cd_p به ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده ضریب دبی می‌باشند. نتایج در جدول ۲ آمده است.

در ادامه برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار FLOW 3D استفاده شد. برای مطالعه میزان حساسیت شبکه محاسباتی (استقلال حل از شبکه مش) و پیدا کردن شبکه‌ای مطلوب، از سه شبکه S_1 ، S_2 و S_3 استفاده شد. جهت مقایسه سه مدل شبکه محاسباتی، از روش‌های آماری میانگین خطای مطلق $(MAE)^1$ و خطای مجذور میانگین مربعات $(RMSE)^2$ برای

1- Mean Absolute Error

2- Root Mean Square Error

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |(Cd_o)_i - (Cd_p)_i| \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n ((Cd_o)_i - (Cd_p)_i)^2} \quad (14)$$

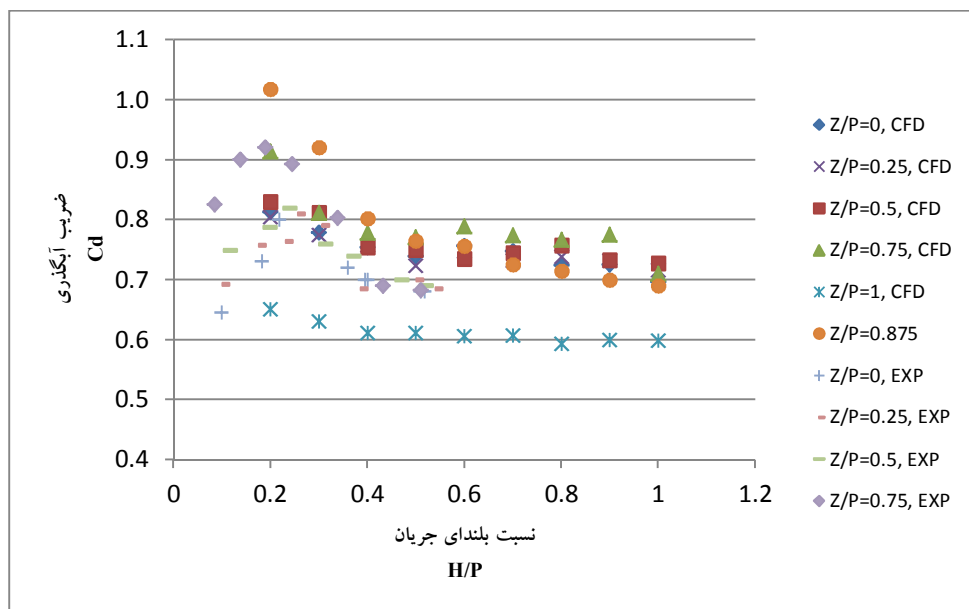
جدول ۲- مشخصات شبکه‌های محاسباتی.

Table 2. Characteristic of Computational Grids.

خطای شبیه‌سازی (SIMULATION ERROR)		NT	δC			NC			شبکه NET
MAE	RMSE		z	y	x	z	y	x	
0.235	0.288	28000	0.012	0.012	0.01	20	20	70	S ₁
0.12	0.172	50000	0.01	0.01	0.008	25	25	80	S ₂
0	0.157	81000	0.008	0.008	0.006	30	30	90	S ₃

شبیه‌سازی عددی، از ضریب آب‌گذری به‌دست آمده در شرایط مختلف از بالاآمدگی بستر بالادست ($Z/P = 0, 0.25, 0.5, 0.75$) استفاده شد، که نتیجه آن در شکل ۴ ارائه شده است.

که در جدول بالا NC تعداد سلول در جهات مختلف، δC کوچک‌ترین بعد سلول در جهات مختلف و NT تعداد کل سلول‌های شبکه محاسباتی می‌باشد. جهت مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و

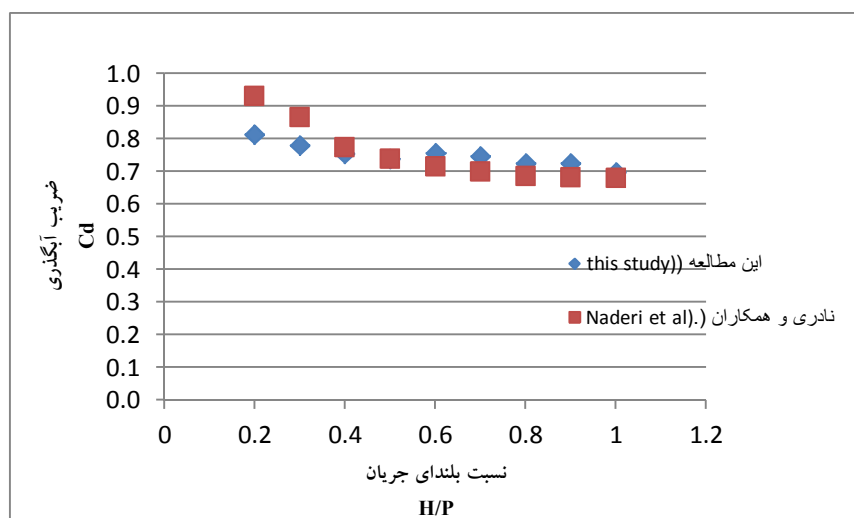


شکل ۴- مقادیر C_d استخراجی به‌وسیله مقادیر آزمایشگاهی و روش عددی.

Figure 4. The discharge coefficient extracted by experimental magnitudes and CFD.

ضریب آبگذری مربوط به Z/P برابر 0.875 می‌باشد. با ادامه افزایش Z/P از 0.875 به 1 مقادیر ضریب آبگذری به شدت کاهش و به طور متوسط برابر 0.6 می‌گردد که این ضریب برابر ضریب در سرریزهای با تاج لبه تخت خواهد بود و خود تأییدی بر نتایج حاصله می‌باشد. اگر ضرایب C_d تبدیل به C شوند نشان می‌دهد که در مقادیر $H/P \geq 0.5$ مقدار C در حالت بدون بالآمدگی (بدون رسوب) برابر $2/25$ و در حالت کاملاً بالا آمده (پر از رسوب و یا دراپ عمودی) برابر $1/8$ خواهد بود که در حالت بدون بالآمدگی نتیجه حاصل با نتیجه دستورانی و نصرانی (۲۰۱۲) در مورد سرریزهای اوجی کاملاً مطابقت دارد و در حالت کاملاً بالا آمده اختلاف $1/8$ خواهد بود. نادری و همکاران (۲۰۱۴) نیز نشان دادند که در محدوده $H/P \geq 0.6$ تغییر در ارتفاع سرریزهای لبه تیز تأثیری روی مقدار ضریب آبگذری ندارد (۱۵). مقایسه‌ای نیز بین نتایج حاصله از مقادیر استخراجی C_d در این مطالعه و آزمایش‌های نادری در سرریز به ارتفاع 20 سانتی‌متر و بدون بالآمدگی انجام گرفت که در شکل ۵ آمده است. نتایج حاصله مبین ضریب تبیین (R^2) برابر با 0.83 و میانگین خطای مطلق (MAE) برابر با 0.046 می‌باشد.

همان‌گونه که گفته شد در دامنه $H/P \leq 0.2$ مقادیر آزمایشگاهی تحت تأثیر کشش سطحی هستند بنابراین مبنای مقایسه قرار نمی‌گیرند. اما در مقادیر $H/P \geq 0.2$ با وجود اختلافاتی در بین مقادیر ضریب آبگذری به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی روند تغییرات به دست آمده برای ضریب آبگذری از هر دو روش یکسان می‌باشد. به طوری که بالآمدگی بستر تا $Z/P = 0.75$ تأثیر محسوسی روی ضریب دبی ندارد. در $Z/P = 0.75$ ضریب آبگذری اندکی افزایش یافته اما تغییرات آن‌چنان آشکار نیست. دامنه نتایج آزمایشگاهی به علت محدودیت دبی حداکثر تا $H/P = 0.55$ بود بنابراین در محدوده $H/P \geq 0.5$ از نتایج شبیه‌سازی عددی استفاده شد. با توجه به شکل ۴ در محدوده $H/P \geq 0.5$ و $0 \leq Z/P \leq 0.5$ مقدار ضریب آبگذری تغییر محسوسی نداشته و می‌توان به طور متوسط مقدار 0.73 را برای آن منظور کرد. اما در Z/P برابر 0.75 ضریب آبگذری به مقدار محسوسی افزایش یافته است. در ادامه با افزایش Z/P روند تغییرات شکل سریع‌تری به خود گرفته به طوری که در Z/P برابر 0.875 ، نقطه H/P برابر 0.5 نقطه عطفی خواهد بود، بدین ترتیب که تا این نقطه بیش‌ترین

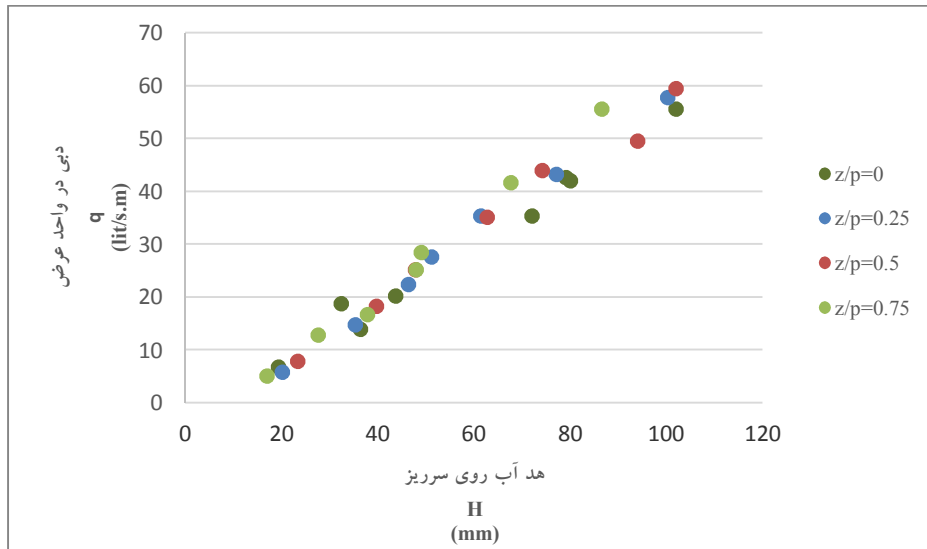


شکل ۵- مقایسه مقادیر ضریب آبگذری در سرریز لبه تیز به ارتفاع 20 سانتی‌متر در این مطالعه و پژوهش نادری و همکاران.

Figure 5. Comparison of discharge coefficient in the sharp-crested weir with 20 cm height between this study and the study of naderi et al.

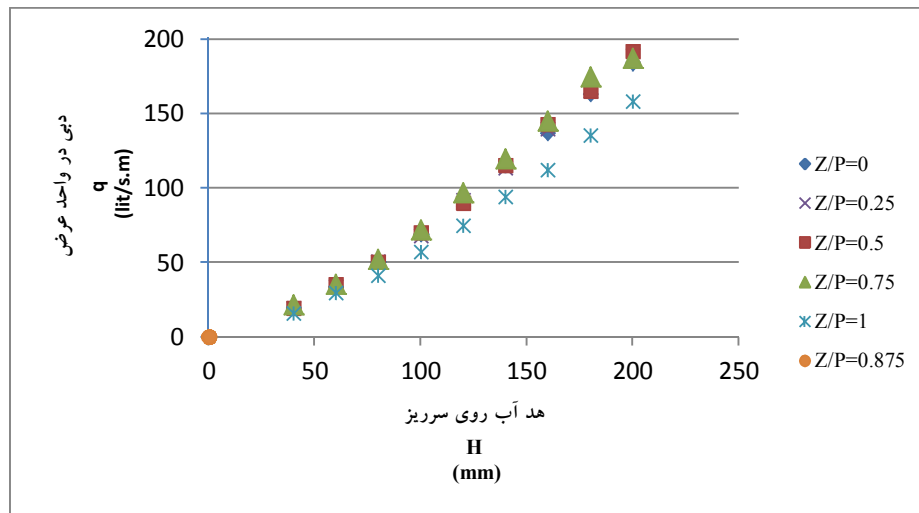
نمودار H در مقابل دبی در واحد عرض (q) از هر دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی ترسیم و نتایج ارائه شد.

یکی از مواردی که در عمل باید مورد توجه قرار گیرد تأثیرات بالاآمدگی بر روی رقوم آب و یا به عبارت دیگر مقدار H می‌باشد برای این منظور



شکل ۶- دبی در واحد عرض جریان در برابر هد آب روی سرریز با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی.

Figure 6. the discharge per unit width against the water head by experimental magnitudes.



شکل ۷- مقادیر دبی در واحد عرض جریان در برابر هد آب روی سرریز با استفاده از CFD.

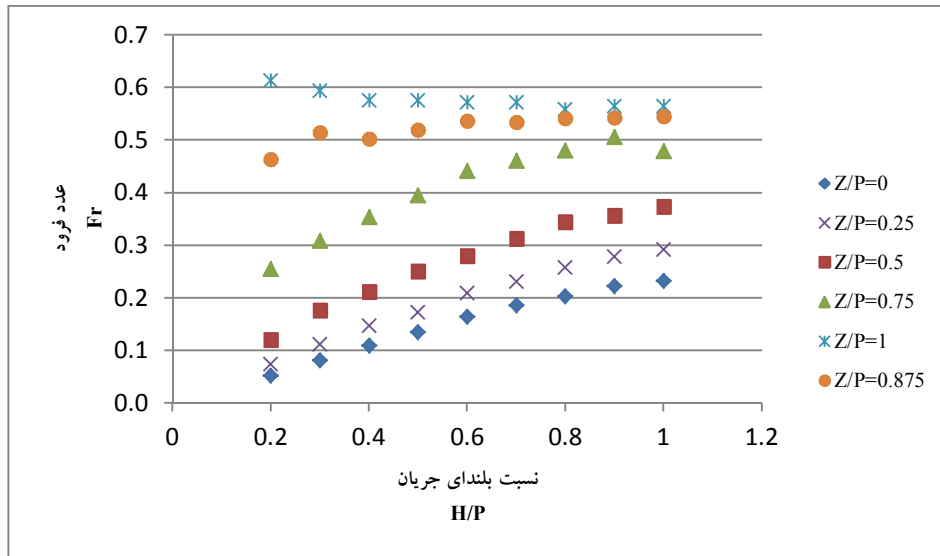
Figure 7. the discharge per unit width against the water head by CFD.

می‌باشند که قابل قبول است. تا هد ۷۵ میلی‌متر اختلاف چندانی بین مقادیر به دست آمده وجود ندارد و در $H = 0.75\text{mm}$ و با مشخصه $Z/P = 0.75$

با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ ملاحظه شد که مقادیر H به دست آمده از روش CFD حداکثر ۱۱٪ از مقادیر H به دست آمده از مقادیر آزمایشگاهی

دبی، نرخ اختلاف تراز آب در حالت $Z/P = 1$ با سایر حالت‌ها افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی عدد فرود با استفاده از مقادیر عددی به دست آمده پرداخته می‌شود.

مقدار دبی به‌طور جزئی افزایش یافته است. در ادامه با توجه به شکل ۷ زمانی که بستر بالادست تا تراز تاج بالا بیاید ($Z/P = 1$) از مقدار دبی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاسته شده که با افزایش مقدار H این اختلافات بیش‌تر خواهد بود. بدین معنی که با افزایش



شکل ۸- مقادیر عدد فرود در مقابل بلندای جریان با استفاده از CFD.

Figure 8. Froude number against the H/P by CFD.

بیش‌تر به سمت افق میل می‌کند که این مورد می‌تواند در طراحی‌ها به‌خصوص شکل انحنای سرریزهای اوجی مورد توجه قرار گیرد چون باعث کاویتاسیون می‌گردد. نکته دیگر این‌که روند افزایش عدد فرود در گام‌های مساوی از بالآمدگی بستر مثلاً $\Delta Z/P = 0.25$ در H/P های کم‌تر سریع‌تر است و با افزایش H/P ، روند افزایش عدد فرود کندتر می‌شود. برای حالت خاص $Z/P = 1$ با توجه به این‌که $y = H$ می‌باشد. بنابراین می‌توان رابطه‌ای بین عدد فرود و ضریب آبگذری به‌صورت رابطه ۱۵ استخراج کرد.

شکل ۸ نشان‌دهنده افزایش عدد فرود با افزایش نسبت‌های H/P و Z/P می‌باشد. بیش‌ترین اختلاف عدد فرود در نسبت‌های بلندای جریان پایین و یا به‌عبارت دیگر در دبی‌های پایین است و با افزایش دبی این اختلاف کم‌تر گردید. به‌عبارت بهتر می‌توان گفت که با افزایش H/P دامنه تغییرات عدد فرود در اثر تغییرات تراز بالادست کم‌تر می‌شود و یک همگرایی بین اعداد فرود به وجود می‌آید. همچنین از شکل ۸ مشخص است که با افزایش رقوم بستر بالادست عدد فرود افزایش پیدا می‌کند که در نتیجه می‌توان گفت جت پرتابی از روی سرریز

$$Q = \frac{2\sqrt{2g}}{3} C_d L H^{\frac{3}{2}} \rightarrow q = \frac{2\sqrt{2g}}{3} C_d H^{\frac{3}{2}}$$

$$\xrightarrow{H=y} q = \frac{2\sqrt{2g}}{3} C_d y^{\frac{3}{2}}$$

$$\rightarrow \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} C_d \rightarrow F_r = \frac{2\sqrt{2}}{3} C_d$$

$$\rightarrow F_r = 0.94 C_d$$

(۱۵)

و همچنین افزایش H/P تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی ضریب دبی نداشته و با اندکی اغماض می‌توان برای تمامی موارد به استثنای $Z/P = 1$ ضریب دبی را ثابت نظر گرفت. در حالتی که بستر بالادست تا تاج از رسوب پر شده و یا بالا آمده باشد (دراپ عمودی)، به مقدار قابل توجهی از ضریب دبی کاسته می‌شود. بنابراین در این حالت نسبت به حالت بدون رسوب در ازای دبی‌های برابر رقوم سطح آب افزایش می‌یابد که این روند با افزایش دبی آشکارتر و بیش‌تر می‌شود. با توجه به این‌که در این حالت رابطه $F_r = 0.94 C_d$ برقرار است و ضریب آبگذری برابر 0.6 است بنابراین عدد فرود هم برابر 0.565 شده و با داشتن یکی از خصوصیات جریان مثلاً عمق و یا سرعت جریان می‌توان بقیه مشخصات جریان را استخراج نمود.

بنابراین در این حالت (دراپ) مقادیر ضریب آبگذری و عدد فرود ثابت و به ترتیب 0.6 و 0.565 خواهند بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به پژوهش صورت گرفته به‌طور خلاصه می‌توان چنین بیان داشت که شبیه‌سازی عددی همخوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد و روند تغییرات ضریب آبگذری را با بالآمدن بستر به خوبی نشان می‌دهد. با افزایش رقوم بستر بالادست سرریز لبه‌تیز عمق جریان بالادست کاهش و سرعت و عدد فرود آن افزایش می‌یابد. تیغه ریزشی نیز به علت افزایش عدد فرود (افزایش سرعت نسبت به عمق) افقی‌تر می‌شود. با افزایش مقادیر H/P اعداد فرود حاصل از رقوم مختلف بالآمدگی همگرا خواهند شد. در محدوده $H/P \geq 0.5$ افزایش رقوم بستر بالادست

منابع

1. Arvanaghi, H., and Nasehi Oskuei, N. 2013. Sharp-Crested Weir Discharge Coefficient. J. Civil Engin. Urban. 3: 3. 87-91.
2. Azimian, A. 2006. Computational Fluid Dynamics. Isfahan University Publication Center. 604p. (In Persian)
3. Bagheri, S., and Heidarpour, M. 2010. Flow over rectangular sharp crested weirs. J. Irrig. Sci. 28: 2. 173-179.
4. Bos, M.G. 1989. Discharge measurement structures. 3rd edn. Publisher: International institute for land reclamation and improvement. 401p.
5. Dastorani, M., and Nasrabadi, M. 2012. The effect of sedimentation in the ogee spillway on flow conditions. Iran. J. Water Res. 10: 47-56. (In Persian)
6. Flow Science Incorporated. 2015. Flow-3D user's manuals, version 11.1, Santa Fe, NM.

7. Ghasemzadeh, F. 2013. Simulation hydraulic issues in Flow-3D. Noavar Publications. 144p. (In Persian)
8. Henderson, F.M. 1964. Open-channel flow. New York: Macmillan. 522p.
9. Hirt, C.W., and Nichols, B.D. 1981. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* 39: 201-225.
10. Khosrojerdi, A., and Kavianpour, M.R. 2002. Hydraulic Behavior of Straight and Curved Broad Crested Weirs. 5th International Conference on Hydrosience Engineering, Poland.
11. Kumar, S., Ahmad, Z., and Mansoor, T. 2011. A new approach to improve the discharging capacity of sharp-crested triangular plan form weirs. *Flow Measurement and Instrumentation*. 22: 175-180.
12. Kumar, S., Ahmad, Z., Mansoor, T., and Himanshu, S.K. 2012. Discharge Characteristics of Sharp Crested Weir of Curved Plan-form. *Res. J. Engin. Sci.* 1: 4. 16-20.
13. Ramamurthy, A.S., Qu, J., and Zhai, C. 2007. Multisite weir characteristics. *J. Irrig. Drain. Engin.* 133: 2. 198-200.
14. Reda, M.A. 2011. 2D-3D Modeling of Flow Over Sharp-Crested Weirs. *J. Appl. Sci. Res.* 7: 12. 2495-2505.
15. Naderi, V., Sadeghi Nasrabadi, M., and Arvanaghi, H. 2014. Effect of Height of Sharp-Crested Weir on Discharge Coefficient. *Inter. J. Basic Sci. Appl. Res.* 3: 6. 325-330.
16. Swamee, P.K. 1988. Generalized rectangular weir equations. *J. Hydr. Engin.* 114: 8. 945-949.



Experimental and numerical study of hydraulic characteristics of flow over the sharp-crested weirs in the effect of increasing upstream bed level

D. Davoud Maghami¹, *H. Banejad², M. Saneie³ and S.A. Mohseni Movahhed⁴

¹Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Buali Sina University, Hamedan, ²Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Buali Sina University, Hamedan, ³Associate Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, ⁴Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Arak University

Received: 05/31/2016; Accepted: 04/08/2017

Abstract

Background and objectives: Sharp crested weirs are used for the purpose of flow measurement, flow diversion and water level control in hydraulics, irrigation and environmental projects. So exploring the features and characteristics of the hydraulic properties are an important issue in the design of these structures. Various studies have been done about sharp-crested weir. Few studies have been done about the impact of inequality in the upstream and downstream bed level on hydraulic properties. The sharp-crested weirs like other weirs, unequal in the upstream and downstream bed level (such as the Check drop) cause changes on the hydraulic characteristics that must be studied.

Materials and Methods: Research conducted on Hydraulic laboratory which Situated in Research Institute of Soil Conservation and Watershed Management. The experiments were performed in the flume with 14 meters length, width of 60 cm and a height of 50 cm. Sharp crested weirs was built of Plexiglas with a thickness of 6 mm, edge thickness of 2 mm, a height of 20 cm and a length of 60 cm in the workshop and was placed within the flume. Upstream bed level increased with proper materials in three level 5, 10 and 15 cm from floor. At any stage, values of the weir crest level and upstream and downstream water level were recorded for different discharges. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to generalize the results. For this purpose, FLOW 3D software was used for modeling of Free-surface flow over weir. In This software, weir and it's free surface are considered by using Fractional Area Volume Obstacle Representation and Volume Of Fluid methods respectively. The governing equations were Navier-Stokes and continuity equations for incompressible flows. For modeling turbulence, was used Re-Normalization Group (RNG) model.

Results: The results showed a good agreement Between experimental data and numerical simulation. changing procedure of discharge coefficient was the same in both methods. Maximum deference in the H , extracted from two methods, is 5% that is acceptable. The results showed that by increasing the upstream bed level, the upstream flow depth decreases, velocity and Froude number increase. But rising the upstream bed level to 0.75 ($Z/P=0.75$) does not affect on the discharge coefficient. In numerical method, Discharge coefficient values for $H/P \geq 0.5$ can be considered the average value of 0.73 for all cases. With increasing discharge Froude numbers are converging in different ratios of upstream bed level. In the special case where the upstream bed level is risen to Crest (vertical drop or $Z/P=1$), the discharge coefficient value will be 0.6. This value is the lowest between all cases and its magnitude is equal to discharge coefficient of the broad-crested weir. So in this case, the level of water is higher than the same rate of discharge in the other cases and this difference goes up by increasing discharge. In $Z/P=1$ he Froude number will be equal to a fixed value $Fr = 0.94C_d$.

Conclusion: In summary it can be concluded that by increasing the upstream bed level, the Froude number will increase and thus the nappe becomes more horizontal. In the range of $H/P \geq 0.5$, except when the Z/P tend towards one, in other cases, the rising bed level and the increasing H/P have no significant impact on discharge coefficient. In the $Z/P < 0.75$ changes of upstream bed level do not affect on the discharge coefficient. In $Z/P = 1$ both discharge coefficient and the Froude number are constant and their magnitude are respectively 0.6 and 0.56.

Keywords: Vertical drop, Sharp-crested weirs, Discharge coefficient, Froude number, Check Drop

* Corresponding Author; Email: hossein_banejad@yahoo.com