



## بررسی اثر شیب وجوه بالادست و پایین دست سرریز لبه‌پهن بر مشخصات جریان با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت

مصطفی حمزئی<sup>۱</sup>، \*میترا جوان<sup>۲</sup> و افشین اقبال‌زاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه،  
<sup>۲</sup>استادیار گروه مهندسی عمران، پژوهشکده تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی، کرمانشاه  
تاریخ دریافت: ۹۰/۱۰/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۱۲

### چکیده

سرریزهای لبه‌پهن از جمله سازه‌های هیدرولیکی رایج در سیستم‌های آبیاری و طرح‌های برق آبی هستند. تغییر شیب وجه بالادست و پایین دست از عوامل مهمی می‌باشد که می‌تواند شرایط جریان و راندمان تخلیه این سازه‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نسخه 12.0.16 و بهره‌گیری از دو نوع مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $k-\varepsilon$  RNG پروفیل گردان هیدرولیکی و پروفیل سطح آزاد بر روی سرریز و همچنین ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج در سرریزهای با شیب‌های بالادست و پایین دست مختلف شبیه‌سازی شده است. به‌طورکلی نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریز، محدوده جدایی جریان ابتدای تاج کاهش یافته و در نتیجه ضریب دبی افزایش می‌یابد. تغییر شیب وجه پایین دست اثری بر ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج و ضریب دبی نخواهد داشت اما عمق آب در بالادست سرریز و قسمت ابتدایی تاج تا قبل از محل تشکیل عمق بحرانی در سرریز با شیب وجه بالادست تند مقداری بیش‌تر از سرریز با شیب وجه بالادست ملایم می‌باشد. 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 انحنا خطوط جریان و همچنین از بین رفتن ناحیه جدایی جریان ابتدای وجه پایین دست، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** شبیه‌سازی، سرریز لبه‌پهن، فلوئنت، جدایی جریان، پروفیل سطح آزاد

\*مسئول مکاتبه: [javanmi@gmail.com](mailto:javanmi@gmail.com)

مقدمه

سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی به‌طور متداول و گسترده در اندازه‌گیری‌های آبی مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سرریزهای لبه‌پهن، سازه‌هایی برای کنترل عبور جریان هستند که تاج آن‌ها افقی است به‌طوری‌که خطوط جریان بر روی تاج در عمل مستقیم و موازیند. این سازه‌ها معمولاً از جنس بتن ساخته شده و به‌طور عرضی در مسیر جریان آب رودخانه‌ها و کانال‌های اصلی قرار می‌گیرند و در شرایطی که آب‌راهه عریض باشد نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری از کارایی بالاتری برخوردار می‌باشند. از برتری‌های مهم سرریزهای لبه‌پهن مستطیلی می‌توان به مشخصات هندسی ساده، هزینه کم در اجرا و ساخت نسبت به روش‌های دیگر و پایداری قابل‌ملاحظه اشاره کرد. سرریزهای لبه‌پهن اولین بار توسط بازین (۱۸۶۹) مطالعه و پیشنهاد گردید. بعدها سایر پژوهش‌گران در مورد اصول هیدرولیکی حاکم بر سرریزهای لبه‌پهن مطالعات خود را ادامه داده و توصیه‌های جدیدی را ارائه نمودند. وودبرن (۱۹۳۲) نشان داد که با گرد کردن دماغه بالادست سرریز لبه‌پهن، ضریب شدت جریان تا ۸ درصد افزایش می‌یابد. هاریسون (۱۹۶۷) به بررسی نظری اثر ضخامت لایه مرزی در ضریب دبی سرریز و مقایسه آن با اطلاعات آزمایشگاهی سایر پژوهش‌گران پرداخت. ایزاک (۱۹۸۱) تأثیرات لایه مرزی آرام را بر روی مدلی از سرریز لبه‌پهن مورد بررسی قرار داد که نتایج به‌دست آمده توسط وی بیانگر تأثیر قابل‌ملاحظه لایه مرزی بر خصوصیات جریان می‌باشد. باس و همکاران (۱۹۸۴) و باس (۱۹۸۹) رابطه‌هایی برای دبی عبوری از سرریزهای لبه‌پهن ارائه نمودند. رامامورتی و همکاران (۱۹۸۸) با انجام آزمایش‌هایی، اثرات گرد کردن گوشه بالادست سرریز لبه‌پهن را بر ضریب دبی و مشخصات جریان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود گردش‌دگی دماغه بالادست سرریز باعث جدا نشدن جریان بر روی تاج خواهد گردید. هاگر (۱۹۹۱) با مطالعه پدیده جدایی جریان در ابتدای تاج، رابطه‌ای برای پروفیل ناحیه جدایی در سرریزهای با وجوه قائم ارائه نمود. هاگر و شوال (۱۹۹۴) سرریزهای لبه‌پهن با وجوه قائم را مورد مطالعه قرار دادند. فریتز و هاگر (۱۹۹۸) با پژوهش روی سرریز با شیب یکسان در بالادست و پایین‌دست ( $2H:1V$ ) ثابت کردند که با کاهش جدایی جریان در گوشه بالادست تاج، عملکرد سرریز بهبود می‌یابد. یک وضعیت بحرانی که حتماً باید مورد توجه واقع شود، احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون به‌خصوص در جریان‌های با سرعت زیاد در قسمت ابتدایی وجه پایین‌دست سرریز است که می‌تواند موجب ایجاد خسارت‌های شدید و یا شکست سازه گردد (فرتنر، ۲۰۰۳؛ اینوزمسو، ۱۹۶۹). سرریز همچنین باید قابلیت عبور دبی مورد نیاز در شرایط وقوع جریان شدید را داشته باشد تا بتواند از شکست و یا طغیان جریان در سازه‌های دیگر جلوگیری کند. ضریب دبی

سرریزهای لبه‌پهن با شکل سطح مقطع مستطیلی مرکب با انجام آزمایش‌های گسترده‌ای توسط گاگس و همکاران (۲۰۰۶) مورد مطالعه قرار گرفت. در بیش‌تر مطالعاتی که روی سرریزهای لبه‌پهن با وجوه شیب‌دار صورت گرفته، شیب وجوه بالادست و پایین‌دست یکسان است (وضعیت متقارن). در موقعیت‌های خاص می‌توان به‌منظور رسیدن به خصوصیات هیدرولیکی مناسب‌تر، تغییراتی در جهت اصلاح شیب‌های بالادست و پایین‌دست سرریزها اعمال نمود. سارجسن و پرسی (۲۰۰۹) مطالعاتی بر روی سرریزها با شیب‌های متفاوت در بالادست و پایین‌دست تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان انجام داده‌اند. خسروجردی و همکاران (۲۰۰۲) با انجام آزمایش‌هایی بر روی چند سرریز لبه‌پهن اثر طول تاج بر روی ضریب دبی را مورد بررسی قرار دادند.

استفاده از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان سبب کاهش هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی می‌گردد. سارکر و رودس (۲۰۰۴) با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و  $k-\varepsilon$  RNG پروفیل سطح آزاد بر روی سرریز لبه‌پهن مستطیلی با گوشه‌های تیز را شبیه‌سازی نموده و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه کردند. لارسن و همکاران (۲۰۰۸) به‌منظور ارزیابی توانایی مدل‌های عددی، با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد پروفیل فشار بر روی سرریز و همچنین پروفیل سطح آزاد بر روی آن را شبیه‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی خود مقایسه نمودند.

در مطالعات بالا به‌طور عمده یکی از مشخصه‌های جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن مورد بررسی قرار گرفته است اما در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نسخه 12.0.16 و بهره‌گیری از دو نوع مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $k-\varepsilon$  RNG به بررسی مشخصه‌های مختلفی مانند پروفیل گرادیان هیدرولیکی، پروفیل سطح آزاد، ضریب دبی و همچنین ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج در سرریزهای با شیب‌های بالادست و پایین‌دست مختلف پرداخته شده است.

**معادله‌های حاکم بر جریان:** قوانین حاکم بر جریان عبارتند از قانون بقای جرم و بقای مومنت که در حالت جریان آشفته و به‌صورت متوسط‌گیری شده در زمان، معادله‌های رینولدز به شکل زیر از آنها استخراج می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(p)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\overline{\rho u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (2)$$

که در آن‌ها،  $u_i$ : مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$  ( $i, j = 1, 2$ ) به ترتیب برای جهت‌های  $x$  و  $y$ ،  $p$ : فشار،  $\rho$ : چگالی،  $\mu$ : ویسکوزیته دینامیکی و جمله  $\overline{\rho u_i u_j'}$  تنش‌های رینولدز می‌باشند. مجهولات این معادله‌ها در دو بعد شامل مؤلفه‌های سرعت در دو جهت  $(u, v)$  و فشار می‌باشند. از طرفی معادله مومتم شامل سه مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، بنابراین سیستم معادله‌های بالا کامل نیست و باید با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنش‌های رینولدز محاسبه شوند. در این مقاله از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شده است. در این مدل‌ها، یک معادله انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و یک معادله انتقال برای اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ( $\varepsilon$ ) حل می‌شود. تفاوت دو مدل آشفتگی بالا به‌طور عمده در معادله  $\varepsilon$  است. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد در اعداد رینولدز بالا بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد و در استخراج معادله‌ها  $k$  و  $\varepsilon$  آن چنین فرض شده است که جریان کاملاً متلاطم بوده و اثر لزجت مولکولی بسیار ناچیز باشد. در مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG یک جمله اضافی در معادله  $\varepsilon$  وارد می‌شود که باعث افزایش دقت محاسباتی مدل در جریان‌های همراه با کرنش‌های بزرگ (مثل جریان در لایه‌های مرزی قوس‌دار و یا گذرگاه‌های واگرا) می‌گردد.

در این پژوهش به‌منظور شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده شده است. در روش VOF از یک تابع متغیر به نام  $\alpha$  استفاده می‌شود که جزو حجم آب در سلول محاسباتی است. اگر  $\alpha$  برابر ۱ باشد نشان‌دهنده پر بودن سلول از آب می‌باشد و اگر  $\alpha$  برابر صفر باشد یعنی سلول پر از هوا است. برای  $0 < \alpha < 1$  درصدی از سلول آب و درصدی از آن هوا است. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد. در این پژوهش، سطح آزاد جریان در جزء حجمی آب برابر ۰/۵ تعریف شده است. با حل معادله پیوستگی زیر برای جزء حجمی آب  $\alpha$ ، جزء حجمی در کل میدان حل تعیین می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

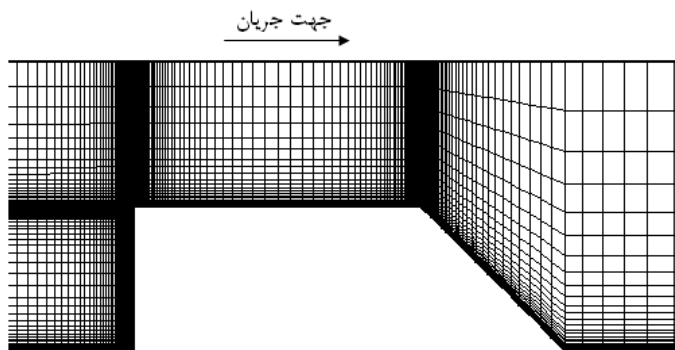
**حل عددی معادله‌ها:** همان‌طور که اشاره شد برای حل معادله‌ها از نرم‌افزار فلونت استفاده شده است. این نرم‌افزار کل میدان جریان را به‌صورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد. از معادله‌های حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفصال، معادله‌های جبری منفصل می‌شوند. به‌منظور تهیه هندسه میدان جریان و شبکه‌بندی آن از نرم‌افزار

پیش‌پردازنده گمبیت استفاده شده است. از طرح پرست<sup>۱</sup> برای گسسته‌سازی فشار، طرح کوئیک برای انفضال جملات جابه‌جایی معادله‌های مومنتم، طرح آپ ویند مرتبه اول برای انفضال جملات جابه‌جایی معادله‌های آشفتگی و همچنین از الگوریتم پیرو برای کوپل نمودن سرعت و فشار استفاده گردیده است. همچنین به‌منظور جلوگیری از واگرایی حل، ضرایب زیر تخفیف کوچک‌تر از ۱ برای فشار، مومنتم، انرژی جنبشی آشفتگی ( $k$ ) و نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفتگی ( $\epsilon$ ) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این پژوهش گام‌های زمانی برای حل مسأله  $0.1/0.1$  ثانیه انتخاب شده است.

**مشخصات میدان حل و شبکه‌بندی آن:** در این مقاله برای صحت‌سنجی مدل عددی از آزمایش‌های انجام شده توسط سارجسن و پرسى (۲۰۰۹) بهره گرفته شده است که مشخصات میدان حل مشابه مدل آزمایشگاهی می‌باشد. سارجسن و پرسى (۲۰۰۹) از یک فلوم آزمایشگاهی افقی با عرض ۲۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر و طول کل ۵/۴ متر استفاده نمودند. در این فلوم یک سرریز مستطیلی لبه‌پهن با گوشه‌های وجوه تیز و سطوح صاف، با عرض تاج ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۲۵ متر قرار داده شده است. این سرریز از ۳ بخش وجه بالادست، وجه پایین‌دست و تاج مستطیلی تشکیل شده که شیب‌های وجوه بالادست و پایین‌دست متغیر می‌باشند. سارجسن و پرسى (۲۰۰۹) چهار ترکیب شیب مختلف را مورد آزمایش قرار دادند که شامل سرریز با شیب وجه بالادست  $2H:1V$  و شیب وجه پایین‌دست  $1H:1V$ ، سرریز با شیب وجه بالادست  $1H:1V$  و شیب وجه پایین‌دست  $2H:1V$ ، سرریز با شیب وجه بالادست قائم و شیب وجه پایین‌دست  $1H:1V$  و سرریز با شیب وجه بالادست  $1H:1V$  و شیب وجه پایین‌دست قائم می‌باشد. در این مقاله از نتایج آزمایش سرریز با شیب وجه بالادست قائم و شیب وجه پایین‌دست  $1H:1V$  و سرریز با شیب وجه بالادست  $1H:1V$  و شیب وجه پایین‌دست قائم استفاده شده است. همچنین شبیه‌سازی عددی به‌صورت دوبعدی در قائم انجام شده است و شبکه‌بندی میدان حل در عمق غیریکنواخت است و در نواحی نزدیک جداره از شبکه ریز استفاده گردیده است. فاصله اولین سلول از دیواره به‌نحوی انتخاب شده است که اولین سلول در ناحیه زیر لایه لزج قرار گیرد یعنی پارامتر بدون بعد  $y^+$  که به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود مقداری کوچک‌تر از ۵ خواهد داشت.

$$y^+ = \frac{y_1 \sqrt{\tau/\rho}}{\nu} \quad (۴)$$

که در آن،  $y_1$ : فاصله مرکز سلول از دیواره در جهت عمود بر دیواره،  $\tau$ : تنش برشی دیواره و  $v$ : لزجت سینماتیکی است. شبکه‌بندی در طول نیز غیریکنواخت در نظر گرفته شده است. ضریب افزایش شبکه از گوشه‌های تاج به سمت مرکز تاج و همچنین از گوشه‌های تاج به سمت بالادست و پایین دست سرریز برابر  $1/1$  در نظر گرفته شده است. دلیل انتخاب این نوع الگوی شبکه‌بندی افزایش دقت شبیه‌سازی افت فشار و جدایی جریان در گوشه‌های سرریز است. نحوه شبکه‌بندی میدان حل در شکل ۱ نشان داده شده است.



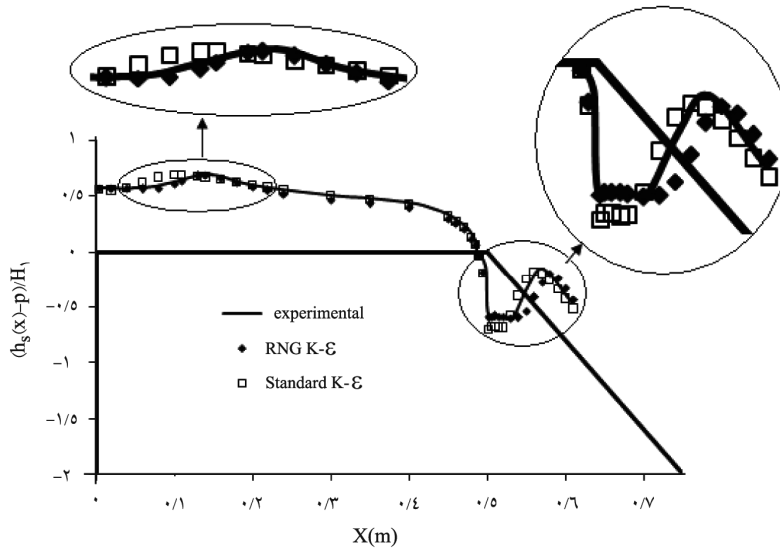
شکل ۱- نحوه شبکه‌بندی میدان حل.

**شرایط مرزی:** شرایط مرزی در مدل عددی منطبق بر آزمایش‌های انجام شده است. همان‌طور که گفته شد، برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان از روش دوفازی VOF استفاده شده است. در این روش عمق فاز آب و هوا معادل  $0/5$  متر در نظر گرفته شده که عمق فاز آب برابر با مقادیر آزمایشگاهی قرار داده شده است. با توجه به مشخص بودن دبی جریان ورودی و عمق آب در بالادست سرریز و همچنین عرض کانال آزمایشگاهی می‌توان سرعت جریان ورودی فاز آب را محاسبه نمود. در مرز ورودی سرعت در فاز هوا برابر با  $0/00001$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در مرز خروجی فاز آب و فاز هوا شرط مرزی فشار خروجی، در مرز فوقانی فاز هوا شرط مرزی تقارن و برای مدل‌سازی کف کانال و سرریز از شرط مرزی دیواره استفاده شده است. در مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد،  $k-\epsilon$  RNG برای شبیه‌سازی جریان‌های آشفته در نزدیکی مرزهای جامد از تابع Enhanced wall treatment استفاده شده است.

## نتایج و بحث

در این بخش ابتدا توانایی مدل‌های آشفستگی  $k-\varepsilon$  استاندارد،  $k-\varepsilon$  RNG در شبیه‌سازی پروفیل گرادیان هیدرولیکی بر روی سرریز بررسی و مطالعه گردیده است. در شکل‌های این بخش شیب قائم با حرف V و شیب  $1H:1V$  با حرف B و قسمت مستطیلی تاج با حرف R نشان داده شده است. بنابراین سرریز با شیب وجه بالادست قائم و وجه پایین‌دست  $1H:1V$  با علامت VRB و سرریز با شیب وجه بالادست  $1H:1V$  و شیب وجه پایین‌دست قائم با علامت BRV نشان داده شده است. همچنین  $x$  فاصله از ابتدای پاشنه بالادست،  $h_s(x)$ : هد پیزومتریک (مجموع ارتفاع از کف کانال و هد فشار) بر روی سرریز در فاصله  $x$  ارتفاع تاج سرریز،  $w$ : عرض تاج سرریز،  $H_1$ : فاصله خط انرژی تا تاج در بالادست سرریز و  $Q$ : دبی عبوری از سرریز بر حسب لیتر بر ثانیه می‌باشند. در شکل ۲ پروفیل گرادیان هیدرولیکی بدون بعد شبیه‌سازی شده بر روی سرریز VRB در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سارجسن و پرس (۲۰۰۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در این حالت در قسمت ابتدایی تاج یک افزایش و کاهش موضعی در پروفیل گرادیان هیدرولیکی رخ می‌دهد به طوری که این پروفیل پس از رسیدن به یک مقدار ماکزیمم در قسمت ابتدایی تاج، کاهش یافته و پس از آن و در طول تاج تقریباً ثابت است. در گوشه پایین‌دست تاج نیز پروفیل گرادیان هیدرولیکی دچار افت گردیده است. با توجه به شکل ۲ می‌توان گفت که هر دو مدل آشفستگی، مقدار گرادیان هیدرولیکی ماکزیمم ابتدای تاج را با دقت یکسانی شبیه‌سازی نموده‌اند. طبق نتیجه آزمایشگاهی، مقدار پروفیل گرادیان هیدرولیکی ماکزیمم برابر  $0.7$  است و خطای هر دو مدل آشفستگی نسبت به نتیجه آزمایشگاهی برابر  $1/43$  درصد می‌باشد. اما مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  RNG محل گرادیان هیدرولیکی ماکزیمم در ابتدای تاج را مناسب‌تر از مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  استاندارد شبیه‌سازی نموده است. به طوری که طبق نتیجه آزمایشگاهی این محل در فاصله  $15$  سانتی‌متری از ابتدای تاج قرار دارد، مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  استاندارد این محل را در فاصله  $11$  سانتی‌متری و مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  RNG در فاصله  $14$  سانتی‌متری از ابتدای تاج پیش‌بینی نموده است. همچنین مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  RNG میزان افت فشار در گوشه پایین‌دست تاج را مناسب‌تر از مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  استاندارد شبیه‌سازی نموده است. طبق نتیجه آزمایشگاهی مقدار پروفیل گرادیان هیدرولیکی حداقل در گوشه پایین‌دست معادل  $0.59$  است. مقدار پروفیل گرادیان هیدرولیکی حداقل پیش‌بینی شده توسط مدل آشفستگی  $k-\varepsilon$  RNG منطبق بر نتیجه آزمایشگاهی است در حالی که مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل آشفستگی

$k-\varepsilon$  استاندارد نسبت به نتیجه آزمایشگاهی ۱۹ درصد خطا دارد. اما مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد مقدار پروفیل در ناحیه مرکزی تاج و همچنین ناحیه بعد از فشار حداقل در گوشه پایین دست تاج را مناسب‌تر از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG پیش‌بینی می‌نماید.

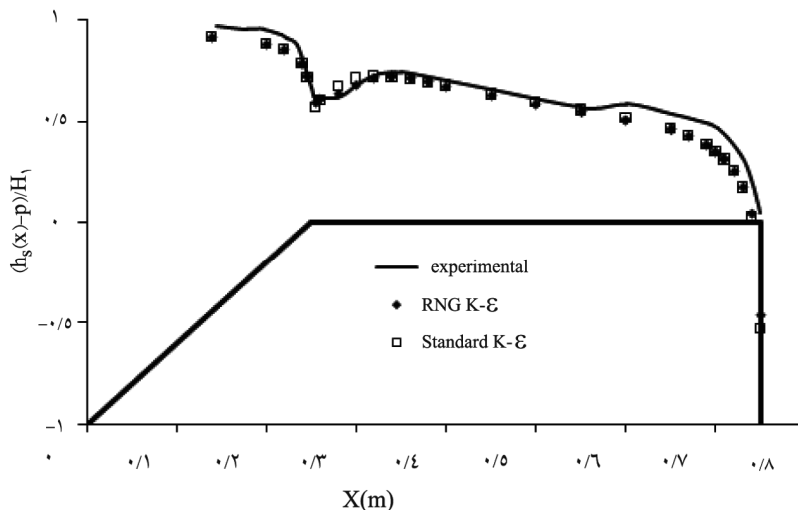


شکل ۲- پروفیل گرادیان هیدرولیکی بدون بعد بر روی سرریز VRB در  $Q = 14/9$  لیتر بر ثانیه.

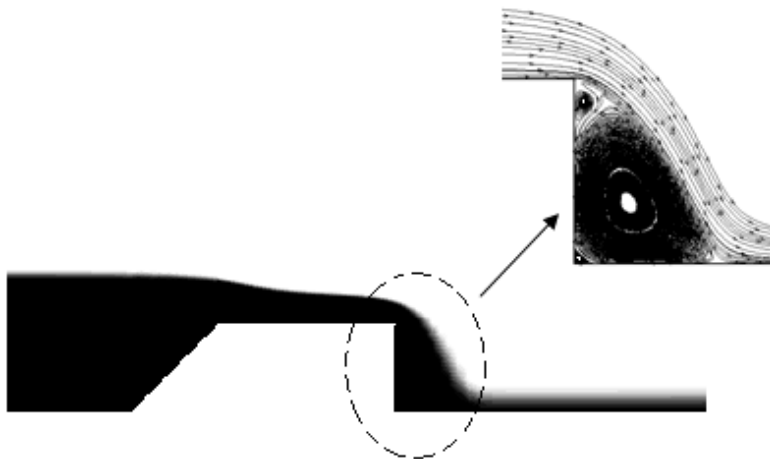
در شکل ۳ پروفیل گرادیان هیدرولیکی بدون بعد شبیه‌سازی شده بر روی سرریز BRV در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی سارجسن و پرس (۲۰۰۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در محل ریزش جریان در قسمت انتهایی تاج اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی وجود دارد. طبق نتایج آزمایشگاهی در گوشه پایین دست تاج، جریان از تاج جدا شده و به صورت جهشی وارد کانال در پایین دست سرریز می‌شود به طوری که در قسمت پایین جریان جهشی هوا وجود دارد و بنابراین مقدار فشار در گوشه پایین دست برابر صفر است. اما نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که فشار منفی قابل ملاحظه‌ای در گوشه پایین دست وجود دارد. به منظور بررسی موضوع در شکل ۴ الگوی جریان شبیه‌سازی شده عبوری از روی سرریز و همچنین خطوط جریان در گوشه پایین دست سرریز نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل از نتایج



مربوط به شبیه‌سازی با مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شده است. همان‌طورکه در این شکل مشاهده می‌شود بر خلاف نتایج آزمایشگاهی در قسمت پایین جریان جهشی هوا وجود نداشته و گردابه‌هایی در مجاورت وجه قائم پایین‌دست تشکیل شده که باعث ایجاد فشار منفی قابل‌ملاحظه در گوشه پایین‌دست تاج می‌شوند. به‌منظور نزدیک کردن شرایط مدل‌سازی به شرایط آزمایشگاهی یک حفره مربع شکل در مجاورت وجه قائم پایین‌دست در نظر گرفته شده است و با اعمال شرط مرزی فشار صفر بر اضلاع مربع یاد شده شرایط هوادهی در پشت جریان جهشی فراهم گردیده است. طول ضلع مربع ۱ سانتی‌متر، فاصله ضلع مجاور وجه قائم پایین‌دست از این وجه ۱ سانتی‌متر و فاصله ضلع افقی فوقانی مربع از تراز تاج سرریز ۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۵ الگوی جریان عبوری شبیه‌سازی شده از روی سرریز و همچنین الگوی خطوط جریان در پایین‌دست سرریز پس از هوادهی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل از نتایج مربوط به شبیه‌سازی با مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شده است. همان‌طورکه در این شکل مشاهده می‌شود در قسمت پایین جریان جهشی تا یک ارتفاع مشخص آب و پس از آن تا مرز تحتانی جریان جهشی هوا وجود دارد و به این ترتیب الگوی جریان عبوری از روی سرریز مشابه الگوی آزمایشگاهی گردیده است.

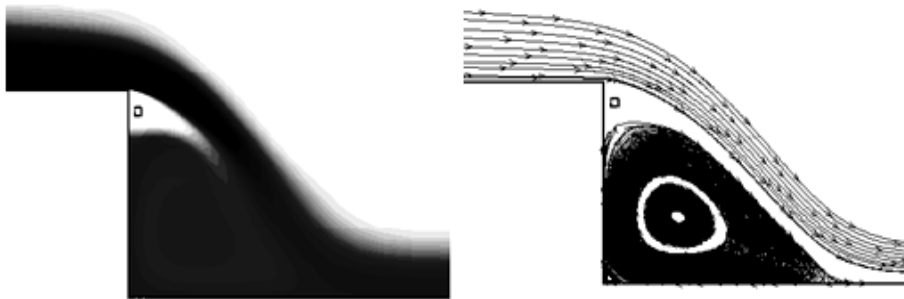


شکل ۳- پروفیل گرادیان هیدرولیکی بدون بعد بر روی سرریز BRV در  $Q = 16/4$  لیتر بر ثانیه.

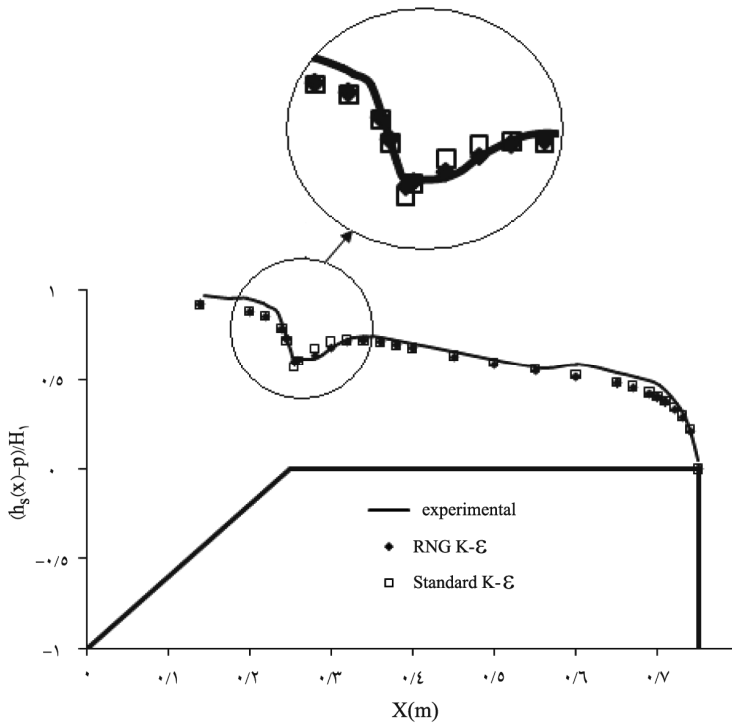


شکل ۴- الگوی جریان عبوری شبیه‌سازی شده از روی سرریز BRV.

شکل ۶ پروفیل گرادیان هیدرولیکی بدون بعد شبیه‌سازی شده بر روی سرریز BRV پس از هوادهی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان گفت که مقدار پروفیل در قسمت انتهایی سرریز اصلاح شده و منطبق با نتایج آزمایشگاهی گردیده است. همچنین مقدار پروفیل تا فاصله ۱۰ سانتی‌متری قبل از گوشه پایین‌دست نیز به مقدار متناظر آزمایشگاهی نزدیک‌تر شده است. اما در بالادست فاصله بالا، هوادهی اثر محسوسی بر مقدار پروفیل گرادیان هیدرولیکی نداشته است. در مجموع مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG، افت فشار در گوشه بالادست تاج را اندکی مناسب‌تر از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد شبیه‌سازی نموده است. طبق نتیجه آزمایشگاهی مقدار پروفیل گرادیان هیدرولیکی در گوشه بالادست تاج برابر  $0/62$  است. خطای مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG نسبت به نتیجه آزمایشگاهی برابر  $4/84$  درصد و خطای مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد برابر  $8/08$  درصد می‌باشد. در سایر نواحی، دقت دو مدل آشفتگی بالا در پیش‌بینی پروفیل گرادیان هیدرولیکی به نسبت یکسان است.



شکل ۵- الگوی جریان عبوری از روی سرریز BRV پس از هوادهی.



شکل ۶- پروفیل گرادیان هیدرولیکی بدون بعد بر روی سرریز با شیب بالادست  $1H : 1V$  پس از هوادهی در  $Q = 16/4$  لیتر بر ثانیه.

با مقایسه پروفیل‌های گرادیان هیدرولیکی بر روی دو سرریز VRB و BRV می‌توان گفت که در سرریز VRB در گوشه پایین‌دست به دلیل انحنای خطوط جریان، افت فشار قابل‌ملاحظه‌ای وجود دارد که می‌تواند در دبی‌های بالا منجر به وقوع پدیده کاویتاسیون گردد اما در سرریز BRV به دلیل وقوع جریان جهشی در گوشه پایین‌دست تاج، مقدار فشار صفر است. همچنین در سرریز BRV در گوشه بالادست به دلیل انحنای خطوط جریان مقداری افت فشار مشاهده می‌شود اما علامت فشار در این گوشه مثبت است و احتمال وقوع کاویتاسیون در این محل وجود ندارد.

در ادامه به بررسی ناحیه جدایی جریان در ابتدای تاج و اثر شیب دار کردن وجوه بالادست و پایین‌دست بر روی این ناحیه پرداخته شده است. هنگام عبور جریان از روی سرریز در گوشه بالادست تاج پدیده جدایی خطوط جریان مشاهده می‌گردد. جدایی خطوط جریان در روی سرریز، تغییراتی در رژیم جریان ایجاد می‌کند که این تغییرات باعث ایجاد نیروی مقاوم در برابر جریان می‌شود. در این بخش و بخش‌های بعد برای شبیه‌سازی از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شده است. همچنین در شکل‌های این بخش مبدأ مختصات گوشه بالادست تاج است بنابراین  $x$ : فاصله افقی از گوشه بالادست تاج و  $y$ : فاصله عمودی از تاج سرریز،  $X = x/H_1$  و  $Y = y/H_1$  است. هاگر (۱۹۹۱) رابطه زیر را برای پروفیل ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج در سرریزهای با وجوه قائم ارائه نمود. لازم به ذکر است که این رابطه شکل تبدیل‌یافته پروفیل جدایی جریان را ارائه می‌نماید.

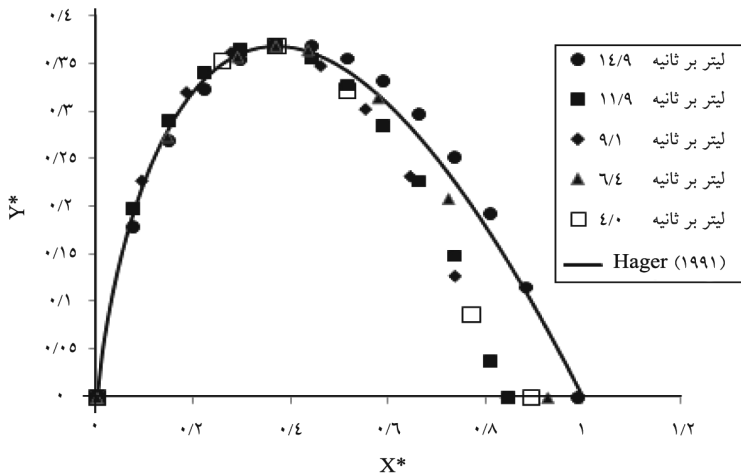
$$Y^* = -X^* LNX^* \quad (5)$$

که در آن،

$$X^* = X(\exp[-1]/X_{SM}) \quad (6)$$

$$Y^* = Y(\exp[-1]/Y_{SM}) \quad (7)$$

که در آن‌ها،  $(X_{SM}, Y_{SM})$  مختصات بدون بعد نقطه ماکزیمم جدایی جریان می‌باشد. در شکل ۷ مقادیر  $X^*$  در مقابل  $Y^*$  مربوط به شبیه‌سازی پروفیل جدایی جریان در سرریز با وجه بالادست قائم و وجه پایین‌دست  $1H:1V$  برای ۵ دبی مختلف در مقایسه با رابطه ارائه شده توسط هاگر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود به‌خصوص در نقطه ماکزیمم پروفیل جدایی جریان و نقاط بالادست آن، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و رابطه هاگر وجود دارد. در قسمت‌های انتهایی پروفیل مقداری اختلاف بین نتایج این شبیه‌سازی با رابطه ارائه شده توسط هاگر مشاهده می‌شود.



شکل ۷- پروفیل تبدیل یافته جدایی جریان ابتدای تاج در سرریز با وجه بالادست قائم و وجه پایین دست  $W : H$ .

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با شیب‌دار کردن وجه بالادست سرریز، اثر لبه تاج بر جریان ورودی تقلیل می‌یابد که متناسب با کم شدن تأثیر لبه تاج، کم شدن محدوده جریان‌های گردابی و در نتیجه کاهش تأثیر جریان‌های برگشتی مشاهده می‌شود. در شکل ۸ اثر تغییر شیب وجه بالادست، با ثابت بودن شیب وجه پایین‌دست، بر پروفیل بدون بعد جدایی جریان نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود بیش‌ترین محدوده جدایی جریان مربوط به سرریز با وجه بالادست قائم می‌باشد و در سرریز با شیب بالادست  $W : H = 1/5$  هیچ‌گونه جدایی جریان مشاهده نمی‌شود.

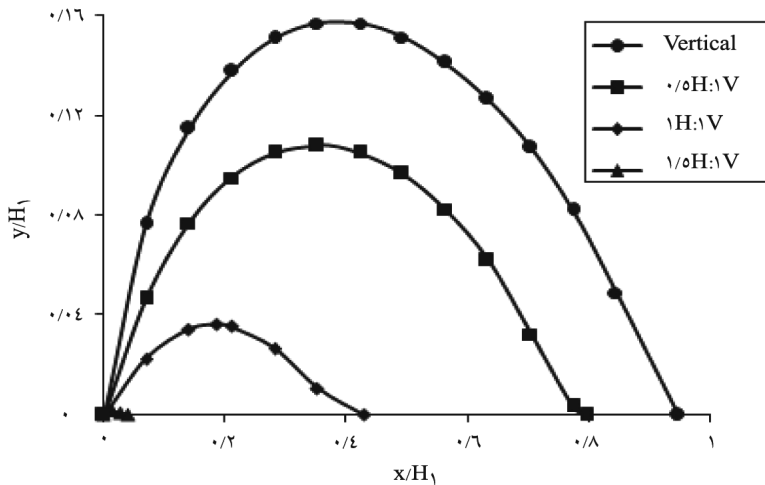
در شکل ۹ اثر تغییر شیب وجه بالادست سرریز بر ضریب دبی ( $C_D$ ) نشان داده شده است. معادله دبی عبوری از سرریزهای لبه‌پهن به شکل زیر بیان می‌شود.

$$Q = C_D b \sqrt{2g} H_1^3 \quad (8)$$

که در آن،  $Q$ : دبی عبوری از سرریز،  $C_D$ : ضریب دبی،  $b$ : عرض کانال و  $H_1$ : عمق آب بالادست از روی تاج سرریز می‌باشد.  $H_1$  به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

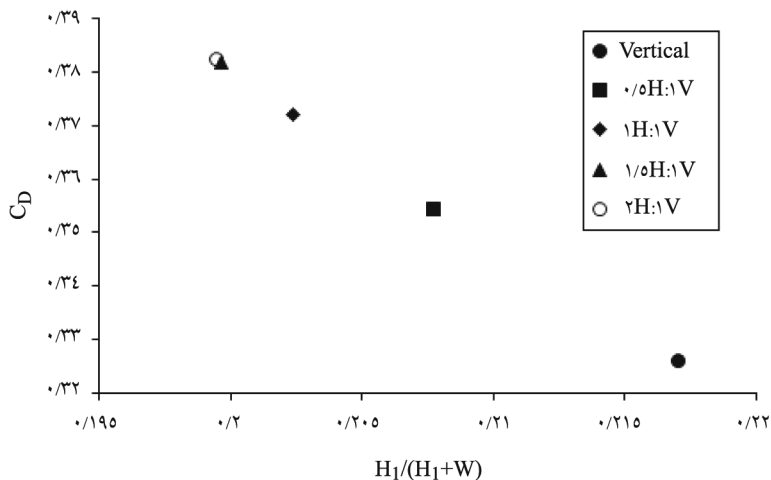
$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gb^2(h_1 + p)^2} \quad (9)$$

با توجه به بالا و با مشخص بودن دبی عبوری از سرریز، عرض کانال، ارتفاع سرریز و عمق آب بالادست، ضریب دبی محاسبه می‌شود. همان‌طورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود کم‌ترین مقدار ضریب دبی مربوط به سرریز با شیب بالادست قائم می‌باشد.



شکل ۸- اثر تغییر شیب بالادست بر ناحیه جدایی جریان در سرریزهای با شیب پایین دست  $H:V$  در  $Q = 14/9$  لیتر بر ثانیه.

با ملایم شدن شیب بالادست به دلیل کاهش ناحیه جدایی جریان، ضریب دبی افزایش می‌یابد به طوری که در سرریز با شیب وجه بالادست  $1/5H:V$  که ناحیه جدایی جریان به طور کامل از بین رفته است بیش‌ترین مقدار ضریب دبی نیز مشاهده می‌شود. پس از از بین رفتن ناحیه جدایی جریان، با ملایم‌تر کردن شیب بالادست تغییر محسوسی در ضریب دبی ایجاد نمی‌شود. همان‌طورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود ضریب دبی در سرریز با شیب وجه بالادست  $2H:V$  منطبق بر ضریب دبی سرریز با شیب بالادست  $1/5H:V$  می‌باشد.

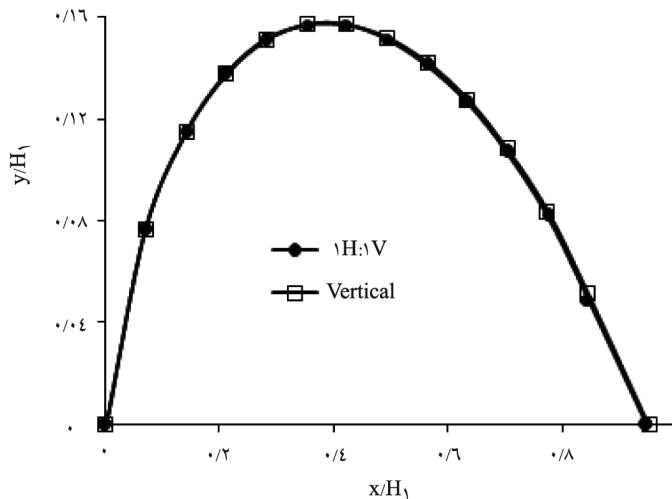


شکل ۹- اثر تغییر شیب وجه بالادست بر ضریب دبی در سرریزهای با شیب پایین دست ۱H:۱V در  $Q = 14/9$  لیتر بر ثانیه.

در ادامه اثر تغییر شیب وجه پایین دست بر ناحیه جدایی جریان بررسی شده است. شکل ۱۰ پروفیل بدون بعد جدایی جریان در دو سرریز با شیب وجوه پایین دست ۱H:۱V و قائم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با تغییر شیب وجه پایین دست از حالت ۱H:۱V به حالت قائم پروفیل جدایی جریان بدون تغییر باقی مانده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار ضریب دبی برای هر دو سرریز بالا یکسان و برابر ۰/۳۲۶ است. بنابراین تغییر شیب وجه پایین دست تأثیری بر ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج و ضریب دبی نخواهد داشت.

در ادامه به بررسی شیب‌دار کردن وجوه بالادست و پایین دست سرریز بر پروفیل سطح آزاد جریان و موقعیت تشکیل عمق بحرانی پرداخته شده است. با داشتن دبی در واحد عرض کانال و استفاده از رابطه ۱۰، عمق بحرانی مشخص می‌گردد.

$$Y_C = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (10)$$

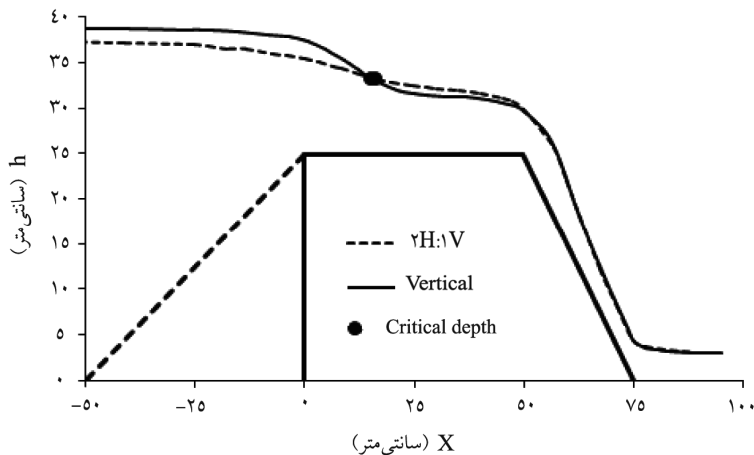


شکل ۱۰- اثر تغییر شیب وجه پایین دست بر ناحیه جدایی جریان در سرریزهای با شیب بالادست قائم در  $Q = 14/9$  لیتر بر ثانیه.

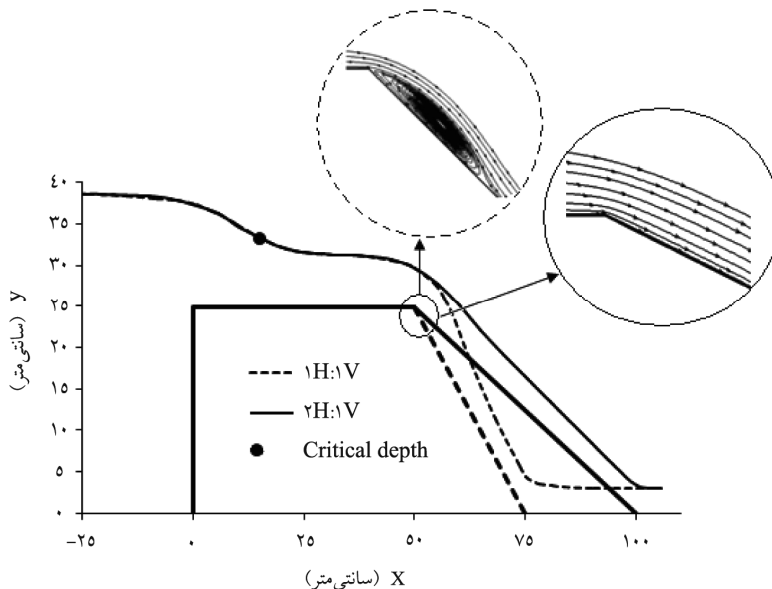
با داشتن عمق بحرانی می‌توان موقعیت تشکیل آن را از روی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی به دست آورد. در شکل ۱۱ پروفیل سطح آزاد بر روی سرریزهای با شیب وجه بالادست قائم و  $2H:1V$  و همچنین موقعیت تشکیل عمق بحرانی بر روی آن‌ها مورد مقایسه واقع شده است. در شکل‌های این بخش  $h$  عمق آب از کف کانال می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود تغییر شیب در وجه بالادست تغییر محسوسی در موقعیت تشکیل عمق بحرانی ایجاد نمی‌کند. فاصله محل تشکیل عمق بحرانی از ابتدای تاج در سرریزهای با شیب وجه بالادست قائم و  $2H:1V$  به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۵/۸ سانتی‌متر است. همچنین پروفیل سطح آزاد آب در پایین دست برای هر دو سرریز تقریباً یکسان است. اما عمق آب در بالادست و قسمت ابتدایی تاج سرریز تا قبل از محل تشکیل عمق بحرانی در سرریز با شیب وجه بالادست قائم مقداری بیش‌تر از سرریز با شیب وجه بالادست  $2H:1V$  می‌باشد. اما بعد از محل تشکیل عمق بحرانی تا قسمت‌های انتهایی تاج، عمق آب در سرریز با شیب وجه بالادست  $2H:1V$  اندکی بیش‌تر از سرریز با شیب وجه بالادست قائم می‌باشد. در ضمن افت سطح آب در ابتدای تاج در سرریز با شیب وجه بالادست  $2H:1V$  نسبت به سرریز با شیب وجه بالادست قائم با شیب ملایم‌تری صورت می‌گیرد.



در پایین دست تاج در محل ریزش جریان، شرایط پروفیل سطح آزاد جریان متناسب با تغییر شیب پایین دست تغییر می کند. در شکل ۱۲ پروفیل سطح آزاد بر روی سرریز با شیب وجه پایین دست  $۱H:۱V$  و  $۲H:۱V$  مورد مقایسه واقع شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود میزان انحنا خطوط جریان در محل ریزش جریان در سرریز با شیب وجه پایین دست  $۲H:۱V$  کم تر از سرریز با شیب تندتر  $۱H:۱V$  است. بنابراین مقدار فشار منفی ناشی از انحنای خطوط جریان در انتهای تاج در سرریز با شیب وجه پایین دست  $۲H:۱V$  کاهش می یابد. همچنین در سرریز با وجه پایین دست  $۱H:۱V$  یک ناحیه جدایی جریان در قسمت ابتدای وجه پایین دست در ناحیه فشار منفی به وجود آمده است. در دبی های بالا در این ناحیه احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون وجود دارد. اما در سرریز با شیب وجه پایین دست  $۲H:۱V$  این ناحیه جدایی جریان وجود ندارد. بنابراین 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 می یابد. با توجه به شکل ۱۲ می توان گفت که تغییر شیب وجه پایین دست موقعیت تشکیل عمق بحرانی را تغییر نمی دهد به طوری که فاصله محل تشکیل عمق بحرانی از ابتدای تاج برای هر دو سرریز برابر با ۱۵ سانتی متر است.



شکل ۱۱- اثر تغییر شیب وجه بالادست بر پروفیل سطح آزاد و موقعیت تشکیل عمق بحرانی در سرریزهای با شیب وجه پایین دست  $۱H:۱V$  و  $Q = ۱۴/۹$  لیتر بر ثانیه.



شکل ۱۲- اثر تغییر شیب وجه پایین‌دست بر پروفیل سطح آزاد و موقعیت تشکیل عمق بحرانی در سرریزهای با شیب وجه بالادست قائم و  $Q = 14/9$  لیتر بر ثانیه.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا به ارزیابی توانایی مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی پروفیل گرادبان هیدرولیکی بر روی سرریزهای لبه‌پهن پرداخته شده و سپس اثر شیب‌دار کردن وجوه بالادست و پایین‌دست سرریز بر ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج، پروفیل سطح آزاد و موقعیت تشکیل عمق بحرانی بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی عددی در بخش‌های مختلف به صورت زیر است:

ارزیابی توانایی مدل‌های آشفتگی در شبیه‌سازی پروفیل گرادبان هیدرولیکی: مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG به طور عمده فشار حداقل در گوشه پایین‌دست سرریزها و همچنین افزایش و کاهش موضعی پروفیل گرادبان هیدرولیکی در ابتدای تاج سرریزهای با وجه بالادست قائم را بهتر پیش‌بینی می‌نماید. اما دقت مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استاندارد به طور عمده در شبیه‌سازی پروفیل گرادبان هیدرولیکی در ناحیه بعد از فشار حداقل در گوشه پایین‌دست تاج بیش‌تر است.

اثر تغییر شیب بر احتمال وقوع پدیده کاویتاسیون: در سرریز VRB در گوشه پایین‌دست به دلیل انحنا خطوط جریان، افت فشار قابل ملاحظه‌ای وجود دارد که می‌تواند در دبی‌های بالا منجر به وقوع

پدیده کاویتاسیون گردد اما در سرریز BRV به دلیل وقوع جریان جهشی در گوشه پایین دست تاج، مقدار فشار صفر است. همچنین در سرریز BRV در گوشه بالادست به دلیل انحنای خطوط جریان مقداری افت فشار مشاهده می شود اما علامت فشار در این گوشه مثبت است و احتمال وقوع کاویتاسیون در این محل وجود ندارد. 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 می یابد.

**اثر تغییر شیب بر موقعیت تشکیل عمق بحرانی:** تغییر شیب وجه پایین دست موقعیت تشکیل عمق بحرانی را تغییر نمی دهد همچنین تغییر شیب در وجه بالادست نیز تغییر محسوسی در موقعیت تشکیل عمق بحرانی ایجاد نمی کند.

**اثر تغییر شیب بر پدیده جدایی جریان ابتدای تاج:** با شیب دار کردن وجه بالادست سرریز، اثر لبه تاج بر جریان ورودی تقلیل می یابد که متناسب با کم شدن تأثیر لبه تاج، محدوده جدایی جریان کاهش یافته و در نتیجه ضریب دبی افزایش می یابد. با ملایم تر شدن شیب بالادست ناحیه جدایی جریان از بین رفته و تغییر محسوسی در ضریب دبی ایجاد نمی شود. اما تغییر شیب وجه پایین دست اثری بر ناحیه جدایی جریان ابتدای تاج و ضریب دبی ندارد.

**اثر تغییر شیب بر پروفیل سطح آزاد:** عمق آب در بالادست و قسمت ابتدایی تاج سرریز تا قبل از محل تشکیل عمق بحرانی در سرریز با شیب وجه بالادست تند مقداری بیش تر از سرریز با شیب وجه بالادست ملایم می باشد. اما بعد از محل تشکیل عمق بحرانی تا قسمت های انتهایی تاج، عمق آب در سرریز با شیب وجه بالادست ملایم اندکی بیش تر از سرریز با شیب وجه بالادست تند می باشد. در ضمن افت سطح آب در ابتدای تاج سرریز با شیب وجه بالادست ملایم تر با شیب کم تری صورت می گیرد. اما در پایین دست تاج در محل ریزش جریان، شرایط پروفیل سطح آزاد جریان متناسب با شیب پایین دست تغییر می کند.

## منابع

1. Bos, M.G. 1989. Discharge measurement structures. 2<sup>nd</sup> Ed., International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, the Netherlands, 399p.
2. Bos, M.G., Clemmens, A.J., and Replogle, J.A. 1984. Flow measuring flumes for open channel systems. Wiley, New York, 321p.

3. Bazin, M.H. 1869. Experiments nouvelles sur l'écoulement en deversoir. Ann. Ponds et Chaussées, 7: 7. 249-347.
4. Fortner, B. 2003. Water vapor almost busts dam. (www.popsci.com).
5. Fritz, H.M., and Hager, W.H. 1998. Hydraulics of embankment weirs. J. Hydr. Engine. 124: 9. 963-971.
6. Gogus, M., Defne, Z., and Ozkandemir, V. 2006. Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections. J. Irrig. Drain. Engine. 132: 3. 272-280.
7. Hager, W.H. 1991. Experiments on standard spillway. Proc. Inst. Civ. Engrs. 90: 399-416.
8. Hager, W.H., and Schwalt, M. 1994. Broad-crested weir. J. Irrig. Drain. Engine. 120: 1. 13-26.
9. Harrison, A.J.M. 1967. The streamlined broad-crested weir. Proc. Inst. Civ. Engine. 38: 657-678.
10. Inozemtsev, Y.P. 1969. Cavitation destruction of concrete and protective facings under natural conditions. Power Technology and Engineering, 3: 1. 24-29.
11. Isaacs, L.T. 1981. Effects of laminar boundary layer on a model broad-crested weir. Research Report No. CE28, Dept. of Civil Engine. University of Queensland, Brisbane, Australia, Pp: 1-20.
12. Khosrojerdi, A., Kavianpour, M.R., Shamsaei, A., and Daemi, A. 2002. Hydraulic behavior of straight and curved broad crested weirs. 3<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference. Tehran University, Tehran, Iran, Pp: 41-50. (In Persian)
13. Larsen, T., Nielsen, L., Jensen, B., and Christensen, E.D. 2008. Numerical 3-D Modelling of Overflows. 11<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, Pp: 1-7.
14. Ramamurty, A.S., Udoyara, S.T., and Rao, M.V.J. 1988. Characteristic of square-edged and round-nosed broad-crested weirs. J. Irrig. Drain. Engine. 114: 1. 61-73.
15. Sargison, J., and Percy, A. 2009. Hydraulics of Broad-Crested Weirs with Varying Side Slopes. J. Irrig. Drain. Engine. 135: 1. 115-118.
16. Sarker, M.A., and Rhodes, D.G. 2004. Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir. Flow Meas. Instrum. 15: 215-219.
17. Woodburn, J.G. 1932. Tests on board crested weir. Transactions of the American society of civil engineers, 96: 387-408.



## **The effect of the upstream and downstream face slopes of the broad crested weirs on the flow characteristics**

**M. Hamzei<sup>1</sup>, \*M. Javan<sup>2</sup> and A. Eghbalzadeh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Water and Waste Water Research  
Center, Razi University, Kermanshah

Received: 01/18/2012; Accepted: 07/02/2012

### **Abstract**

Broad-crested weirs are common engineering structures in irrigation systems and hydroelectric schemes. Varying the upstream and downstream face slopes are of the important factors affecting flow conditions and discharge efficiency of structure. In this paper, the Hydraulic Grade Line, free surface profile over the broad crested weir and separation zone at the upstream corner of it have been simulated by using Fluent software. The turbulence models considered are the standard  $k-\varepsilon$  and renormalization group (RNG)  $k-\varepsilon$ . The simulation results are found in good agreement with measured data. The numerical simulations show that sloping the upstream face slope increases the discharge coefficient and decreases separation zone at the upstream corner and varying the downstream face slope does not affect the separation zone and discharge coefficient. Water depth before the critical depth in the weir with the steep upstream face slope however, is greater than the weir with the mild upstream face slope. The position of critical depth does not change by varying the downstream face slope. By using mild downstream face slope, negative pressure value decreases due to the decrease in curvature of streamlines, separation zone in downstream corner and the possibility of cavitations.

**Keywords:** Numerical simulation, Broad crested weir, Fluent, Flow separation, Free surface profile

---

\* Corresponding Author; Email: [javanmi@gmail.com](mailto:javanmi@gmail.com)