

# تأثیر عدد فرود بالادست بر میدان جریان در کانال با مقطع U شکل و سرریز جانبی فوق بحرانی

حامد عظیمی<sup>۱</sup>، افشین اقبالزاده<sup>۲\*</sup>، میترا جوان<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران، آب دانشگاه رازی کرمانشاه

۲- استادیار مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

Eghbalzadeh@gmail.com\*

تاریخ پذیرش: [۹۴/۱۱/۰۹]

تاریخ دریافت: [۹۴/۰۱/۱۹]

**چکیده** - به دلیل ساختار هیدرولیکی کانال‌های U شکل، این نوع مجاری بعنوان مقطع مبدل کانال‌های مستطیلی و دایروی دریاچه‌های آدم-رو و نیز به همراه سرریزهای جانبی در شبکه دفع فاضلاب، سیستم‌های آبیاری، محافظت سیلاب و غیره استفاده می‌شود. در این نوع کانال‌ها رژیم جریان می‌تواند در شرایط فوق بحرانی باشد. در مطالعه حاضر، میدان جریان آشفتنه و سطح آزاد جریان در یک کانال با مقطع U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط فوق بحرانی با استفاده از نرم‌افزار فلوتری دی، مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  و طرح VOF شبیه‌سازی شده است. مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی، سطح آزاد و مشخصات میدان جریان را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌نماید. در ادامه، اثر عدد فرود بالادست سرریز جانبی روی الگوی جریان کانال اصلی بررسی شد. در کانال‌های U شکل با سرریز جانبی برای کلیه عددهای فرود، در مجاورت دیواره داخلی یک افت سطح آزاد در ابتدای بالادست سرریز بوقوع پیوسته و پرش سطحی در یک چهارم انتهایی طول دهانه سرریز جانبی اتفاق افتاد. در امتداد پرش سطحی انرژی پتانسیل کاهش و در مقابل انرژی جنبشی افزایش یافت. علاوه بر آن، با افزایش مقدار عدد فرود، عرض صفحه جدایش جریان و ابعاد ناحیه سکون زیاد و اندازه زاویه ریزشی جت جریان کاهش می‌یابد. برای همه عدد فرودها همواره، بیشینه مقدار سرعت عرضی تقریباً در انتهای پائین دست سرریز جانبی بوقوع پیوسته است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، بیشینه مقدار تنش برشی در محور مرکزی کانال اصلی واقع در وسط دهانه سرریز جانبی بوقوع پیوسته و در مقابل کمینه آن در زیر ناحیه ایستایی و در انتهای پائین دست سرریز جانبی اتفاق افتاده است.

**واژگان کلیدی:** جریان فوق بحرانی؛ کانال U شکل؛ سرریز جانبی؛ شبیه‌سازی عددی؛ عدد فرود.

## ۱- مقدمه

امتداد سرریز جانبی ممکن است که زیر بحرانی و یا فوق بحرانی باشد. پژوهش‌ها و مطالعات آزمایشگاهی، تئوریک و تحلیلی فراوانی به وسیله پژوهشگران مختلف روی رفتار هیدرولیکی کانال‌های دارای سرریز جانبی در شرایط رژیم زیر بحرانی انجام گرفته است. یوکسل تغییرات اثر انرژی مخصوص را با توجه به پارامترهای مختلف روی دبی عبوری از روی سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی مورد بررسی قرار داد [1]. امیرآق‌لو و همکاران با انجام دادن یک سری آزمایش‌ها به بررسی پروفیل طولی جریان در امتداد سرریز جانبی پرداختند [2]. آنها ضریب

سرریزهای جانبی برای تنظیم جریان اضافی سیستم‌های انتقال و زهکشی استفاده می‌شود. این نوع از سازه‌های هیدرولیکی به صورت گسترده‌ای در شبکه‌های دفع فاضلاب، سیستم‌های مهار سیلاب-رواناب شهری و زمین‌های آبیاری در پروژه‌های آبی و زیست محیطی کاربرد دارند. یک سرریز جانبی روی دیواره جانبی کانال اصلی نصب می‌شود. جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی از نوع جریان‌های متغییر مکانی با کاهش دبی محسوب می‌شود. در عمل جریان در

اصول انرژی مخصوص و تحلیل رگرسیونی روی نتایج آزمایشگاهی، رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی سرریزجانبی در شرایط رژیم فوق‌بحرانی معرفی کردند. دُرگاراو و پیلائی با یک مطالعه آزمایشگاهی روی یک کانال مستطیلی دارای سرریزجانبی در شرایط جریان فوق‌بحرانی به بررسی ضریب دبی سرریزجانبی، سرعت در کانال اصلی، زاویه‌ی ریزش جریان از روی سرریزجانبی و اندازه‌گیری عمق جریان در امتداد سرریز پرداختند [9]. آنها با استفاده از اصول ممنتوم، ضریب دبی سرریزجانبی در جریان فوق‌بحرانی را بعنوان تابعی از عدد فرود معرفی نمودند. کُنرود و همکاران اثر پره‌های هادی بر روی جریان عبوری از روی سرریزجانبی واقع در یک کانال مستطیلی در شرایط رژیم فوق‌بحرانی را بررسی کردند [10]. آنها دریافتند که وجود این پره‌های هادی باعث افزایش میزان جریان جانبی می‌شود.

کانال‌های با سطح مقطع U شکل در عمل دارای کاربرد بسیار وسیعی هستند. رشته قنات‌های موجود در سراسر فلات مرکزی ایران از کانال‌هایی با سطح مقطع عرضی U شکل، تخم مرغی و نعل اسبی ساخته شده‌اند. در این بین به دلیل ساختار هیدرولیکی کانال‌های U شکل این نوع مجاری بعنوان مقطع مبدل کانال‌های مستطیلی و دایروی در پیچه‌های آدم‌رو و نیز به همراه سرریزهای سیلاب در شبکه دفع فاضلاب شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. اولین مطالعات، در ارتباط با کانال U شکل دارای سرریزجانبی توسط هاگر و همکاران صورت پذیرفته است [11]. آیماز آزمایش‌هایی را در دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی روی کانال‌های U شکل دارای سرریزجانبی انجام داد [12]. وی با معرفی یک روش نیمه تحلیلی که بر پایه اصول انرژی پایه‌ریزی شده به کمک روش اجزاء محدود معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغییر مکانی با کاهش دبی برای یک مجرای U شکل دارای سرریزجانبی را حل نمود. وطنخواه با استفاده از تئوری دی مارچی و روش انتگرال‌گیری بیضوی غیرکامل یک روش نیمه-تحلیلی برای محاسبه پروفیل طولی جریان در امتداد سرریزجانبی واقع در یک کانال U شکل ارائه نمود [13].

صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های آزمایشگاهی از مهمترین

دبی سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی را تابعی از عدد فرود بالادست، نسبت طول سرریز جانبی به عرض کانال اصلی، نسبت طول سرریزجانبی به هد روی آن و نسبت ارتفاع تاج سرریز جانبی به هد جریان روی سرریز دانسته و رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی ارائه کردند. باقری و حیدرپور مشخصات میدان سرعت و جریان عبوری از روی سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی را برای عدد فرودهای مختلف مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند [3]. نُواک و همکاران با استفاده از تکنیک‌های مرئی‌سازی سیال، مشخصات میدان سرعت جریان عبوری از روی سرریزجانبی واقع در یک کانال مستطیلی را در شرایط رژیم زیربحرانی مورد آزمایش قرار دادند [4].

جریان‌های سیلابی، آبگیری از سدها و جریان داخل خطوط انتقال دارای رژیم جریان فوق‌بحرانی هستند. برخی از پژوهش‌های آزمایشگاهی و تئوریک در ارتباط با جریان‌های فوق‌بحرانی در کانال‌های دارای سرریزجانبی عبارتند از: هاگر یک راه‌حل تحلیلی برای جریان‌های فوق‌بحرانی عبوری از داخل یک مجرای دایروی دارای سرریزجانبی ارائه نمود [5]. روش تحلیلی هاگر برای هر دو وضعیت جریان فوق‌بحرانی بدون پرش و با پرش هیدرولیکی کاربرد دارد. قدسیان به مطالعه آزمایشگاهی جریان فوق‌بحرانی گذرنده از روی سرریزجانبی واقع در یک کانال مستطیلی پرداخته است [6]. وی ضریب دبی سرریزجانبی در شرایط فوق‌بحرانی را تابعی از نسبت هد روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز و عدد فرود معرفی نموده است. میزُورا و همکاران یک راه‌حل تحلیلی برای محاسبه دبی کانال اصلی، زاویه انتشار جریان در محل سرریز و هد جریان در یک کانال مستطیلی دارای سرریزجانبی با تاج صفر در شرایط فوق‌بحرانی ارائه نمودند [7]. روش تحلیلی آنها بر پایه اصول انرژی استوار بوده و دبی کانال اصلی را بعنوان تابعی از عدد فرود معرفی کردند. پاتیرانا و همکاران مطالعه‌ای آزمایشگاهی شامل بررسی انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریزجانبی، ضریب دبی و دبی عبوری از روی سرریزجانبی در شرایط جریان فوق‌بحرانی برای یک کانال مستطیلی دارای سرریزجانبی انجام دادند [8]. آنها با استفاده از

ناشی از لزجت در راستاهای  $(x, y, z)$  است. همچنین  $\rho, t, R_{SOR}, p$  و  $V_F$  به ترتیب معرف زمان، چگالی سیال، ترم چشمه، فشار و کسری از حجم مرتبط با جریان است. در این مطالعه‌ی عددی برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شده است. این مدل آشفتگی نواحی با برش بالا و جریان‌های آشفته با شدت کم را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند. همچنین این مدل نسبت به مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد به ثابت‌های تجربی کمتری نیاز داشته و برای شبیه‌سازی نواحی دارای جداشدگی جریان، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آزاد میدان جریان از روش VOF بهره‌گرفته شده است. در طرح VOF برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می‌شود.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) = 0.0 \quad (5)$$

در اینجا  $F$  جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی است. چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد  $F=1$  خواهد شد. اگر  $F=0$  سلول مورد نظر خالی است و اگر  $0 < F < 1$  سلول حاوی هر دو فاز آب و هوا است.

### ۳- شرایط مرزی

در شبیه‌سازی عددی حاضر به منظور درستی‌آزمایی نتایج مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی اُیماز [12] استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی وی شامل یک کانال روباز با سطح مقطع U شکل با قطر ۰/۲۵ متر است که سرریزجانبی در مقطع میانی و روی دیواره جانبی کانال اصلی نصب شده است. طول و ارتفاع تاج سرریزجانبی بترتیب برابر ۰/۵ متر و ۰/۱ متر است. شرایط مرزی اعمال شده بر مدل عددی به‌گونه‌ای انتخاب شده که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی اُیماز [12] هماهنگی داشته باشد. به همین منظور با توجه به داشتن دبی و عمق ورودی، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی کانال اصلی استفاده شده است. این شرایط مرزی در نرم‌افزار فلوتوری دی معادل شرط مرزی "نرخ

مزیت شبیه‌سازی‌های عددی محسوب می‌شوند. برخی از مهمترین مطالعات عددی در ارتباط با شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی عبارتند از: کیو با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\omega$  و روش VOF تغییرات سه بعدی جریان عبوری از روی سرریزجانبی را مدل سازی نمود [14]. تدین یک مدل عددی را با استفاده از مدل آشفتگی RSM و روش VOF توسعه داد [15]. آیدین با استفاده از نرم‌افزار فلونتت سطح آزاد جریان در داخل یک کانال مستطیلی دارای سرریزجانبی گنگره‌ای مثلی را به روش VOF شبیه‌سازی نمود [16]. آیدین و امیرآقلو به وسیله نرم‌افزار فلونتت-انسیس ظرفیت آگذری و جریان عبوری از روی سرریزجانبی گنگره-ای را پیش‌بینی کردند [17].

با مرور مطالعات انجام شده روی کانال‌های دارای سرریزجانبی، مشاهده می‌شود که نیاز به پژوهش درباره الگوی جریان در کانال‌های U شکل با سرریز جانبی در شرایط جریان فوق بحرانی وجود دارد. در این مطالعه، میدان جریان آشفته و سطح آزاد در کانال U شکل دارای سرریزجانبی در شرایط جریان فوق بحرانی با استفاده از نرم‌افزار فلوتوری دی نسخه ۱۰ شبیه‌سازی شده است [18]. در ادامه، اثر عدد فرود بالادست سرریزجانبی روی الگوی جریان کانال اصلی بررسی شده است.

### ۲- معادلات حاکم

از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس برای حل میدان جریان سیال غیرقابل تراکم استفاده می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w A_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

در معادلات بالا  $(u, v, w)$ ،  $(A_x, A_y, A_z)$ ،  $(G_x, G_y, G_z)$  و  $(f_x, f_y, f_z)$  به ترتیب برابر مولفه‌های سرعت، مساحت کسری محیط به جریان، نیروهای گرانشی و شتاب‌های

کل سطح فوقانی میدان جریان توسط شرایط مرزی "تقارن" معرفی شده است.

شکل ۱- شبکه بندی میدان جریان (الف) نمای سه بعدی (ب) مقطع عرضی

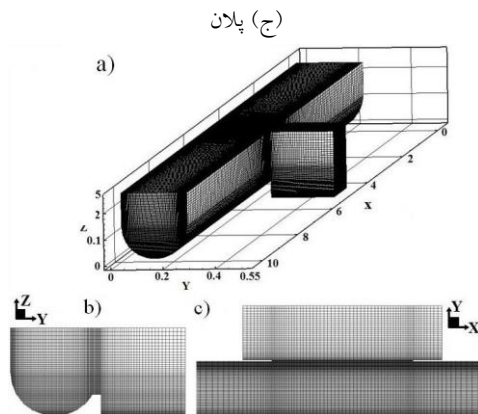


Fig. 1. Flow field grid a) 3D view, b) Cross Section and c) Plan

جدول (۱) تعداد سلولهای محاسباتی در راستاهای مختلف

Grid Type	X	Y	Z
Non-Uniform	222	110	65

Table 1. Number of computational cells in different directions

## ۴- بحث و نتیجه گیری

همان گونه که پیشتر اشاره شد، در این شبیه سازی عددی برای اعتبار سنجی نتایج مدل عددی از اندازه گیری های آزمایشگاهی به وسیله ایماز [12] استفاده شده است. ایماز در مطالعه آزمایشگاهی خود به اندازه گیری پروفیل طولی سطح آزاد جریان واقع بر محور مرکزی کانال اصلی و دبی عبوری از روی سرریز جانبی در شرایط رژیم فوق بحرانی پرداخته است. در مدل آزمایشگاهی ایماز [12] دبی ورودی کانال اصلی ( $Q_1$ )، انرژی مخصوص ( $E_1$ )، عمق جریان در بالادست سرریز جانبی ( $Z_1$ )، عمق جریان در پائین دست سرریز جانبی ( $Z_2$ ) و شیب کانال اصلی ( $S_0$ ) به ترتیب برابر  $0.025 \text{ m}^3/\text{s}$ ،  $0.2495 \text{ m}$ ،  $0.115 \text{ m}$ ،  $0.0809 \text{ m}$  و  $0.005$  است. لازم به گفتن است که در مدل آزمایشگاهی مذکور نسبت طول سرریز به قطر کانال اصلی ( $L/D$ ) و نسبت ارتفاع تاج سرریز به قطر کانال اصلی ( $P/D$ ) به ترتیب برابر ۲ و  $0.24$  است. نمایی از سطح آزاد سه بعدی شبیه سازی شده در امتداد سرریز جانبی برای شرایط فوق بحرانی در شکل (۲) نشان داده شده است. در شکل (۳) مقایسه پروفیل طولی سطح آزاد شبیه سازی شده با نتایج آزمایشگاهی قابل مشاهده است. به

جریان حجمی" است. در مرز ورودی کانال اصلی پارامترهای انرژی جنبشی آشفتگی ( $k_t$ ) و نرخ اتلاف آشفتگی ( $\varepsilon_t$ ) توسط روابط زیر محاسبه می شوند:

$$k_t = \frac{3}{2} (v_t \cdot T_{len})^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_t = C_u \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_t^{3/2}}{T_{len}} \quad (7)$$

که در آنها  $v_t$  ویسکوزیته سینماتیکی آشفتگی،  $T_{len}$  مقیاس طول آشفتگی در کانالهای باز و برابر  $0.7$  قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می شود.  $C_u$  یک مقدار ثابت است که در مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  برابر  $0.085$  در نظر گرفته می شود. هندسه کانال U شکل در نرم افزار اتوکد ایجاد شده و در قالب یک فایل STL به محیط نرم افزار فلوتری دی وارد شده است. در این شبیه سازی عددی کل دامنه محاسباتی توسط یک بلوک مش غیریکنواخت شبکه بندی شده است. در محل تقاطع کانال اصلی با سرریز جانبی و در مجاورت دیواره های جامد، شبکه بندی ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است. شکل (۱) میدان جریان شبکه بندی شده قابل مشاهده می باشد. در جدول (۱) تعداد سلولهای محاسباتی مورد استفاده در شبیه سازی مذکور در راستاهای X, Y, Z مرتب شده که این مقادیر در نزدیکی دیواره های جامد از رابطه زیر محاسبه می شوند:

$$y^+ = \frac{Y_1 \cdot u_*}{\nu} \quad (8)$$

در اینجا  $Y_1$  فاصله مرکز سلول از دیواره جامد،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال می باشد. با توجه به مشخص بودن عمق پائین دست کانال اصلی در شرایط آزمایشگاهی، در شبیه سازی مذکور از شرایط مرزی "فشار مشخص" استفاده شده است. جریان عبوری از روی سرریز جانبی بدخل یک مخزن ریخته می شود، به منظور عدم اثر دیواره های مخزن جانبی بر الگوی جریان عبوری از روی سرریز جانبی، عرض مخزن متصل به سرریز بزرگتر از طول سرریز جانبی در نظر گرفته می شود. در پائین دست این مخزن شرایط مرزی "خروجی" اعمال شده است. کلیه مرزهای جامد میدان محاسباتی بعنوان شرایط مرزی "دیواره" تعریف شده اند.

آیماز [12] رابطه‌ی ۱۱ را برای محاسبه دبی بر واحد طول سرریزجانبی واقع بر یک کانال با مقطع U شکل پیشنهاد داده است:

$$-\frac{dQ_w}{dx} = q = C_d \sqrt{2g(z-P)}(z-P) \quad (11)$$

که در آن  $Q_w$  دبی عبوری از روی سرریزجانبی،  $x$  فاصله طولی از ابتدای سرریز،  $\frac{dQ_w}{dx}$  یا  $q$  دبی بر واحد طول سرریزجانبی،  $g$  شتاب جاذبه،  $P$  ارتفاع تاج سرریزجانبی و  $Z$  عمق جریان است. بنابراین ضریب دبی سرریزجانبی را می‌توان از رابطه ۱۲ محاسبه کرد (امیرآقلو و همکاران [2]):

$$C_d = \left( \frac{Q_w}{L\sqrt{2g}(Z-P)^{3/2}} \right) \quad (12)$$

در اینجا  $L$  طول سرریزجانبی است. همچنین آیماز [12] رابطه‌ی تجربی ۱۳ را برای محاسبه‌ی ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های با مقطع U شکل در شرایط جریان فوق‌بحرانی ارائه کرده است. این رابطه تابعی از نسبت طول سرریزجانبی به قطر کانال ( $L/D$ ) و عدد فرود در مقطع انتهایی بالادست سرریزجانبی واقع بر محور مرکزی کانال اصلی ( $F_1$ ) است.

$$C_d = -(0.046 + 0.0054\sqrt{1.67L/D - 1})F_1 + (0.24 + 0.021\sqrt{1 + 35.3L/D}) \quad (13)$$

در جدول (۲) مقادیر عدد فرود واقع در انتهای بالادست سرریزجانبی ( $F_1$ )، انرژی مخصوص ( $E_1$ ) و ضرایب دبی ( $C_d$ ) (محاسبه شده از روابط ۱۲ و ۱۳) حاصل از نتایج عددی و آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده است. برای بررسی دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای گفته شده درصد خطای نسبی ( $REP$ ) از رابطه‌ی ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$REP = 100 \times \left| \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right| \quad (14)$$

جدول (۲) مقایسه عدد فرود، انرژی مخصوص و ضریب دبی آزمایشگاهی و عددی

Results	$F_1$ (m)	$E_1$ (m)	(12) $C_d$	(13) $C_d$
Experimental	1.217	0.2495	0.331	0.352
Numerical	1.207	0.2024	0.317	0.353
Relative error	% 0.082	% 18.88	% 4.23	% 0.72

Table 2. Comparison of Froude number, specific energy and discharge coefficient between experimental and numerical cases

طورکلی، در یک کانال دارای سرریزجانبی و در شرایط جریان فوق‌بحرانی عمق جریان از انتهای بالادست سرریزجانبی به سمت انتهای پائین‌دست سرریز کاهش می‌یابد. همان‌گونه که دیده می‌شود هماهنگی قابل قبولی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد به گونه‌ای که مدل عددی، رفتار سطح آزاد جریان در امتداد سرریزجانبی را به خوبی پیش‌بینی کرده است. به‌منظور بررسی میزان دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف میدان جریان، مقادیر درصد خطای متوسط ( $APE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$APE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right| \quad (9)$$

$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{(measured)} - R_{(simulated)})^2} \quad (10)$$

در اینجا  $R_{(measured)}$  و  $R_{(simulated)}$  به ترتیب معرف نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است. مقادیر ( $APE$ ) و ( $RMSE$ ) برای پروفیل طولی سطح آزاد جریان به ترتیب برابر ۱٪/۷ و ۰٪/۲۱۳ محاسبه شده، که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان است.

شکل ۲- تغییرات سه‌بعدی سطح آزاد جریان در کانال U شکل دارای

سرریزجانبی در شرایط رژیم فوق‌بحرانی

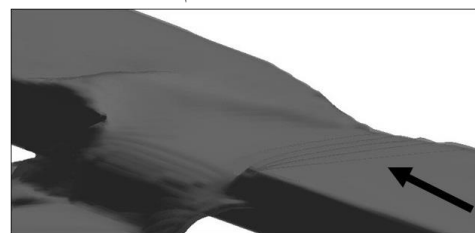


Fig. 2. 3D changes of the flow free surface in the U-shaped channel with a side weir in a supercritical flow regime

شکل ۳- مقایسه پروفیل طولی سطح آزاد جریان آزمایشگاهی و شبیه‌سازی

شده در کانال U شکل دارای سرریز جانبی

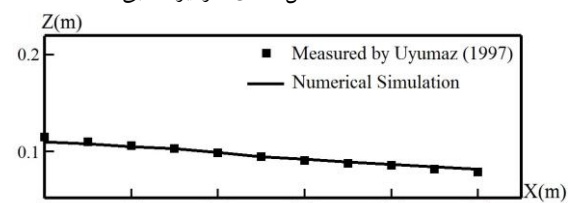


Fig. 3. Comparison of longitudinal profile of the flow free surface in the U-shaped channel with a side weir between experimental and numerical cases

دهانه سرریز جانبی اتفاق افتاده است (شکل ۵ - الف). این افت ناگهانی بدلیل اثرات ورودی سرریز جانبی می‌باشد (امیرآق‌لو و همکاران [2]). همان‌گونه که در شکل (۵ - الف) مشاهده می‌شود، بعد از این افت عمق جریان بتدریج کاهش یافته و این کاهش عمق تا یک چهارم انتهایی دهانه سرریز امتداد می‌یابد. سپس با افزایش انرژی جنبشی و کاهش انرژی پتانسیل یک پرش سطحی در انتهای پائین‌دست سرریز جانبی اتفاق می‌افتد (امیرآق‌لو و همکاران [2]). آیدین با شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در داخل یک کانال مستطیلی برای رژیم زیربحرانی به وجود یک نقطه ایستایی در انتهای پائین‌دست سرریز جانبی اشاره کرده است [16]. در همه عددهای فرود، بعد از پرش سطحی نقطه ایستایی با حداکثر تراز ارتفاعی بوقوع پیوسته و با افزایش مقدار عدد فرود ارتفاع نقطه ایستایی نیز زیاد می‌شود (شکل ۵ - الف). همان‌گونه که در سایر مقاطع طولی قابل مشاهده است، با افزایش عدد فرود، عمق جریان در امتداد سرریز جانبی زیاد می‌شود، این در حالی است که در کلیه شبیه‌سازی‌ها مطابق الگوی جریان‌های فوق‌بحرانی عمق جریان در امتداد سرریز جانبی کاهش می‌یابد. هرچند که با دور شدن از دیواره داخلی کانال اصلی آثار سرریز جانبی کمتر شده، به شکلی که تغییرات سطح آزاد جریان در مقطع ۴-۴ نسبت به سایر مقاطع طولی کمتر است (شکل ۵ - د).

امیرآق‌لو و همکاران [2] در مطالعه‌ی آزمایشگاهی خود بر روی مشخصات جریان زیربحرانی واقع در یک کانال مستطیلی دارای سرریز جانبی به تشکیل یک ناحیه ایستایی در پائین‌دست سرریز جانبی و مجاور دیواره خارجی کانال اصلی اذعان کرده‌اند. آنها علت تشکیل ناحیه مذکور را انحراف خطوط جریان در اثر وجود سرریز جانبی گفتند.

همچنین، نیری و همکاران گزارش کرده‌اند که یک صفحه جدایش جریان به علت فشار مکشی کانال جانبی تشکیل می‌شود [19]. در شکل (۶) طرحی از خطوط جریان دو بعدی به همراه محل صفحه جدایش جریان و ناحیه ایستایی در کانال اصلی برای یکی از مدل‌های شبیه‌سازی شده قابل مشاهده است.

ایماز [12] علاوه بر اندازه‌گیری سطح آزاد جریان واقع بر محور مرکزی کانال اصلی، مقادیر مختلف دبی گذرنده از داخل کانال اصلی در برابر دبی عبوری از روی سرریز جانبی را برای شرایط هندسی  $(L/D = 2)$ ،  $(P/D = 0.24)$  و  $(S_0 = 0.002)$  اندازه‌گیری نمود. در شکل (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است.

شکل ۴- مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دبی عبوری از روی سرریز جانبی واقع در کانال U شکل

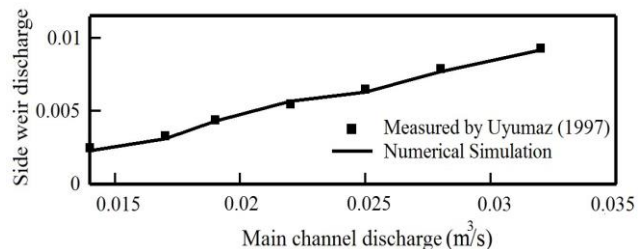


Fig. 4. Comparison of discharge of the side weir located in the U-shaped channel between experimental and numerical cases

مقادیر  $(RMSE)$  و  $(APE)$  برای دبی عبوری از روی سرریز جانبی به ترتیب برابر  $۳.۸\%$  و  $۰.۱۷۷\%$  محاسبه شده که این مقادیر خطا نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در پیش‌بینی رفتار جریان در مجاورت سرریز و دبی عبوری از روی سرریز جانبی است.

در ادامه مطالعه، اثر عدد فرود بالادست کانال اصلی روی مشخصات میدان جریان بررسی می‌شود. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، ایماز [12] مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی را برای دبی‌های متفاوت کانال اصلی در شرایط جریان فوق‌بحرانی اندازه‌گیری نموده‌است. هر یک از دبی‌های ورودی معرف یک عدد فرود خاص است. در شکل (۵) تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی و مقاطع طولی واقع در  $Y=0/125$ ،  $Y=0/1875$ ،  $Y=0/245$  و  $Y=0/625$  برای عدد فرودهای مختلف نشان داده شده است. در کلیه مقاطع طولی، عمق جریان از انتهای بالادست سرریز جانبی بسمت انتهای پائین‌دست آن کاهش می‌یابد. برای کلیه عدد فرودها، یک افت سطح آزاد در یک چهارم ابتدایی

شکل ۵ - تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده برای عدد فرودهای مختلف الف) مقطع ۱-۱ ب) مقطع ۲-۲ ج) مقطع ۳-۳ د) مقطع ۴-۴

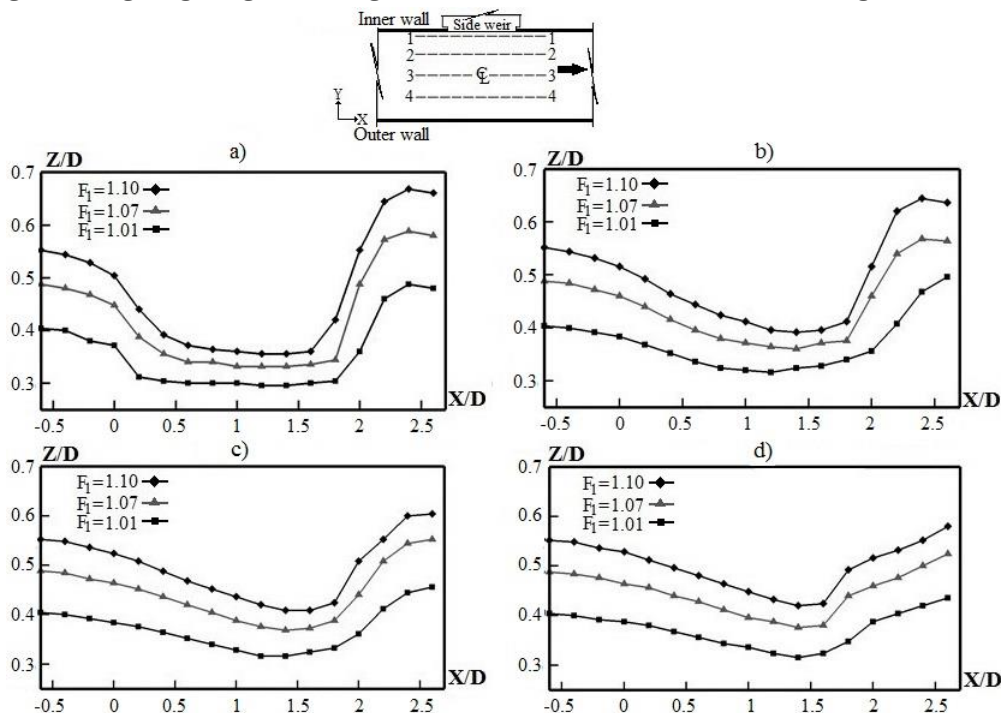


Fig. 5. Changes of the flow free surface for different Froude numbers a) section 1-1, b) section 2-2, c) section 3-3, d) section 4-4

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در یک تراز مشخص با افزایش عدد فرود عرض صفحه جدایش جریان و ابعاد ناحیه ایستایی ( $L_s$  و  $W_s$ ) بزرگ می‌شوند و برای کلیه عدد فرودها، بیشینه عرض صفحه جدایش و ابعاد ناحیه ایستایی به ترتیب در مجاورت سطح آزاد و بستر کانال اصلی اتفاق افتاده است.

با نصب یک سرریز جانبی روی دیواره کانال اصلی، هنگامی که جریان به صفحه‌ی سرریز جانبی نزدیک می‌شود، مولفه عرضی سرعت تولید می‌شود. در شکل (۸) خطوط هم-سرعت مولفه عرضی سرعت در امتداد سرریز جانبی در مقاطع عرضی واقع شده در ابتدا، وسط و انتهای سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در هر مقطع عرضی با افزایش عدد فرود، مولفه جانبی سرعت جریان زیاد می‌شود. همچنین با پیشروی به سمت انتهای پائین‌دست سرریز جانبی مقدار سرعت جانبی در امتداد سرریز افزایش یافته، به گونه‌ای که برای همه عدد فرودها همواره، بیشینه مقدار سرعت عرضی تقریباً در انتهای پائین‌دست سرریز جانبی بوقوع پیوسته است.

زاویه ریزشی جت جریان ( $\phi$ ) به عنوان یکی از

شکل ۶ - نمای خطوط جریان دو بعدی ترسیم شده در کانال اصلی

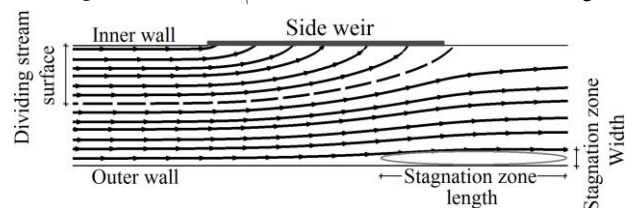


Fig. 6. 2D stream lines in the main channel

در این مطالعه،  $W_d$  بعنوان عرض صفحه جدایش جریان و نیز  $W_s$  و  $L_s$  به ترتیب برابر طول و عرض ناحیه ایستایی معرفی می‌شوند. در شکل (۷) تغییرات  $W_d$ ،  $L_s$  و  $W_s$  در برابر عدد فرود بالادست سرریز جانبی ( $F_1$ ) برای ترازهای ارتفاعی مختلف، در زیر تاج سرریز (متر  $Z=0.03$ )، هم‌تراز تاج سرریز (متر  $Z=0.06$ ) و بالای تاج سرریز (متر  $Z=0.07$ ) نشان داده شده است. در این نمودارها، محورهای قائم نسبت به قطر کانال اصلی بدون بعد شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، عرض صفحه جدایش جریان از کف کانال بسمت تاج سرریز جانبی کاهش یافته و سپس با پیشروی بسوی سطح آزاد جریان عرض صفحه مذکور افزایش می‌یابد. در مقابل، ابعاد ناحیه ایستایی با پیشروی بسمت سطح آزاد کاهش یافته است.

شکل ۷ - مقدار  $W_d$ ,  $L_s$  و  $W_s$  در تراز های متفاوت برای عدد فرودهای مختلف

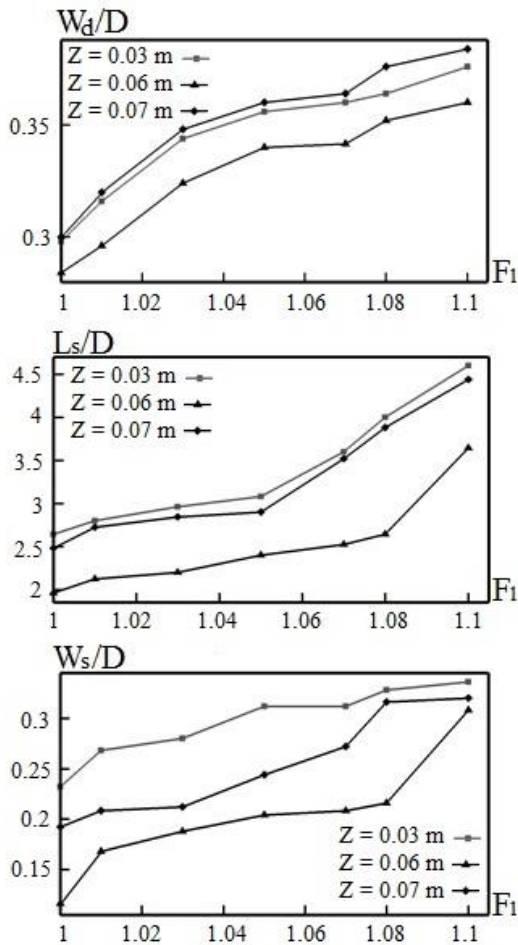


Fig. 7. Quantity of  $W_d$ ,  $L_s$  and  $W_s$  at different levels for different Froude numbers

مشخصات هیدرولیکی سرریزهای جانبی در شکل گیری جریان انحرافی شناخته می شود. رابطه ۱۵ به وسیله باقری و حیدرپور [3] برای محاسبه  $\phi$  در مجاورت تاج سرریزجانبی واقع در یک کانال مستطیلی در شرایط رژیم جریان زیربحرانی پیشنهاد شده است:

$$\phi = \text{Arctan}\left(\frac{V_x}{V_y}\right) \quad (15)$$

که در آن  $V_x$  و  $V_y$  به ترتیب برابر مولفه طولی و عرضی سرعت در امتداد تاج سرریزجانبی است.

در شکل (۹) تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریزجانبی برای عدد فرودهای مختلف ( $F_1=1/0.1$  و  $F_1=1/0.7$ ) نشان داده شده است. لازم به گفتن است که در این شکل ها اندازه زاویه ریزشی جت جریان بر حسب درجه است. در قبل و بعد از سرریزجانبی مقدار  $\phi$  برای کلیه عدد فرودها نزدیک به ۹۰ درجه محاسبه شده است (باقری و حیدرپور [3]). زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریز کاهش یافته و در انتهای پائین دست تاج سرریزجانبی به کمترین مقدار خود می رسد و سپس با نزدیک شدن به انتهای پائین دست اندازه  $\phi$  افزایش می یابد. همان گونه که مشاهده می شود، الگوی تغییرات زاویه ریزشی جت جریان برای کلیه عدد فرودها مشابه است اما کمینه  $\phi$  با افزایش عدد فرود کاهش یافته است.

شکل ۸ - خطوط هم سرعت مولفه عرضی سرعت، در امتداد سرریزجانبی برای عدد فرودهای مختلف

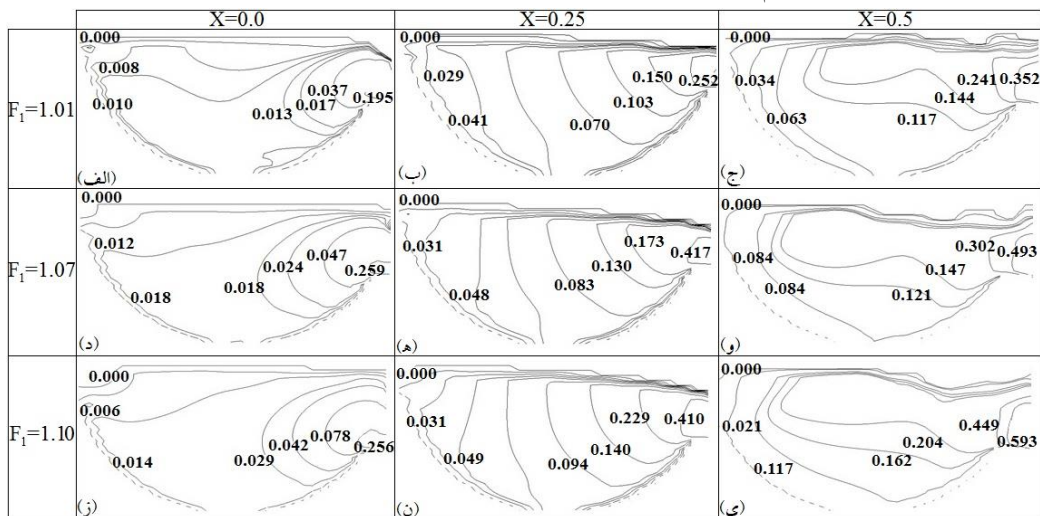


Fig. 8. Transverse component of the velocity contours along the side weir for different Froude numbers



شکل ۱۰ - الگوی تنش برشی بستر در کانال اصلی الف) ( $F_1=1/0.1$ ) ب)

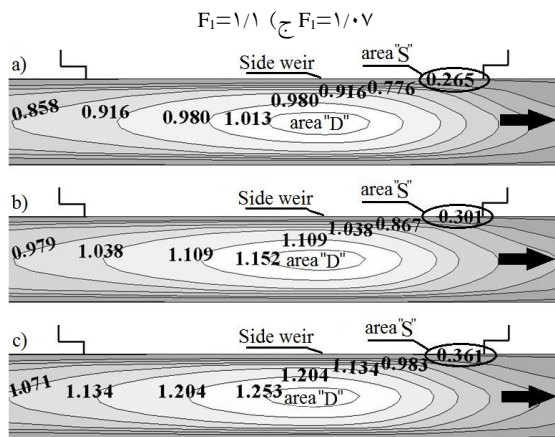


Fig. 10. Bed shear stress pattern in the main channel a)  $F_1= 1.01$ , b)  $F_1= 1.07$  and c)  $F_1= 1.1$

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، میدان و آشفتگی جریان عبوری از داخل یک کانال با مقطع U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط فوق-بحرانی با استفاده از نرم افزار فلوتری دی نسخه ۱۰ شبیه سازی شده است. همچنین تغییرات سطح آزاد جریان به وسیله طرح VOF و آشفتگی میدان جریان بوسیله مدل آشفتگی RNG  $k-\epsilon$  مدل سازی شده است. مقادیر  $(APE)$  و  $(RMSE)$  برای پروفیل طولی سطح آزاد جریان و دبی عبوری از روی سرریز جانبی به ترتیب برابر  $1/7$ ،  $0.213$ ،  $3/8$  و  $0.177$  محاسبه شده که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در شبیه سازی الگوی جریان است. در ادامه پژوهش، اثر عدد فرود بالادست سرریز جانبی بر روی مشخصات میدان جریان کانال اصلی بررسی شده است. برای کلیه عدد فرودها، در مجاورت سرریز جانبی یک افت سطح آزاد در یک چهارم ابتدایی دهانه سرریز جانبی اتفاق افتاده و بعد از این افت عمق جریان به تدریج کاهش یافته و در یک چهارم انتهایی دهانه سرریز یک پرش سطحی به وقوع می پیوندد. همچنین در انتهای پرش سطحی نقطه ایستایی با بیشینه تراز ارتفاعی اتفاق افتاده است. عرض صفحه جدایش جریان از کف کانال به سمت تاج سرریز جانبی کاهش یافته و سپس با پیشروی بسوی سطح آزاد جریان عرض صفحه مذکور افزایش می یابد. برای کلیه عدد فرودها، بیشینه عرض صفحه جدایش جریان و ابعاد ناحیه ایستایی به ترتیب در مجاورت سطح آزاد و بستر کانال اصلی

شکل ۹ - تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در امتداد تاج سرریز جانبی

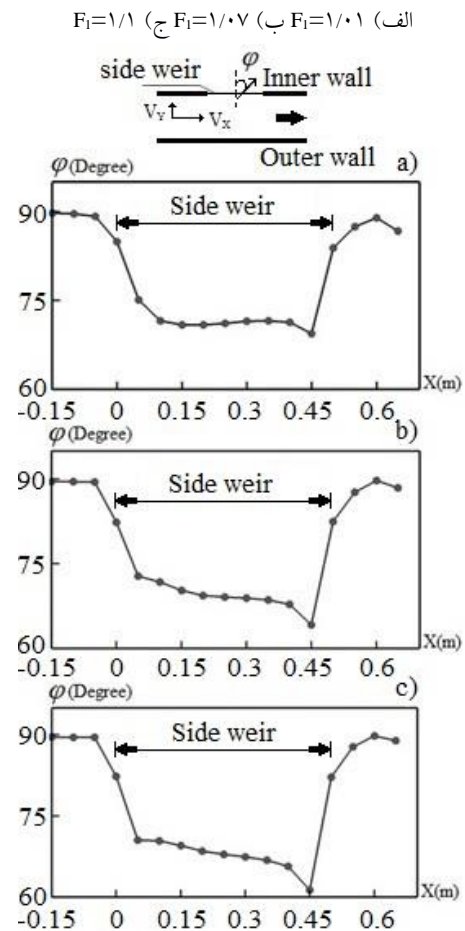


Fig. 9. Changes of falling angle of the jet flow along the side weir a)  $F_1= 1.01$ , b)  $F_1= 1.07$  and c)  $F_1= 1.1$

الگوی تنش برشی در پیش بینی نواحی محتمل آبشستگی و رسوب گذاری استفاده می شود. در شکل (۱۰) الگوی تنش برشی بستر در مجاورت کف کانال اصلی برای عدد فرودهای مختلف نشان داده شده است. با حرکت در امتداد محور مرکزی کانال اصلی، از ابتدای بالادست سرریز جانبی به سمت وسط دهانه مقدار تنش برشی در حال افزایش بوده به گونه ای که بیشینه مقدار آن در ناحیه "D" بوقوع پیوسته است. سپس با پیشروی به سمت انتهای پائین دست کانال اصلی از مقدار تنش برشی کاسته می شود. کمینه مقدار تنش برشی بستر زیر ناحیه ایستایی و در انتهای پائین دست سرریز جانبی اتفاق می افتد (ناحیه "S"). پس به ترتیب در نواحی "D" و "S" احتمال وقوع آبشستگی و رسوب گذاری وجود دارد. همان گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، بطور کلی با افزایش عدد فرود، مقدار تنش برشی بستر در داخل کانال اصلی زیاد شده است.

Outflow from Supercritical Channel Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 769-776.

8. Pathirana K. P. P., Munas M. M. & Jaleel A. L. A. 2006 Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weir in Supercritical Flow. *Journal of the Institution of Engineers*, 39(2), 17-24.

9. Rao K. H. & Pillai C. R. 2008 Study of flow over side weirs under supercritical conditions. *Water Resources Management*, 12, 131-143.

10. Coonrod J., Ho J. & Bernardo N. 2009 Lateral outflow from supercritical channels." Proc., 33<sup>rd</sup> International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, IAHR, Madrid, Spain, 123-130.

11. Hager W. H., Hager K., & Weyermann H. 1983 Die hydraulische Berechnung von Streichwehren in Entlastungsbauwerken der kanalis ationstechnik. *Gas-Wasser-Abwasser*. 63, 309-329. (In German)

12. Uyumaz A. 1997 Side weir in U-shaped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(7), 639-646.

13. Vatankhah A. R. 2013 Water surface profiles along a rectangular side weir in a U-shaped channel. *Journal of Hydrological Engineering*, 18(5), 595-602.

14. Qu J. 2005 *Three dimensional turbulence modeling for free surface flows*. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

15. Tadayon R. 2009 *Modeling Curvilinear Flows in Hydraulic Structures*. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

16. Aydin M. C. 2012 CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software*, 45, 159-166.

17. Aydin M. C. & Emiroglu M. E. 2013 Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 1-8.

18. FLOW 3D User's Manual. 2011. Version 10.0. Flow Science Inc.

19. Neary V.S., Odgaard A. & Sotiropoulos F. 1999 Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(2), 126-140.

اتفاق افتاده است. زاویه ریزشی جت جریان در امتداد سرریز کاهش یافته و در انتهای پائین دست سرریز جانبی به کمترین مقدار خود می رسد و سپس با نزدیک شدن به انتهای پائین دست سرریز اندازه زاویه مذکور افزایش می یابد. با حرکت در امتداد محور مرکزی کانال اصلی، از ابتدای بالادست سرریز جانبی به سمت وسط دهانه مقدار تنش برشی در حال افزایش بوده به گونه ای که بیشینه مقدار آن در داخل کانال اصلی و در وسط دهانه سرریز (ناحیه "D") اتفاق افتاده و در مقابل حداقل مقدار تنش برشی زیر ناحیه ایستایی و در انتهای پائین دست سرریز جانبی (ناحیه "S") بوقوع پیوسته است.

## References

## ۷- مراجع

1. Yüksel E. 2004 Effect of specific energy variation on lateral overflows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 15(5-6), 259-269.
2. Emiroglu M. E., Agaccioglu H. & Kaya N. 2011 Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(4), 319-330.
3. Bagheri S. & Heidarpour M. 2012 Characteristics of Flow over Rectangular Sharp-Crested Side Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(6), 541-547.
4. Novak G., Kozelj D., Steinman F. & Bajcar T. 2013 Study of flow at side weir in narrow flume using visualization techniques. *Flow Measurement and Instrumentation*, 29, 45-51.
5. Hager W. H. 1994 Supercritical Flow in Circular-Shaped Side Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120(1), 1-12.
6. Ghodsian M. 2003 Supercritical Flow over a Rectangular Side Weir. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30, 596-600.
7. Mizumura K., Yamasaka M. & Adachi J. 2003 Side

# The Upstream Froude Number Effect on the Flow Field of the U-shaped Channel along the Side Weir in the Supercritical Flow Regimes

H. Azimi<sup>1</sup>, A. Eghbalzadeh<sup>2\*</sup>, M. Javan<sup>2</sup>

1- M.Sc., Department of Civil Engineering., Razi University., Kermanshah

2- Assist. Prof., Department of Civil Engineering., Razi University., Kermanshah

\*Eghbalzadeh@gmail.com

## Abstract:

The U-shaped channels are applied as a transition cross-section from rectangular to circular in manholes. Also the U-shaped channels along the side weirs are used in the sewage networks, irrigation-drainage systems, flood protection and etc. The flow in the main channel along the side weir can be the supercritical conditions. In this study, the free surface flow in the supercritical regime has been simulated by FLOW-3D software, RNG  $k - \varepsilon$  model and volume of fluid (VOF) scheme in a U-shaped channel along the side weir. The comparison between the numerical and experimental results showed that the numerical simulation predicted the free surface flow with the reasonable accuracy. Generally, the flow depth decreases with distance from the upstream end of the side weir towards the downstream end in the U-shaped channel. The APE and RMSE of the water surface profile along the side weir have been computed 1.7% and 0.213%, respectively. Also, the APE and RMSE were respectively 3.8% and 0.0177% for the discharges over the side weir. In continue, the effects of the upstream Froude number on the flow pattern in the main channel were investigated. For all Froude numbers, because of entrance effects, a free surface drop occurred at the upstream end of the side weir and the water depth gradually reduced toward the downstream end. Then, a surface jump happened at the last fourth of the side weir length in the vicinity of the inner bank. Unlike the potential energy, the kinetic energy increases along the surface jump. Also, a stagnation point is created at the end of the surface jump. The height of this stagnation point increases with increasing the Froude numbers. In addition, the dividing stream surface and stagnation zone were respectively produced near the inner and outer bank in the main channel along a side weir. The dividing stream surface reduces from channel bottom toward the side weir crest then increases to the flow surface. Also, the dimensions of the dividing stream surface and stagnation zone increased with increasing Froude number. The maximum lateral flow in the U-shaped channel occurs almost at the downstream end of the side weir. The transverse velocity increases at each cross-section of the main channel with increasing Froude number. The angle of the spilling jet ( $\varphi$ ) was close to  $90^\circ$  at the upstream and downstream of the side weir crest and the pattern of spilling jet angle is similar for all Froude numbers. The minimum angle of the spilling happens approximately at the downstream of the side weir crest however, the minimum  $\varphi$  decreases with increasing Froude number. The pattern of the bed shear stress can be used to prediction of the areas of the scour and sedimentation in the alluvial channels. In the U-shaped channel along a side weir, the bed shear stress increases along the main channel axis form the beginning of the side weir toward the middle then decreases toward the downstream end. Generally, with increasing Froude number, the bed shear stress increases in the main channel along the side weir.

**Keywords:** Supercritical flow; U-shaped channel; Side weir; Numerical simulation; Froude number.