

## مقایسه مشخصات جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی مستغرق و غیر مستغرق

حامد عظیمی<sup>۱</sup>، سعید شهبانلو<sup>۲\*</sup>، سعید کاردار<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: تاریخ پذیرش:

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

۳- استادیار گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: saeid.shabanlou@gmail.com

### چکیده

به‌طور کلی، سرریزهای جانبی برای تنظیم و کنترل جریان در کانال‌های اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کانال‌های U شکل به‌عنوان مقطع مبدل بین کانال مستطیلی به دایروی در شبکه دفع فاضلاب استفاده می‌شود. در این مطالعه میدان جریان سه بعدی در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D مدل آشفتگی RNG k-ε و روش حجم سیال در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی شبیه‌سازی عددی شد. برای هر دو رژیم جریان انطباق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی بدست آمد. به‌عنوان مثال مقدار درصد خطای ریشه میانگین مربعات برای شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی به‌ترتیب مساوی ۲/۸۶٪ و ۲/۲۱٪ محاسبه شد. در شرایط رژیم زیربحرانی، یک جریان ثانویه در داخل کانال اصلی تشکیل شد که با پیشروی به سمت پائین‌دست توسعه یافت. در شرایط جریان فوق‌بحرانی، جریان جانبی از ابتدای سرریز به سوی انتهای آن افزایش یافت. همچنین در این مطالعه، اثرات استغراق سرریز جانبی بر روی الگوی جریان کانال اصلی مورد بررسی قرار گرفت. بیشینه سرعت عرضی تقریباً در وسط دهانه سرریز جانبی مستغرق اتفاق افتاد.

واژه‌های کلیدی: جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی، کانال‌های U شکل

## Comparison of Subcritical and Supercritical Flow Characteristics of U-shaped Channels Along Submerged and Non-Submerged Side Weir

H Azimi<sup>1</sup>, S Shabanlou<sup>2\*</sup>, S Kardar<sup>3</sup>

Received: Accepted:

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

<sup>2</sup> Asso. Prof., Dept. of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

<sup>3</sup> Assis. Prof., Dept. of Architecture, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

\*Corresponding Author, Email: saeid.shabanlou@gmail.com

### Abstract

Generally, side weirs are used for regulating and controlling the flow in the main channels. U-shaped channels are used as transition structure from rectangular to circular cross-section in sewage systems. This study presented a flow field simulation in the U-shaped channels along a side weir using FLOW-3D software, the RNG k- $\epsilon$  turbulence model, and volume of fluid (VOF) scheme under the subcritical and supercritical flow conditions. The good agreement was obtained between the results of the numerical simulation and the experimental measurements for both flow regimes. For example, the root mean square error for subcritical and supercritical flow regimes was computed as 2.86% and 2.21%, respectively. In subcritical flow regime, a secondary flow was created in the main channel which developed toward the downstream. The lateral flow increased from the beginning of the side weir toward the downstream end of the weir under supercritical flow regime. The effects of the side weirs submergence were investigated on the flow pattern in the main channel too. The maximum transverse velocity almost happened at the middle of the submerged weir length.

**Keywords:** Numerical simulation; Side weir; Subcritical and Supercritical flow; U-shaped channels

### مقدمه

جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی در کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی ارائه داد. کایا و همکاران (۲۰۱۱) یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی افزایش آبگذری سرریزهای جانبی نیمه بیضوی واقع بر روی کانال‌های مستطیلی انجام دادند. باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) توزیع سه بعدی سرعت و زاویه جت ریزشی جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی واقع بر یک کانال مستطیلی را برای عدد فرودهای مختلف مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار داد. یک معادله ضریب دبی بر حسب عدد فرود بالادست، نسبت عمق جریان در انتهای پائین-

معمولا یک سرریز جانبی بر روی دیواره جانبی کانال اصلی نصب می‌شود و برای اهدافی از قبیل کنترل تراز سطح آب و انحراف آب‌های اضافی در سیستم‌های محافظت سیلاب، کانال‌های آبیاری و زمین‌های زهکشی استفاده می‌شود. جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی از نوع جریان‌های متغیر مکانی محسوب می‌شود. مطالعات بسیاری توسط محققین مختلفی بر روی رفتار هیدرولیکی سرریزهای جانبی انجام گرفته است. ونوتلی (۲۰۰۸) یک راه حل تحلیلی برای حل معادله دینامیکی

در کانال‌های مستطیلی را در شرایط زیر بحرانی به وسیله مدل‌های آشفتگی مختلف شبیه‌سازی کردند. عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) سطح آزاد و میدان سرعت در داخل کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی را در رژیم جریان فوق بحرانی شبیه‌سازی نمودند. عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی واقع بر کانال‌های دایروی را شبیه‌سازی نمودند. آنها یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی ارائه نمودند. همچنین عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۶) سطح آزاد جریان و دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی در یک کانال دایروی در شرایط جریان زیر بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. آنها اثر شکل کانال دایروی بر روی الگو و شدت جریان ثانویه در کانال اصلی و اثرات دبی کانال اصلی بر روی ارتفاع نقطه سکون و الگوی تنش برشی بستر مورد بررسی قرار دادند. همچنین عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۷) اثر تغییر شیب کف کانال دایره‌ای در جریان فوق بحرانی در طول سرریز جانبی را به صورت عددی مطالعه نمودند.

با مرور مطالعات عددی در ارتباط با کانال‌های دارای سرریز جانبی مشاهده می‌شود که تاکنون ارزیابی دقیقی در ارتباط با الگوی جریان در داخل کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی در شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی به صورت عددی انجام نشده است. در مطالعه حاضر، ابتدا نتایج عددی اعتبار سنجی شده و سپس الگوی جریان در داخل کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی در هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی مورد مطالعه قرار گرفته و در ادامه، اثرات استغراق سرریز جانبی بر روی الگوی جریان در هر دو رژیم جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### معادلات حاکم

دست سرریز جانبی به ارتفاع سرریز و عرض کانال اصلی به طول سرریز جانبی توسط نواک و همکاران (۲۰۱۳) پیشنهاد شد. در رژیم جریان فوق بحرانی با و بدون پرش هیدرولیکی، هاگر (۱۹۹۴) یک راه حل تحلیلی را برای کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی ارائه نمود. اولیوتو و همکاران (۲۰۰۱) مشخصات جریان در امتداد سرریزهای جانبی مستطیلی و منشوری را مورد بررسی قرار دادند. یک مفهوم از ضریب دبی اولیه<sup>۱</sup> برای رژیم جریان فوق بحرانی در کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی توسط قدسیان (۲۰۰۳) ارائه گردید. میزومورا و همکاران (۲۰۰۳) به صورت آزمایشگاهی و عددی، نسبت دبی سرریز جانبی به دبی کانال اصلی، سرعت و عمق جریان در جریان خروجی از کانال جانبی برای شرایط جریان فوق بحرانی مورد مطالعه قرار دادند. در عمل کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی به عنوان مقطع مبدل مجاری مستطیلی به دایروی منهول‌های شبکه دفع فاضلاب شهری استفاده می‌شوند. یک راه حل تحلیلی-گرافیکی برای محاسبه دبی سرریز جانبی و پروفیل سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع در کانال‌های U شکل برای هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی به وسیله اویمان (۱۹۹۷) ارائه شد. وطن‌خواه (۲۰۱۳) معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی را با استفاده از روش انتگرال گیری بیضوی غیرکامل در یک کانال U شکل دارای سرریز جانبی برای رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی حل کرد. اخیراً، مدل‌های عددی به شکل گسترده‌ای در رشته‌های مختلف مهندسی کاربرد دارند. آیدین (۲۰۱۲) پروفیل سطح آزاد جریان در امتداد یک سرریز کنگره‌ای مثلثی<sup>۲</sup> را برای رژیم جریان زیر بحرانی با استفاده از مدل آشفتگی FLUENT مدل‌سازی کرد. آیدین و امیراگلو (۲۰۱۳) ظرفیت آگذری سرریزهای جانبی کنگره‌ای مثلثی واقع

<sup>1</sup> preliminary discharge coefficient

<sup>2</sup> triangular labyrinth side weir

اثرات استغراق سرریزجانبی بر روی میدان جریان داخل کانال اصلی در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای مستغرق نمودن سرریزجانبی، یک سرریز مستطیلی در انتهای پائین‌دست کانال جانبی نصب شده است. ارتفاع این سرریز مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۰۲ متر است. کل دیواره‌های جامد به عنوان شرایط مرزی دیواره تعریف شده است و شرط عدم لغزش (no-slip) در آنجا اعمال می‌شود. یک صفحه تقارن (symmetry) در بالاترین لایه هوا تعریف گردیده است.

#### آرایش شبکه‌بندی

در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، نتایج مدل‌سازی عددی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷) صحت‌سنجی شده است. مدل آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷) شامل یک سرریزجانبی غیرمستغرق است که بر روی دیواره جانبی یک کانال U شکل نصب شده است. در جدول ۱ مشخصات مدل آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷) برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی نشان داده شده است. در این جدول P.L, D و S<sub>0</sub> به ترتیب برابر با قطر کانال اصلی، طول تاج سرریزجانبی، ارتفاع سرریزجانبی و شیب کف کانال اصلی است.

جدول ۱- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷).

رژیم جریان	D (m)	L (m)	P (m)	S <sub>0</sub>
زیربحرانی	۰/۲۵	۰/۵	۰/۸	۰,۰
فوق‌بحرانی	۰/۲۵	۰/۵	۰/۰۶	۰/۰۰۵

در مدل عددی و برای هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، قطر کانال برابر ۰/۲۵ متر و طول کانال برابر ۱۰/۵ متر بوده که یک کانال جانبی به طول یک

در این مطالعه، معادله پیوستگی و معادلات متوسط گیری شده ناویر استوکس برای یک سیال غیرقابل تراکم به صورت ذیل نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0.0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -P \delta_{ij} + \rho \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad [2]$$

در اینجا  $U_i, U_j$  و  $x$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) به ترتیب مولفه‌های سرعت و محورهای مختصات در سیستم مختصات کارتزین می‌باشند. همچنین  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $P$  فشار،  $\delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) دلتای کرونیکر،  $\nu_t$  ویسکوزیته آشفتگی است. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان داخل کانال U شکل دارای سرریزجانبی از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  RNG استفاده شده است. زیرا همچنین مدل آشفتگی RNG  $k - \varepsilon$  نسبت به سایر مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای (بعنوان مثال مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  استاندارد) کاربرد بیشتری داشته و به ثابت‌های تجربی کمتری نیاز دارد و برای شبیه‌سازی نواحی دارای جدانشدگی جریان، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.

همچنین برای مدل‌سازی تغییرات سطح آزاد میدان جریان طرح VOF بکار رفته است. یک تابع F برای طرح حجم سیال تعریف شده است. در طرح VOF معادله انتقال زیر برای محاسبه جزء حجمی سیال حل می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0.0 \quad [3]$$

در اینجا F جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی مشخص است. اگر  $F=0$  باشد، سلول مذکور خالی می‌باشد، و اگر  $F=1$  باشد سلول محاسباتی پر از سیال است. در مقطع ورودی کانال اصلی، دبی و عمق جریان مشخص به‌عنوان شرایط مرزی تعریف شده است. عمق جریان و فشار خروجی به عنوان شرایط مرزی در مقطع خروجی کانال U شکل اعمال شده است. همان‌گونه که بیان شد، در این مطالعه عددی

مشخصات هیدرولیکی میدان جریان مقدار  $y^+$  مساوی ۱۲۰ در نظر گرفته شد. جدول ۲ تعداد سلول‌های محاسباتی در راستای X، Y و Z برای هر دو رژیم جریان را نشان می‌دهد.

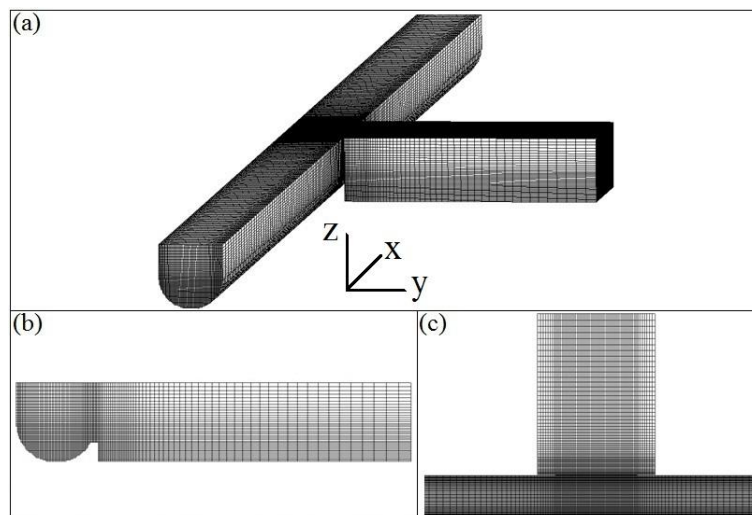
**بحث و نتیجه‌گیری**

در این مطالعه، نتایج شبیه‌سازی عددی برای هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷) صحت سنجی شده است. خلاصه‌ای از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷) برای هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی در جدول (۳) مرتب شده است. در این جدول،  $Q_1, Z_1, Z_2, L/D, P/D$  و  $S_0$  به ترتیب دبی ورودی، عمق جریان در ابتدا و انتهای سرریز جانبی، نسبت طول، ارتفاع سرریز به قطر کانال اصلی و شیب کف کانال اصلی می‌باشند.

متر، عرض ۰/۷ متر و عمق ۰/۲۵ متر در میانه کانال اصلی به آن وصل شده است. برای هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی، کل دامنه محاسباتی توسط یک بلوک مش غیریکنواخت شبکه‌بندی شده است. ابعاد شبکه‌بندی در مجاورت دیواره جامد و تقاطع کانال اصلی و کانال جانبی بسیار ریزتر از سایر نواحی مش-بندی شده است (شکل ۱). معادله زیر برای بدست آوردن ابعاد شبکه در مجاورت دیواره جامد استفاده می‌شود:

$$y^+ = \frac{y_1 \cdot u_*}{\nu} \quad [4]$$

در اینجا  $y_1$  فاصله مرکز سلول از دیواره جامد،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال می‌باشد. بر اساس راهنمای کاربر نرم افزار FLOW-3D برای جلوگیری از قرار گرفتن اولین گره محاسباتی در ناحیه زیر لزج مقدار  $y^+$  باید بزرگتر از ۳۰ در نظر گرفته شود. بنابراین در این مطالعه، بر اساس



شکل ۱- میدان محاسباتی شبکه‌بندی شده (a) نمایش ۳ بعدی (b) مقطع عرضی (c) پلان

جدول ۲- تعداد سلول‌های محاسباتی در شبیه‌سازی عددی کانال U شکل دارای سرریز جانبی در هر دو رژیم جریان.

رژیم جریان	موقعیت	در جهت X	در جهت Y	در جهت Z
زیر بحرانی	کانال اصلی	۲۲۲	۶۳	۴۲
	کانال جانبی	۷۵	۵۷	۴۲

فوق بحرانی	کانال اصلی	۲۲۲	۷۸	۳۸
	کانال جانبی	۷۵	۶۲	۳۸

جدول ۳- مشخصات آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۷)

رژیم جریان	$Q_1$ ( $m^3s^{-1}$ )	$Z_1$ (m)	$Z_2$ (m)	L/D	P/D	$S_0$
زیربحرانی	۰/۰۱۷	۰/۱۳۴۷	۰/۱۴۹۱	۲	۰/۴	صفر
فوق بحرانی	۰/۰۲۵	۰/۱۱۵	۰/۰۸۰۹	۲	۰/۲۴	۰/۰۰۵

برای شرایط جریان فوق بحرانی مساوی ۱/۷ درصد محاسبه گردیده است. علاوه بر این مقدار خطای ریشه میانگین مربعات نیز برای شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی به ترتیب برابر ۲/۸۶ و ۲/۲۱ درصد بدست آمده است.

جدول ۴- مقادیر APE و RMSE محاسبه شده برای پروفیل طولی سطح آزاد جریان.

رژیم جریان	APE	RMSE
زیربحرانی	٪ ۲/۷۹	٪ ۲/۸۶
فوق بحرانی	٪ ۱/۷	٪ ۲/۲۱

برای هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، در شکل ۳ نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی در پیش بینی مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی با مقادیر اندازه گیری های آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقادیر APE و RMSE محاسبه شده برای دبی های عبوری از روی سرریز جانبی برای هر دو رژیم جریان در جدول ۵ مرتب شده اند. همان گونه که مشاهده می شود، مدل عددی مقادیر مختلف دبی گذرنده از روی سرریز جانبی را نیز با دقت مناسبی پیش بینی کرده است. لازم به ذکر است که در شکل مذکور محور های افقی و قائم ( $Q_w, Q_1$ ) به ترتیب نشان دهنده دبی داخل کانال اصلی قبل از سرریز و دبی عبوری از روی سرریزهای جانبی هستند.

به طور کلی در شرایط جریان زیربحرانی، عمق جریان از بالادست سرریز به سوی پائین دست آن افزایش یافته و در مقابل در رژیم جریان فوق بحرانی عمق آب در امتداد سرریز جانبی با کاهش همراه است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی پروفیل طولی سطح آزاد جریان برای هر دو رژیم جریان در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور بررسی دقت مدل عددی، مقادیر درصد خطای میانگین نسبی (APE) و درصد خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) پروفیل طولی سطح آزاد جریان در داخل کانال U شکل دارای سرریز جانبی از روابط ذیل محاسبه می شود:

$$APE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(Measured)} - R_{(Simulated)}}{R_{(Measured)}} \right| \quad [5]$$

$$RMSE = 100 \times \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{R_{(Measured)} - R_{(Simulated)}}{R_{(Measured)}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad [6]$$

در اینجا  $R_{(simulated)}$  و  $R_{(measured)}$  به ترتیب برابر مقادیر آزمایشگاهی و شبیه سازی می باشد. مقادیر APE و RMSE محاسبه شده در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نزدیک بودن شاخص های آماری مذکور به عدد صفر نشان دهنده دقت بیشتر مدل عددی مذکور است. مقادیر APE و RMSE محاسبه شده نشان می دهد که انطباق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی وجود دارد. به عنوان مثال مقادیر خطای میانگین نسبی برای جریان زیربحرانی برابر ۲/۷۹ درصد و

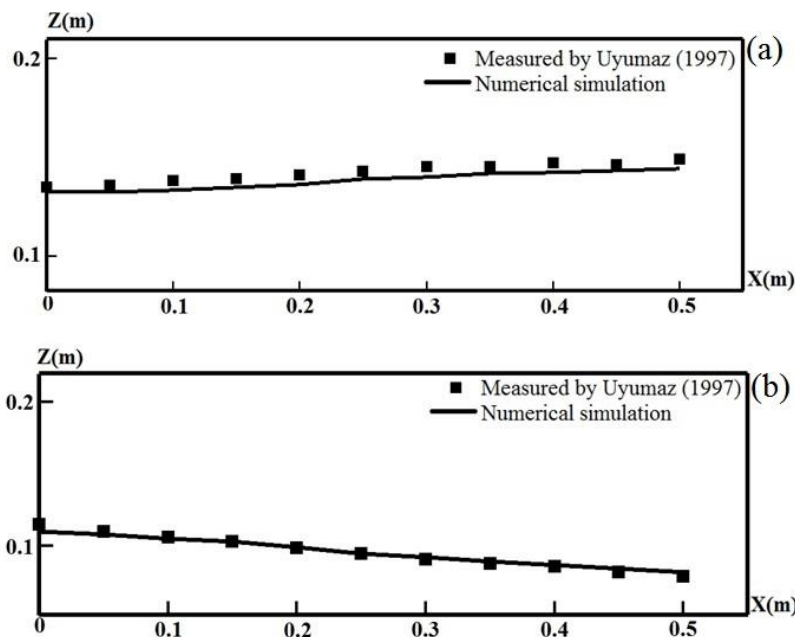
Y=0.0625m (۴-۴) مقطع طولی) به تصویر کشیده شده است.

برای هر دو رژیم جریان، تغییرات تراز سطح آب در قبل از شروع سرریز جانبی ناچیز است. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، یک افت سطح آزاد در ابتدای سرریز جانبی و مجاورت دیواره داخلی (Inner bank) اتفاق افتاده است.

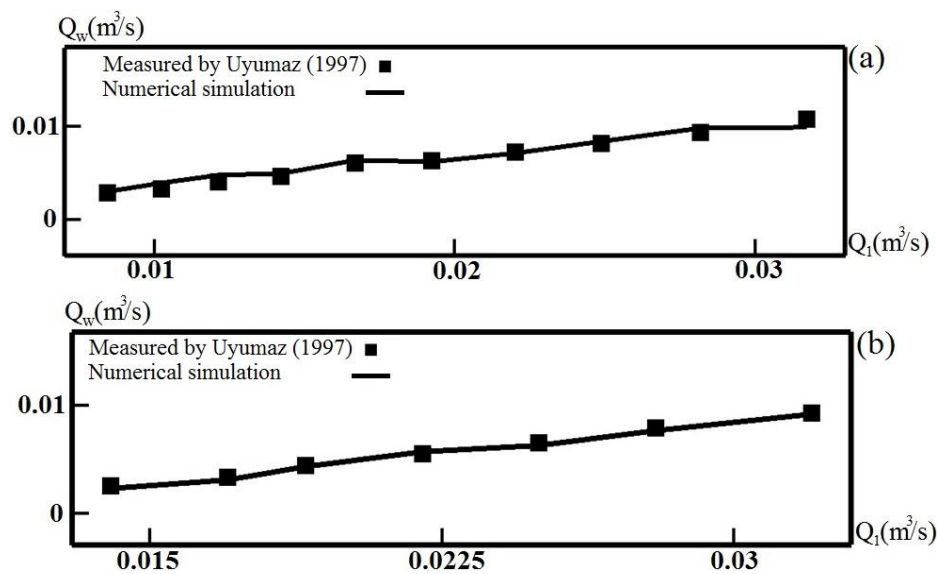
به‌عنوان مثال عمق جریان در محل افت در شرایط جریان زیر بحرانی تقریباً مساوی ۰/۴۸ متر پیش‌بینی شده است. همچنین کمینه عمق جریان در شرایط رژیم فوق‌بحرانی حدوداً برابر با ۰/۳۲ متر تخمین زده شده است.

اویماز (۱۹۹۷) در مطالعه آزمایشگاهی خود تنها به اندازه‌گیری تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع بر محور مرکزی کانال اصلی پرداخت. بنابراین در این مطالعه تغییرات سطح آزاد جریان برای محورهای طولی مختلف در امتداد سرریز جانبی برای هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق بحرانی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در شکل ۴ برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق-بحرانی، پروفیل‌های طولی سطح آزاد شبیه‌سازی جریان در Y=0.245m (۱-۱) مقطع طولی، Y=0.1875m (۲-۲) مقطع طولی، و Y=0.125m (۳-۳) مقطع طولی و



شکل ۲- مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی پروفیل طولی سطح آزاد جریان برای رژیم زیربحرانی (a) رژیم فوق بحرانی (b).



شکل ۳- مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دبی عبوری از روی سرریز جانبی واقع در کانال U شکل (a) جریان زیر-بحرانی (b) جریان فوق‌بحرانی.

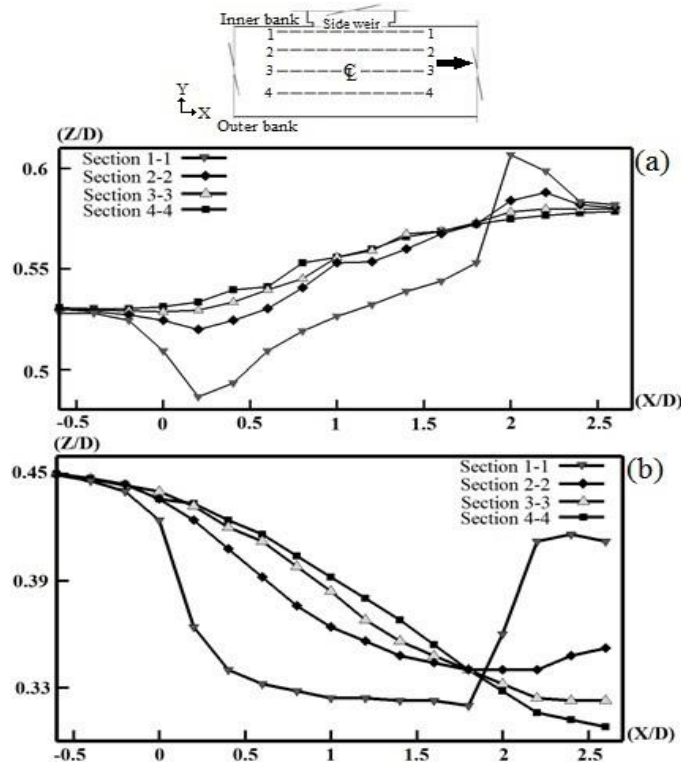
جدول ۵- مقادیر درصد خطای متوسط نسبی (APE) و خطای ریشه میانگین مربعات نسبی (RMSE) دبی عبوری از روی سرریز جانبی در هر دو رژیم جریان.

رژیم جریان	APE	RMSE
زیربحرانی	٪ ۷/۵۶	٪ ۹/۵۲
فوق بحرانی	٪ ۳/۸	٪ ۴/۴

ایستایی برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق-بحرانی به ترتیب مساوی ۰/۶۱ و ۰/۴۲ متر بدست آمده است. بر خلاف رژیم جریان زیربحرانی، در شرایط فوق‌بحرانی تراز سطح آزاد جریان از بالادست سرریز به سوی پائین‌دست آن کاهش می‌یابد.

بعد از این افت سطح آزاد، در رژیم زیربحرانی، عمق جریان به سمت پائین‌دست سرریز افزایش می‌یابد این در حالی است که عمق آب در رژیم فوق بحرانی به تدریج به سوی پائین‌دست کاهش یافته است (مقطع ۱-۱). در هر دو شرایط جریان، یک پرش سطحی بهمراه یک نقطه ایستایی در انتهای پائین‌دست سرریز جانبی به وقوع پیوسته است. مقدار عمق جریان در محل نقطه





شکل ۴- پروفیل طولی سطح آزاد شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی غیرمستغرق (a) جریان زیر بحرانی (b) جریان فوق بحرانی.

مقدار پارامتر مذکور بر روی لبه تاج سرریز در مقاطع عرضی میانی و انتهایی به ترتیب مساوی با ۰/۵۹۱ و ۰/۲۶۳ متر بر ثانیه تخمین زده شده است. به طور کلی در شرایط جریان فوق بحرانی، مقدار سرعت عرضی از ابتدای سرریز به سمت انتهایی سرریز جانبی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، سرعت عرضی در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی به ترتیب برابر ۰/۴۵۹، ۰/۰۸۵ و ۰/۶۱۶ متر بر ثانیه بدست آمده است.

جریان ثانویه به دلیل جریان جانبی در داخل کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی و شرایط جریان زیر بحرانی به وجود می‌آید. شکل ۶ جریان مقدار بردارهای سرعت عرضی (سرعت متوسط عرضی) با پیشروی به سمت پائین دست کانال اصلی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است مقادیر مذکور به صورت مستقیم از خروجی نرم افزار استخراج شده‌اند. به بیان دیگر به ازای بزرگای مشخصی از بردار سرعت از فاصله یک متری بعد از سرریز جانبی مقدار مولفه

یک جریان جانبی به دلیل وجود سرریز جانبی در داخل کانال اصلی تولید می‌شود. شکل ۵ خطوط هم‌تراز سرعت عرضی شبیه‌سازی شده در مقاطع عرضی واقع در ابتدا ( $x=0.0$ ), وسط ( $x=0.25$ ) و انتها ( $x=0.5$ ) سرریز جانبی در هر دو شرایط جریان نشان داده شده است. در شرایط جریان زیر بحرانی، جریان عرضی از ابتدای سرریز به سوی وسط دهانه افزایش یافته و سپس با پیشروی به سوی پائین دست سرریز جانبی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال مقدار مولفه عرضی سرعت در ابتدای دهانه سرریز جانبی بر روی لبه تاج مساوی ۰/۱۷ متر بر ثانیه پیش‌بینی شده است. همچنین ثانویه در داخل کانال اصلی و برای مقاطع عرضی مختلف رژیم جریان زیر بحرانی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی و در رژیم زیر بحرانی، یک سلول جریان ثانویه در بعد از سرریز جانبی تولید می‌شود و با پیشروی به سوی پائین دست کانال اصلی توسعه می‌یابد. به عنوان مثال،

تنها بر روی تغییرات سطح آزاد جریان در هر دو رژیم جریان و سرعت عرضی در رژیم جریان فوق‌بحرانی اثر گذار بوده است. در شکل ۸ تغییرات سطح آزاد جریان برای سرریزجانبی مستغرق در شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ترسیم شده است. در هر دو رژیم جریان، افت و شیب پروفیل‌های طولی سطح آزاد برای سرریزجانبی مستغرق کمتر از سرریزجانبی غیرمستغرق می‌باشد. همچنین، تراز سطح آب در نقطه ایستایی در حالت سرریزجانبی مستغرق افزایش یافته است. به‌عنوان مثال ارتفاع نقطه ایستایی در شرایط جریان زیر بحرانی تقریباً مساوی  $0/66$  متر پیش‌بینی شده است. این در حالی است عمق جریان در محل نقطه ایستایی برای رژیم جریان فوق‌بحرانی تقریباً برابر با  $0/45$  متر می‌باشد.

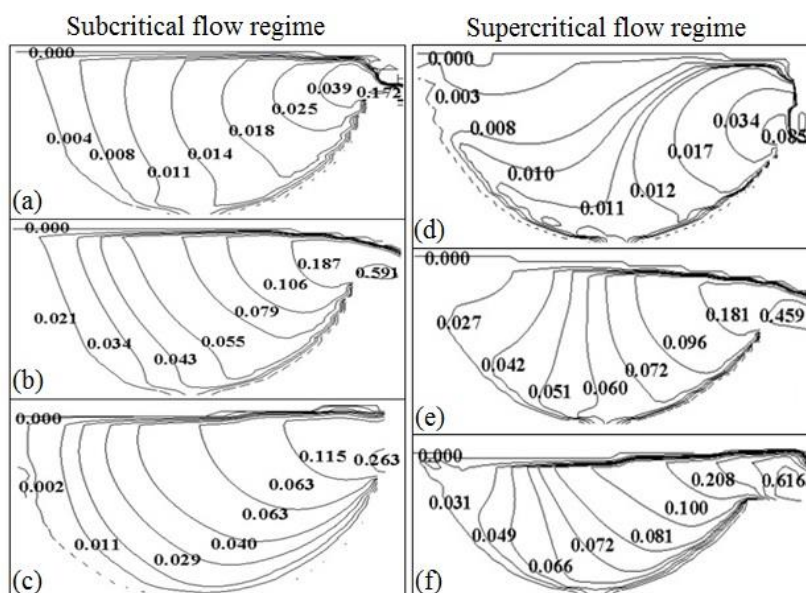
شکل ۹ خطوط هم‌تراز سرعت عرضی در ابتدا، وسط و انتهای سرریزجانبی مستغرق و برای رژیم جریان فوق‌بحرانی را نشان می‌دهد. بر خلاف سرریزجانبی غیرمستغرق، حداکثر سرعت عرضی تقریباً در وسط دهانه سرریزجانبی مستغرق به وقوع پیوسته است. به بیان دیگر مقدار پارامتر مذکور بر روی لبه تاج سرریز جانبی در مقاطع عرضی واقع بر ابتدا، وسط و انتهای سرریز به‌ترتیب مساوی با  $0/074$ ،  $0/292$  و  $0/153$  متر بر ثانیه پیش‌بینی شده است.

عرضی سرعت مساوی  $0/02$  متر بر ثانیه است و پا پیش‌روی به سوی پائین‌دست این طول مشخص افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که نیری و ادگار (۱۹۹۳) در مطالعات خود در ارتباط با جریان داخل آبگیرهای جانبی و همچنین رزیر (۲۰۰۷) در یک بررسی آزمایشگاهی و عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۶) در مطالعه عددی خود بر روی سرریزهای جانبی، به وجود جریان‌های ثانویه در راستای طولی کانال اصلی اشاره کرده‌اند.

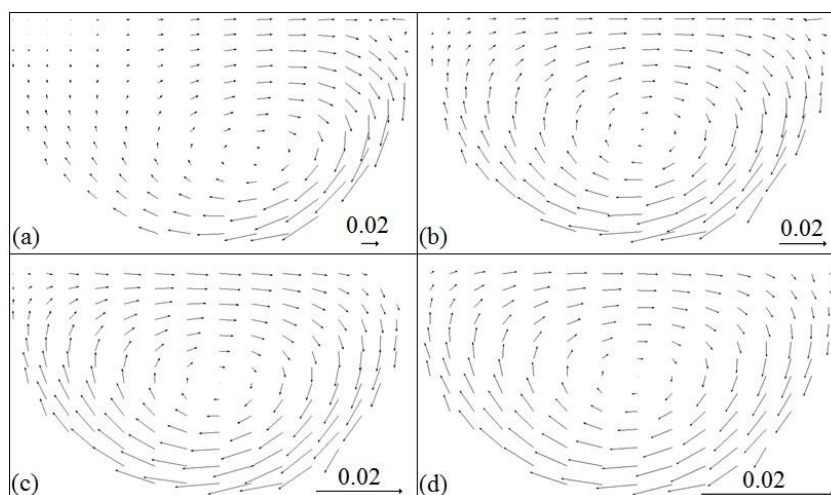
شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی عددی برای بردارهای سرعت عرضی در شرایط جریان فوق‌بحرانی واقع در مقاطع عرضی مختلف را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، یک جریان جانبی در نزدیکی دیواره خارجی (Outer bank) کانال اصلی واقع در مقطع عرضی  $x=1m$  تولید می‌شود. سپس در مقطع بعدی ( $x=2m$ )، دو سلول چرخشی<sup>۳</sup> که یکی از آنها در نزدیکی دیواره داخلی و برخلاف عقربه‌های ساعت و دیگری مجاور دیواره خارجی و در جهت عقربه‌های ساعت تولید می‌شوند. در مقاطع واقع در  $x=3$  و  $x=4m$  این سلول‌های چرخشی خذف شده و بردارهای سرعت عرضی به سمت دیواره داخلی متمایل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، مقدار بردارهای سرعت با پیش‌روی به سوی پایین‌دست کانال اصلی کاهش می‌یابد.

در ادامه اثرات استغراق سرریزجانبی بر روی الگوی جریان کانال اصلی در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی بررسی می‌شود. در شبیه‌سازی مدل‌های سرریزجانبی مستغرق، شرایط مرزی، پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مشابه مدل‌های سرریزجانبی غیرمستغرق است. مقایسه الگوی جریان در مدل‌های شبیه‌سازی شده سرریزجانبی مستغرق و سرریزجانبی غیرمستغرق نشان می‌دهد که استغراق سرریزجانبی

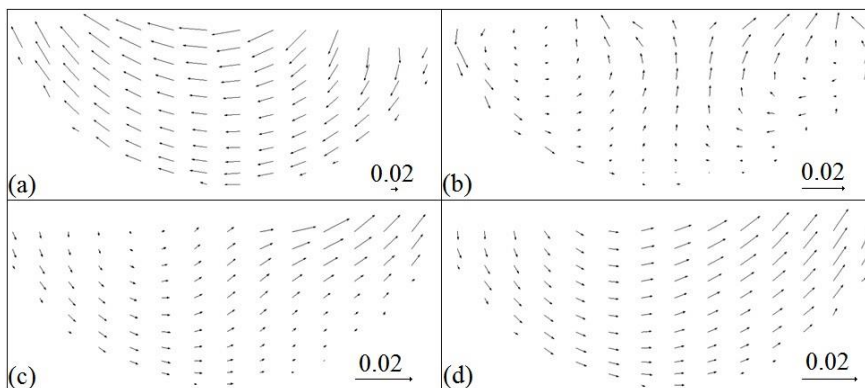
<sup>3</sup> Motion cells



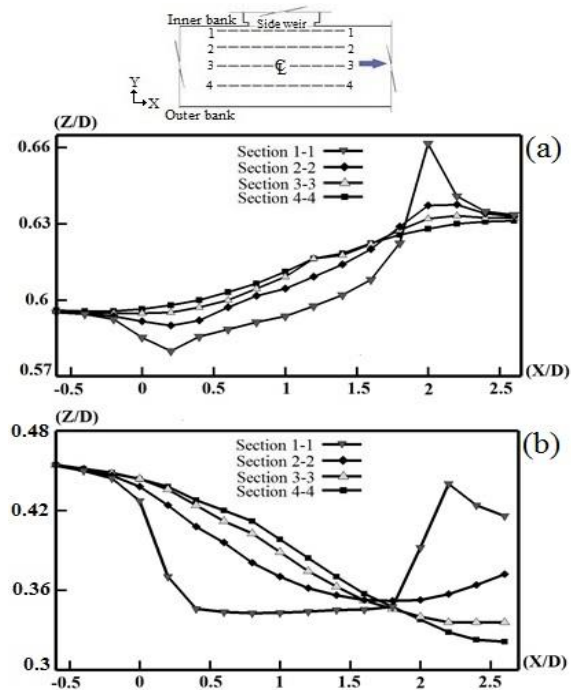
شکل ۵- خطوط هم‌تراز سرعت عرضی شبیه‌سازی شده در مقاطع عرضی واقع در ابتدا (a و d)، وسط (b و e)، و انتهای (c و f) سرریز جانبی.



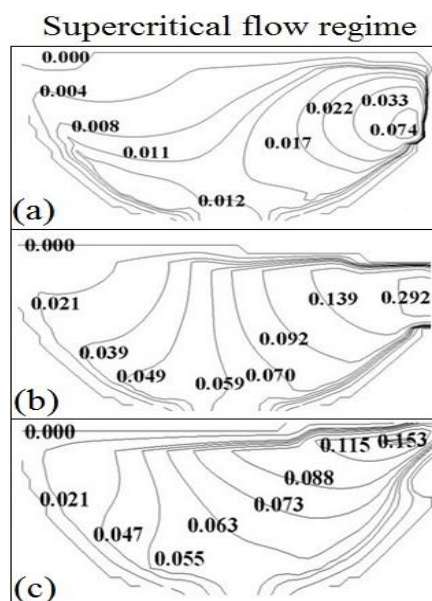
شکل ۶- بردارهای سرعت عرضی شبیه‌سازی شده برای رژیم جریان زیر بحرانی در مقاطع عرضی واقع در (a)  $x=1m$  (b)  $x=2m$  (c)  $x=3m$  (d)  $x=4m$ .



شکل ۷- بردارهای سرعت عرضی شیب‌سازی شده برای رژیم جریان فوق بحرانی واقع در مقاطع عرضی واقع در (a)  $x=1m$  (b)  $x=2m$  (c)  $x=3m$  (d)  $x=4m$ .



شکل ۸- تراز سطح آزاد آب در حالت سرریز جانبی مستغرق برای مقاطع طولی مختلف (a) جریان زیر بحرانی (b) جریان فوق بحرانی.



شکل ۹- خطوط هم‌تراز سرعت عرضی در (a) ابتدا (b) وسط و (c) انتهای سرریز جانبی مستغرق برای رژیم جریان فوق بحرانی.

## نتیجه گیری کلی

سرریزجانبی به وقوع پیوسته است. در شرایط زیربحرانی، سرعت جانبی از ابتدا تا وسط دهانه سرریزجانبی افزایش یافته و سپس با پیشروی به سوی پائین دست سرریز با کاهش همراه است. بر اساس نتایج شبیه سازی عددی، بزرگای بردارهای سرعت عرضی در رژیم فوق بحرانی از ابتدای سرریز به سمت انتهای آن افزایش می یابند. در شرایط زیربحرانی، یک سلول جریان ثانویه در بعد از سرریزجانبی تولید می شود و با پیشروی به سوی پائین دست کانال اصلی توسعه می یابد. مقایسه الگوی جریان در داخل کانال‌های U شکل دارای سرریزجانبی غیرمستغرق و مستغرق نشان می دهد که استغراق سرریزجانبی تنها بر روی تغییرات سطح آزاد جریان در هر دو رژیم جریان و سرعت عرضی در شرایط فوق بحرانی اثر گذار بوده است. در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، افت و شیب پروفیل‌های طولی سطح آزاد برای سرریزجانبی مستغرق کمتر از حالت سرریزجانبی غیرمستغرق است. برای هر دو رژیم جریان، برخلاف سرریزجانبی غیرمستغرق، حداکثر سرعت عرضی تقریباً در وسط دهانه سرریزجانبی مستغرق به وقوع پیوسته است.

به طور کلی، کانال‌های U شکل به عنوان مقطع مبدل کانال‌های مستطیلی به دایروی منهول‌های شبکه دفع فاضلاب شهری استفاده می شوند. در این مطالعه، جریان سطح آزاد و آشفتگی میدان جریان رژیم زیربحرانی و فوق بحرانی در داخل کانال‌های U شکل دارای سرریزجانبی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و طرح VOF شبیه سازی عددی می شود. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی نشان دهنده دقت قابل قبول مدل عددی در پیش بینی جریان سطح آزاد است. مقدار  $RMSE$  پروفیل‌های سطح آزاد شبیه سازی شده برای رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی به ترتیب برابر با  $2/86\%$  و  $2/21\%$  محاسبه شده است. برای هر دو رژیم جریان، یک افت سطح آزاد در ابتدای سرریزجانبی و در مجاورت دیواره داخلی اتفاق افتاده است. سپس در شرایط جریان زیربحرانی، عمق جریان با پیشروی به سوی پائین دست سرریزجانبی افزایش یافته و این در حالی است که در شرایط جریان فوق بحرانی عمق جریان با پیش روی به سمت انتهای سرریز به تدریج کاهش می یابد. برای هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، یک پرش سطحی به همراه یک نقطه ایستایی در انتهای پائین دست

## منابع مورد استفاده

- Aydin MC, 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. Adv. Eng. Soft. 45, 159-166.
- Aydin MC and Emiroglu ME, 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. Flow. Meas. Instrument. 29, 1-8.
- Azimi H and Shabanlou S, 2016. Numerical simulation of flow free surface and field in circular channel along the sideweir in subcritical flow conditions. Water and Soil Science-University of Tabriz. 26(1-1): 225-238.
- Azimi H, Shabanlou S, Ebtehaj I and Bonakdari, H, 2016. Discharge coefficient of rectangular side weirs on circular channels. Inter. J. Nonl. Sci. Num. Sim. 17(7-8), 391-399.
- Azimi H, Shabanlou S and Salimi MS, 2014. Free surface and velocity field in a circular channel along the side weir in supercritical flow conditions. Flow. Meas. Instrument. 38, 108-115.
- Azimi H and Shabanlou S, 2017. Numerical study of the effect of the bed slope change of circular channel on supercritical flow along the side weir. Water and Soil Science-University of Tabriz. 27(3): 53-64.
- Bagheri S and Heidarpour M, 2012. Characteristics of Flow over Rectangular Sharp-Crested Side Weirs. J. Irrig. Drain. Eng. 138, 541-547.
- FLOW-3D Version 10.0 [Computer Software]. Flow Science, Santa Fe.NM.

- Ghodsian M, 2003. Supercritical Flow over a Rectangular Side Weir. *Can. J. Civil Eng.* 30, 596-600.
- Hager WH, 1994. Supercritical Flow in Circular-Shaped Side Weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120, 1-12.
- Kaya N, Emiroglu ME and Agaccioglu H, 2011. Discharge coefficient of a semi-elliptical side weir in subcritical flow. *Flow. Meas. Instrument.* 22, 25-32.
- Mizumura K, Yamasaka M and Adachi J, 2003. Side Outflow from Supercritical Channel Flow. *J. Hydraulic Eng.* 129, 769-776.
- Neary VS and Odgaard AJ, 1993. Three-dimensional flow structure at open channel diversions. *J. Hydraulic Eng.* 119(11), 1224-1230.
- Neary VS and Odgaard AJ, 1995. Closure to Three-Dimensional Flow Structure at Open Channel Diversions. *J. Hydraulic Eng.* 121(1), 88-90.
- Novak G, Kozelj D, Steinman F and Bajcar T, 2013. Study of flow at side weir in narrow flume using visualization techniques. *Flow. Meas. Instrument.* 29, 45-51.
- Oliveto G, Biggiero V and Fiorentino M, 2001. Hydraulic Features of Supercritical Flow along Prismatic Side Weirs. *J. Hydraulic Res.* 39, 73-82.
- Rosier B, 2007. Interactions of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel. PhD Thesis, EPFL University, Lausanne, Switzerland.
- Uyumaz A and Muslu Y, 1985. Flow over side weirs in circular channels. *J. Hydraulic Eng.* 111, 144-160.
- Uyumaz A, 1997. Side weir in U-shaped channels. *J. Hydraulic Eng.* 123, 639-646.
- Vatankhah AR, 2013. Water surface profiles along a rectangular side weir in a U-shaped channel. *J. Hydrologic. Eng.* 18, 595-602.
- Venutelli M, 2008. Method of solution of nonuniform flow with the presence of rectangular side weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134, 840-846.