

## شبیه‌سازی سه‌بعدی مشخصات جریان فوق‌بحرانی در کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۳/۱۶

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران آب. مرکز تحقیقات آب و فاضلاب، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- استادیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

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

### چکیده

کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی به شکل گسترده‌ای برای تنظیم و کنترل عمق جریان در شبکه‌های جمع-آوری فاضلاب شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه، آشفتگی میدان جریان و تغییرات سطح آزاد جریان فوق‌بحرانی در داخل یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  RNG و طرح VOF شبیه‌سازی سه‌بعدی شد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی، سطح آزاد و مشخصات میدان جریان را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی، عمق جریان در امتداد سرریز جانبی از ابتدای سرریز بسمت انتهای آن با کاهش همراه بود. در کلیه شبیه‌سازی‌ها یک افت سطح آزاد در ابتدای بالادست سرریز جانبی اتفاق افتاد. همچنین یک پرش سطحی در انتهای دهانه سرریز جانبی به وقوع پیوست. تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی برای رژیم جریان فوق‌بحرانی تقریباً ثابت است و افت انرژی ناچیز می‌باشد اما با افزایش طول سرریز جانبی اختلاف انرژی در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی میدان سرعت نشان می‌دهد که بیشینه مقدار سرعت طولی و عرضی جریان به ترتیب در انتها و وسط دهانه سرریز جانبی به وقوع پیوست. همچنین در هر مقطع عرضی، بیشینه سرعت قائم در مجاورت تاج سرریز جانبی اتفاق افتاد.

واژه‌های کلیدی: جریان فوق‌بحرانی، سرریز جانبی، شبیه‌سازی سه‌بعدی، کانال دایروی، مشخصات میدان جریان

## 3D Simulation of Supercritical Flow Characteristics in Circular Channels with Side Weirs

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

Received: 2016.3.30

Accepted: 2017.06.06

1- M.Sc. of Water Engineering, Dept. of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

2- Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Kermanshah, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

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

### Abstract

The circular channels with side weirs are widely used to regulate the flow and control the water depth in the urban sewage disposal systems. In this study, the turbulence of flow field and variation of the free surface of supercritical flow in a circular channel with a side weir are simulated using FLOW-3D software, the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and VOF scheme. Comparison between the numerical simulation and laboratory measurements shows that the numerical model has simulated the free surface and flow field profile with reasonable accuracy. According to the numerical simulation, the flow depth is decreased along the side weir. In all simulations, a free surface drop has happened at the upstream beginning of the side weir. There is also a surface jump at the downstream end of the side weir. The change of specific energy along the side weir for the supercritical flow regime is almost constant and the energy loss is not significant but by increasing the side weir length the energy difference between the upstream and downstream of the side weir increases. The velocity field analysis indicates that the maximum longitudinal and lateral flow velocities happen at the end and middle of the side weir, respectively. Also in each cross-section, the maximum vertical velocity happens in vicinity of the side weir.

**Keywords:** Circular channel, Flow field features, Side weir, Supercritical flow, 3D simulation

### مقدمه

تحلیلی و عددی مختلفی در ارتباط با جریان در داخل کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی انجام گرفته است. آلن (۱۹۵۷) جزء اولین کسانی بود که یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی جریان در داخل کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی انجام داد. اویماز و موسلا (۱۹۸۵) یک راه حل تحلیلی برای محاسبه نیمرخ طولی جریان و دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی واقع بر یک کانال دایروی در هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی ارائه دادند. راه حل تحلیلی ارائه شده توسط اویماز و موسلا (۱۹۸۵) بر پایه اصول انرژی استوار بوده و به روش اجزاء محدود محاسبه شد. هاگر (۱۹۹۴) یک راه حل تحلیلی برای جریان‌های فوق‌بحرانی عبوری از

در عمل کانال‌های با سطح مقطع دایره همراه با سرریز جانبی به صورت گسترده‌ای در شبکه‌های دفع فاضلاب شهری استفاده می‌شوند. سرریز جانبی یک نوع سازه هیدرولیکی است که بر روی دیواره جانبی کانال-های اصلی نصب می‌شود. هنگامی که جریان در داخل کانال اصلی بالاتر از تراز تاج سرریز جانبی باشد آب-های اضافی از روی سرریز جانبی به داخل کانال جانبی هدایت می‌شوند. سرریزهای جانبی کاربرد بسیار وسیعی دارند و برای کنترل سطح جریان در سیستم‌های زهکشی، جمع‌آوری فاضلاب و شبکه‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعات آزمایشگاهی،

از مهمترین مزیت شبیه سازی های عددی محسوب می شوند. کیو (۲۰۰۵) با استفاده از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  و روش VOF تغییرات سه بعدی جریان عبوری از روی سرریز جانبی را مدل سازی نمود. وی نشان داد که مدل عددی مذکور برای شبیه سازی میدان جریان در مقایسه با نرم افزارهای تجاری مدت زمان محاسباتی کمتری را اجرا می کند. تدین (۲۰۰۹) یک مدل سه بعدی را برای شبیه سازی سطح آزاد و میدان سرعت در داخل کانال های مستطیلی دارای سرریز جانبی ارائه نمود. وی نشان داد که در صورت استفاده از مدل آشفتگی RSM برای شبیه سازی آشفتگی جریان و بهره گیری از طرح VOF برای بازسازی سطح آزاد، مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است. مانگارولکار (۲۰۱۰) با استفاده از مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  و روش VOF جریان سه بعدی عبوری از روی سرریز جانبی با تاج صفر را مدل سازی عددی نمود. همچنین وی بیان نمود که نقطه سکون در پائین دست سرریز جانبی به وقوع می پیوندد. آیدین (۲۰۱۲) تغییرات سطح آزاد جریان واقع در یک کانال مستطیلی دارای سرریز جانبی مثلثی کنگره ای را به کمک طرح VOF و نرم افزار FLUENT برای اعداد فرود مختلف شبیه سازی عددی نمود. وی در مطالعه عددی خود به وقوع یک پرش سطحی در پائین دست سرریز جانبی اشاره کرد. آیدین و امیرقلو (۲۰۱۳) ظرفیت آگذری سرریزهای کنگره ای مثلثی واقع بر دیواره جانبی کانال های مستطیلی را در رژیم جریان زیر بحرانی شبیه سازی عددی کردند. آنها با تجزیه و تحلیل نتایج مطالعه خود به وجود یک سلول جریان ثانویه در امتداد سرریز جانبی اشاره نمودند. عظیمی و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات سطح آزاد جریان و میدان سرعت در امتداد یک سرریز جانبی واقع بر دیواره جانبی کانال های دایروی در شرایط جریان فوق بحرانی را با استفاده از نرم افزار FLOW-3D مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  و روش VOF مدل سازی عددی کردند. آنها نشان دادند که نقطه سکون در انتهای پرش سطحی اتفاق می افتد. در ادامه عظیمی و همکاران (۲۰۱۶) در یک

داخل یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی را ارائه نمود. روش تحلیلی هاگر (۱۹۹۴) برای هر دو وضعیت جریان فوق بحرانی بدون پرش و با پرش هیدرولیکی کاربرد دارد. رامامورتی و همکاران (۱۹۹۵) با استفاده از نظریه جریان های دو بعدی برگرفته از خطوط جریان آزاد، یک روش تحلیلی برای پیش بینی جریان عبوری از روی یک سرریز جانبی واقع در کانال های دایروی ارائه نمودند. آنها ضریب دبی تحلیلی سرریز جانبی را به عنوان تابعی از پارامترهای هندسی سرریز و کانال اصلی و نیز یک پارامتر سرعت معرفی کردند. اولیوتو و همکاران (۲۰۰۱) مشخصات هیدرولیکی جریان های فوق بحرانی در امتداد یک سرریز جانبی واقع بر دیواره جانبی کانال های دایروی را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش ها آنها بر روی اندازه گیری موضعی زاویه خروجی جریان و سرعت در طول سرریز جانبی متمرکز بود. وطن خواه (۲۰۱۲) با استفاده از اصول انرژی و با روش انتگرال گیری بیضوی غیر کامل معادله دینامیکی حاکم بر جریان های متغیر مکانی با کاهش دبی برای یک کانال دایروی دارای سرریزهای جانبی را حل کرد. وی همچنین نیمرخ سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع در یک کانال دایروی را برای هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی محاسبه نمود. گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) یک راه حل تحلیلی جدید، برای پیش بینی نیمرخ سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی و دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی واقع بر دیواره جانبی یک کانال دایروی در شرایط جریان فوق بحرانی را ارائه نمودند. آنها ضریب دبی مقدماتی سرریزهای جانبی واقع بر روی کانال های دایروی را به عنوان تابعی از نسبت هد انرژی کل در ابتدای بالادست سرریز جانبی به ارتفاع تاج سرریز جانبی معرفی نمودند. در سال های اخیر شبیه سازی عددی میدان جریان در مهندسی هیدرولیک و سازه های هیدرولیکی به شکل گسترده ای مورد استفاده محققان مختلفی قرار گرفته است. بطور کلی صرفه جویی در زمان و کاهش هزینه های آزمایشگاهی

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

<sup>1</sup> Incomplete elliptic integrals

مختصات کارتیزین می‌باشند. همچنین  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $p$  فشار،  $\delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) دلتای کرونیکر،  $\nu_i$  ویسکوزیته آشفتگی است. همچنین در این مطالعه عددی، برای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده شده است. در طرح VOF برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر 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 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 مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا می‌باشد.

#### مدل آزمایشگاهی

در این مطالعه، برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی مذکور متشکل از یک کانال دایروی افقی است که سرریزجانبی بر روی دیواره جانبی کانال اصلی تعبیه شده است. کانال دایروی و سرریزهای جانبی از صفحات پلاگسی گلاس ساخته شده‌اند. در جدول ۱ مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) ارائه گردیده است. در این جدول  $F_0$  و  $Q_0$ ،  $w$ ،  $S$ ،  $L$ ،  $D$  بترتیب برابر قطر کانال اصلی، طول سرریزجانبی، شیب کانال اصلی، ارتفاع تاج سرریزجانبی، دبی در بالادست سرریزجانبی و عدد فرود ابتدای بالادست سرریز می‌باشند. شکل ۱ طرح کلی کانال دایروی دارای سرریزجانبی در شرایط جریان فوق‌بحرانی مورد مطالعه گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) را نشان می‌دهد.

مطالعه عددی و با استفاده از رگرسیون خطی، یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع بر مجاری دایروی شکل پیشنهاد دادند. همچنین عظیمی و شعبانلو (۱۳۹۵) مشخصات هیدرولیکی جریان زیربحرانی درون کانال‌های دایروی شکل دارای سرریزجانبی را شبیه‌سازی کردند. آنها بیان کردند که برای مقادیر مختلف دبی جریان تقریباً یک رابطه خطی بین مقدار دبی کانال اصلی و ارتفاع نقاط سکون وجود دارد.

مرور سوابق تحقیق درارتباط با جریان در داخل کانال‌های دایروی دارای سرریزجانبی نشان می‌دهد که مطالعه بر روی آشفتگی میدان جریان، تغییرات سطح آزاد و الگوی جریان در داخل کانال‌های دایروی دارای سرریزجانبی در رژیم جریان فوق‌بحرانی به بررسی بیشتری نیاز دارد. در این مطالعه عددی، الگوی سه بعدی تغییرات سطح آزاد جریان و میدان سرعت در امتداد سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی در شرایط جریان فوق‌بحرانی توسط نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی عددی شده است. آشفتگی میدان جریان با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و تغییرات سطح آزاد جریان توسط طرح VOF مدل‌سازی گردیده است.

#### مواد و روش‌ها

##### معادلات حاکم

نرم‌افزار FLOW-3D برای حل معادلات حاکم بر جریان از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویراستوکس استفاده می‌کند:

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

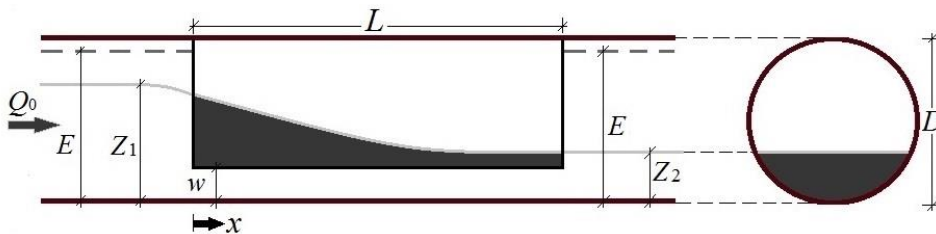
$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -p \delta_{ij} + \rho \nu_i \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad [2]$$

در اینجا  $U_i, U_j$  و  $x$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) به ترتیب

مولفه‌های سرعت و محورهای مختصات در سیستم

جدول ۱- محدوده متغیرها برای مطالعه گراناتا و همکاران (۲۰۱۳).

متغیر	$D(m)$	$L(m)$	$S$	$w(m)$	$Q_0 (m^3 s^{-1})$	$F_0$
مقدار	۰/۲۹	۰/۱-۸/۲	۰/۰	۰/۰-۰/۵/۱۲	۰/۰-۰/۰۴/۰۶۳	۱/۱-۰/۵/۶

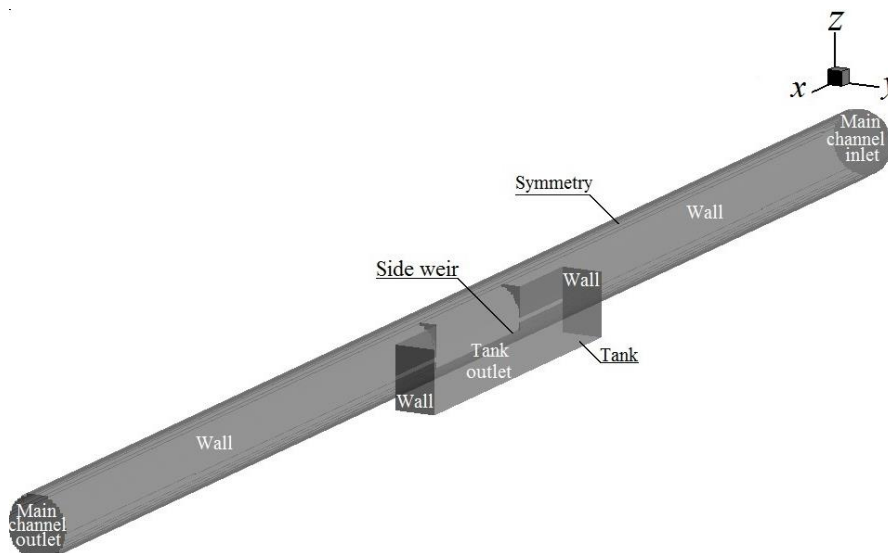


شکل ۱- طرح کلی کانال دایروی دارای سرریز جانبی در شرایط جریان فوق بحرانی مورد مطالعه گراناتا و همکاران (۲۰۱۳).

هدایت می شود که در پائین دست این مخزن شرایط مرزی خروجی اعمال گردیده است. کلیه دیواره های جامد که شامل دیواره های جانبی و کف کانال اصلی و مخزن است بعنوان شرط مرزی Wall تعریف شده و کل لایه فوقانی فاز هوا بعنوان شرط مرزی تقارن انتخاب گردیده است. در شکل ۲ شرایط مرزی مورد استفاده در مدل عددی نشان داده شده است.

شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده بر مدل عددی به صورتی انتخاب شده که بر شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) منطبق باشد. بنابراین با توجه به داشتن دبی و عمق ورودی از مقادیر دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی کانال اصلی استفاده شده است. در مقطع خروجی کانال اصلی از مقادیر فشار و عمق معلوم استفاده شده است. جریان عبوری از روی سرریز جانبی به داخل یک مخزن



شکل ۲- شرایط مرزی مورد استفاده در مدل عددی.

داده شد که پارامتر بدون بعد  $y^+$  که بر اساس رابطه ۴ تعریف می شود، بزرگتر از ۳۰ باشد:

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

مدل عددی

فاصله اولین سلول محاسباتی از دیواره های جامد طوری انتخاب شد که از محاسبات در زیر ناحیه لزوج اجتناب شود. به همین منظور اولین گره در محلی قرار

جدول ۲- یک نمونه استقلال از شبکه‌بندی‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد جریان

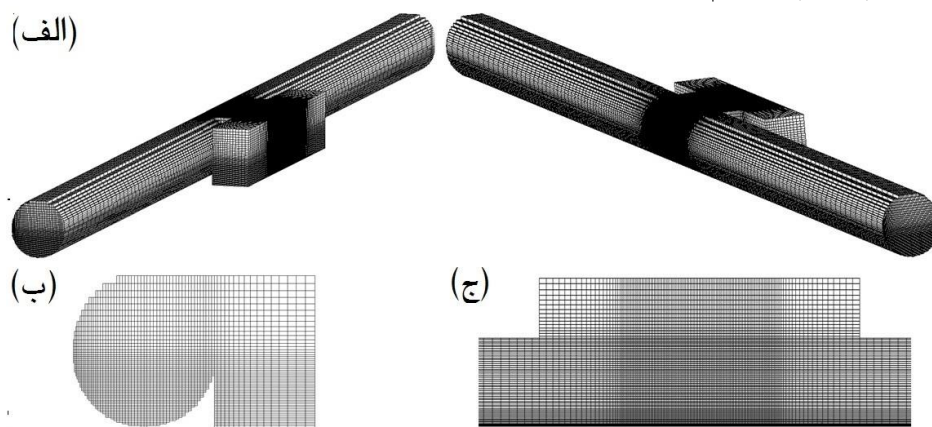
شبکه‌بندی محاسباتی	تعداد سلول‌های محاسباتی	RMSE	MAPE
۱	۴۶۸۱۶۰	۸٪/۳۱	۷٪/۱۹۲
۲	۶۷۲۰۰۰	۵٪/۶۵	۵٪/۱۱۳
۳	۹۳۳۸۰۰	۲٪/۲۴	۱٪/۸۵
۴	۱۲۷۴۰۰۰	۲٪/۱۷	۱٪/۷۹

همان‌گونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج شبکه‌بندی ۳ و ۴ ناچیز بوده و شبکه‌بندی ۳ برای انفصال میدان محاسباتی انتخاب شد. بنابراین کل میدان محاسباتی در راستاهای  $x$  و  $y$  و به ترتیب به وسیله ۲۳۰، ۷۰ و ۵۸ جزء مستطیلی و با توزیع غیریکنواخت شبکه‌بندی شده است. یک نمونه از شبکه‌بندی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی در شکل ۳ نشان داده شده است.

در اینجا  $y_1$  فاصله اولین گره از دیواره در جهت عمود بر آن،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند. کل میدان محاسباتی توسط یک بلوک مش غیریکنواخت منفصل شده است. در جدول ۲ مشخصات یک نمونه استقلال از شبکه‌بندی‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی نیمرخ سطح آزاد جریان مرتب شده است. به منظور بررسی دقت مدل عددی در پیش-بینی پارامترهای مختلف جریان، مقادیر درصد خطای ریشه میانگین مربعات نسبی ( $RMSE$ ) و درصد خطای متوسط مطلق ( $MAPE$ ) با استفاده از روابط ۵ و ۶ محاسبه شده است. در اینجا  $R_{(measured)}$  و  $R_{(simulated)}$  به ترتیب معادل نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشند:

$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right)^2} \quad [5]$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right| \quad [6]$$



شکل ۳- شبکه‌بندی مورد استفاده در انفصال میدان محاسباتی (الف) نمای سه‌بعدی (ب) مقطع عرضی (ج) پلان

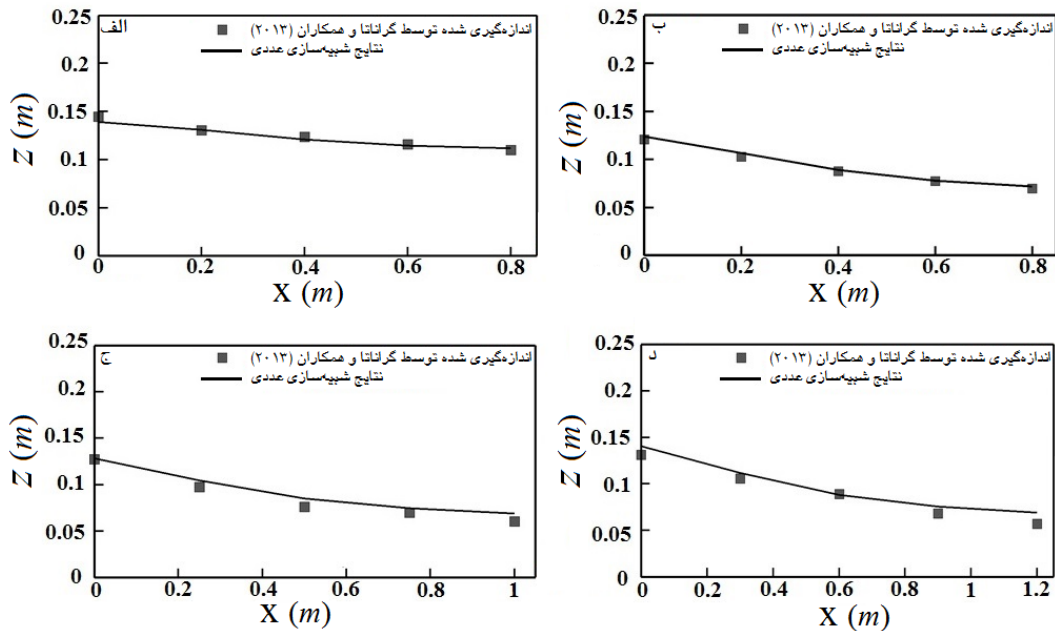
به گونه‌ای که مطابق با الگوی جریان‌های فوق‌بحرانی، عمق جریان در امتداد سرریزجانبی از ابتدای بالادست سرریز به سمت انتهای پائین دست آن با کاهش همراه است و انطباق قابل قبولی بین نتایج مدل‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. مقادیر ( $RMSE$ ) و ( $MAPE$ ) برای نیمرخ‌های طولی سطح آزاد جریان محاسبه شده و در جدول ۳ مرتب شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار خطا برای سرریز با طول کوتاه‌تر ( $L=0.8 m, w=0.1 m, Q_0=0.0421 m^3 s^{-1}$ )

### صحت‌سنجی

در این شبیه‌سازی عددی برای صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) استفاده شده است. در شکل ۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی سطح آزاد جریان فوق‌بحرانی در امتداد سرریزهای جانبی با طول مختلف با نتایج آزمایشگاهی گراناتا و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان را به خوبی پیش‌بینی کرده

جانبی تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریزجانبی با دقت کمتری پیش بینی می شود.

و بیشترین مقدار خطا برای سرریز با طول بیشتر تخمین زده شده است ( $m, w=0.05, Q_0=0.42 m^3 s^{-1}$ ). به عبارت دیگر با افزایش طول دهانه سرریز ( $L=1/2$ ).



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه سازی عددی و آزمایشگاهی برای نیمرخ های سطح آزاد جریان الف)  $m, Q_0=0.431 m^3 s^{-1}$ ، ب)  $L=0.8, w=0.05, Q_0=0.312 m^3 s^{-1}$ ، ج)  $L=1, w=0.05, Q_0=0.33 m^3 s^{-1}$ ، د)  $L=0.8, w=0.05, Q_0=0.42 m^3 s^{-1}$

جدول ۳- مقادیر درصد خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و خطای متوسط (MAPE) نسبی نیمرخ طولی سطح آزاد.

مدل های آزمایشگاهی	RMSE	MAPE
$L=0.8, w=0.05, Q_0=0.431 m^3 s^{-1}$	۲٪/۲۴	۱٪/۸۵
$L=0.8, w=0.05, Q_0=0.312 m^3 s^{-1}$	۲٪/۵۹	۲٪/۳۶
$L=1, w=0.05, Q_0=0.33 m^3 s^{-1}$	۹٪/۴۸	۸٪/۲۶
$L=0.8, w=0.05, Q_0=0.42 m^3 s^{-1}$	۱۱٪/۳۳	۹٪/۸۴

ابتدای بالادست سرریزجانبی به سمت انتهای پائین دست سرریز کاهش یافته است. با توجه به نتایج شبیه سازی، در قبل از سرریزجانبی تغییرات سطح آزاد جریان ناچیز بوده و اثرات سرریزجانبی در آنجا قابل صرف نظر کردن است. امیراغلو و همکاران (۲۰۱۱) در مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار سطح آزاد جریان زیربحرانی در کانال های مستطیلی دارای سرریزجانبی به وجود یک افت در ابتدای بالادست سرریزجانبی اشاره کرده اند. آنها علت این افت ناگهانی را بدلیل اثرات ورودی سرریزجانبی معرفی نمودند. همان گونه که در

### نتایج و بحث

#### نیمرخ های سطح آزاد جریان

در ادامه، تغییرات سطح آزاد جریان در داخل کانال های دایروی دارای سرریزجانبی در شرایط فوق بحرانی مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۵ نیمرخ های سطح آزاد جریان برای شرایط هندسی و اعداد فرود مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می شود، عمق جریان در کلیه شبیه سازی ها با کاهش همراه بوده به صورتی که تراز سطح آزاد جریان از



جریان در امتداد مقطع طولی ۱-۱ نسبت به مقطع طولی ۲-۲ کمتر است.

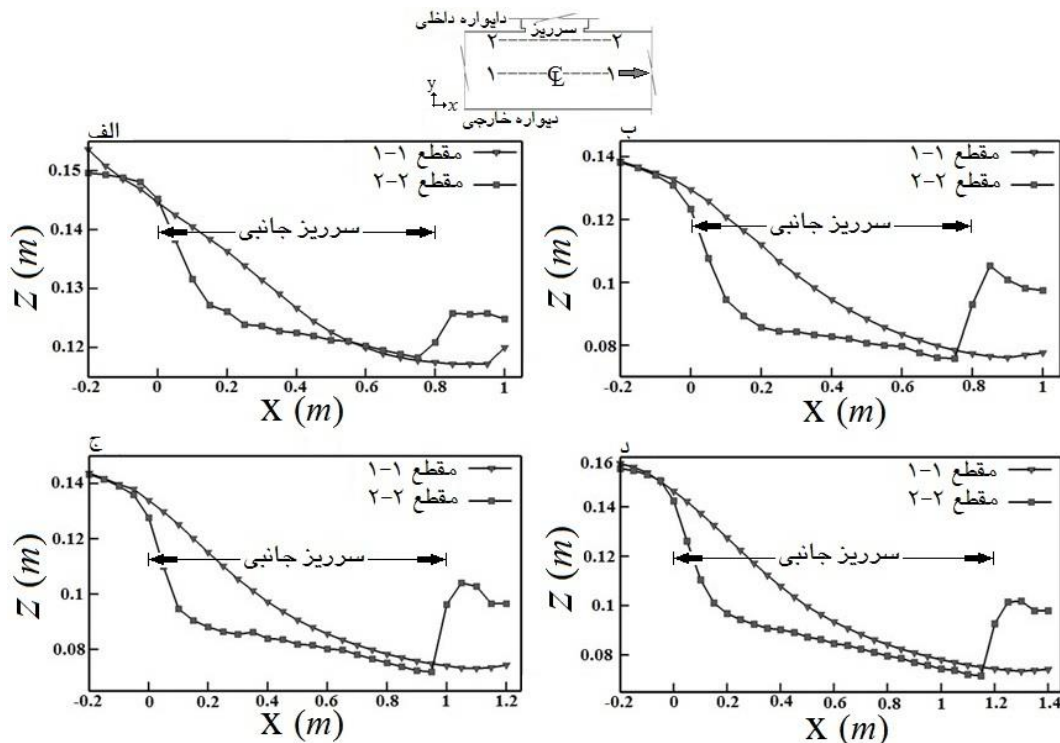
### تغییرات انرژی مخصوص

فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در حل معادلات حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی از اصول اساسی این نوع از جریان‌ها محسوب می‌شود. بر اساس فرضیات دی‌مارچی (۱۹۳۴) در صورت کوتاه بودن طول سرریز جانبی، انرژی مخصوص بین ابتدای بالادست سرریز و انتهای پائین‌دست آن ثابت است و نتایج تجربی نیز نشان می‌دهد که این فرض منطقی می‌باشد. با فرض اینکه شیب کف کانال کم باشد مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی ثابت بوده و برابر است با:

$$E = Z + \alpha \left( \frac{Q^2}{2gA^2} \right) \quad [7]$$

در اینجا  $E$  انرژی مخصوص،  $\alpha$  ضریب تصحیح انرژی مخصوص،  $Q$  دبی در داخل کانال اصلی و  $A$  سطح مقطع عرضی جریان است. بررسی انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی توسط محققان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است.

شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای کلیه شبیه‌سازی‌ها یک افت سطح آزاد در ابتدای سرریز جانبی بوقوع پیوسته است. سپس عمق جریان به تدریج کاهش یافته به گونه‌ای که در انتهای پائین دست سرریز جانبی به کمترین مقدار خود می‌رسد. همچنین امیراگلو و همکاران (۲۰۱۱) به وجود یک پرش سطحی در انتهای پائین دست سرریز جانبی اشاره کرده‌اند. آنها در مطالعات خود گزارش نموده‌اند که در امتداد پرش سطحی، انرژی جنبشی افزایش و انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد. همان‌طور که در مقطع ۲-۲ از شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای کلیه شبیه‌سازی‌ها یک پرش سطحی در انتهای دهانه سرریز جانبی به وقوع پیوسته است. آیدین (۲۰۱۲) با شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در داخل یک کانال مستطیلی در رژیم جریان زیربحرانی، به وجود یک نقطه ایستایی در انتهای پائین دست سرریز جانبی اشاره کرده، نقطه ایستایی دارای بیشترین تراز ارتفاعی آب است. در کلیه مدل‌سازی‌ها، در انتهای پرش سطحی یک نقطه با حداکثر تراز ارتفاعی اتفاق افتاده که نشان دهنده نقطه ایستایی می‌باشد (مقطع ۲-۲ از شکل ۵). همچنین، با دور شدن از دیواره داخلی کانال اصلی اثرات سرریز جانبی کمتر شده، به طوری که تغییرات سطح آزاد



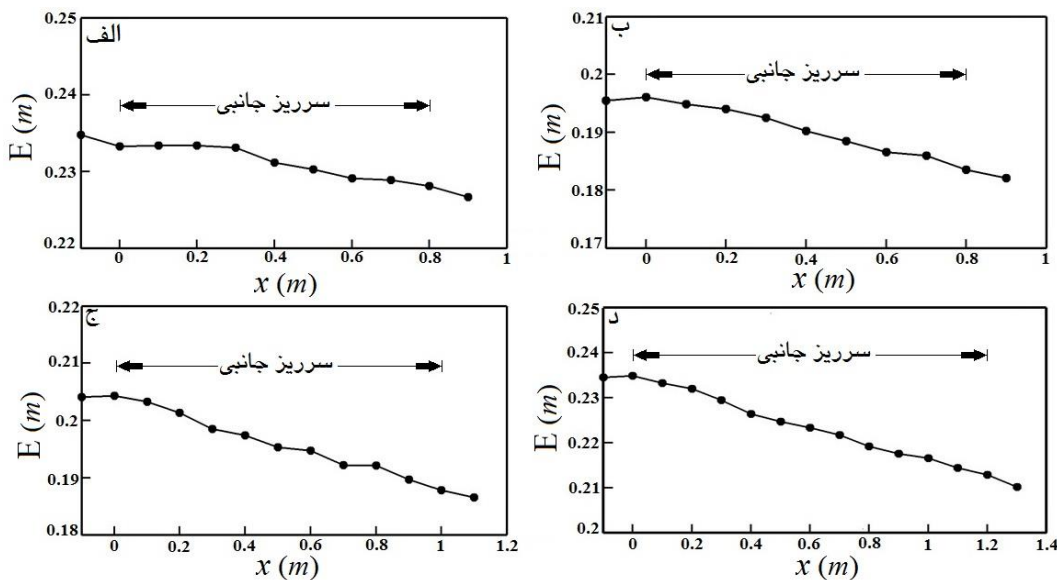
شکل ۵- تغییرات سطح آزاد جریان برای الف)  $L=0.8m, w=0.1m, F_0=1/23$  ب)  $L=0.8m, w=0.1m, F_0=1/27$  ج)  $L=0.8m, w=0.1m, F_0=1/23$  د)  $L=1m, w=0.1m, F_0=1/21$

$L=1/2m, w=0.1m, F_0=1/46$  (د)  $L=1m, w=0.1m, F_0=1/21$



تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی برای رژیم جریان فوق بحرانی نیز تقریباً ثابت بوده و افت انرژی ناچیز می باشد هرچند که با افزایش طول سرریز جانبی اختلاف انرژی در بالادست و پائین دست سرریز جانبی افزایش می یابد. همچنین، در جدول ۴ درصد اختلاف انرژی مخصوص ابتدای بالادست و انتهای پائین دست سرریز جانبی ( $\% \Delta E$ ) مرتب شده است. با توجه به مقادیر جدول ۴ با افزایش طول سرریز جانبی ( $L$ ) اختلاف انرژی در ابتدا و انتهای سرریز جانبی بیشتر خواهد شد. به عبارت دیگر کمترین مقدار افت انرژی برای مدل سرریز با طول کوتاه تر ( $L=0.8\text{ m}, w=0.8\text{ m}, F_0=1/23$ ) و بیشترین مقدار کاهش انرژی در امتداد سرریز طویل تر ( $L=1/46\text{ m}, F_0=1/46$ ) به وقوع پیوست. بنابراین افزایش طول سرریز جانبی باعث افت انرژی بیشتری می شود.

الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶) و برقی و همکاران (۱۹۹۹) بیان کرده اند که مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی برای رژیم جریان زیر بحرانی تقریباً ثابت می باشد. همچنین آنها در مطالعات آزمایشگاهی خود اختلاف بین انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی را به ترتیب برابر ۵٪ و ۳/۷٪ محاسبه کرده اند. پاتیرانا و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعات آزمایشگاهی خود بر روی مشخصات جریان فوق-بحرانی، اختلاف متوسط بین انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی را ۳٪ محاسبه نموده اند. در این بخش از مطالعه، به منظور بررسی فرضیه ثابت بودن انرژی مخصوص در شرایط جریان فوق بحرانی، مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۶ تغییرات انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف و شرایط هندسی متفاوت نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود،



شکل ۶- تغییرات انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی برای الف)  $L=0.8\text{ m}, w=0.8\text{ m}, F_0=1/23$  ب)  $L=0.8\text{ m}, w=0.8\text{ m}, F_0=1/27$  ج)  $L=0.8\text{ m}, w=0.5\text{ m}, F_0=1/21$  د)  $L=1\text{ m}, w=0.5\text{ m}, F_0=1/46$

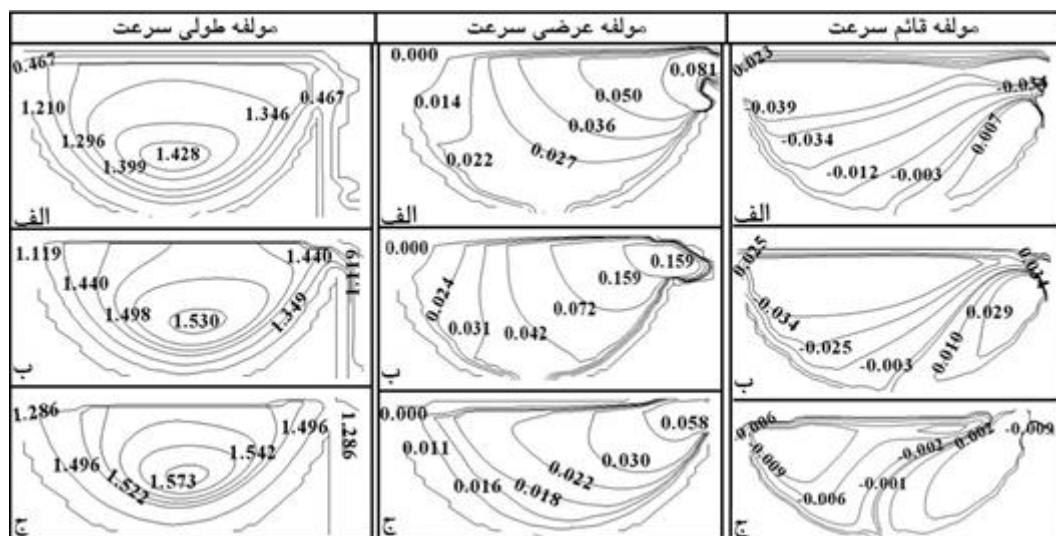
جدول ۴- اختلاف انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی برای عدد فرودهای مختلف و شرایط هندسی متفاوت.

مدل‌های آزمایشگاهی	$\Delta E = 100 \times \left( \frac{E_2 - E_1}{E_1} \right)$
$L=0.18 \text{ m}, w=0.1 \text{ m}, F_0=1/23$	۲٪/۲۳
$L=0.18 \text{ m}, w=0.05 \text{ m}, F_0=1/27$	۶٪/۴۳
$L=1 \text{ m}, w=0.05 \text{ m}, F_0=1/21$	۸٪/۱۰۸
$L=1/2 \text{ m}, w=0.05 \text{ m}, F_0=1/46$	۹٪/۳۷

میدان سرعت

در شکل ۷ خطوط هم تراز سرعت طولی (U)، سرعت عرضی (V) و سرعت قائم (W) مربوط به ابتدا، وسط و انتهای دهانه سرریز جانبی نشان داده شده است. این شکل‌ها مربوط به مدل  $w=0.1 \text{ m}, F_0=1/23$  می‌باشند. با توجه به شکل ۷ با پیشروی جریان در امتداد سرریز جانبی، مقدار سرعت طولی افزایش می‌یابد. به گونه که حداکثر مقدار سرعت طولی در انتهای پائین دست سرریز جانبی اتفاق افتاده است. به عبارت دیگر در شرایط جریان فوق بحرانی و بر اساس اصل پیوستگی جریان، با جابجایی جریان بسوی انتهای پائین دست سرریز جانبی، عمق جریان کاهش یافته و در مقابل مولفه سرعت طولی جریان افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مقدار سرعت عرضی جریان از ابتدای سرریز جانبی تا وسط دهانه سرریز در حال

افزایش بوده و سپس با پیشروی جریان به سوی انتهای پائین دست سرریز جانبی مقدار مولفه سرعت عرضی کاهش می‌یابد. بنابراین در شرایط جریان فوق بحرانی، بیشینه سرعت عرضی جریان تقریباً در وسط دهانه سرریز جانبی به وقوع می‌پیوندد. از طرفی، در هر مقطع عرضی با پیشروی به سمت موقعیت سرریز جانبی، حداکثر سرعت عرضی در مجاورت تاج سرریز جانبی اتفاق می‌افتد. بر اساس شکل ۶ تغییرات سرعت قائم برای رژیم فوق بحرانی در امتداد سرریز جانبی به گونه‌ای است که مقدار سرعت قائم منفی شده است. از طرفی در هر مقطع عرضی، حداکثر سرعت قائم در مجاورت تاج سرریز جانبی اتفاق می‌افتد.



شکل ۷- خطوط هم تراز مولفه‌های سرعت (الف) ابتدای دهانه سرریز جانبی، (ب) وسط دهانه سرریز جانبی و (ج) انتهای دهانه سرریز جانبی.

### نتیجه گیری کلی

مخصوص نشان داد که تغییرات انرژی مخصوص در طول سرریزهای جانبی واقع بر دیواره اصلی کانال های دایروی در شرایط جریان فوق بحرانی تقریباً ثابت است، هرچند که با افزایش طول سرریز جانبی، اختلاف انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز زیاد شد. در ادامه، میدان سرعت در امتداد سرریزهای جانبی واقع در کانال های دایروی در رژیم فوق بحرانی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه سازی، با پیشروی جریان در امتداد سرریز جانبی، مقدار سرعت طولی افزایش یافت به گونه که حداکثر سرعت طولی جریان در انتهای پائین دست سرریز جانبی بوقوع پیوست. همچنین مقدار سرعت عرضی جریان از ابتدای سرریز جانبی تا وسط دهانه سرریز در حال افزایش بود و سپس با پیشروی جریان بسوی انتهای پائین دست سرریز جانبی مقدار مولفه سرعت عرضی کاهش یافت. از طرفی برای هر مقطع عرضی، بیشینه سرعت قائم جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی تشکیل شد.

در عمل یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی برای تنظیم عمق جریان در شبکه های جمع آوری فاضلاب بکار گرفته می شوند. در این مطالعه، الگوی سه بعدی جریان و سطح آزاد در داخل کانال های دایروی دارای سرریز جانبی برای رژیم جریان فوق بحرانی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D، مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  و طرح VOF شبیه سازی شده است. مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان دهنده دقت قابل قبول مدل عددی در پیش بینی مشخصات میدان جریان می باشد. برای کلیه شبیه سازی ها یک افت سطح آزاد در ابتدای سرریز جانبی بوقوع پیوست و در انتهای دهانه سرریز جانبی یک پرش سطحی اتفاق افتاد. از طرفی با دور شدن از محل سرریز جانبی، اثرات سرریز جانبی بر روی سطح آزاد به شکل قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. در این مطالعه عددی، ثابت بودن مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی برای شرایط فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی انرژی

### منابع مورد استفاده

- Allen JW, 1957. The discharge of water over side weirs in circular pipes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 6(2): 270-287.
- Aydin MC, 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software* 45(1): 159-166.
- Aydin MC and Emiroglu ME, 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation* 29(1): 1-8.
- 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 Measurement and Instrumentation* 38(1): 108-115.
- Azimi H, Shabanlou S, Ebtehaj I and Bonakdari H, 2016. Discharge coefficient of rectangular side weirs on circular channels. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation* 17(7-8): 391-399.
- 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.
- Borghei SM, Jalili MR and Ghodsian M, 1999. Discharge coefficient for sharp crested side-weirs in subcritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 125(10): 1051-1056.
- De Marchi G, 1934, Essay on the performance of lateral weirs. *L'Energia Electrica Milan* 11(11): 849-860.
- El-Khashab A and Smith KVH, 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 102(9): 1255-1268.
- Emiroglu ME, Agaccioglu H and Kaya N, 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(4): 319-330.
- Granata F, Giovanni M, Rudy G and Carla, T, 2013. Novel approach for side weirs in supercritical flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 139(8): 672-679.

- Hager WH, 1994. Supercritical flow in circular-shaped side weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 120(1): 1-12.
- Mangarulkar K, 2010. Experimental and numerical study of the characteristics of side- weir flows. Master Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Oliveto G, Biggiero V and Fiorentino M, 2001. Hydraulic features of supercritical flow along prismatic side weirs. *Journal of Hydraulic Research ASCE* 39 (1): 73-82.
- Pathirana KPP, Munas MM and Jaleel ALA, 2006. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in supercritical flow. *Journal of the Institution of Engineers* 39(2): 17-24.
- Qu J, 2005. Three dimensional turbulence modeling for free surface flows. PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Ramamurthy AS, Zhu W and Vo, D. 1995. Rectangular lateral weirs in circular open channels. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 121(8): 608-612.
- Tadayon R, 2009. Modeling curvilinear flows in hydraulic structures. PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada
- Uyumaz A and Muslu Y, 1985. Flow over side weirs in circular channels. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 111(1): 144-160.
- Vatankhah AR, 2012. New solution method for water surface profile along a side weir in a circular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 138(10): 948-954.