

## مطالعه عددی اثر تغییر شیب کف کانال دایره‌ای در جریان فوق‌بحرانی در طول سرریز جانبی

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

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۵

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

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

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

### چکیده

سرریزهای جانبی از مهمترین سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شوند که به‌صورت گسترده در سیستم‌های انحراف جریان و شبکه‌های زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین کانال‌های دایره‌ای به‌عنوان مجاری اصلی انتقال جریان در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب و شبکه‌های آبیاری به‌کار گرفته می‌شوند. در این تحقیق، الگو و میدان جریان در کانال دایره‌ای با سرریز جانبی در رژیم جریان فوق‌بحرانی با استفاده از نرم‌افزار فلوتریدی شبیه‌سازی شد. همچنین آشفتگی میدان جریان توسط مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و تغییرات سطح آزاد با استفاده از روش VOF مدل‌سازی گردید. در ابتدا نتایج مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده و انطباق مناسبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های آزمایشگاهی حاصل شد. در عمل، کانال‌های مورد استفاده در شبکه‌های آبرسانی و سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شیب‌دار هستند، بنابراین اثرات تغییر شیب کف کانال دایره‌ای بر روی مشخصات هیدرولیکی میدان جریان در امتداد سرریز جانبی نیز مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش شیب کف کانال اصلی، سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس نتایج شبیه‌سازی، با افزایش شیب کف کانال دایره‌ای، مقدار انرژی مخصوص افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جریان فوق‌بحرانی، سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی، شیب کف کانال اصلی، کانال دایره‌ای

## Numerical Study of the Effect of the Bed Slope Change of Circular Channel on Supercritical Flow Along the Side Weir

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

Received: 20 January 2016 Accepted: 05 March 2017

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

<sup>2</sup>- Assis. prof., Dept. of Water Engin., Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

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

### Abstract

Side weirs are of main hydraulic structures which are widely used in flow diversion systems and drainage networks. Also, circular channels are used as the main channel for flow transmission in sewage disposal systems and irrigation networks. In this study, pattern and field of the passing flow within circular channel along the side weir under supercritical flow regime was simulated using FLOW-3D software. Also, the flow field turbulence and variations of the free surface have been simulated using RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and VOF scheme, respectively. Comparing numerical simulations with experimental results showed the reasonable accuracy of numerical model. In practice, transport channels used in irrigation networks and urban sewage disposal are steep. Therefore, the effect of bed slope variations on the hydraulic characteristics of flow field along the side weir was investigated. By increasing the main channel bed slope the free surface of flow along the side weir was decreased. According to simulation results, by increasing the circular channel bed slope the specific energy was increased.

**Keywords:** Bed slope of main channel, Circular channel, Numerical simulation, Side weir, Supercritical flow

### مقدمه

بر روی رفتار جریان در کانال‌های با سرریز جانبی انجام گرفته است.

اویماز (۱۹۹۲) در ارتباط با نیم‌رخ طولی سطح آب در امتداد سرریز جانبی واقع در یک کانال مثلثی و دبی گذرنده از روی سرریز جانبی یک روش تحلیلی ارائه نمود. راه حل وی با استفاده از روش اجزاء محدود به دست آمده و برای هر دو رژیم جریان زیر بحرانی و فوق‌بحرانی کاربرد دارد. روش تحلیلی اویماز (۱۹۹۲) تغییرات سطح آب و دبی سرریز جانبی را با خطای ۱۲ درصد پیش‌بینی می‌کند. پاسیرانا و همکاران

سرریزهای جانبی به منظور تنظیم تراز سطح آب بر روی دیواره جانبی کانال‌های اصلی نصب می‌شود. جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی از نوع جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی (SVF) می‌باشد. در عمل سرریزهای جانبی برای کنترل سطح آب در شبکه‌های آبیاری-زهکشی، آبرسانی و سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی فراوانی

(۲۰۰۶) مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای بررسی انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز، ضریب دبی و دبی سرریز جانبی در شرایط جریان فوق‌بحرانی انجام دادند. آنها با استفاده از روابط انرژی مخصوص و تحلیل رگرسیونی که بر روی نتایج آزمایشگاهی صورت دادند، رابطه‌ای را برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی در شرایط فوق‌بحرانی پیشنهاد نمودند. رابطه ضریب دبی پاسیرانا و همکاران (۲۰۰۶) تابعی از عدد فرود و مشخصات هندسی سرریز جانبی و کانال اصلی می‌باشد. راتو و پیلا (۲۰۰۸) با یک تحقیق آزمایشگاهی بر روی یک کانال مستطیلی با سرریز جانبی در شرایط جریان فوق‌بحرانی به بررسی ضریب دبی سرریز جانبی، سرعت در کانال اصلی، زاویه ریزش جریان از روی سرریز جانبی و اندازه‌گیری عمق جریان در امتداد سرریز جانبی پرداختند. آنها با استفاده از روابط ممنتوم، معادله دینامیکی جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی را حل کردند. کونرود و همکاران (۲۰۰۹) وجود پره‌های هادی را در میزان جریان انحرافی از روی سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی در شرایط جریان فوق‌بحرانی مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند. آنها دریافتند که تعبیه پره‌های هادی باعث افزایش آبگذری سرریزهای جانبی می‌شود. وطن‌خواه (۲۰۱۲) با استفاده از روابط انرژی مخصوص و انتگرال‌گیری از معادله دینامیکی حاکم بر جریان عبوری در امتداد یک سرریز جانبی واقع در کانال مثلثی، نیم‌رخ سطح آزاد جریان در امتداد سرریز را پیش‌بینی کرد. وی با فرض اینکه مقدار انرژی در طول سرریز جانبی، ضریب دبی و ضریب توزیع سرعت ثابت است به کمک انتگرال‌گیری بیضوی غیرکامل یک روش نیمه‌تحلیلی برای محاسبه نیم‌رخ طولی سطح آزاد جریان در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ارائه نمود. وطن‌خواه (۲۰۱۳) معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی را برای یک کانال با سطح مقطع عرضی سهموی که سرریز جانبی بر روی دیواره اصلی نصب شده حل کرد. وی با کوتاه فرض نمودن طول سرریز، تغییرات انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی را

ناچیز در نظر گرفت و نتایج روش تحلیلی خود را با روش رانگ-کوتا مرتبه چهارم اعتبارسنجی نمود. در سال‌های اخیر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به‌عنوان ابزاری قابل استفاده در شناخت دقیق رفتار هیدرودینامیکی سیالات و اندرکنش بین سازه و سیال معرفی شده است. کیو (۲۰۰۵) با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\omega$  و روش VOF تغییرات سه بعدی (3D) جریان عبوری در امتداد سرریز جانبی را مدل‌سازی نمود. او نتایج مدل‌سازی عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲) صحت‌سنجی کرد. تدین (۲۰۰۹) به کمک نتایج آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲) و سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲) یک مدل عددی با استفاده از مدل آشفتگی RSM و روش VOF شبیه‌سازی کرد. آیدین (۲۰۱۲) با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت سطح آزاد جریان در داخل یک کانال مستطیلی با سرریز جانبی گنجره‌ای مثلثی را به روش VOF شبیه‌سازی کرد. وی نتایج تحلیل عددی خود را با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی نمود و با مطالعه تغییرات سه‌بعدی سطح آزاد به وجود یک نقطه ایستایی در پائین‌دست سرریز جانبی اشاره کرد. آیدین و امیرالقلو (۲۰۱۳) توسط نرم‌افزار FLUENT-ANSYS ظرفیت آبگذری و جریان عبوری از روی سرریز جانبی کنگره-ای مثلثی را پیش‌بینی نمودند. آنها تغییرات سطح آزاد جریان را توسط روش VOF مدل‌سازی کرده و آشفتگی جریان را با مدل‌های آشفتگی مختلف شبیه‌سازی کردند. همچنین نتایج شبیه‌سازی آیدین و امیرالقلو (۲۰۱۳) وجود یک جریان ثانویه در داخل کانال اصلی و در امتداد سرریز جانبی را نشان می‌دهد. با مرور مطالعات انجام گرفته بر روی کانال‌های با سرریز جانبی، مشاهده می‌شود که تاکنون مطالعه عددی کافی بر روی الگوی جریان فوق‌بحرانی در امتداد سرریزهای جانبی واقع در کانال دایره‌ای انجام نگرفته است. در این تحقیق، تغییرات سطح آزاد و آشفتگی میدان جریان در داخل کانال‌های دایره‌ای با سرریز جانبی در شرایط جریان فوق‌بحرانی به ترتیب توسط روش VOF و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG شبیه‌سازی عددی می‌شود. محققان مختلفی همچون

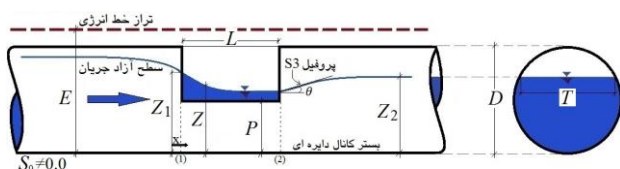
محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می-شود:

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

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 عددی، به منظور اعتبارسنجی نتایج مدل عددی از داده‌های آزمایشگاهی اویماز و موسلا (۱۹۸۵) استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی شامل یک کانال دایره‌ای با سرریز جانبی است. جنس کانال اصلی از بتن بوده و سرریز جانبی از صفحات فایبرگلاس ساخته شده است. طول کانال اصلی ۱۰/۹ متر و قطر آن ۰/۲۵ متر می‌باشد. سرریز بر روی دیواره جانبی کانال دایره‌ای نصب شده است. طول و ارتفاع تاج سرریز جانبی به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۰۶ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱ طرح توصیفی کانال دایره‌ای به همراه سرریز جانبی در شرایط رژیم فوق-بحرانی مورد مطالعه اویماز و موسلا (۱۹۸۵) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱- طرح توصیفی کانال دایره‌ای با سرریز جانبی مورد مطالعه اویماز و موسلا (۱۹۸۵).

#### شرایط مرزی

در مقطع ورودی کانال اصلی دایره‌ای از مقادیر معلوم دبی و عمق مشخص به عنوان شرط مرزی استفاده شد. در این شرط مرزی پارامترهای آشفتگی

سابرامانیا و اواستی (۱۹۷۲)، الخشاب (۱۹۷۵)، سینگ و همکاران (۱۹۹۴)، برقعی و همکاران (۱۹۹۹) و رائو و پیلا (۲۰۰۸) با انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی، اثرات شیب کف کانال اصلی را بر روی مشخصات جریان بررسی کرده‌اند. با توجه به اینکه در عمل کانال‌های دایره‌ای مورد استفاده در شبکه جمع‌آوری فاضلاب شیب‌دار هستند، بنابراین، در ادامه اثرات تغییر شیب کف کانال اصلی ( $S_0$ ) نیز بر روی مشخصات هیدرولیکی جریان فوق بحرانی در امتداد سرریز جانبی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### معادلات حاکم

در این شبیه‌سازی عددی برای حل میدان جریان سیال غیرقابل تراکم در دستگاه مختصات کارتیزین از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس استفاده می‌شود که توسط روابط زیر معرفی شده است [راهنمای کاربر نرم افزار نرم‌افزار فلوتری-دی ۲۰۱۱].

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

$$[2]$$

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

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

مؤلفه‌های سرعت و محورهای مختصات در سیستم مختصات کارتیزین می‌باشند. همچنین  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $p$  فشار،  $\delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) دلتای کرونیکر،  $v_t$  لزوجت آشفتگی<sup>۲</sup> است. همچنین در این مطالعه عددی، برای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده شده است. در طرح VOF برای

<sup>1</sup> Kronecker delta

<sup>2</sup> Turbulent eddy-viscosity

در نظر گرفته شود و نیازی به تعریف پارامترهای آشفتگی که شامل انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی بوده نیست. در این مطالعه عددی بالاترین لایه هوا به عنوان شرط مرزی تقارن تغییرات سرعت در سراسر شرط مرزی صفر بوده بنابراین آشفتگی نیز تولید نمی‌شود [راهنمای کاربر نرم افزار نرم افزار فلوتوری دی ۲۰۱۱].

#### مدل عددی

در این مدل عددی، کل دامنه محاسباتی توسط یک بلوک مش غیریکنواخت متشکل از اجزاء مستطیلی شبکه‌بندی گردید. در جدول ۱ تعداد اجزاء محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است.

#### جدول ۱- تعداد سلول‌های محاسباتی میدان حل در شبیه‌سازی عددی

موقعیت	جهت X	جهت Y	جهت Z
کانال اصلی	۱۹۶	۶۰	۵۸
مخزن	۶۰	۲۰	۵۸

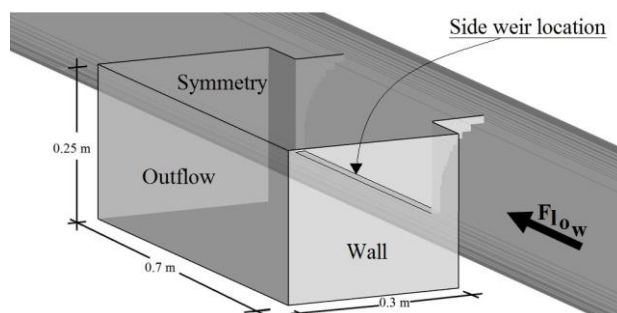
در شکل ۳ شبکه‌بندی میدان حل مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی قابل مشاهده می‌باشد. به علت وجود گردابه‌های بزرگ و گرادیان شدید جریان در محل اتصال کانال اصلی و سرریز جانبی مش‌بندی نسبت به سایر قسمت‌های میدان جریان ریزتر در نظر گرفته شده است. در محل دیواره‌های جامد نیز شبکه‌بندی ریزتر در نظر گرفته شده است. مدل عددی غیرماندگار تعریف گردیده و مدت زمان اجرای محاسبات ۱۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده که میدان جریان در ثانیه ۴۰ دائمی شد. لازم به ذکر است که، پیغام دائمی شدن جریان توسط نرم‌افزار فلوتوری دی ارائه می‌شود.

که شامل انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی است توسط روابط زیر تعیین می‌شود.

$$k_t = \frac{3}{2} (v_t \cdot T_{len})^2 \quad [4]$$

$$\varepsilon_t = C_u \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_t^{3/2}}{T_{len}} \quad [5]$$

که در آن  $v_t$  لزوجت سینماتیکی آشفتگی،  $T_{len}$  مقیاس طول آشفتگی که در کانال‌های باز برابر ۷٪ قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود.  $C_u$  یک مقدار ثابت است که در مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG برابر ۰/۰۸۵ در نظر گرفته می‌شود [راهنمای کاربر نرم افزار فلوتوری دی ۲۰۱۱]. در مقطع خروجی کانال اصلی از مقدار معین عمق و فشار مشخص به عنوان شرایط مرزی خروجی استفاده شده است. به منظور ریزش کامل جریان از روی سرریز جانبی، یک مخزن در محل اتصال سرریز به کانال اصلی تعبیه شده است. ابعاد مخزن مورد نظر و شرایط مرزی استفاده شده بر روی آن در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. در مقطع خروجی این مخزن شرط مرزی خروجی در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- شرایط مرزی تعریف شده برای مخزن متصل به سرریز جانبی در مدل عددی.

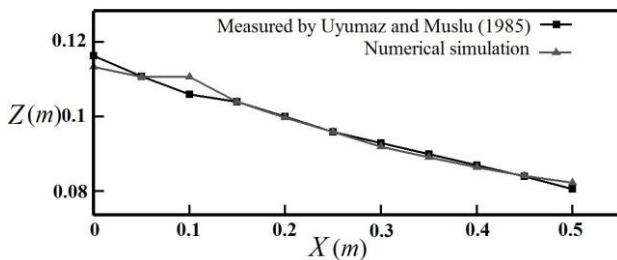
در این مدل‌سازی عددی جداره‌های جامد بعنوان شرط مرزی دیواره تعریف شده‌اند. برای شرایط مرزی دیواره شرط عدم لغزش اعمال شده است. در شرایط مرزی دیواره سرعت معمولی باید صفر

<sup>4</sup> Symmetry

<sup>3</sup> Wall

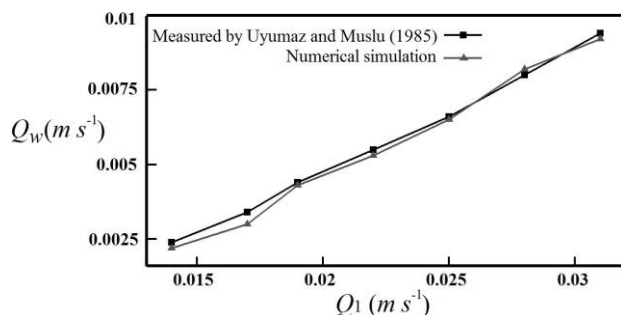
$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{(measured)} - R_{(simulated)})^2} \quad [V]$$

در اینجا  $R_{(simulated)}$  و  $R_{(measured)}$  به ترتیب برابر مقادیر اندازه‌گیری و محاسباتی می‌باشد.



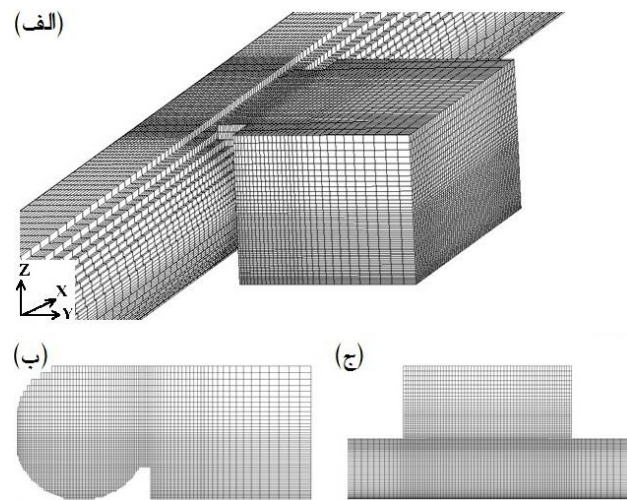
شکل ۴- مقایسه تغییرات سطح آزاد بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی در امتداد سرریز جانبی.

همچنین اویماز و موسلا (۱۹۸۵) مقادیر مختلف دبی گذرنده از روی سرریز جانبی را برای دبی‌های مختلف عبوری از کانال اصلی و مدل آزمایشگاهی با مشخصات هندسی  $(L/D=2)$ ،  $(P/D=0.24)$  و  $(S_0=0.002)$  اندازه‌گیری کرده‌اند. در شکل ۵ مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی در پیش‌بینی دبی سرریز جانبی نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی و عددی دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود مدل عددی دبی سرریز جانبی را برای مقادیر مختلف دبی کانال اصلی با دقت بالایی پیش‌بینی کرده است. به‌منظور بررسی دقت مدل عددی مقادیر  $RMSE$  و  $APE$  برای پیش‌بینی دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی به ترتیب برابر  $4/61$  درصد و  $0/22$  محاسبه شده است. اویماز



شکل ۳- شبکه‌بندی میدان محاسباتی الف) دید سه‌بعدی ب) مقطع عرضی ج) پلان.

#### اعتبارسنجی مدل عددی

مقدار دبی ورودی کانال اصلی، عمق جریان در ابتدای بالادست و عمق جریان در انتهای پائین دست سرریز جانبی به ترتیب برابر  $0/025$  مترمکعب بر ثانیه،  $0/1164$  و  $0/0806$  متر اندازه‌گیری شده است. در مدل آزمایشگاهی اویماز و موسلا (۱۹۸۵) شیب کانال اصلی  $0/005$  در نظر گرفته شده است و جریان در کانال اصلی فوق‌بحرانی می‌باشد. در شکل ۴ مقایسه بین نتایج سطح آزاد شبیه‌سازی شده و مقادیر آزمایشگاهی نشان داده شده است. به‌منظور بررسی دقت مدل عددی مقادیر درصد خطای متوسط ( $APE$ ) و خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه شده است. مقدار  $APE$  و  $RMSE$  نیم‌رخ سطح آزاد شبیه‌سازی شده به ترتیب برابر  $1/193$  و  $0/182$  درصد به‌دست آمده است. بنابراین مدل عددی سطح آزاد جریان را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرده است، به‌طوری‌که مطابق الگوی جریان‌های فوق‌بحرانی، عمق جریان در امتداد سرریز جانبی از ابتدای بالادست سرریز به سمت انتهای پائین دست آن در حال کاهش است.

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

ابتدای بالادست سرریز جانبی است. در جدول ۲ مقادیر عدد فرود و ضریب دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شده است. لازم به یادآوری است که عدد فرود آزمایشگاهی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی محاسبه شده و در مقابل عدد فرود عددی به صورت مستقیم از نتایج شبیه‌سازی استخراج شده است.

جدول ۲- مقایسه بین عدد فرود و ضریب دبی آزمایشگاهی و عددی.

APE%	عددی	آزمایشگاهی	
۲/۳	۰/۳۴۱	۰/۳۴۹	Cd از رابطه ۹
۱/۷	۰/۳۵۸	۰/۳۵۲	Cd از رابطه ۱۰
۹/۸	۱/۱	۱/۲۲	F <sub>1</sub>

رابطه ۱۰ ضریب دبی عددی و آزمایشگاهی را نزدیک بهم پیش‌بینی کرده است، زیرا این رابطه تنها تابع عدد فرود و پارامتر هندسی ثابت  $L/D$  است.

#### اثر شیب کانال بر روی تغییرات سطح آزاد جریان

در این مدل عددی با افزایش شیب کف کانال، شرایط مرزی، شبکه‌بندی میدان حل و شرایط هیدرولیکی مدل عددی ثابت در نظر گرفته شده و تنها پارامتری که تغییر کرده است، شیب کف کانال اصلی می‌باشد. در شکل ۶ تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع بر محور مرکزی کانال اصلی برای سه شیب مختلف با هم مقایسه شد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش شیب کف کانال، سطح آزاد آب دچار پائین‌افتادگی می‌شود بگونه‌ای که در کانال با شیب بیشتر شیب افت سطح آب افزایش می‌یابد. شیب افت سطح آب در بالادست سرریز جانبی بیشتر از پائین‌دست سرریز است. با دور شدن از سرریز جانبی در انتهای پائین‌دست سرریز اثرات افزایش شیب کف کانال بر روی سطح آزاد جریان ناچیز می‌شود.

و موسلا (۱۹۸۵) تراز انرژی مخصوص در مقطع بالادست سرریز جانبی را برابر  $۱۷/۹۹$  سانتی‌متر اندازه‌گیری نموده‌اند، این در حالی است که مدل عددی مقدار انرژی مخصوص در مقطع بالادست سرریز جانبی را  $۱۸/۶۷$  سانتی‌متر پیش‌بینی نموده است. مقدار درصد خطای نسبی ( $REP\%$ ) انرژی مخصوص برابر  $۳/۸$  درصد محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل عددی در پیش‌بینی مقدار انرژی مخصوص است.

#### نتایج و بحث

##### ضریب دبی سرریز جانبی

اویماز و موسلا (۱۹۸۵) دبی در واحد طول سرریز جانبی واقع بر یک کانال دایره‌ای شکل را به شکل زیر پیشنهاد دادند.

$$-\frac{dQ_w}{dx} = q = C_d \sqrt{2g(z-P)}(z-P) \quad [۸]$$

در اینجا  $Q_w$  دبی عبوری از روی سرریز

جانبی،  $x$  فاصله طولی از ابتدای سرریز،  $q$  یا  $\frac{dQ_w}{dx}$  دبی در واحد طول سرریز جانبی،  $g$  شتاب جاذبه،  $P$  ارتفاع تاج سرریز جانبی و  $z$  عمق جریان است. بنابراین می‌توان ضریب دبی سرریز جانبی ( $C_d$ ) را از رابطه ۹ محاسبه کرد.

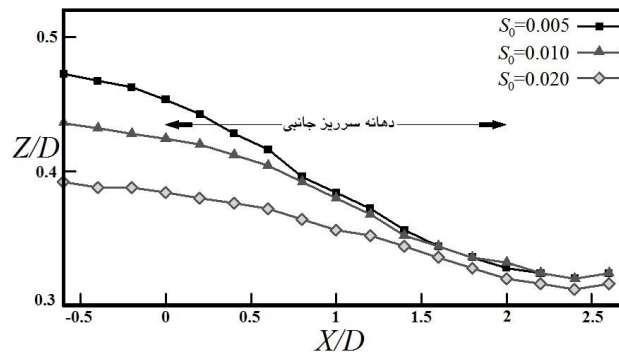
$$C_d = \left( \frac{Q_w}{L\sqrt{2g}(z-p)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad [۹]$$

رابطه تجربی ۱۰ برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی واقع در یک کانال دایره‌ای شکل در شرایط رژیم فوق بحرانی توسط اویماز و موسلا (۱۹۸۵) ارائه شده است.

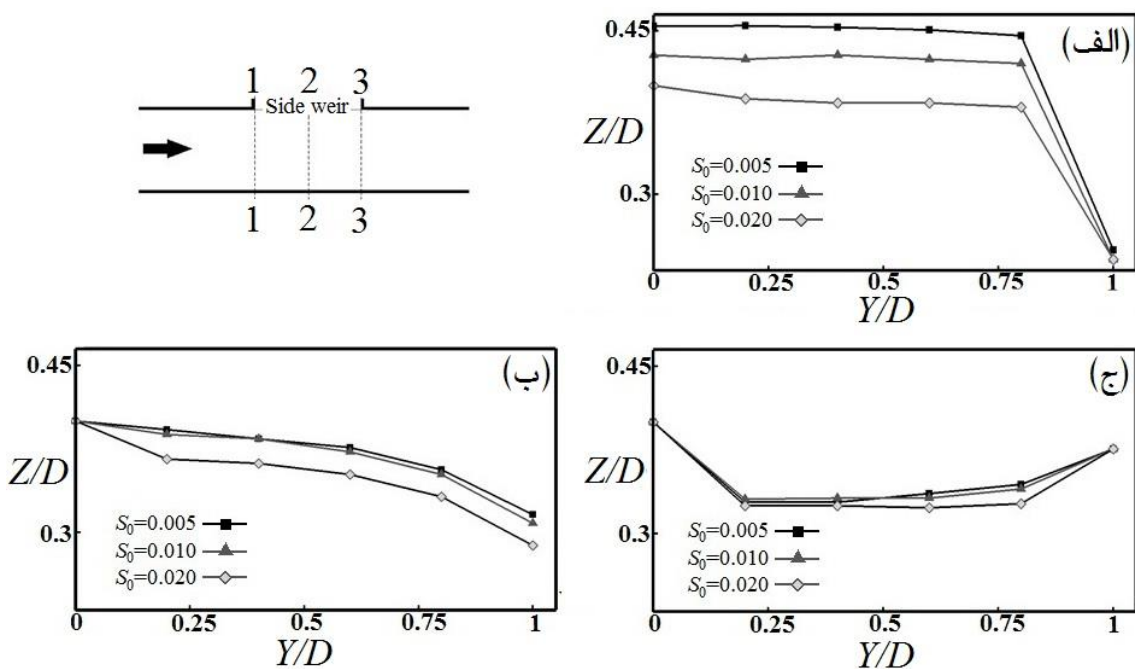
[۱۰]

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

در اینجا  $L/D$  و  $F_1$  به ترتیب برابر نسبت طول سرریز جانبی به قطر کانال دایره‌ای و عدد فرود در



شکل ۶- تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع بر محور مرکزی کانال اصلی برای شیب‌های مختلف.



شکل ۷- نیم‌رخ‌های عرضی سطح آزاد شبیه‌سازی شده برای شیب‌های مختلف (الف) مقطع ۱-۱ (ب) مقطع ۲-۲ (ج) مقطع ۳-۳.

اثر شیب بر روی دبی سرریز جانبی ( $Q_w$ )، عدد فرود بالادست سرریز ( $F_I$ ) و ضریب دبی سرریز جانبی ( $C_d$ ) در شبیه‌سازی عددی دبی ورودی کانال اصلی ( $Q_I$ ) ثابت در نظر گرفته شده و با افزایش شیب کف کانال اصلی اثر آن بر دبی عبوری از روی سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۳ تغییرات دبی سرریز جانبی ( $Q_w$ )، عدد فرود ( $F_I$ ) و ضریب دبی سرریز جانبی ( $C_d$ ) در مقابل افزایش شیب کانال اصلی نشان داده شده است. با افزایش شیب کف کانال دایره‌ای مقدار دبی گذرنده از روی سرریز جانبی کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش شیب کف کانال باعث

در شکل ۷ نیم‌رخ‌های عرضی سطح آزاد شبیه‌سازی شده جریان در سه مقطع عرضی ابتدا، میانه و انتهای سرریز جانبی برای شیب‌های مختلف نشان داده شد. در مقطع ابتدایی سرریز جانبی، سطح آزاد جریان با افزایش شیب کف کانال کاهش می‌یابد و با پیشروی در امتداد سرریز جانبی اثر افزایش شیب کف کانال ناچیز می‌شود. در مجاورت سرریز جانبی و در محل مقطع ابتدایی یک افت ناگهانی اتفاق افتاده است. این افت در مقطع میانی سرریز (مقطع ۲-۲) کمتر بوده و در انتهای سرریز (مقطع ۳-۳) افت مذکور جای خود را به یک افزایش عمق می‌دهد.



محققان مختلفی از جمله الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶) و برقی و همکاران (۱۹۹۹) با انجام مطالعات و آزمایش‌های مختلف بیان کرده‌اند که مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی تقریباً ثابت است. الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶) و برقی و همکاران (۱۹۹۹) در مطالعات آزمایشگاهی خود اختلاف بین انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی را به ترتیب برابر ۵ و ۳/۷ درصد برآورد کرده‌اند. در شرایط رژیم جریان فوق‌بحرانی پاسیرانا و همکاران (۲۰۰۶) و رانو و پیلا (۲۰۰۸) با استفاده از روابط انرژی روابطی را برای محاسبه ضریب دبی سرریز جانبی ارائه کرده‌اند. پاسیرانا و همکاران (۲۰۰۶) در نتایج آزمایشگاهی خود با مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی مقدار اختلاف بین  $E_1$  و  $E_2$  را در رژیم فوق‌بحرانی در حدود ۳ درصد محاسبه نمود. در این مطالعه عددی اصل ثابت بودن انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی در شرایط رژیم فوق‌بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به یادآوری است که در این تحقیق، ضریب تصحیح انرژی جنبشی ثابت در نظر گرفته شد. در شکل ۸ مقدار انرژی مخصوص در ابتدای بالادست و انتهای پائین‌دست سرریز جانبی برای مقادیر مختلف دبی جریان در داخل کانال اصلی با شیب کف  $S_0 = 0.002$  اندازه‌گیری شده، توسط اویماز و موسلا (۱۹۸۵) با هم مقایسه شده است. مدل عددی مقدار انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی در شرایط رژیم فوق‌بحرانی را تقریباً ثابت پیش‌بینی کرده و افت انرژی در طول سرریز جانبی ناچیز می‌باشد. اختلاف متوسط انرژی مخصوص در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی در حدود ۲/۸۹ درصد محاسبه شده است. بنابراین در شرایط جریان فوق‌بحرانی که کانال شیب‌دار می‌باشد، نیز اصل انرژی مخصوص برقرار بوده و مقدار انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی تقریباً ثابت است.

می‌شود که دبی بیشتری در داخل کانال اصلی باقی بماند. همان‌گونه که از جدول ۳ مشاهده می‌شود با افزایش شیب کف کانال اصلی عدد فرود واقع در ابتدای بالادست سرریز افزایش یافته و ضریب دبی که نشان‌دهنده آنگذری سرریز جانبی می‌باشد (محاسبه شده از رابطه ۱۰) کاهش می‌یابد. بنابراین ضریب دبی سرریز جانبی با افزایش شیب کف کانال اصلی، کاهش خواهد یافت.

جدول ۳- تغییرات  $C_d, F_1, Q_w$  در مقابل افزایش شیب کانال اصلی ( $S_0$ )

$S_0$	۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲
$Q_w (m^3 s^{-1})$	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۳۲
$F_1$	۱/۲۲	۱/۱	۱/۴۶
$C_d$	۰/۳۵۲	۰/۳۵۸	۰/۳۳۹

#### انرژی مخصوص

معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی با استفاده از اصل بقای انرژی حل می‌گردد. معادله انرژی در هر مقطع از کانال شکل ۲ برابر است با:

$$E = z + \alpha \left( \frac{Q^2}{2gA^2} \right) \quad [11]$$

در اینجا  $E$  انرژی مخصوص،  $z$  عمق جریان در کانال اصلی،  $\alpha$  ضریب توزیع سرعت،  $Q$  دبی کانال اصلی،  $g$  شتاب ناشی از گرانش و  $A$  سطح مقطع عرضی جریان است. مطالعات نظری و آزمایشگاهی مختلفی در ارتباط با جریان در امتداد سرریز جانبی و اصل ثابت بودن انرژی مخصوص انجام گرفته است (برقی و همکاران ۱۹۹۹، حسینی و ابریشمی ۱۳۸۴).

نتایج تجربی نشان می‌دهد که اگر طول سرریز جانبی کوتاه باشد فرض ثابت بودن انرژی مخصوص قابل قبول می‌باشد (حسینی و ابریشمی ۱۳۸۴). نظریه ثابت بودن انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی معادل این فرض است که افت اصطکاک ( $S_f$ ) مساوی شیب کف کانال اصلی ( $S_0$ ) بوده و یا اینکه  $S_f = S_0 = 0.0$  است. در شرایط جریان زیربحرانی

### اثر شیب کف کانال اصلی بر شیب نیمرخ S3

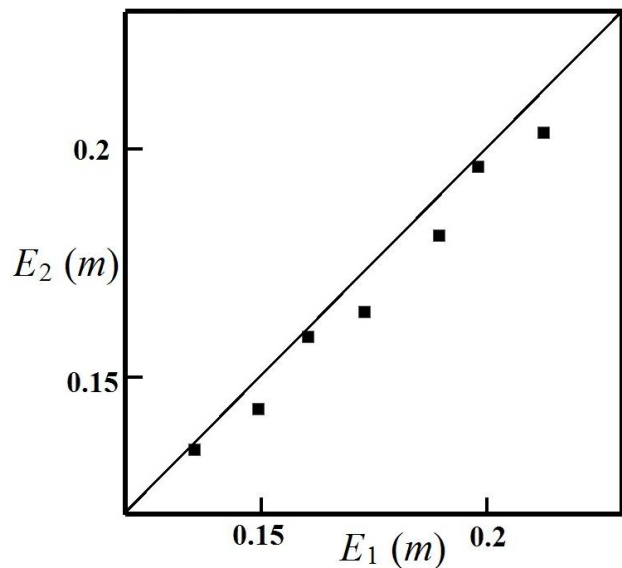
در شرایطی که جریان فوق بحرانی در یک کانال شیبدار دارای سرریز جانبی برقرار باشد، بعد از سرریز جانبی نیمرخ S3 تشکیل می‌شود (جریان بعد از سرریز و قبل از پایاب). در این مطالعه عددی شیب نیم-رخ S3 با  $\theta$  معرفی می‌شود (شکل ۱ را ببینید). بر اساس معادله حاکم بر جریان‌های متغیر تدریجی

$$\left( \frac{dz}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2} \right) \text{ و با توجه به کوتاه بودن مسیر در}$$

امتداد نیمرخ S3 مقدار شیب خط انرژی ( $S_f$ ) ثابت فرض می‌شود، بنابراین با افزایش شیب کف کانال اصلی ( $S_0$ ) صورت کسر کوچکتر می‌شود و در مقابل عدد فرود افزایش یافته و مخرج کسر نیز بزرگتر می‌گردد، بنابراین طبق تحلیل جریان‌های متغیر تدریجی مقدار شیب نیمرخ S3 ( $\theta$ ) کاهش می‌یابد و پائین افتادگی جریان در انتهای سرریز جانبی با شیب ملایم-تری به عمق پایاب متصل می‌شود. در شکل ۹ دید سه-بعدی (3D) تغییرات سطح آزاد جریان فوق بحرانی شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی و چگونگی تشکیل نیمرخ S3 نشان داده شده است. در جدول ۵ نحوه تغییرات شیب نیمرخ S3 در برابر شیب کف کانال اصلی ارائه شده است که مطابق مطالب ذکر شده مدل عددی رفتار نیمرخ S3 را در برابر افزایش شیب کف کانال صحیح پیش بینی نموده است.

### جدول ۵- تغییرات شیب نیمرخ S3 در مقابل شیب کف

کانال اصلی.			
۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	$S_0$
۰/۰۱	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۸۷	$\theta(\text{rad})$



شکل ۸- مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی برای دبی‌های مختلف جریان در از کانال دایره‌ای.

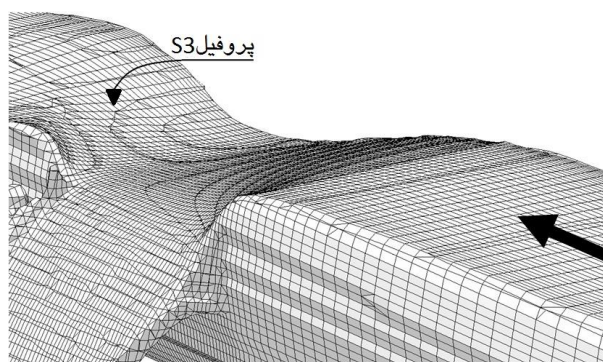
### اثر شیب کانال بر روی انرژی مخصوص

در جدول ۴ مقدار انرژی مخصوص در ابتدای بالادست و انتهای پائین دست سرریز جانبی برای یک کانال با سه شیب مختلف نشان داده شده است. در مدل شبیه‌سازی شده شرایط مرزی، مش‌بندی میدان محاسباتی و شرایط هیدرولیکی مدل عددی ثابت در نظر گرفته شده و فقط شیب کف کانال افزایش یافته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش شیب کف کانال دایره‌ای، مقدار انرژی مخصوص افزایش می‌یابد. نکته مهمی که باید به آن اشاره شود این است که با وجود افزایش چهار برابری شیب کف کانال اصلی مقدار انرژی مخصوص در مقطع بالادست و پائین دست سرریز جانبی تقریباً ثابت می‌باشد. بنابراین اصل ثابت بودن انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی برای شیب‌های مختلف کانال اصلی نیز برقرار است.

### جدول ۴- تغییرات انرژی مخصوص شبیه‌سازی شده

برای کانال اصلی با شیب مختلف.			
۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۰۵	$S_0$
۰/۲۰۸۱	۰/۱۹۳۱	۰/۱۸۶۷	$E_1(m)$
۰/۲۰۵۰	۰/۱۹۲۶	۰/۱۸۳۶	$E_2(m)$

در ادامه، اثرات تغییر شیب کف کانال دایره‌ای بر روی نیم‌رخ‌های طولی و عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی مورد بررسی قرار گرفت. با افزایش شیب کف کانال اصلی، عمق جریان کاهش می‌یابد هرچند که این کاهش عمق در پائین‌دست سرریز جانبی ناچیز است. افزایش شیب کف کانال دایره‌ای باعث کاهش دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی شده و در مقابل عدد فرود بالادست سرریز جانبی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب کف کانال دایره‌ای، ضریب دبی نیز کاهش یافت. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مقدار انرژی مخصوص در ابتدای بالادست و انتهای پائین‌دست سرریز جانبی تقریباً ثابت بوده و اختلاف متوسط انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای سرریز برابر  $2/89$  درصد است. سپس اثر تغییر شیب کف کانال دایره‌ای بر روی مقدار انرژی مخصوص مورد بررسی قرار گرفت که تحلیل نتایج عددی نشان دهنده روند افزایشی کل انرژی مخصوص با افزایش شیب کف کانال اصلی است. در شرایط فوق‌بحرانی و کانال شیب‌دار دارای سرریز جانبی، عمق جریان در انتهای پائین‌دست سرریز به کمترین مقدار خود می‌رسد، سپس این عمق توسط یک نیم‌رخ  $S3$  به عمق پایاب متصل می‌گردد. در پایان اثرات تغییر شیب کف کانال اصلی بر روی رفتار نیم‌رخ  $S3$  مورد بررسی قرار گرفت که افزایش شیب کف کانال دایره‌ای ( $S_0$ ) منجر به کاهش شیب نیم‌رخ  $S3$  ( $\theta$ ) شد.



شکل ۹- دید سه بعدی تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز و نحوه تشکیل نیم‌رخ  $S3$ .

### نتیجه‌گیری کلی

کانال‌های با سرریزهای جانبی برای کنترل و تنظیم سطح جریان سیستم‌های آبیاری، شبکه‌های زهکشی و پروژه‌های کنترل سیلاب مورد استفاده مهندسين هیدرولیک قرار می‌گیرند. در مقابل، جریان‌های سیلابی، آگیری از سدها و جریان داخل خطوط انتقال دارای رژیم جریان فوق‌بحرانی هستند. در این مطالعه عددی، جریان از داخل کانال دایره‌ای با سرریز جانبی در شرایط فوق‌بحرانی با استفاده از نرم‌افزار فلوتری دی شبیه‌سازی شد و تغییرات سطح آزاد جریان توسط روش VOF و آشفتگی میدان جریان با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG مدل‌سازی گردید. مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان، ضریب دبی، انرژی مخصوص و مقادیر مختلف دبی جریان گذرنده از روی سرریز جانبی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند.

### منابع مورد استفاده

- Aydin MC, 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software* 45: 159–166.
- Aydin MC and Emiroglu ME, 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation* 29: 1–8.
- Borghai 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.
- Coonrod J, Ho J and Bernardo N, 2009. Lateral outflow from supercritical channels. Proc., 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, IAHR, Madrid, Spain Pp.123-130.
- El-Khashab AMM, 1975. Hydraulics of flow over side weirs. Ph.D Thesis, University of Southampton, England.

- El-Khashab A and Smith KVH, 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of the Hydraulic Division ASCE* 102(9): 1255-1268.
- FLOW-3D Version 10.0 [Computer Software]. Flow Science, Santa Fe, NM
- Hager WH, 1982. Die Hydraulik von Verteilkanaelen (in German). Teil 1-2, Mitteilung Nr.55 56, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich.
- Hosseini M and Abrishami J, 2005. Open Chanel Hydraulic. Astan Ghods Razavi, Mashhad, Iran.
- Pathirana KPP, Munas MM and Jaleel ALA, 2006. Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weir in Supercritical Flow. *Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka* 39(2): 17-24.
- Qu J, 2005. Three dimensional turbulence modeling for free surface flows. PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Rao KH and Pillai CR, 2008. Study of flow over side weirs under supercritical conditions. *Water Resources Management* 12: 131-143.
- Singh R, Manivannan D and Satyanarayana T, 1994. Discharge coefficient of rectangular side- weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 120(4): 814-819.
- Subramanya K and Awasthy SC, 1972. Spatially varied flow over side- weirs. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 98(1): 1-10.
- Tadayon R, 2009. Modelling curvilinear flows in hydraulic structures. PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Vatankhah AR, 2012. Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation* 23(1): 76-79.
- Vatankhah AR, 2013. Water surface profile along a side weir in a parabolic channel. *Flow Measurement and Instrumentation* 32: 90-95.
- Uyumaz A, 1992. Side weir in triangular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 118(6): 965-970.
- Uyumaz A and Muslu Y, 1985. Flow over side weirs in circular channels. *Journal of the Hydraulic Engineering ASCE* 111(1): 144-160.