

## مطالعه‌ی عددی بر روی جریان عبوری از داخل مجاری دایروی دارای سرریز جانبی

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

### چکیده

سرریز جانبی به شکل یک شکاف در کناره کانال اصلی برای هدایت جریان‌های اضافی که بالاتر از تاج سرریز قرار دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع از سازه‌ها در کنترل سطح جریان در شبکه‌های آبیاری-زهکشی، سیستم دفع فاضلاب‌های شهری و آبرسانی جهت شرب بکار گرفته می‌شوند. در این بین کانال‌های دایروی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار هستند، طول قابل ملاحظه‌ای از سیستم دفع فاضلاب و لوله‌های انتقال ساخته شده از مجاری دایروی است. در این مطالعه تغییرات تراز سطح آزاد، آشفتگی و میدان جریان عبوری از داخل یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی توسط نرم افزار تجاری شبیه‌سازی عددی شده است. در این شبیه‌سازی عددی برای مدل‌سازی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF و برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده شده است. در این مطالعه بمنظور اعتبار سنجی دقت مدل عددی، تغییرات عمق جریان در امتداد سرریز جانبی، ضریب دبی سرریز جانبی، دبی عبوری از روی سرریز، عدد فرود در بالادست سرریز و انرژی مخصوص در ابتدای سرریز با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقایسه کلیه پارامترهای ذکر شده با نتایج آزمایشگاهی حاکی از دقت بسیار بالای مدل CFD در پیش‌بینی آشفتگی و میدان جریان عبوری از داخل یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی است. هدف اصلی در این شبیه‌سازی عددی کسب درک صحیح از رفتار جریان عبوری از داخل کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی بمنظور استفاده در مسائل طراحی این نوع از سازه‌های هیدرولیکی است.

**واژه‌های کلیدی:** کانال دایروی، سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی، VOF،  $k-\epsilon$  RNG.

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد عمران آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

<sup>۲</sup> دکتری منابع آب، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

ایمیل: Saeid.Shabanlou@gmail.com؛ تلفن: ۰۸۳۱-۳۷۲۴۳۱۸۱

## مقدمه

در عمل کانال‌های با مقطع عرضی U شکل و سهموی بترتیب در سیستم‌های فاضلاب بعنوان مقطع مبدل من-هول‌های فاضلاب و کانال‌های طبیعی و دست‌ساز استفاده می‌شوند. برای یک کانل U شکل دارای سرریزجانبی اویماز (۱۹۹۷) با انجام یک سری آزمایشات سطح آزاد جریان و دبی عبوری از روی سرریزجانبی در شرایط رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی را اندازه‌گیری نمود. وی با ارائه یک روش نیمه تحلیلی در قالب گراف‌هایی پروفیل طولی سطح آزاد جریان و دبی گذرنده از روی سرریزجانبی را با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه نمود. با توجه به اصول انرژی مخصوص و روش انتگرال‌گیری وطن‌خواه (۲۰۱۳) یک راه حل نیمه تحلیلی برای پیش‌بینی پروفیل سطح آزاد جریان عبوری از داخل مجاری U شکل گزارش نمود. با استفاده از روش انتگرال‌گیری بیضوی غیر کامل وطن‌خواه (۲۰۱۳) یک راه‌حل تحلیلی برای معادله دینامیکی حاکم بر جریان متغییر مکانی عبوری از داخل کانال سهموی دارای سرریزجانبی ارائه نمود.

در عمل کانال‌های با سطح مقطع دایروی در شبکه‌های دفع فاضلاب مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی فراوانی بر روی جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی انجام شده است. آلن (۱۹۵۷) جز نخستین کسانی است که آزمایشاتی را بر روی جریان عبوری از کانال‌های دایروی دارای سرریزجانبی انجام داد. اویماز و موسلا (۱۹۸۵) آزمایشاتی را در دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی بر روی جریان گذرنده از روی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی انجام دادند. آنها در قالب یک سری گراف یک روش تحلیلی مبتنی بر اصول انرژی و روش اجزاء محدود ارائه نمودند. اولیوتو و همکاران (۲۰۰۱) مشخصات جریان عبوری از روی یک سرریزجانبی واقع در یک کانال دایروی مورد بررسی قرار دادند. در مدل آزمایشگاهی اولیوتو و همکاران (۲۰۰۱) جریان در بالادست سرریزجانبی زیربحرانی و در امتداد سرریزجانبی فوق‌بحرانی است. با استفاده از تئوری دو بعدی جریان برگرفته از تئوری خطوط جریان آزاد رامامورتی و همکاران (۱۹۹۵) با انجام مطالعه‌ای آزمایشگاهی روابطی را برای محاسبه ضریب دبی و سرعت جریان خروجی از روی سرریزجانبی

سرریزجانبی نوعی سازه هیدرولیکی است که برای کنترل جریان و بر روی دیواره کناری کانال اصلی نصب می‌شود. با افزایش عمق جریان در داخل کانال اصلی آبهای اضافی از روی تاج سرریزجانبی سرریز شده و به داخل کانال جانبی هدایت می‌شود. جریان عبوری از روی یک سرریزجانبی از نوع جریان‌های متغییر مکانی با کاهش دبی (SVF) محسوب می‌شود. سرریزهای جانبی بصورت گسترده‌ای در پروژه‌های هیدرولیکی و زیست محیطی بعنوان مثال در سیستم‌های آبیاری و زهکشی، شبکه دفع فاضلاب شهری و طرح‌های محافظت از سیلاب استفاده می‌شوند. بدلیل رفتار هیدرولیکی پیچیده جریان عبوری از روی سرریزجانبی تاکنون یک حل تحلیلی کامل برای این گونه از جریان‌های متغییر مکانی ارائه نشده است. تحقیقات و مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی فراوانی بر روی الگوی جریان عبوری از روی سرریزجانبی واقع در کانال‌های مستطیلی ارائه شده است که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

دی مارچی (۱۹۳۴)، فرازر (۱۹۵۴)، ایگرز (۱۹۵۷)، چوو (۱۹۵۹)، سوبرامانیا و اواستی (۱۹۷۲)، الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶)، هاگر (۱۹۸۷)، سینگ و همکاران (۱۹۹۴)، برقی و همکاران (۱۹۹۹)، یوکسل (۲۰۰۴)، ونوتلی (۲۰۰۸)، امیراقلو و همکاران (۲۰۱۱)، باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) و نواک و همکاران (۲۰۱۳).

کانال‌های با سطح مقطع مثلثی و دوزنقه در شبکه‌های زهکشی و آبیاری بصورت گسترده بکار گرفته می‌شوند. برای کانال‌های مثلثی اویماز (۱۹۹۲) با استفاده از روش اجزاء محدود و اصول انرژی مخصوص یک راه‌حل تحلیلی ارائه کرده است که پروفیل طولی جریان واقع در محور کانال اصلی و دبی عبوری از روی سرریزجانبی را پیش‌بینی می‌کند. با استفاده از اصل انرژی مخصوص وطن‌خواه (۲۰۱۲) یک راه‌حل تحلیلی صریح برای پیش‌بینی پروفیل سطح آزاد جریان عبوری از داخل یک کانال با مقطع عرضی مثلثی در امتداد سرریزجانبی ارائه نموده است.

در ارتباط با جریان عبوری از داخل کانال‌های دوزنقه‌ای چوونگ (۱۹۹۱) و وطن‌خواه (۲۰۱۲) مطالعات آزمایشگاهی و عددی را انجام داده‌اند.

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

(۲)

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

(۳)

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

(۴)

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

در معادلات (۱) تا (۴)  $(u, v, w)$ ،  $(A_x, A_y, A_z)$ ،  $(f_x, f_y, f_z)$  و  $(G_x, G_y, G_z)$  به ترتیب برابر مولفه‌های سرعت، مساحت کسری محیط به جریان، نیروهای گرانشی و شتاب‌های ناشی از لزجت در راستاهای  $(x, y, z)$  است. همچنین  $t$ ،  $\rho$ ،  $R_{SOR}$ ،  $p$  و  $V_F$  به ترتیب برابر زمان، چگالی سیال، ترم چشمه، فشار و کسری از حجم مرتبط با جریان است.

در این شبیه‌سازی عددی تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از الگوی VOF مدل‌سازی شده است. روش VOF از سه جزء اصلی تشکیل یافته است.

۱. تعریف تابع سیال حجمی.

۲. حل معادله انتقال VOF.

۳. تنظیم شرایط مرزی در سطح آزاد.

برای مدل‌سازی تغییرات کلی سطح آزاد جریان معادله پیوستگی زیر حل می‌شود.

(۵)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{I}{V_F} \left( \frac{\partial}{\partial x} (F u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (F v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (F w A_z) \right) = 0.0$$

در معادله (۵)،  $F$  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 می‌باشد.

برخی از مدل‌های آشفتگی مختلف عبارتند از:

The Prandtl mixing length model, the turbulent energy model, the two equation standard  $k - \epsilon$  and RNG  $k - \epsilon$  models, large eddy simulation (LES).

واقع در یک کانال دایروی ارائه نمودند. بر اساس اصول انرژی مخصوص و روش انتگرال‌گیری بیضوی غیرکامل وطن‌خواه (۲۰۱۲) یک راه‌حل تحلیلی برای پیش‌بینی پروفیل طولی سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع در یک مجرای دایروی گزارش نموده است.

اخیرا مدل سازی‌های عددی بعنوان ابزاری بسیار قدرتمند و قابل اعتماد در شبیه‌سازی جریان عبوری از سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده محققین مختلف قرار گرفته است. با استفاده از نرم افزار فلونت (FLUENT)، مدل آشفتگی RSM و روش VOF، محمودی‌نیا و همکاران (۲۰۱۲) الگوی جریان و تاثیر عدد فرود بالادست سرریز جانبی مستطیلی را شبیه‌سازی نمودند. با استفاده از طرح VOF، آیدین (۲۰۱۲) سطح آزاد جریان عبوری از روی سرریز جانبی کنگره‌ای مثلثی واقع در یک کانال مستطیلی در شرایط جریان زیر بحرانی را مدل‌سازی نمود. با نرم افزار FLUENT-ANSYS، آیدین و امیرقلو (۲۰۱۳) ظرفیت آبگذری سرریز جانبی کنگره‌ای واقع در یک کانال مستطیلی را تعیین نمودند. آنها با استفاده از طرح VOF، مدل‌های آشفتگی مختلف، نسبت‌های مختلف طول سرریز به عرض کانال و زاویه دهانه سرریز جانبی کنگره‌ای گوناگون، ضریب دبی سرریز جانبی آزمایشگاهی و عددی را با هم مقایسه نمودند.

با مرور مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی بر روی کانال‌های دارای سرریز جانبی مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی عددی بر روی آشفتگی و میدان جریان عبوری از داخل کانال‌های دایره‌ای دارای سرریز جانبی صورت نگرفته است. در این مطالعه‌ی عددی سطح آزاد، الگوی جریان و میدان سرعت در داخل یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی در شرایط رژیم زیر بحرانی با استفاده از نرم‌افزار تجاری شبیه‌سازی می‌شود. در این تحلیل عددی تغییرات سطح آزاد میدان جریان توسط الگوی VOF و آشفتگی جریان توسط مدل آشفتگی  $k - \epsilon$  RNG مدل‌سازی شده است.

## معادلات حاکم

در این مطالعه CFD برای حل میدان جریان یک سیال غیرقابل تراکم در سیستم مختصات کارتزین سه بعدی، معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویراستوکس به شکل ذیل نوشته می‌شود.

در این مطالعه عددی، نتایج حاصل از تحلیل CFD با داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط اویماز و موسلا (۱۹۸۵) مقایسه شده است. تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده اویماز و موسلا شامل یک کانال افقی با سطح مقطع عرضی دایره است. جنس مصالح کانال دایروی از بتن می‌باشد. طول و قطر کانال اصلی بترتیب برابر ۱۰/۹ و ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شده است. سرریزجانبی دقیقاً در میانه کانال دایره‌ای و بر روی دیواره جانبی کانال اصلی نصب شده است. سرریزجانبی از صفحات فایبر گلاس ساخته شده و طول و ارتفاع تاج سرریزجانبی بترتیب برابر ۰.۵ و ۰.۱ متر می‌باشد. در شکل (۲) طرح شماتیک کانال دایروی دارای سرریزجانبی مورد مطالعه اویماز و موسلا قابل مشاهده است.

### مدل عددی

در مدل آزمایشگاهی اویماز و موسلا جریان عبوری از روی سرریزجانبی بصورت کاملاً ریزشی بسمت مخزن جمع آوری هدایت می‌شود. بنابراین در این مطالعه عددی به منظور انجام ریزش کامل جریان عبوری از روی سرریزجانبی یک تانک با ابعاد مشخص در محل سرریزجانبی به کانال اصلی نصب شده است. ابعاد این تانک در شکل (۳) قابل مشاهده است.

بمنظور شبکه‌بندی مدل عددی، کل دامنه محاسباتی توسط یک بلوک مش غیر یکنواخت متشکل از المان‌های مستطیلی شبکه‌بندی شده است. به دلیل وجود گردابه‌های بزرگ و تغییر رفتار جریان در محل اتصال کانال اصلی و تانک مش‌بندی نسبت به سایر قسمت‌های میدان حل ریزتر در نظر گرفته شده است. در محل دیواره‌های جامد نیز شبکه بندی ریزتر در نظر گرفته شده است (شکل ۴). کانال اصلی دایروی بترتیب در راستاهای X, Y و Z توسط راستاهای X, Y و Z توسط ۳۵، ۶۲ و ۶۱ المان شبکه‌بندی شده است.

در این تحلیل عددی برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استفاده شده است. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG برای توصیف آشفتگی نواحی با شدت آشفتگی پائین و برش بالا از دقت بسیار خوبی برخوردار است.

### شرایط مرزی

در این شبیه‌سازی عددی در مقطع ورودی کانال دایره‌ای از مقادیر معلوم دبی و عمق استفاده شده است. در شرایط مرزی ورودی پارامترهای آشفتگی که شامل انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود.

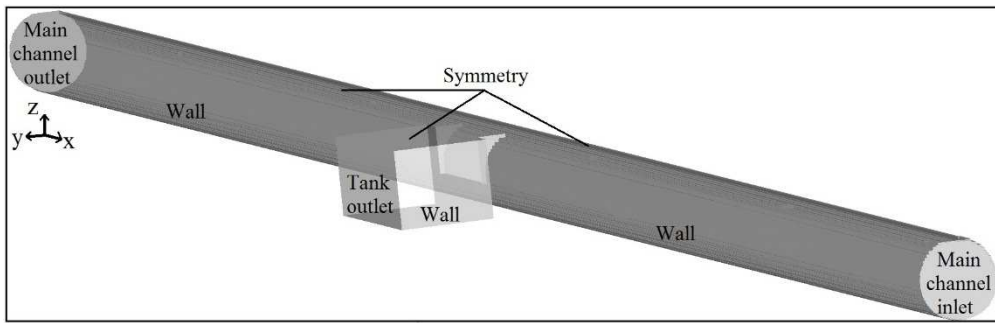
$$k_t = \frac{3}{2} (v_t \cdot T_{len})^2 \quad (۶)$$

$$\varepsilon_t = C_u \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_t^2}{T_{len}} \quad (۷)$$

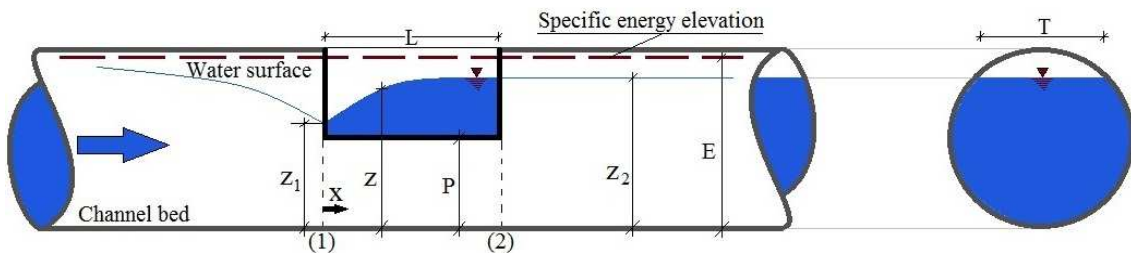
در اینجا  $v_t$  ویسکوزیته سینماتیکی آشفتگی،  $T_{len}$  مقیاس طول آشفتگی که در کانال‌های باز برابر ۰.۷ قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود.  $C_u$  یک مقدار ثابت است که در مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG برابر ۰,۰۸۵ در نظر گرفته می‌شود.

در مقطع خروجی کانال دایروی از مقادیر معلوم فشار و عمق استفاده شده است. در این شبیه‌سازی عددی بمنظور ریزش جریان از روی سرریز و در محل اتصال کانال دایروی با سرریزجانبی یک تانک در نظر گرفته شده است. دیواره پائین دست تانک بعنوان شرایط مرزی خروجی تعریف شده است. کلیه جداره‌های جامد که شامل دیواره‌های جانبی و کف کانال اصلی و تانک است بعنوان شرط مرزی Wall تعریف شده است. کل لایه‌ی فوقانی فاز هوا بعنوان شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده است. در شکل (۱) شرایط مرزی استفاده شده در مدل‌سازی عددی نشان داده شده است.

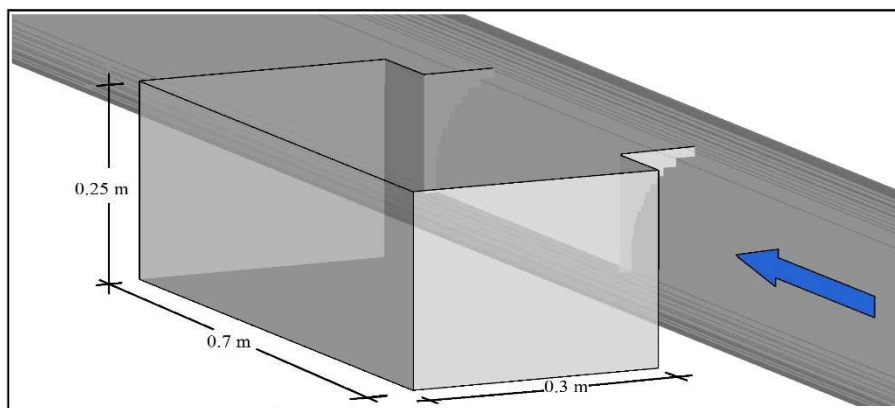
### مدل آزمایشگاهی



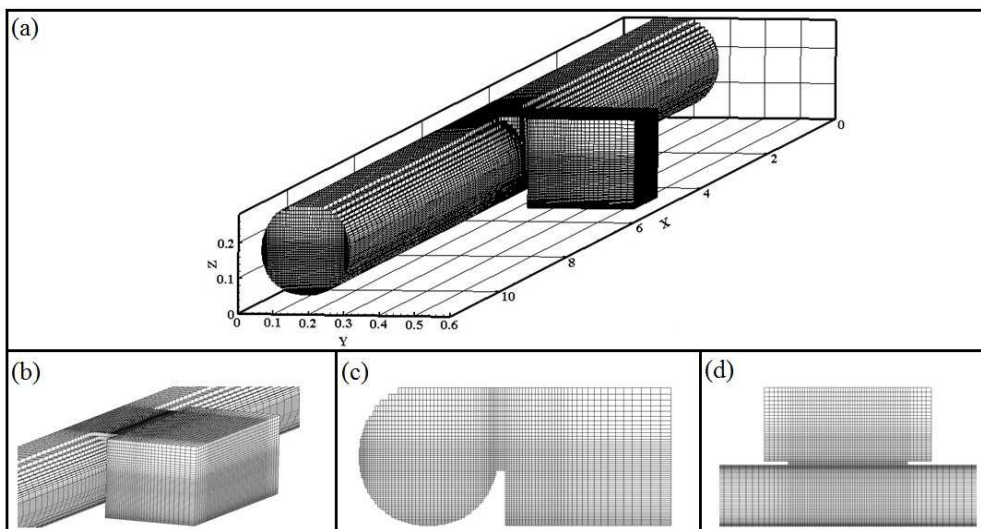
شکل ۱- شرایط مرزی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی



شکل ۲- طرح شماتیک کانال دایروی دارای سرریز جانبی مورد مطالعه اویماز و موسلا



شکل ۳- ابعاد تانک مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی



شکل ۴- ساختار مش‌بندی میدان حل در شبیه‌سازی عددی

## صحت سنجی

در مدل آزمایشگاهی اویماز و موسلا (۱۹۸۵) مقدار دبی در مقطع بالادست سرریز جانبی ( $Q_1$ ) برابر ۰/۰۱۷ مترمکعب بر ثانیه و عمق جریان در انتهای بالادست سرریز جانبی واقع در کانال اصلی ( $Z_1$ ) برابر ۰/۱۳۶۸ متر و عمق جریان در انتهای پائین دست سرریز جانبی واقع در کانال اصلی ( $Z_2$ ) ۰/۱۴۷۶ متر در نظر گرفته شده است. رژیم جریان در این مدل آزمایشگاهی در شرایط زیر بحرانی است بنابراین سطح آزاد جریان در انتهای بالادست بسمت انتهای پائین دست سرریز جانبی افزایش عمق خواهد داشت. در جدول (۱) عمق جریان واقع در کانال اصلی و در امتداد سرریز جانبی حاصل از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط اویماز و موسلا مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد مدل CFD عمق جریان را با دقت بسیار مناسبی پیش‌بینی نموده است.

بمنظور ارزیابی دقت مدل عددی خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) و درصد خطای مطلق میانگین ( $MAE$ ) با استفاده از روابط ذیل محاسبه شده است.

(۸)

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

$$MAE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N |R_{(measured)} - R_{(simulated)}| \quad (۹)$$

مقادیر ( $RMSE$ ) و ( $MAE$ ) برای عمق جریان بترتیب برابر ۰.۵۵۴٪ و ۰.۵۴۷٪ اندازه‌گیری شده است که نشان دهنده دقت مناسب تحلیل عددی در مدل سازی سطح آزاد و عمق جریان است.

در شکل (۵) سطح آزاد جریان سه بعدی شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده میشود در شرایط جریان زیر بحرانی عمق جریان از انتهای بالادست سرریز بسمت انتهای پائین دست سرریز جانبی افزایش عمق داده است که حاکی از رفتار صحیح مدل عددی در شرایط رژیم زیر بحرانی است. در سال ۱۹۸۵ اویماز و موسلا دبی بر واحد طول سرریز جانبی واقع بر یک کانال دایره‌ای شکل را توسط رابطه‌ی ذیل پیشنهاد دادند.

$$-\frac{dQ_w}{dx} = q = C_d \sqrt{2g(z-P)}(z-P) \quad (۱۰)$$

در اینجا  $Q_w$  دبی عبوری از روی سرریز جانبی،  $x$  فاصله طولی از ابتدای سرریز،  $\frac{dQ_w}{dx}$  یا  $q$  دبی بر واحد طول سرریز جانبی،  $g$  شتاب جاذبه،  $P$  ارتفاع تاج سرریز جانبی و  $z$  عمق جریان است. بنابراین ضریب دبی سرریز جانبی را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد.

$$C_d = \left( \frac{Q_w}{L \sqrt{2g(z-P)^3}} \right) \quad (۱۱)$$

در اینجا  $L$  طول سرریز جانبی است. همچنین اویماز و موسلا (۱۹۸۵) رابطه‌ی تجربی (۱۲) را برای محاسبه‌ی ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی در شرایط جریان زیر بحرانی پیشنهاد داده‌اند.

(۱۲)

$$C_d = (0.21 + 0.094 \sqrt{1.75L/D - 1}) + (0.22 - 0.08 \sqrt{1.68L/D - 1}) \sqrt{1 - F_1}$$

در اینجا  $D$  قطر کانال دایروی و  $F_1$  عدد فرود انتهای بالادست سرریز جانبی می‌باشد. مقایسه ضریب دبی سرریز جانبی واقع در یک کانال دایره شکل برای روابط مختلف در جدول (۲) قابل مشاهده است. ضریب دبی آزمایشگاهی و عددی بترتیب با ( $C_{de}$ ) و ( $C_{dn}$ ) نشان داده شده‌اند. برای ارزیابی دقت مدل عددی در پیش‌بینی ضریب دبی درصد خطای نسبی از رابطه‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود. در رابطه (۱۱) ضریب دبی با مقدار دبی عبوری از روی سرریز جانبی رابطه مستقیم و با عمق جریان رابطه معکوس دارد، بنابراین ضریب دبی محاسبه شده از این رابطه در مقایسه با رابطه (۱۲) دارای خطای بیشتری است. در حالیکه که رابطه‌ی (۱۲) تابع عدد فرود انتهای بالادست سرریز جانبی بوده که مقادیر عدد فرود آزمایشگاهی و عددی بترتیب برابر ۰.۶۱۲ و ۰.۵۷۴ محاسبه شده است که ضریب دبی حاصل از رابطه (۱۲) بسیار بهم نزدیک می‌باشد. درصد خطای مدل عددی در پیش‌بینی عدد فرود بالادست سرریز جانبی برابر ۶/۲ درصد است.

$$REP = 100 \times \left| \frac{C_{de} - C_{dn}}{C_{de}} \right| \quad (۱۳)$$

در مدل آزمایشگاهی اویماز و موسلا (۱۹۸۵) مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی برای دبی‌های

جدول ۱- مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و عددی عمق جریان (بر حسب متر) در کانال اصلی دایروی

طول سرریز (متر)	۰	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵
نتایج آزمایشگاهی	۰/۱۳۶۸	۰/۱۳۸۳	۰/۱۳۹۰	۰/۱۳۹۳	۰/۱۴۰۶	۰/۱۴۲۶	۰/۱۴۴۳	۰/۱۴۴۴	۰/۱۴۶۳	۰/۱۴۶۷	۰/۱۴۷۶
نتایج عددی	۰/۱۳۱۲	۰/۱۳۱۵	۰/۱۳۲۲	۰/۱۳۴۲	۰/۱۳۴۸	۰/۱۳۷۶	۰/۱۳۸۶	۰/۱۳۹۸	۰/۱۴۱۱	۰/۱۴۱۷	۰/۱۴۳۰

جدول ۲- مقایسه ضریب دبی آزمایشگاهی و ضریب دبی عددی

رابطه شماره	$(C_{de})$	$(C_{dn})$	$(REP)$
(۱۱)	۰/۳۸۴	۰/۴۲۵	٪ ۱۰/۷
(۱۲)	۰/۴۱۹	۰/۴۲۲	٪ ۰/۷۲

می‌یابد. بنابراین به طور کلی با افزایش دبی کانال اصلی مقدار ضریب دبی سرریز جانبی کاهش می‌یابد.

### انرژی مخصوص

همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌گردد با فرض اینکه شیب کف کانال کم باشد مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی ثابت بوده و برابر است با:

$$E = z + \alpha \left( \frac{Q_1^2}{2gA^2} \right) \quad (14)$$

در اینجا  $E$  انرژی مخصوص،  $\alpha$  ضریب توزیع سرعت،  $Q_1$  دبی در داخل کانال اصلی و  $A$  سطح مقطع عرضی جریان است. فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در حل معادلات حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی از اصول اساسی می‌باشد. از اینرو به منظور بررسی این فرض و با توجه به اینکه مدل عددی مقدار انرژی مخصوص در انتهای بالادست سرریز جانبی (مقطع ۱ در شکل ۲) را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی نموده است. بنابراین در این بخش از مطالعه به مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی پرداخته می‌شود. در شکل (۹) مقدار انرژی مخصوص در مقاطع (۱) و (۲) (شکل ۲) که به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار انرژی مخصوص در انتهای بالادست ( $E_1$ ) و انتهای پائین دست ( $E_2$ ) سرریز جانبی می‌باشد برای مقادیر مختلف دبی عبوری از داخل کانال اصلی با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل عددی مقدار انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی را تقریباً ثابت پیش‌بینی کرده است و افت انرژی در طول سرریز جانبی ناچیز می‌باشد. اختلاف متوسط انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی در حدود ۲/۱ درصد محاسبه شده است.

مختلف عبوری از داخل کانال اصلی اندازه‌گیری شده است. در شکل (۶) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای دبی‌های مختلف عبوری از روی سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. مقادیر  $(RMSE)$  و  $(MAE)$  برای دبی عبوری از روی سرریز جانبی بترتیب برابر ۰/۰۴۱ و ۰/۰۳۱ درصد محاسبه شده است که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی است.

در مدل آزمایشگاهی اویماز و موسلا (۱۹۸۵) مقدار انرژی مخصوص در مقطع بالا دست سرریز جانبی برابر ۰/۱۵۶۳ متر اندازه‌گیری شده است. مقدار انرژی مخصوص بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی عددی برابر ۰/۱۵۳۵ متر بدست آمده است. به منظور بررسی دقت مدل CFD در پیش‌بینی انرژی مخصوص، درصد خطای نسبی انرژی مخصوص برابر ۱/۸ درصد محاسبه شده که حاکی از دقت بسیار بالای شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی مقدار انرژی مخصوص جریان است.

### دبی کانال اصلی - عدد فرود - ضریب دبی

در شکل (۷) تغییرات عدد فرود در انتهای بالادست سرریز جانبی در کانال اصلی ( $F_1$ ) نسبت به دبی عبوری از داخل کانال اصلی ( $Q_1$ ) نشان داده شده است. مقادیر دبی به حداکثر دبی گذرنده از داخل کانال اصلی بدون بعد شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار دبی کانال اصلی، عدد فرود افزایش می‌یابد. در شکل (۸) تغییرات ضریب دبی ( $C_d$ ) سرریز جانبی نسبت به عدد فرود ( $F_1$ ) مشاهده می‌شود. در این شکل ضریب دبی با جایگذاری عدد فرود در رابطه (۱۲) محاسبه شده است. مقدار ضریب دبی سرریز جانبی با افزایش عدد فرود کاهش

مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام داده‌اند. به منظور بررسی دقیق ساختار سطح آب در امتداد سرریز جانبی واقع در یک کانال دایروی، پروفیل‌های طولی سطح آزاد شبیه-سازی شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

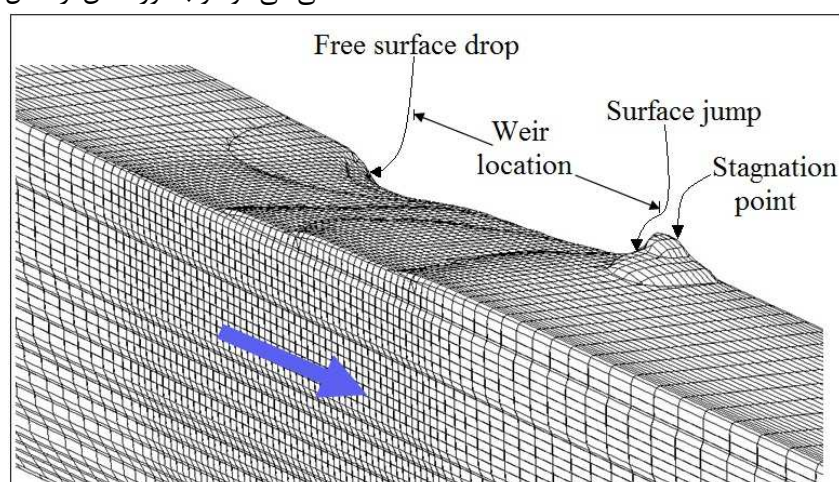
اثرات جریان جانبی ناشی از وجود سرریز جانبی در قبل از بالادست و بعد از پائین دست سرریز ناچیز بوده و بر روی پروفیل‌های طولی سطح آزاد جریان تاثیر نمی‌گذارد.

با پیشروی بسمت محل سرریز جانبی اثرات جریان جانبی بیشتر شده و سطح آب در طول سرریز دچار پائین افتادگی می‌شود و با دور شدن از محل سرریز اثر جریان

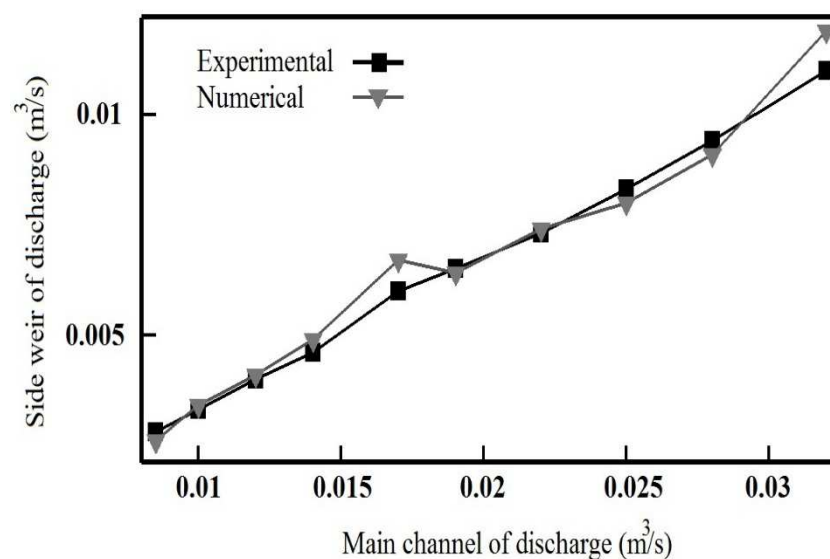
الخشاب و اسمیت (۱۹۷۶) و برقی و همکاران (۱۹۹۹) در نتایج آزمایشگاهی خود با مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریز جانبی مقدار اختلاف بین  $E_1$  و  $E_2$  را بترتیب برابر ۵ و ۳/۷ درصد محاسبه کرده‌اند.

### پروفیل‌های سطح آزاد جریان

الخشاب (۱۹۷۵)، امیرقلو و همکاران و همکاران (۲۰۱۰) و آیدین (۲۰۱۲) بر روی رفتار سطح آزاد جریان عبوری از داخل یک کانال مستطیلی دارای سرریز جانبی

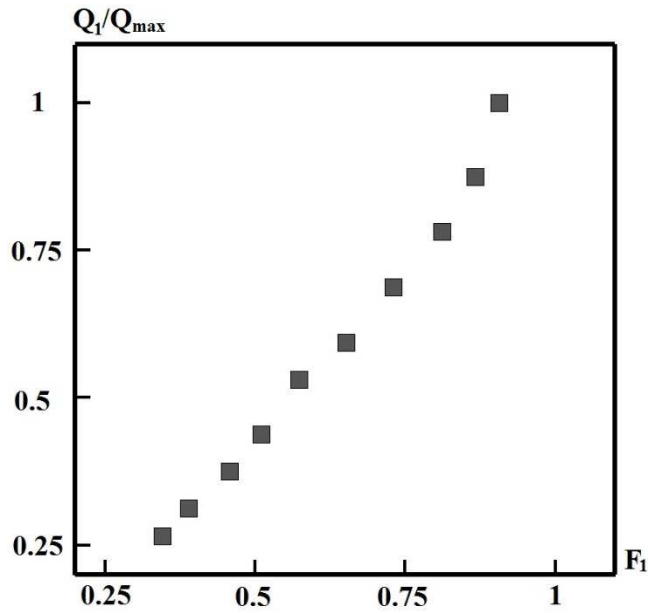


شکل ۵- سطح آزاد سه‌بعدی شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی واقع در کانال دایروی

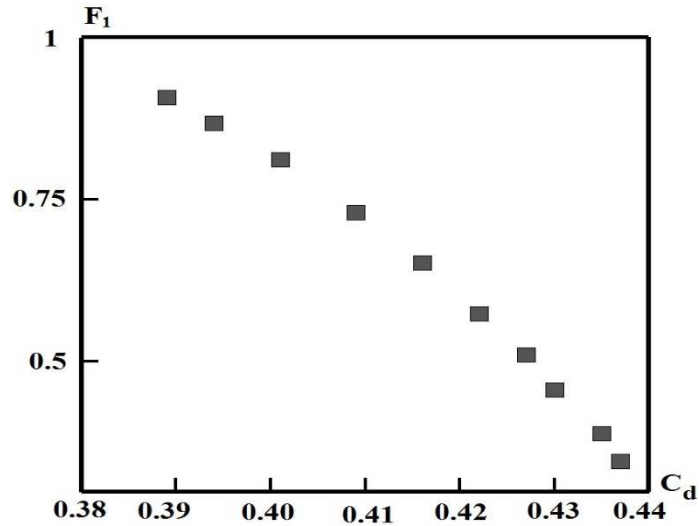


شکل ۶- مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی شده و نتایج آزمایشگاهی برای دبی عبوری از روی سرریز جانبی.

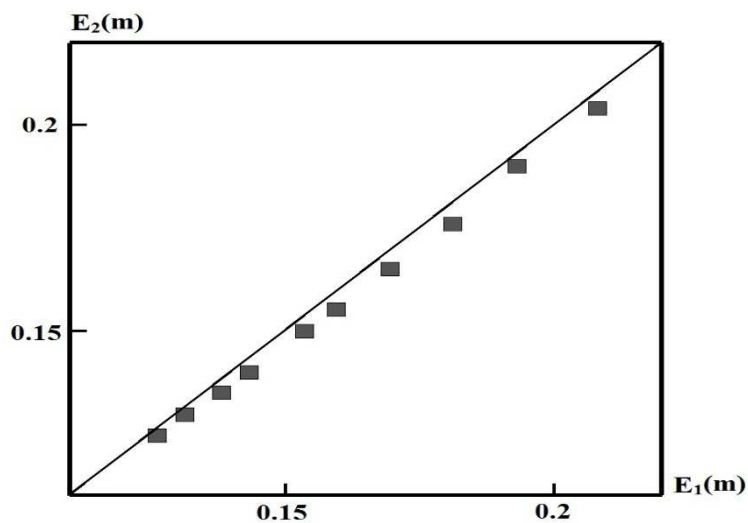




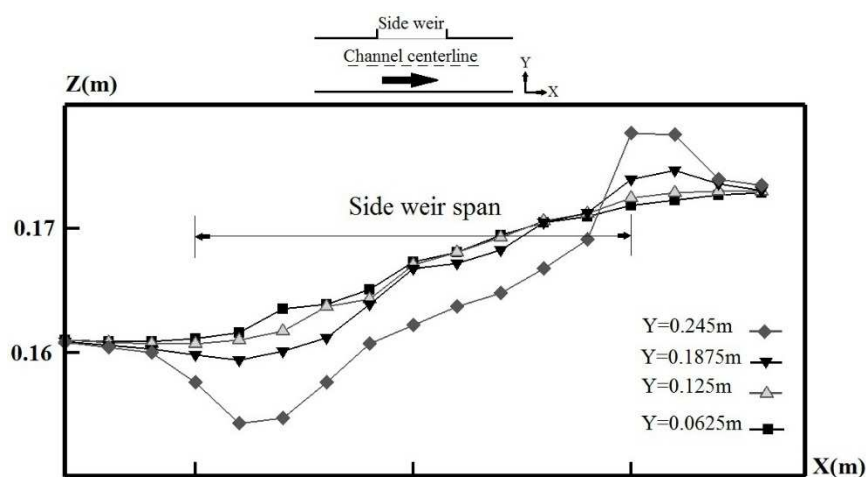
شکل ۷- تغییرات عدد فرود به دبی عبوری از داخل کانال اصلی



شکل ۸- تغییرات ضریب دبی به عدد فرود



شکل ۹- مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریزجانبی برای دبی‌های مخلف عبوری از داخل کانال دایروی.



شکل ۱۰- پروفیل‌های طولی شبیه‌سازی شده واقع در امتداد سرریز جانبی.

در انتهای پائین دست سرریز جانبی تقریباً افقی است و تغییرات عرضی آن ناچیز می‌باشد.

در شکل (۱۲) خطوط هم‌سرعت  $u$  واقع در کانال اصلی و در تراز بالای تاج سرریز جانبی نشان داده شده است. حداکثر سرعت طولی در بالای تاج سرریز دقیقاً در ناحیه بالادست سرریز جانبی به وقوع پیوسته است. با پیشروی جریان در امتداد طولی سرریز جانبی از مقدار سرعت طولی کاسته می‌شود. حداقل سرعت طولی ( $u$ ) در انتهای پائین دست سرریز و در مجاورت دیواره داخلی به وقوع پیوسته است. در واقع ناحیه وقوع سرعت حداقل، محل تشکیل نقطه ایستایی است (شکل ۵).

در شکل (۱۳) مولفه جانبی سرعت ( $v$ ) توسط خطوط هم‌سرعت واقع در کانال اصلی و در تراز بالای تاج سرریز جانبی نشان داده شده است. بعلاوه اثرات جانبی ناشی از وجود سرریز جانبی مولفه جانبی سرعت در مجاورت سرریز به حداکثر خود می‌رسد و با دور شدن از محل سرریز و نزدیک شدن به دیواره خارجی (Outer bank) از شدت این اثرات کاسته می‌شود. در داخل کانال اصلی مقدار سرعت جانبی در قبل از بالادست و بعد از پائین دست سرریز جانبی ناچیز است و می‌توان از اثرات جریان جانبی ناشی از وجود سرریز صرف نظر کرد.

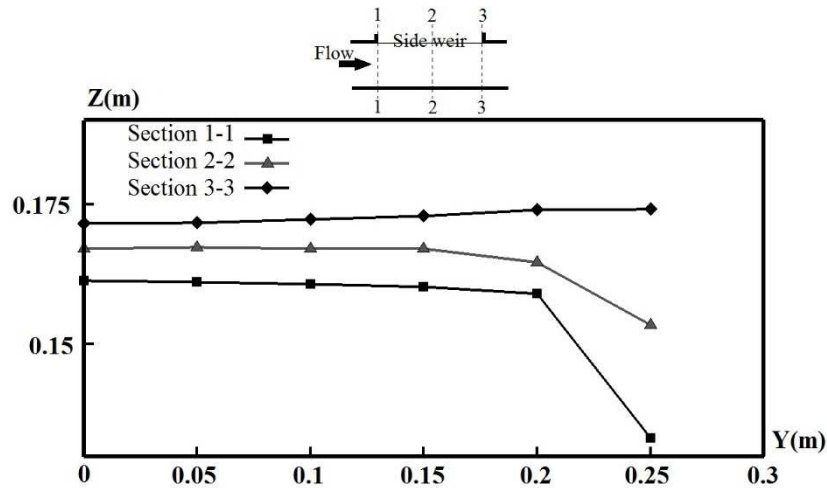
باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) با مطالعه بر روی زاویه جت ریزشی جریان از روی سرریز جانبی، مقدار این زاویه در مجاورت سرریز جانبی را از رابطه‌ی (۱۵) محاسبه نموده‌اند.

ثانویه کاهش می‌یابد و سطح آزاد جریان دارای شیب کمتری خواهد بود.

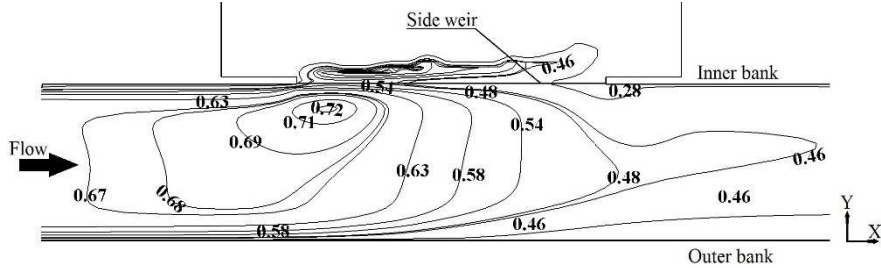
بدلیل اثرات ورودی یک افت (drop) سطح آزاد در بالادست سرریز جانبی اتفاق می‌افتد. مقدار این افت با دور شدن از محل سرریز و نزدیک شدن به خط مرکزی کانال اصلی کاهش یافته است. بعد از این افت سطح آب با سرعت افزایش عمق خواهد داد و در انتهای پائین دست سرریز جانبی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در مجاورت سرریز جانبی این افزایش عمق به صورت یک پرش سطحی قابل مشاهده است (شکل ۵). در طول پرش سطحی انرژی جنبشی افزایش یافته و انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد.

بعد از پرش سطحی عمق آب در انتهای پائین دست سرریز جانبی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این نقطه بعنوان نقطه سکون معرفی می‌شود. نقطه سکون دارای کمترین سرعت و بالاترین تراز ارتفاعی آب است. کل مطالب بیان شده بر روی شکل (۵) و در قالب شکل (۱۰) قابل مشاهده می‌باشد.

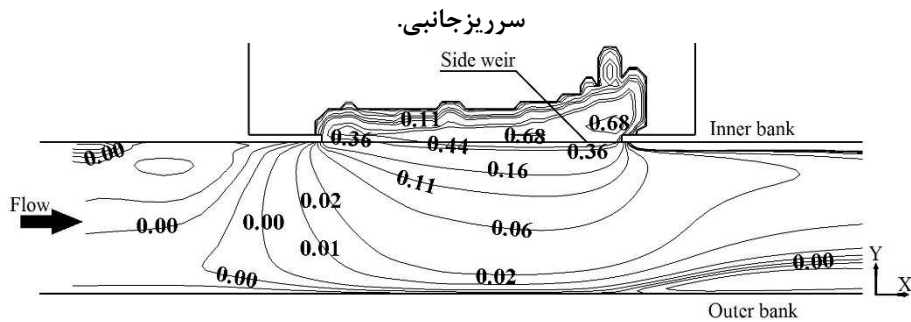
در شکل (۱۱) پروفیل‌های عرضی سطح آزاد شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی نشان داده شده است. با پیشروی در طول کانال، عمق جریان در حال افزایش است و با نزدیک شدن به محل سرریز جانبی تغییرات عرضی سطح آزاد جریان بدلیل جریان جانبی ناشی از وجود سرریز زیاد می‌شود. پروفیل عرضی جریان



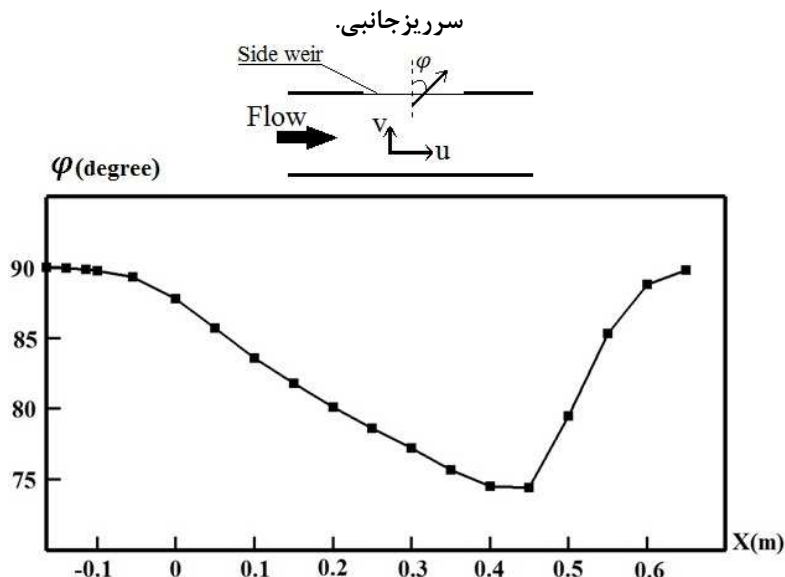
شکل ۱۱- پروفیل‌های عرضی سطح آزاد شبیه‌سازی در امتداد سرریز جانبی



شکل ۱۲- خطوط هم‌سرعت u واقع در کانال اصلی (مولفه طولی سرعت) شبیه‌سازی شده در مجاورت تراز فوقانی تاج



شکل ۱۳- خطوط هم‌سرعت v واقع در کانال اصلی (مولفه طولی سرعت) شبیه‌سازی شده در مجاورت تراز فوقانی تاج



شکل ۱۴- تغییرات زاویه جت خروجی جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی

طول سرریزجانبی است. در این تحقیق عددی مقدار انرژی مخصوص در بالادست و پائین دست سرریزجانبی با همدیگر مقایسه شده است که تحلیل نتایج عددی نشان دهنده افت جزئی انرژی مخصوص در طول سرریزجانبی است.

با بررسی تغییرات طولی و عرضی سطح آزاد جریان در امتداد سرریزجانبی یک افت در سطح آزاد جریان و در ابتدای سرریز اتفاق می‌افتد. با پیشروی در طول سرریز عمق جریان سرعت افزایش یافته و در انتهای سرریز یک پرش سطحی رخ میدهد. بعد از پرش سطحی نقطه ایستایی مشاهده می‌شود که دارای بالاترین تراز ارتفاعی است.

مولفه طولی سرعت در ابتدای سرریزجانبی و در داخل کانال اصلی دارای بیشترین مقدار است که با پیشروی در امتداد سرریز از مقدار آن کاسته می‌شود، در ضمن مولفه جانبی سرعت نیز با پیشروی بسمت محل سرریز بعثت جریان جانبی ناشی از وجود سرریز افزایش می‌یابد.

زاویه جت خروجی جریان در مجاورت تاج سرریزجانبی در قبل از بالادست و بعد از پائین دست سرریزجانبی به زاویه ۹۰ درجه نزدیک شده و در انتهای سرریز به حداقل مقدار خود میرسد.

هدف اصلی از این شبیه‌سازی عددی کسب دیدی صحیح و دقیق از رفتار جریان عبوری از داخل کانال‌های دایروی دارای سرریزجانبی بمنظور استفاده در مسائل طراحی و کاربردهای عملی است.

پیشنهاد میشود جهت مطالعه‌ی دقیق‌تر الگو و میدان جریان عبوری از داخل کانال‌های دایروی دارای سرریزجانبی تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بیشتری بر روی جریان عبوری از داخل این نوع از سازه‌های هیدرولیکی انجام بگیرد.

## مراجع

- 1) Ackers P.A. 1957. Theoretical Consideration of Side Weirs as Storm water Overflows. Institute of Civil Engineers, London, vol. 6, pp. 250, February.
- 2) Allen J.W. 1957. The discharge of water over side weirs in circular pipes. ICE Proc, 6(2), 270-287.

$$\varphi = \text{Arc tan}\left(\frac{u}{v}\right) \quad (15)$$

در اینجا  $\varphi$  زاویه جت خروجی جریان در مجاورت تاج سرریزجانبی برحسب درجه،  $u$  و  $v$  بترتیب برابر مولفه‌های طولی و عرضی سرعت می‌باشد.

تغییرات  $\varphi$  در طول سرریزجانبی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در مجاورت سرریز و در بالادست آن زاویه جت خروجی جریان تقریباً ۹۰ درجه اندازه‌گیری شده است. در واقع در این قسمت از کانال اصلی هیچ‌گونه جریان جانبی که دارای مولفه  $v$  باشد وجود ندارد. در طول سرریزجانبی و در انتهای آن  $\varphi$  به حداقل مقدار خود میرسد. در انتهای پائین دست سرریزجانبی و با دور شدن از محل سرریز مقدار  $\varphi$  دوباره افزایش یافته و به زاویه ۹۰ درجه نزدیک می‌شود. باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) در مطالعه آزمایشگاهی خود بر روی زاویه جت جریان خروجی در مجاورت سرریزجانبی واقع در یک کانال مستطیلی به نتایج مشابه‌ای دست یافته‌اند.

## نتیجه‌گیری

سرریزهای جانبی بشکل گسترده‌ای در پروژه‌های هیدرولیکی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در عمل کانال‌های دایره‌ای در سیستم‌های دفع فاضلاب و آبرسانی استفاده می‌شوند. در این شبیه‌سازی عددی جریان عبوری از داخل یک کانال دایروی دارای سرریزجانبی با استفاده از نرم‌افزار تجاری و مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  مدل‌سازی گردید. تغییرات سطح آزاد جریان توسط روش VOF شبیه‌سازی شده است. مدل CFD تغییرات سطح آزاد را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرده است، بگونه‌ای که عمق جریان از انتهای بالادست سرریز بسمت انتهای پائین دست سرریزجانبی افزایش یافته است. در این مطالعه عددی ضریب دبی سرریزجانبی با استفاده از روابط مختلف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و دبی عبوری از روی سرریزجانبی توسط مدل عددی با دقت بالایی پیش‌بینی شده است. مقدار ضریب دبی سرریزجانبی با افزایش عدد فرود کانال اصلی کاهش می‌یابد. مدل عددی عدد فرود و انرژی مخصوص در ابتدای سرریزجانبی را بترتیب با مقدار خطای نسبی  $6/2$  و  $1/8$  درصد پیش‌بینی کرده است. در هنگام حل معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی فرض بر ثابت بودن مقدار انرژی در

- Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 121(8), 608-612.
- 20) Singh R. Manivannan D. Satyanarayana T. 1994. Discharge coefficient of rectangular side-weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120(4): 814-819.
- 21) Subramanya K. Awasthy S.C. 1972. Spatially varied flow over side- weirs. *Journal of the Hydraulics Division* 98(1):1-10.
- 22) Uyumaz A. 1992. Side weir in triangular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 118(6): 965-970.
- 23) Uyumaz A. 1997. Side weir in U-shaped channels. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(7): 639-646.
- 24) Uyumaz A. Muslu Y. 1985. Flow over side weirs in circular channels. *J. Hydraul. Eng.*, 111(1), 144-160.
- 25) Vatankhah A.R. 2012. New solution method for water surface profile along a side weir in a circular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 138(10):948-954.
- 26) Vatankhah A.R. 2012. Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation* 23(1): 76-79.
- 27) Vatankhah A.R. 2012. Water surface profile over side weir in a trapezoidal channel. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers (ICE) Water Management*; 165(5):247-252.
- 28) Vatankhah A.R. 2013. Water surface profiles along a rectangular side weir in a U-shaped channel. *Journal of Hydrologic Engineering* (Accepted for publication).
- 29) Vatankhah. A.R. 2013. Water surface profile along a side weir in a parabolic channel. *Flow Measurement and Instrumentation*. 32: 90-95.
- 30) Venutelli M. 2008. Method of solution of non-uniform flow with the presence of rectangular side weir. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 134(6), 840-846.
- 31) Yüksel E. 2004. Effect of specific energy variation on lateral overflows. *Flow Meas. Instrum.*, 15(5-6), 259-269.
- 3) Aydin M.C. 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software* 45: 159-166.
- 4) Aydin M.C. Emiroglu M.E. 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation* 29: 1-8.
- 5) Bagheri S. Heidarpour M. 2012. Characteristics of Flow over Rectangular Sharp-Crested Side Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(6): 541-547.
- 6) Borghei S.M. Jalili M.R. Ghodsian M. 1999. Discharge coefficient for sharp crested side-weirs in subcritical flow. *Journal of the Hydraulic Division* 125 (10):1051-1056.
- 7) Cheong H. 1991. Discharge coefficient of lateral diversion from trapezoidal channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 117(4):461-475.
- 8) Chow V.T. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. New York, McGraw-Hill.
- 9) De Marchi, G. 1934. Essay on the performance of lateral weirs (In Italian). *L'Energia elettrica Milan* 11(11): 849-860.
- 10) El-Khashab A. Smith K.V.H. 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *J. Hydraul. Div.* 102(9), 1255-1268.
- 11) El-Khashab AMM. 1975. *Hydraulics of flow over side weirs*. Ph.D. thesis England: University of Southampton.
- 12) 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.
- 13) Emiroglu ME. Kaya N. Agaccioglu H. 2010. Discharge capacity of labyrinth side weir located on a straight channel. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*; 136(1):37-46.
- 14) Frazer W. 1954. The behavior of side weirs in prismatic rectangular channels. Ph.D. thesis, Glasgow Univ., Glasgow, UK.
- 15) Hager W.H. 1987. Lateral outflow over side- weirs. *Journal of Hydraulic Engineering* 112(4): 491-504.
- 16) Mahmodinia S. Javan M. Eghbalzadeh A. 2012. The Effects of the Upstream Froude Number on the Free Surface Flow over the Side Weirs. *Int. Conf. Mod. Hydr. Eng., Procedia Eng.* 28 (1), 644-647.
- 17) 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.
- 18) Oliveto G. Biggiero V. Fiorentino M. 2001. Hydraulic Features of Supercritical Flow along Prismatic Side Weirs. *J. Hydr. Res.* 39 (1), 73-82.
- 19) Ramamurthy A.S. Zhu W.Vo.D. 1995. *Rectangular Lateral Weirs in Circular Open*

