

شبیه‌سازی عددی سطح آزاد و میدان جریان در کانال دایروی در امتداد سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی

حامد عظیمی¹، سعید شهبانلو^{2*}

تاریخ پذیرش: 94/09/04

تاریخ دریافت: 93/11/23

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

2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه

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

چکیده

سرریز جانبی به‌عنوان سازه کنترل‌کننده جریان بر روی دیواره کانال اصلی نصب می‌شود. هنگامی که سطح آب بالاتر از تاج سرریز جانبی است، جریان اضافی از روی تاج سرریز شده و به داخل کانال جانبی هدایت می‌شود. این سازه‌ها کاربرد وسیعی در شبکه‌های دفع فاضلاب شهری، سیستم‌های آبرسانی، شبکه زهکشی و انحراف سیلاب دارند. در این مطالعه سطح آزاد جریان و دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی در یک کانال دایروی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG و برای برآورد تغییرات سطح آزاد جریان نیز از طرح VOF استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که دقت قابل‌قبول مدل عددی را نشان داد. در ادامه، ضریب دبی سرریز جانبی و نیز سطح آزاد جریان برای دبی‌های مختلف داخل کانال اصلی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس نحوه تغییرات عرض صفحه جدایش جریان از محل بستر کانال اصلی به سمت سطح آزاد جریان بررسی شد. همچنین 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 گرفت. بر اساس الگوی جریان‌های زیربحرانی، عمق جریان از بالادست سرریز جانبی به سمت انتهای پایین‌دست سرریز افزایش یافت. برای کلیه نیمرخ‌های طولی، با افزایش دبی کانال اصلی، عمق جریان در امتداد سرریز جانبی افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی، سطح آزاد، شبیه‌سازی عددی، کانال دایروی، میدان جریان

Numerical Simulation of Flow Free Surface and Field in Circular Channel along the Side Weir in Subcritical Flow Conditions

H Azimi¹, S Shabanlou^{2*}

Received: 12 February 2015 Accepted: 25 November 2015

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

²-Ph.D. of Hydrology and Water Resources, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

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

Abstract

A side weir is being installed as a flow control structure on the side of the main channel. When the water level exceeds the crest level of the side weir, the additional flow will spill over the weir crest and divert into the side channel. This type of structures has wide application in urban sewage disposal, water supply systems, drainage and flood diversion networks. In this study, the free surface of flow and the side weir discharge were simulated using FLOW-3D software. The RNG k- ϵ turbulence model was used for simulation of the flow field turbulence. Also the volume of fluid (VOF) scheme was applied to predict the variations of flow free surface. Comparing numerical simulations with experimental results showed the acceptable accuracy of numerical model. Next, the discharge coefficient of side weir and the free surface of flow variations were evaluated for different discharges of the main channel. Then the variation of the width of the separating stream surface from bed of the main channel toward the free surface of flow was investigated. Also, the circular channel effects on the pattern and strength of the secondary flow were studied. The effects of the main channel discharge on the stagnation point height and bed shear stress pattern were investigated. According to the subcritical flows pattern, the flow depth was increased from the side weir upstream end towards its downstream end. For all longitudinal profiles with increasing discharges within circular channel, the flow depth was increased along the side weir.

Keywords: Circular channel, Flow field, Free surface, Numerical simulation, Side weir

مقدمه

آزمایشگاهی اثرات طول سرریز لبه تیز بر روی ضریب دبی سرریز جانبی واقع در کانال مستطیلی را در شرایط جریان زیربحرانی بررسی نمودند. آن‌ها ضریب دبی سرریز جانبی را تابعی از عدد فرود بالادست سرریز، نسبت ارتفاع تاج سرریز به عمق جریان در بالادست، نسبت طول سرریز به عرض کانال اصلی و نسبت طول سرریز جانبی به عمق جریان در بالادست سرریز معرفی کردند. باقری و حیدرپور (2012) با انجام مطالعه‌ای آزمایشگاهی توزیع سه‌بعدی سرعت در مجاورت سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی را اندازه‌گیری نمودند. آن‌ها الگوی زاویه جت جریان بر

سرریزهای جانبی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی محسوب می‌شوند که برای انحراف، تنظیم و اندازه‌گیری جریان، اتلاف انرژی و سایر اهداف هیدرولیکی مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند. معمولاً یک سرریز جانبی بر روی دیواره جانبی کانال‌های اصلی برای انحراف جریان اضافی نصب می‌گردد. رامامورتی و همکاران (2006) با استفاده از روش غیرخطی PLS ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی و مستطیلی را محاسبه نمودند. معادلات ایشان دبی سرریز جانبی را با خطای $\pm 5\%$ پیش‌بینی کرد. امیراوغلو و همکاران (2011) با انجام مطالعه‌ای

برای شرایط جریان زیربحرانی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها رابطه‌ای را برای محاسبه این نوع از سرریزهای جانبی پیشنهاد دادند که رابطه مذکور تابعی از مشخصات هیدرولیکی جریان و پارامترهای هندسی کانال اصلی و سرریز جانبی است.

با مرور مطالعات آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی بر روی میدان جریان کانال‌های دارای سرریز جانبی، مشاهده می‌شود که تاکنون شبیه‌سازی عددی دقیقی در ارتباط با کانال‌های با مقطع دایروی دارای سرریز جانبی صورت نگرفته است. هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی سطح آزاد و آشفتگی میدان جریان عبوری از یک کانال با مقطع دایروی دارای سرریز جانبی مستطیلی در شرایط جریان زیربحرانی با استفاده از نرم‌افزار 3D-FLUENT است. در این مطالعه عددی، برای آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و متوسط‌گیری شده رینولدز-ناویر استوکس برای حل میدان غیردائمی سیال غیرقابل تراکم به صورت ذیل نوشته می‌شود:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial}{\partial x} (u A_x) \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial}{\partial x} (u A_x) \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad [3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial}{\partial x} (u A_x) \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad [4]$$

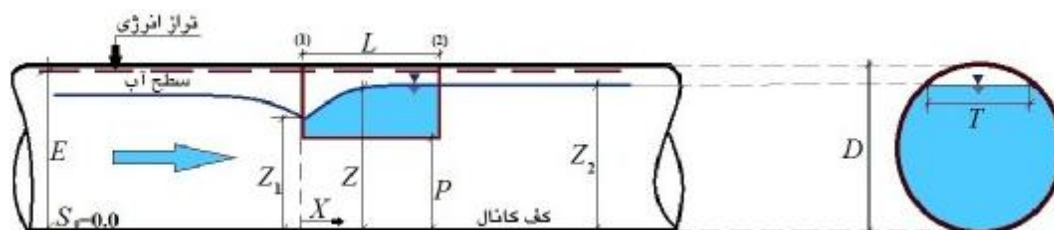
در اینجا (u, v, w) ، (A_x, A_y, A_z) ، (G_x, G_y, G_z) و (f_x, f_y, f_z) به ترتیب برابر مؤلفه‌های سرعت، مساحت کسری محیط به جریان، نیروهای گرانشی و شتاب‌های ناشی از لزجت در راستاهای (x, y, z) است. همچنین t

روی سرریز جانبی را مورد مطالعه قرار دادند، اندازه زاویه مذکور در بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی تقریباً 90 درجه محاسبه شد. همچنین وطن‌خواه (2012) یک راه‌حل نیمه‌تحلیلی برای پیش‌بینی پروفیل طولی سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع در یک کانال دایروی معرفی نمود. وی این روش تحلیلی را با استفاده از روش انتگرال‌گیری بیضوی غیر کامل و اصول انرژی مخصوص به‌دست آورد که برای هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق بحرانی مورداستفاده قرار می‌گیرد. کاریزی و هنر (1378) به بررسی آزمایشگاهی و عددی توزیع تنش برشی روی سرریزهای جانبی لبه‌پهن مستطیلی با ورودی تیز گوشه و گردگوشه پرداختند. آن‌ها با مقایسه تنش برشی حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت بیان کردند که در ورودی‌های گرد-گوشه به نحو چشم‌گیری از میزان جداسازی جریان در لبه‌های ورودی سرریز جانبی و همچنین از میزان جریان‌های ثانویه غیر مؤثر روی سرریز جانبی کاسته می‌شود که این امر باعث افزایش بازده آبیگری از سرریز جانبی خواهد شد. منگارلکار (2010) با بهره‌گیری از نرم‌افزار ANSYS ICEM CFD به شبیه‌سازی عددی سطح آزاد سرریز جانبی با ارتفاع تاج صفر با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG پرداخته و محل تشکیل نقطه ایستایی به‌دست‌آمده از بررسی تحلیلی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه کرد. آیدین (2012) با استفاده از روش حجم سیال (VOF) الگوی جریان در یک کانال مستطیلی دارای سرریز جانبی مثلثی کنگره‌ای را برای اعداد فرود مختلف شبیه‌سازی کرد. وی رفتار سطح آزاد جریان را در مجاورت سرریز جانبی مورد بررسی قرار داد و به‌وجود نقطه ایستایی در انتهای پایین‌دست سرریز جانبی اشاره نمود. آیدین و امیراوغلو (2013) با استفاده از نرم‌افزار FLUENT-ANSYS و طرح VOF، ظرفیت آبیگری سرریز جانبی کنگره‌ای را

RNG برابر 0/085 در نظر گرفته می‌شود. در مقطع خروجی کانال اصلی، عمق پایین دست جریان مشخص هست. جریان عبوری از روی سرریز جانبی به داخل یک مخزن ریخته می‌شود که در مرز خروجی این مخزن شرایط مرزی خروجی (outflow) تعریف شده است. همه دیواره‌های جامد به‌عنوان شرایط مرزی Wall تعریف شده‌اند. در شرایط مرزی دیواره شرط no-slip تحمیل شده است و اصطکاک، ناچیز در نظر گرفته می‌شود بنابراین در مرز Wall هیچ زبری اعمال نشده است. کل سطح فوقانی میدان جریان توسط شرایط مرزی تقارن (symmetry) معرفی شده است.

آرایش شبکه

در شبیه‌سازی عددی حاضر به‌منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی عددی از داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط اویماز و موسلا (1985) استفاده شده است. مدل آزمایشگاهی آن‌ها شامل یک کانال روباز افقی ($S_0 = 0.0$) با سطح مقطع دایروی به طول 10/9 متر و قطر (D) 0/25 متر بود که سرریز جانبی لبه‌تیز در مقطع میانی و روی دیواره جانبی کانال اصلی نصب شده است. جنس کانال اصلی از بتن بوده و سرریز جانبی از صفحات فایبرگلاس ساخته شده است. طول (L) و ارتفاع تاج (P) سرریز جانبی به ترتیب برابر 0/5 و 0/1 متر هست. در شکل 1 طرح شماتیک کانال دایره‌ای دارای سرریز جانبی مورد استفاده اویماز و موسلا (1985) مشاهده می‌شود.



شکل 1- طرح شماتیک کانال دایره‌ای دارای سرریز جانبی مورد مطالعه اویماز و موسلا (1985).

ρ ، R_{SOR} و P به ترتیب برابر زمان، چگالی سیال، ترم چشمه، فشار و کسری از حجم مرتبط با جریان است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل آشفتگی RNG k- ϵ استفاده شده است. این مدل آشفتگی نواحی با برش بالا و جریان‌های آشفته با شدت کم را با دقت بالایی شبیه‌سازی می‌کند. تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از طرح VOF مدل‌سازی شده است. در طرح VOF برای محاسبه جزء حجمی معادله پیوستگی زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) = 0 \quad [5]$$

در رابطه 5 F جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی مشخص است. اگر $F = 0$ باشد، سلول مذکور خالی هست و اگر $F = 1$ باشد سلول محاسباتی پر از سیال است. برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی کانال اصلی استفاده شده است. در مرز ورودی کانال اصلی پارامترهای آشفتگی جریان شامل انرژی جنبشی آشفتگی (k_t) و نرخ اتلاف آشفتگی (e_t) توسط رابطه‌های 6 و 7 محاسبه می‌شود:

$$k_t = \frac{3}{2} (n_t \times TLEN)^2 \quad [6]$$

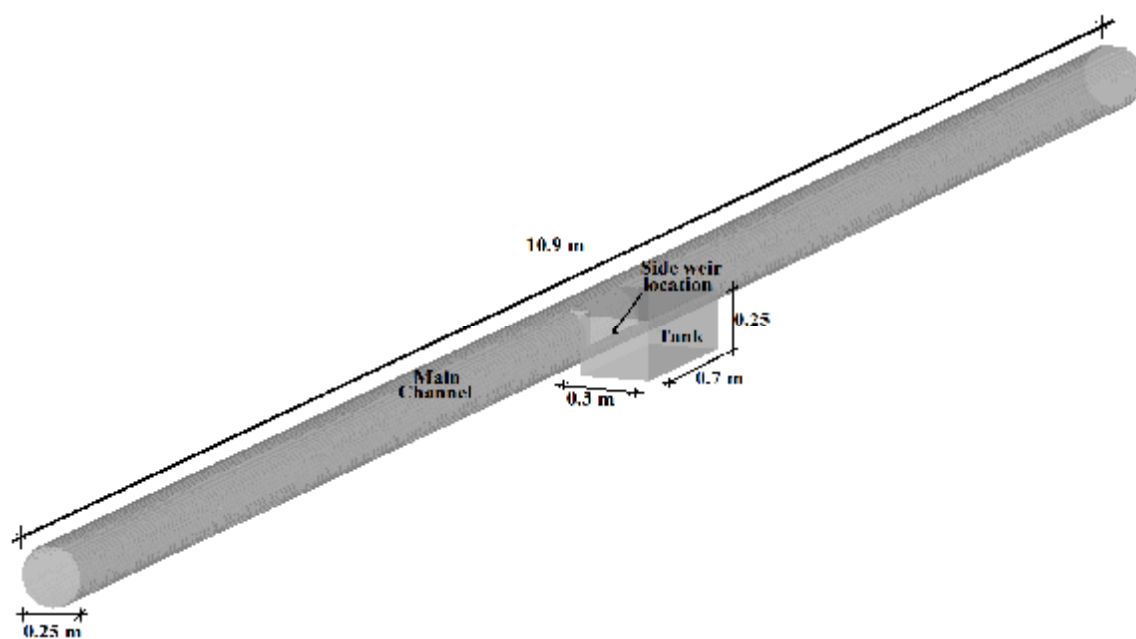
$$e_t = CNU \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_t^{\frac{3}{2}}}{TLEN} \quad [7]$$

در رابطه‌های 6 و 7 n_t ویسکوزیته سینماتیکی آشفتگی و TLEN مقیاس طول آشفتگی است که در کانال‌های باز برابر 7% قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود. CNU نیز یک مقدار ثابت است که در مدل آشفتگی

جانبی و در مجاورت دیواره‌های جامد شبکه‌بندی بسیار ریزتر از سایر نواحی انجام شده است. در شکل 3 میدان جریان شبکه‌بندی شده قابل مشاهده هست. در جدول 1 تعداد سلول‌های محاسباتی در راستاهای X,Y,Z مشاهده می‌شود که این مقادیر در نزدیکی دیواره‌های جامد از رابطه 8 تعیین می‌شود:

$$y^+ = \frac{Y_1 \times u_*}{n} \quad [8]$$

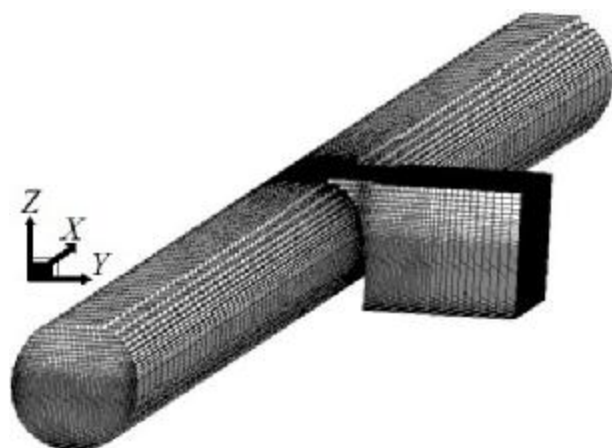
به‌منظور ریزش کامل جریان از روی سرریز جانبی لبه-تیز، عرض مخزن متصل به سرریز بزرگ‌تر از طول سرریز در نظر گرفته شده است. در شکل 2 کل دامنه محاسباتی و ابعاد کانال اصلی به همراه مخزن متصل به سرریز جانبی قابل مشاهده هست. در شبیه‌سازی عددی موردنظر، کل دامنه محاسباتی توسط یک بلوک شبکه غیریکنواخت متشکل از اجزاء مستطیلی شبکه‌بندی گردیده است. در محل تقاطع کانال اصلی با سرریز



شکل 2- طرح کلی از کانال با مقطع دایروی و مخزن متصل به سرریز جانبی مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی.

جدول 1- تعداد سلول‌های محاسباتی در راستاهای مختلف.

نوع شبکه‌بندی	موقعیت	در جهت		
		X	Y	Z
غیریکنواخت	کانال اصلی	186	60	61
غیریکنواخت	مخزن	62	35	61



شکل 3- شبکه‌بندی میدان جریان.

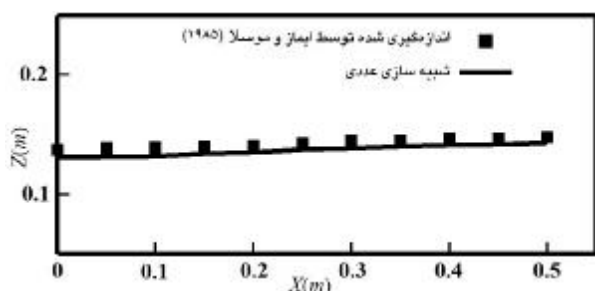
نتایج و بحث

صحت‌سنجی

خطای (RMSE) با استفاده از رابطه‌های 9 و 10 محاسبه می‌شود:

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

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

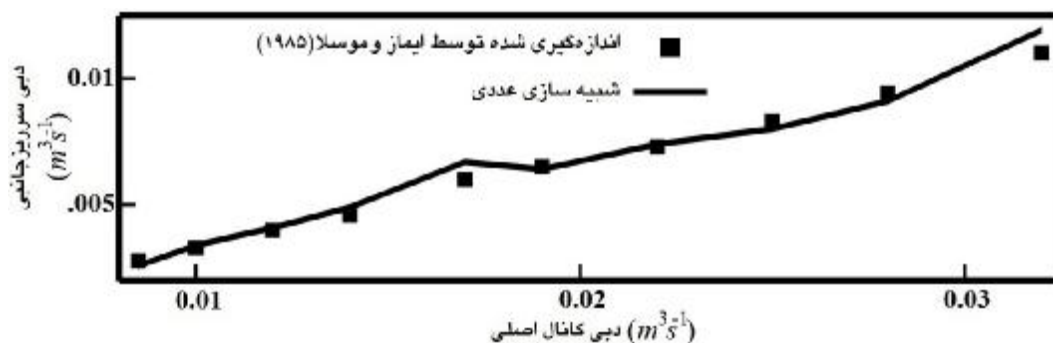


شکل 4- مقایسه تغییرات طولی سطح آزاد جریان در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی.

در رابطه‌های 9 و 10 $R_{(measured)}$ و $R_{(simulated)}$ به ترتیب برابر نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی هست. مقادیر APE و RMSE برای پروفیل طولی سطح آزاد جریان به ترتیب برابر 3/88 و 0/544 محاسبه شده است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل عددی در پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان هست. در شکل 5 نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی مقادیر مختلف دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی در کانال دایروی برای $L/D=2$ و $P/D=0.4$ با مقادیر آزمایشگاهی اویماز و موسلا (1985) مقایسه شده است. مقادیر APE و RMSE برای دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی به ترتیب برابر 4/87 و 0/041 محاسبه شده است. این مقادیر خطا نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول مدل عددی در پیش‌بینی رفتار جریان در مجاورت سرریز جانبی است. اویماز و موسلا (1985) یک رابطه تجربی برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی در شرایط جریان زیربحرانی پیشنهاد کردند. این رابطه تابعی از نسبت طول سرریز جانبی به قطر کانال (L/D) و عدد فرود در بالادست سرریز جانبی (F_1) است:

$$C_d = (0.21 + 0.094\sqrt{1.75L/D - 1}) + (0.22 - 0.08\sqrt{1.68L/D - 1})\sqrt{1 - F_1} \quad [11]$$

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی، سطح آزاد جریان و دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده توسط اویماز و موسلا (1985) در شرایط جریان زیربحرانی مقایسه شده است. اویماز و موسلا (1985) در تحقیق آزمایشگاهی خود به اندازه‌گیری پروفیل طولی سطح آزاد جریان و دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی پرداختند. در شبیه‌سازی عددی ابتدا سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. سپس مقادیر مختلف دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی شبیه‌سازی شده، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌گردد. در ادامه، مشخصات میدان و آشفتگی جریان و اثرات سرریز جانبی بر الگوی جریان عبوری از کانال دایروی در شرایط جریان زیربحرانی مورد ارزیابی قرار گرفته است. داده‌های آزمایشگاهی اویماز و موسلا (1985) که در آن پروفیل طولی سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع بر محور مرکزی کانال اصلی اندازه‌گیری شده است عبارت‌اند از: $E_1=0.1563m$, $Z_1=0.1368m$, $Z_2=0.1476m$ و $Q_1=0.017m^3s^{-1}$. به‌طورکلی، در یک کانال دارای سرریز جانبی در شرایط جریان زیربحرانی، عمق جریان در امتداد سرریز جانبی از انتهای بالادست سرریز به سمت انتهای پایین‌دست سرریز افزایش خواهد یافت. همان‌گونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود، انطباق قابل‌قبولی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در پیش‌بینی سطح آزاد جریان و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. مدل عددی، رفتار سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی واقع در یک کانال دایروی را به‌خوبی پیش‌بینی کرده، به‌گونه‌ای که سطح آزاد جریان از بالادست سرریز به سمت پایین‌دست آن افزایش یافته است. به‌منظور بررسی میزان دقت مدل عددی در پیش‌بینی سطح آزاد جریان مقادیر خطای متوسط (APE) و ریشه میانگین مربعات



شکل 5- مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی شده و آزمایشگاهی دبی جریان عبوری از روی سرریز جانبی.

ضریب دبی حاصل از رابطه 11 برای نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی است. به‌منظور نشان دادن دقت مدل عددی درصد خطای نسبی (REP) عدد فرود و ضریب دبی محاسبه شده است.

مقایسه بین عدد فرود و ضریب دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی در جدول 2 قابل‌مشاهده است. در این جدول $F_{I(e)}$ و $F_{I(n)}$ به ترتیب عدد فرود حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی برای ($Q_1=0.017m^3s^{-1}$) هستند. C_{dn} و C_{de} به ترتیب برابر

جدول 2- مقایسه بین عدد فرود و ضریب دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و عددی برای $Q_1=0.017 m^3s^{-1}$.

	$REP\% = 100 \cdot \left \frac{R_{measured} - R_{simulated}}{R_{measured}} \right $
$F_{I(e)} = 0/612$	
$F_{I(n)} = 0/574$	6/2%
$C_{de} = 0/419$	
$C_{dn} = 0/422$	0/72%

سابرامانیا و آواستی (1972) پیشنهاد شده است. آنها ضریب دبی را تنها تابعی از عدد فرود بالادست سرریز جانبی معرفی کردند:

$$C_d = \frac{2}{3} \frac{g}{e} 0.611 \sqrt{1 - \frac{3F_1^2}{F_1^2 + 2}} \quad [12]$$

در جدول 3 مقادیر ضریب دبی با استفاده از رابطه‌های کانال‌های دایروی و مستطیلی محاسبه شده و با هم مقایسه شده است.

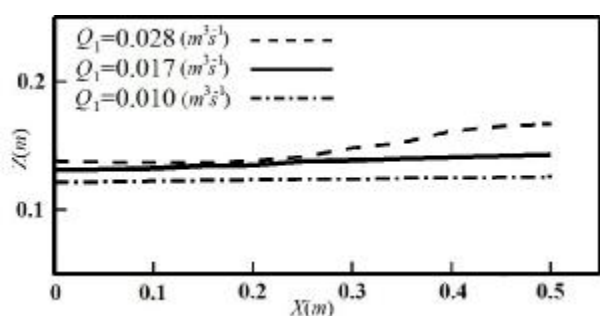
میدان جریان الف) ضریب دبی

رابطه 11 برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های دایروی در شرایط جریان زیربحرانی توسط اویماز و موسلا (1985) پیشنهاد شده است. هرچند که آنها پیشنهاد دادند برای محاسبه ضریب دبی می‌توان از رابطه 12 نیز استفاده کرد. رابطه 12 برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال مستطیلی برای شرایط جریان زیربحرانی توسط

جدول 3- مقادیر ضریب دبی محاسبه شده از نتایج شبیه سازی عددی با استفاده از رابطه های کانال های دایروی و مستطیلی

$Q_1(m^3s^{-1})$	0/0085	0/01	0/012	0/014	0/017	0/019	0/022	0/025	0/028	0/032
رابطه 11	0/437	0/435	0/430	0/427	0/422	0/416	0/409	0/401	0/394	0/389
رابطه 12	0/371	0/362	0/345	0/330	0/310	0/280	0/247	0/207	0/173	0/144

جریان در ترازهای مختلف از سرریز جانبی در داخل کانال دایروی قابل مشاهده هست. همان گونه که در این شکل ها مشخص است با نزدیک شدن جریان به دهانه سرریز جانبی به علت وجود فشار مکشی اعمال شده از طرف سرریز جانبی، جریان در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم می شود. قسمتی از جریان وارد دهانه سرریز جانبی شده و مابقی در کانال اصلی پایین دست جریان می یابد. در ناحیه تقسیم خطوط جریان قسمتی از جریان که وارد کانال جانبی می شود به وسیله صفحه برشی به نام "صفحه جدایش جریان" تفکیک می گردد.



شکل 6- پروفیل سطح آزاد جریان شبیه سازی شده برای مقادیر مختلف دبی عبوری از کانال اصلی.

لازم به ذکر است که این صفحه از تراز سطح آزاد جریان شروع شده و تا تراز تاج سرریز ادامه دارد. در این مطالعه W_H به عنوان عرض صفحه جدایش جریان معرفی می شود که از محل تقاطع دیواره کانال اصلی با سرریز جانبی تا امتداد صفحه جدایش جریان هست. همان گونه که مشاهده می گردد، عرض صفحه جدایش جریان از کف کانال به سمت تراز سطح آزاد در حال افزایش است. بنابراین در نزدیکی تراز تاج سرریز جانبی فشار مکشی اعمال شده از طرف کانال جانبی بیشتر از سایر ترازهای ارتفاعی کانال اصلی است.

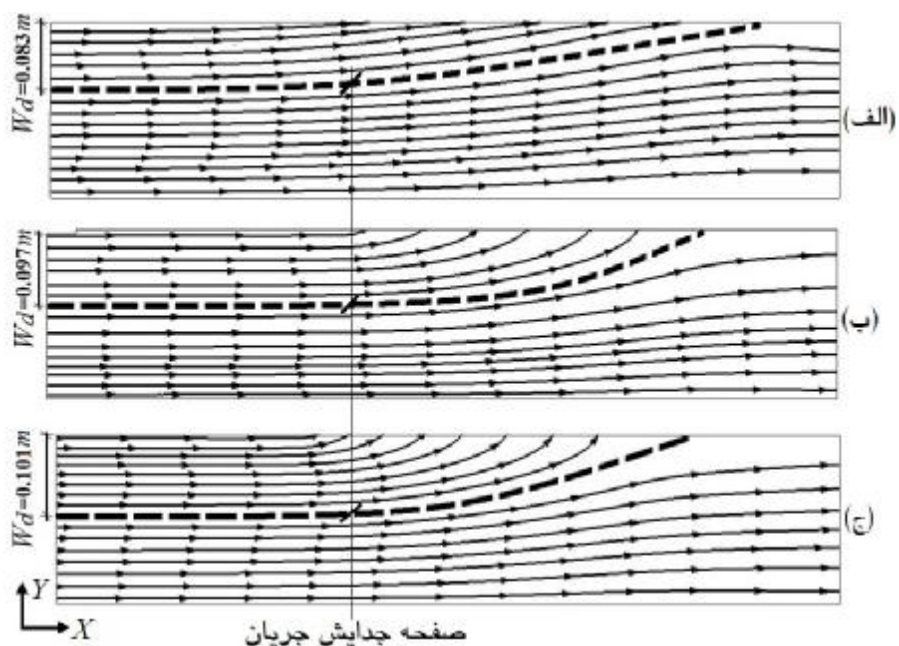
همان طور که از جدول 3 مشاهده می شود، مقادیر ضریب دبی محاسبه شده از نتایج شبیه سازی با افزایش مقدار دبی در کانال اصلی کاهش می یابد. رابطه مربوط به کانال های مستطیلی، ضریب دبی را کمتر از رابطه مربوط به کانال های دایروی پیش بینی می کند، زیرا رابطه 12 تنها تابع عدد فرود است و از اثرات هندسه سرریز جانبی صرف نظر شده است. بنابراین برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در مجاری دایروی می توان از رابطه مربوط به کانال های مستطیلی نیز استفاده کرد، هر چند که رابطه کانال های مستطیلی ضریب دبی را کمتر از رابطه مربوط به کانال های دایروی پیش بینی می کند.

ب) سطح آزاد جریان

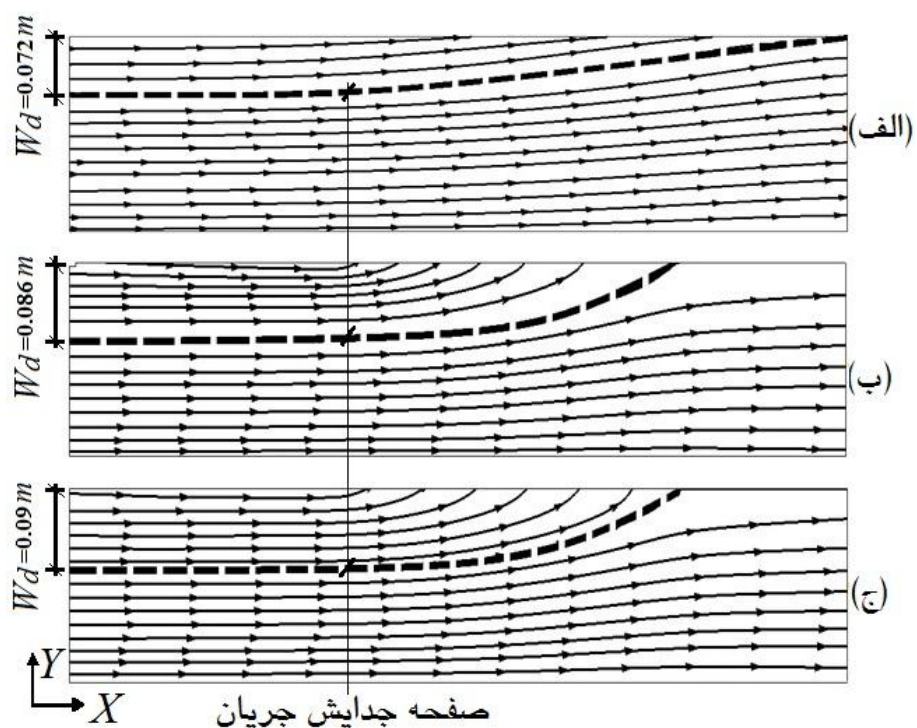
در شکل 6 پروفیل سطح آزاد جریان در سه دبی جریان مختلف قابل مشاهده هست. تغییرات کلی سطح آزاد جریان توسط مدل عددی برای مقادیر مختلف دبی جریان حاکی از افزایش عمق جریان از انتهای بالادست سرریز جانبی به سمت انتهای پایین دست سرریز جانبی است، که نشان دهنده دقت بالای مدل عددی در پیش بینی سطح آزاد جریان در نسبت های مختلف آگذری در شرایط جریان زیر بحرانی است.

ج) صفحه جدایش جریان

جهت بررسی مسیر حرکت ذرات در ترازهای مختلف لازم است تا خطوط جریان در این ترازا رسم و مورد بررسی قرار گیرد. در شکل های 7 و 8 خطوط دو بعدی



شکل 7- خطوط دوبعدی جریان در تراز الف) پایین‌تر از تاج ب) روی تاج ج) بالاتر از تاج به همراه عرض صفحه جدایش جریان برای $Q_1=0/017 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ در کانال اصلی.



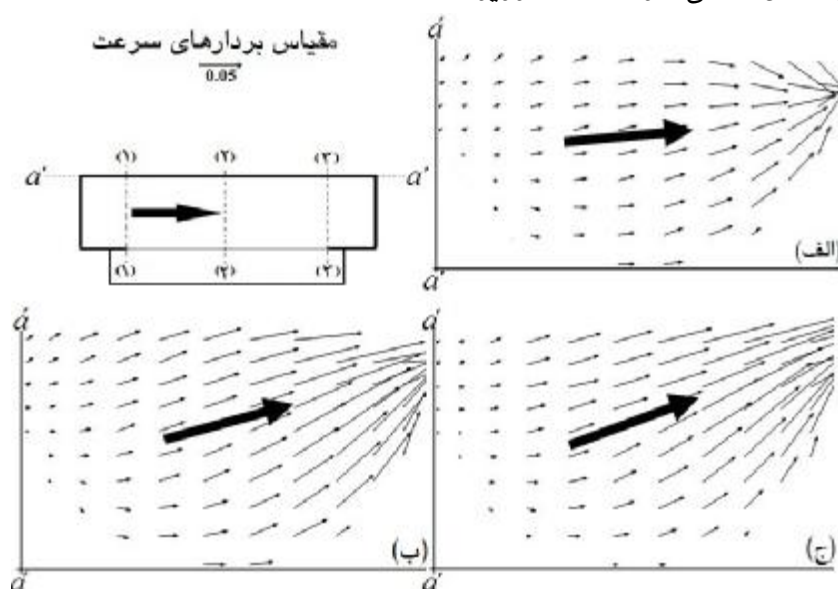
شکل 8 - خطوط دوبعدی جریان در تراز الف) پایین‌تر از تاج ب) روی تاج ج) بالاتر از تاج به همراه عرض صفحه جدایش جریان برای $Q_1=0/019 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ در کانال اصلی.

جانبی، جریان ثانویه در حال شکل‌گیری است. نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که به دلیل ساختار دایروی شکل کانال اصلی شدت جریان ثانویه تخفیف یافته است. به عبارت دیگر کانال دایروی باعث کاهش شدت جریان ثانویه شده است.

در شکل 10 بردارهای سرعت طولی در امتداد سرریز جانبی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با نزدیک شدن به محل سرریز جانبی، جریان ثانویه در حال شکل‌گیری است، با توجه به مقطع طولی 6-6، سلول چرخشی در حال تشکیل شدن است. اما نکته قابل توجه این است که شدت جریان ثانویه در کانال‌های دایروی دارای سرریز جانبی نسبت به کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی، تخفیف یافته و از قدرت کمتری برخوردار است.

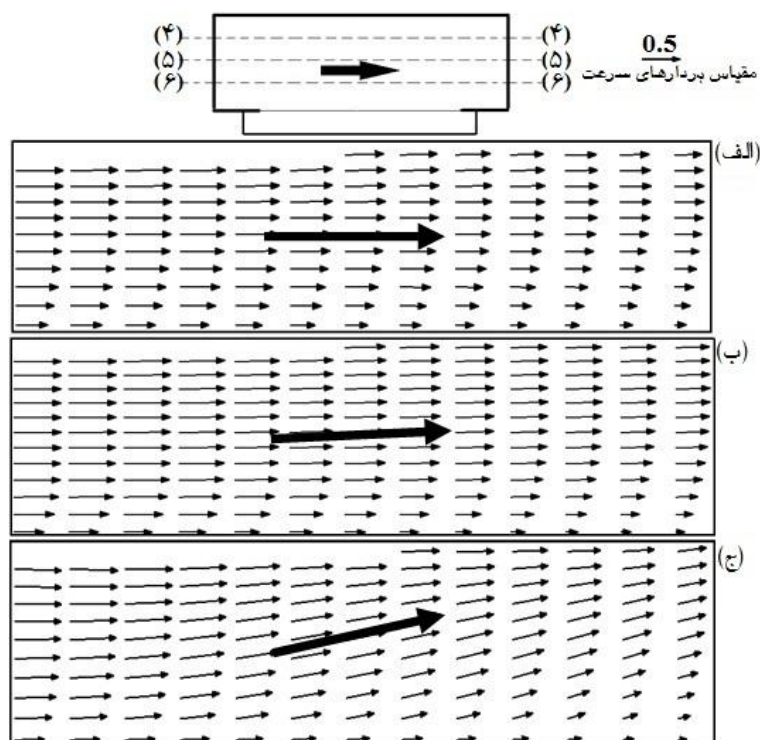
(د) اثر شکل کانال بر روی الگوی جریان ثانویه

در بررسی الگوی جریان شبیه‌سازی شده در کانال اصلی دارای سرریز جانبی، می‌توان به جریان ثانویه موجود در کانال‌های دایروی اشاره نمود. نیری و ادگارد (1993) در بررسی‌های خود در مورد جریان در آبگیرهای جانبی و همچنین روسیر (2007) در مطالعات خود روی سرریزهای جانبی لبه‌تیز در مسیر کانال مستقیم، به وجود جریان‌های ثانویه در راستای طولی کانال اصلی اشاره کرده‌اند. به منظور بررسی این جریان‌های ثانویه در طول سرریز جانبی، بردارهای سرعت در راستاهای X,Y به ترتیب در سه مقطع عرضی و طولی از کانال اصلی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل 9 قابل مشاهده هست، در مقطع ابتدایی سرریز جانبی و در داخل کانال دایروی $(a'-1)$ جریان یک‌سویه در عرض کانال اصلی وجود دارد و به تدریج با پیشروی در داخل کانال اصلی در امتداد سرریز



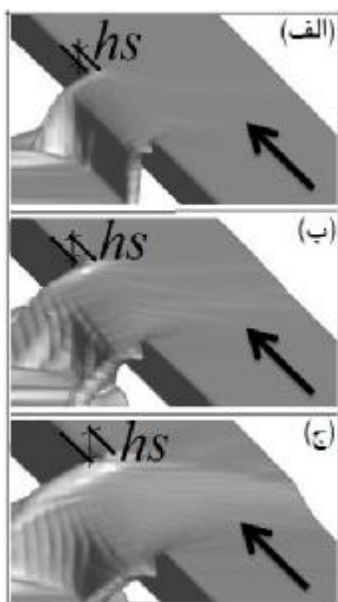
شکل 9 - بردارهای سرعت عرضی شبیه‌سازی شده در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی کانال اصلی دایروی در امتداد سرریز

جانبی: الف) محور $a'-1$ ب) محور $a'-2$ ج) محور $a'-3$.



شکل 10- بردارهای سرعت طولی شبیه‌سازی شده در مقاطع طولی کانال اصلی: الف) محور 4-4 ب) محور 5-5 ج) محور 6-6.

نقطه ایستایی که از لبه فوقانی تاج سرریز جانبی اندازه‌گیری شده است معرفی می‌شود.



شکل 11- سطح آزاد سه بعدی شبیه‌سازی شده به همراه

نقاط ایستایی برای الف) $Q_1 = 0.01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ب) $Q_1 = 0.017 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

ج) $Q_1 = 0.028 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

ر) اثر مقدار دبی جریان بر روی ارتفاع نقاط ایستایی در داخل کانال اصلی و در انتهای دهانه سرریز جانبی، ناحیه‌ای تشکیل می‌شود که به آن ناحیه ایستایی می‌گویند. نقطه ایستایی در داخل این ناحیه دارای بالاترین تراز ارتفاعی است. در این ناحیه در اثر برخورد خطوط جریان به جداره پایین دست کانال و با فرض ثابت بودن انرژی مخصوص، کمینه میزان سرعت طولی با بیشترین میزان تراز سطح آب ظاهر شده و یک نقطه ایستایی تشکیل می‌شود. در این نقطه مقدار تنش برشی نزدیک بستر کانال اصلی صفر است و در صورت حمل رسوب توسط جریان، در این نقطه ذرات رسوبی به دام افتاده و به خاطر عدم وجود تنش برشی و سرعت پایین جریان، ذرات رسوبی ته‌نشین شده و باعث تشکیل پشته‌های رسوبی می‌شوند (نیری و همکاران 1999). در شکل 11 سطح آزاد سه بعدی شبیه‌سازی شده به همراه نقطه ایستایی برای نسبت‌های مختلف آگذری قابل مشاهده هست. در این مطالعه عددی پارامتر h_s به عنوان ارتفاع

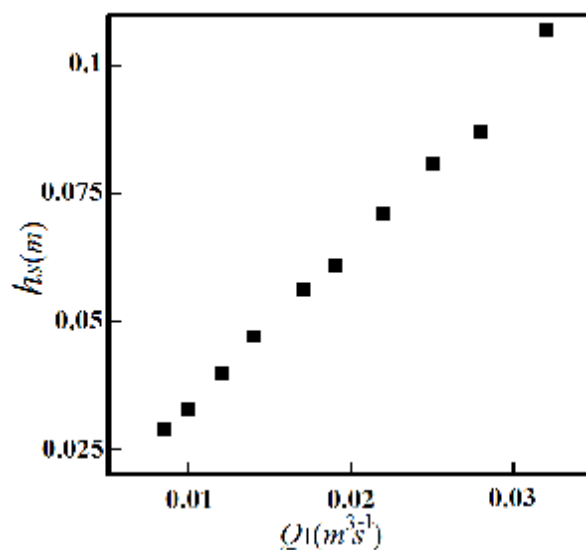
سرعت، در امتداد دهانه سرریز به دلیل تشکیل جریان-های ثانویه رخ داده است. بنابراین مقدار سرعت در نزدیکی بستر کانال اصلی در پایین دست سرریز جانبی کمتر از بالادست سرریز جانبی هست. زیرا ساختار جریان ثانویه به گونه‌ای است که در این نوع از جریان، مؤلفه طولی سرعت (u) کاهش یافته و در مقابل مؤلفه-های عرضی و قائم سرعت (w,v) زیاد می‌شود.

همان‌گونه که از مقایسه پروفیل‌های طولی سرعت در دو مقدار مختلف آبگذری مشاهده می‌شود، مقدار سرعت در نزدیکی انتهای پایین دست سرریز جانبی در مجاورت کانال اصلی در حال کاهش است. این ناحیه از کانال اصلی بر روی شکل 15 مشخص شده است. بررسی توزیع تنش برشی بستر تا حد زیادی می‌تواند در کسب درک کیفی از الگوی فرسایش میدان جریان مفید باشد. در شکل 15 الگوی توزیع تنش برشی در نزدیکی بستر کانال اصلی نشان داده شده است. ناحیه "S" به عنوان ناحیه‌ای با کمترین مقدار تنش برشی در داخل کانال اصلی معرفی شده است. محققانی از جمله امیدبیگی و همکاران (2009) و نیری و همکاران (1999) به وجود این ناحیه با تنش برشی کم اشاره کرده‌اند. در ناحیه S احتمال وقوع رسوب‌گذاری در مجاورت دیواره کانال اصلی وجود دارد. روسیر (2007) نیز در نتایج تحقیقات آزمایشگاهی خود روی الگوی جریان در کانال مستقیم همراه با سرریز جانبی به چنین الگوی رسوب-گذاری اشاره کرده است. علت تشکیل ناحیه مزبور را می‌توان به دلیل کاهش سرعت در نزدیکی بستر کانال اصلی در مقطع انتهایی پایین دست سرریز جانبی در داخل کانال اصلی (شکل‌های 13 و 14) و وجود نقطه ایستایی در این ناحیه که دارای بیشترین تراز آب و کمترین مقدار سرعت هست (شکل 11) توجیه نمود.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه سطح آزاد جریان، دبی عبوری از روی سرریز جانبی لبه‌تیز و ضریب دبی سرریز جانبی واقع در یک کانال با مقطع دایروی در شرایط جریان زیر-بحرانی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D شبیه‌سازی

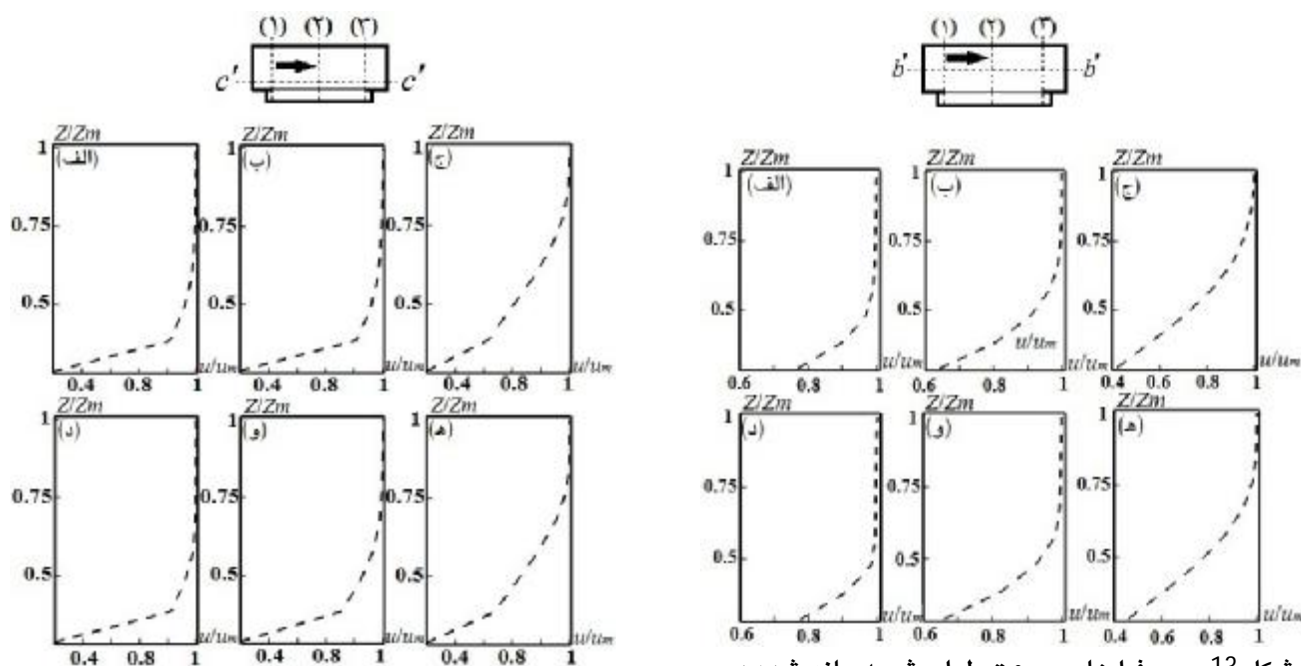
در شکل 12 ارتفاع نقطه ایستایی برای مقادیر مختلف دبی جریان عبوری از کانال دایروی نشان داده شده، که تقریباً یک رابطه خطی بین مقدار دبی کانال اصلی و ارتفاع نقاط سکون وجود دارد. باید به این نکته اشاره شود که در محل تشکیل نقطه سکون سرعت به کمینه مقدار خود می‌رسد و با توجه به افزایش ارتفاع آب در این ناحیه فشار نیز زیاد می‌شود.



شکل 12- ارتفاع نقاط سکون برای دبی‌های مختلف جریان در کانال اصلی.

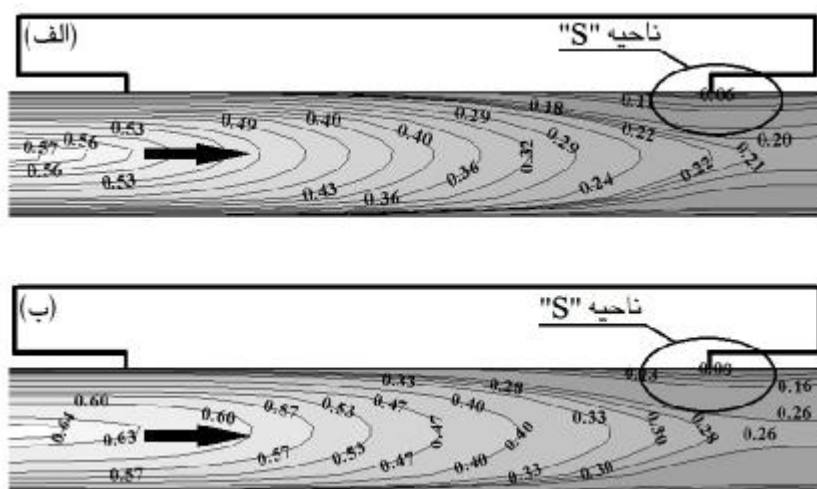
ز) سرعت طولی و الگوی تنش برشی

در شکل‌های 13 و 14 پروفیل‌های طولی سرعت در مقاطع ابتدایی، میانی و انتهایی کانال اصلی در امتداد سرریز جانبی به ترتیب در $y=0.125m$ و $y=0.1875m$ برای دو مقدار متفاوت دبی کانال اصلی نشان داده شده است. در این شکل‌ها در هر مقطع، محور افقی نسبت به سرعت بیشینه و محور قائم نسبت به عمق بیشینه در همان مقطع بی‌بعد شده است. با بررسی پروفیل‌های طولی سرعت مشاهده می‌شود که سرعت بیشینه در نزدیکی سطح آزاد اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه در این شکل‌ها این است که با پیشروی جریان در امتداد سرریز جانبی مقدار سرعت در داخل کانال اصلی در نزدیکی بستر کاهش یافته است. با مقایسه بین شکل‌های 9، 10، 13 و 14 می‌توان مشاهده کرد که این کاهش



شکل 13 - پروفیل‌های سرعت طولی شبیه‌سازی شده در امتداد محور b'-b' (الف، ب، ج برای $Q_1=0/017 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و د، و، ه برای $Q_1=0/019 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

شکل 14 - پروفیل‌های سرعت طولی شبیه‌سازی شده در امتداد محور c'-c' (الف، ب، ج برای $Q_1=0/017 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و د، و، ه برای $Q_1=0/019 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).



شکل 15- الگوی توزیع تنش برشی در نزدیکی بستر کانال اصلی دایروی (الف) $Q_1=0/017 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و (ب) $Q_2=0/019 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

هدف اصلی در این مطالعه عددی شناخت کافی از الگو و میدان جریان عبوری از یک کانال دایروی دارای سرریز جانبی لبه‌تیز هست. مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان را در شرایط جریان زیربحرانی برای دبی‌های مختلف به‌خوبی برآورد نموده است، به‌گونه‌ای که

شد. مقایسه بین نتایج مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده دقت قابل‌قبول شبیه‌سازی موردنظر هست. در این تحقیق برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان و تغییرات سطح آزاد جریان به‌ترتیب از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ RNG و طرح VOF استفاده شده است.

مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که عرض این صفحه از کف به سمت سطح آزاد جریان در حال افزایش است. در این مطالعه اثر شکل کانال دایروی بر روی جریان ثانویه ارزیابی شده که بررسی‌ها نشان‌دهنده کاهش شدت جریان ثانویه در داخل کانال دایروی دارای سرریز جانبی است. با افزایش مقدار دبی جریان در کانال اصلی ارتفاع نقطه ایستایی نیز زیاد می‌شود که باعث کاهش سرعت و تنش برشی در ناحیه پایین‌دست سرریز در مجاورت دیواره کانال اصلی می‌گردد. این ناحیه مستعد تشکیل توده‌های رسوبی است و احتمال وقوع رسوب‌گذاری در پایین‌دست سرریز جانبی و در مجاورت دیواره کانال اصلی وجود دارد.

عمق آب در ابتدای بالادست سرریز به سمت انتهای پایین‌دست آن افزایش می‌یابد. ضریب دبی سرریز جانبی واقع در کانال دایروی با استفاده از نتایج مدل عددی توسط رابطه‌های مربوط به کانال‌های دایروی و مستطیلی محاسبه شده است که ضریب دبی محاسبه شده مربوط به رابطه کانال‌های مستطیلی کوچک‌تر از رابطه مربوط به کانال‌های دایروی است. با نزدیک شدن جریان به دهانه سرریز جانبی به علت وجود فشار مکشی اعمال شده از طرف کانال جانبی، جریان در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم می‌شود، سپس صفحه جدایش جریان در داخل کانال اصلی تشکیل می‌گردد. در این تحقیق نحوه تغییر صفحه مذکور از بستر کانال اصلی به سمت سطح آزاد

منابع مورد استفاده

- کاریزی آ، و هنر ت، 1387. بررسی الگوی جریان و تنش برشی سرریز جانبی لبه‌پهن مستطیلی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال 14، شماره 51، صفحه‌های 15 تا 25.
- 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.
- Bagheri SM and Heidarpour M, 2012. Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 138(6): 541-547.
- Emiroglu ME, Agaccioglu H and Kaya N, 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 22: 319-330.
- Mangarulkar K, 2010. Experimental and numerical study of the characteristics of side- weir flows. Master Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Neary VS and Odgaard AJ, 1993. Three-dimensional flow structure at open channel diversions. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 119(11): 1224-1230.
- Neary VS, Odgaard A and Sotiropoulos F, 1999. Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 125(2): 126-140.
- Omidbeigi MA, Ayyoubzadeh SA and Safarzadeh A, 2009. Experimental and numerical investigations of velocity field and bed shear stresses in a channel with lateral intake. 33rd IAHR Congress, British Columbia, Vancouver, Canada, 9-14 August.
- Ramamurthy AS, Qu J and Vo D, 2006. Nonlinear PLS method for side weir flows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 132(5): 486-489.
- Rosier B, 2007. Interactions of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel. PhD Thesis, EPFL University, Lausanne, Switzerland.
- Subramanya K and Awasthy SC, 1972. Spatially varied flow over side-weirs. *Journal of Hydraulic Division ASCE* 98(1): 1-10.
- 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.