

بررسی عددی توزیع سرعت در جریان بر روی سرریزهای جانبی مستطیلی

محمد رضا جلیلی قاضیزاده^{۱*}، امیر علی محمد علی پور اهری^۲، عباس بختیاری اركسی^۳

*- دانشیار دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

[*m_jalili@sbu.ac.ir](mailto:m_jalili@sbu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۳

چکیده

سرریزهای جانبی، کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های انتقال آب و فاضلاب دارند. جریان روی این سازه‌ها از نوع متغیر مکانی و سه‌بعدی است. برای تحلیل این جریان لازم است توزیع سرعت و مقادیر ضرایب تصحیح انرژی جنبشی (α) و اندازه حرکت (β) شناخته شده باشند اما پیچیدگی‌های موجود در این جریان از یک طرف و محدودیت‌های آزمایشگاهی از طرف دیگر، باعث شده است تا توزیع سرعت در این نوع از جریان، کمتر مطالعه شده است. در این پژوهش توزیع سرعت در سرریز جانبی مستطیلی توسط نرم‌افزار FLOW-3D در دو حالت جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی بررسی شده است. ابتدا درستی آزمایی نرم‌افزار با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. پس از اطمینان از عملکرد مدل عددی در تحلیل جریان، توزیع سرعت، ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت و نواحی جدادشده مورد مطالعه قرار گرفتند. براساس نتایج شبیه‌سازی موجود، روابط جدیدی بین ضرایب α و β برای جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی ارائه شد و همچنین روابطی برای کمی‌سازی تابعه جدادشده آرائه شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به طراحان سرریزهای جانبی برای شناخت بهتر از جریان سه‌بعدی و پیچیده آن کمک نماید.

کلیدواژگان: سرریز جانبی مستطیلی، ضریب تصحیح انرژی جنبشی، ضریب تصحیح اندازه حرکت، نواحی جدادشده جریان، شبیه‌سازی عددی، نرم‌افزار FLOW-3D

سرریزهای جانبی می‌توان به انحراف جریان و محافظت در برابر سیلاب در سدها، انحراف و ثابت نگهداشت سطح آب در کانال‌های کشتیرانی، کاهش و جداسازی رسوب در رودخانه‌ها و کانال‌ها و تقسیم جریان فاضلاب در برکه‌های تصفیه اشاره نمود. تحلیل جریان در سرریز جانبی می‌تواند از نوع افزایش یا کاهش دبی باشد. در حالت کاهش دبی سرریز جانبی در دیواره

۱- مقدمه

سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی هستند که با اهداف مختلف در سدها و سیستم‌های انتقال آب و فاضلاب استفاده می‌شود. از مزایای این نوع سازه‌ها کنترل و تقسیم جریان بدون نیاز به اپراتور و صرف انرژی است. از کاربردهای

روش دی مارچی دارای ضعف هایی است. اول اینکه فرضیات ساده کننده ای در استخراج معادلات به کار گرفته شده است، دوم اینکه در این رابطه ضریب دبی سرریز، C_M وجود دارد که باید تعیین شود و همچنین پراکندگی زیاد داده است. بعد از مطالعه دی مارچی، پژوهشگران زیادی تلاش کردند تا ضریب دبی را به کمک آزمایش های تجربی تعیین کنند. از جمله این پژوهشگران داس^۳، بر قعی، کشاورزی و قدسیان هستند [3-6]. مروری بر مطالعات این پژوهشگران نشان می دهد که با وجود روابط متعدد ارائه شده هنوز یک رابطه عمومی برای تعیین ضریب دبی ثابت مورد پذیرش قرار نگرفته است؛ علت این موضوع می تواند عدم ثابت بودن ضریب دبی در طول سرریز باشد. به همین دلیل نیز بعضی از پژوهشگران ضریب دبی در طول سرریز را ثابت در نظر نگرفته و ضرایب متغیر در طول سرریز تعریف کردند از جمله این پژوهشگران سووام، قدسیان و پرهیزگاری هستند که البته این روابط نیز به صورت تجربی و بر اساس داده های آزمایشگاهی تعیین شده بود. حتی با فرض پذیرش رابطه دی مارچی و تعیین ضریب دبی در این رابطه، این روش، یک تحلیل یک بعدی است که مقدار دبی ریزشی را می دهد اما اطلاعات بیشتری از جزئیات جریان از قبیل توزیع سرعت را به دست نمی دهد. برای دریافت اطلاعات بیشتری از مشخصات جریان می توان از معادلات پایه انرژی و اندازه حرکت شناخت توزیع سرعت و تعیین ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت موردنیاز است [7-9].

$\alpha = 1.4$ اکرزوه برای سرریز جانبی مستطیلی در جریان زیربحرانی را پیشنهاد کرد [10]. الخشاب^۶ با آزمایش هایی که روی سرریز های جانبی مستطیلی انجام داد، روند تغییرات α را در طول سرریز بررسی نمود. او اظهار داشت تغییرات α در طول سرریز جانبی، هم در جریان زیربحرانی و هم در جریان فوق بحرانی نرخ افزایشی دارد [11]. الخشاب و همکاران مقادیر پیشینه ضرایب α و β را برای سرریز های جانبی تا حدود $2/5$ و $1/2$ گزارش کردند

کanal حامل جریان نصب شده و هنگامی که ارتفاع سیال در کanal به لبه سرریز می رسد، مقداری از جریان از روی سرریز به خارج از کanal تخلیه شده و موجب تنظیم دبی در کanal اصلی و انشعابی می شود. در شکل (۱) مقطع و پلان یک سرریز جانبی مستطیلی و مشخصه های جریان در حالت جریان زیربحرانی نمایش داده شده است.

شکل ۱. سرریز جانبی مستطیلی (الف) مقطع، (ب) پلان

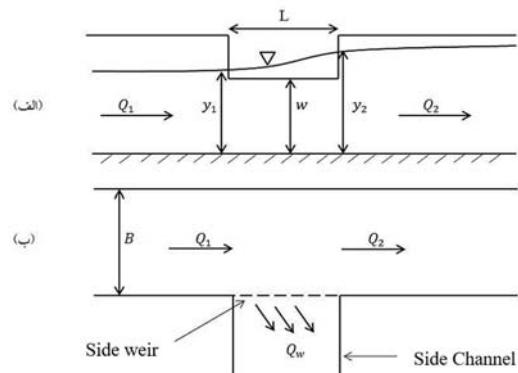


Fig.1. Rectangular side weir A) Cross section, B) Plan

مطالعات زیادی در مورد سرریز های جانبی در حالت جریان های زیربحرانی و فوق بحرانی همچنین شکل های مختلف هندسی سرریز و کanal اصلی انجام شده است. اولین آزمایش ها روی سرریز های جانبی در سال ۱۹۱۷ توسط انگلیز انجام گرفت [1]. از جمله مطالعات بالهیت در این زمینه، مطالعات دی مارچی^۲ در سال ۱۹۳۴ است. دی مارچی با فرض ثابت بودن انرژی ویژه در طول سرریز، رابطه تحلیلی برای ضریب سرریز جانبی مستطیلی به صورت زیر ارائه کرد.

$$C_M = \frac{3}{2} \frac{B}{L} (\phi_2 - \phi_1) \quad (1)$$

که در آن C_M ضریب شدت جریان، B عرض کanal اصلی، L طول سرریز جانبی، انديس های ۱ و ۲ به ترتیب معرف ابتدا و انتهای سرریز و ϕ تابع تعریف شده به شکل زیر است:

$$\phi(y, E, w) = \frac{\sqrt{E-3w}}{E-w} \sqrt{\frac{E-y}{y-w}} - 3 \sin^{-1} \sqrt{\frac{E-y}{E-w}} \quad (2)$$

که در آن y عمق جریان، E انرژی مخصوص و w ارتفاع سرریز جانبی است [2]. تحلیل جریان روی سرریز های جانبی به کمک

سرریز جانبی اشاره داشتند. تغییرات توزیع سرعت در عمق باعث افزایش مقادیر α و β می‌شود در صورتی که توزیع سرعت در پلان جدایی جریان را در کanal اصلی سرریز جانبی را می‌تواند نشان دهد [17]. مطالعات آزمایشگاهی برای شناخت توزیع سرعت و تعیین ضرایب α و β با محدودیت‌های آزمایشگاهی همراه است و با وجود مطالعات انجام‌شده، به علت این محدودیت‌ها و مشکلات اندازه‌گیری سرعت، توزیع سرعت به خوبی شناخته‌شده نیست. و حتی در مورد روند تغییرات ضرایب α و β در طول سرریز جانبی (صعودی یا نزولی بودن) نیز اختلاف نظر وجود دارد. در این مقاله روند تغییرات ضرایب α و β به صورت عددی و به کمک نرم‌افزار FLOW-3D بررسی شده است. بررسی عددی توزیع سرعت سرریزهای جانبی علاوه بر امکان تعیین مقادیر α و β (که به توزیع سرعت در عمق مربوط می‌شوند) امکان بررسی توزیع سرعت در پلان را نیز فراهم می‌آورد که از جمله نتایج این بررسی‌ها تعیین نواحی جداشدگی جریان است. در این مطالعه نواحی جداشدگی در جریان سرریز جانبی مستطیلی نیز بررسی شده است که نتایج آن در ادامه ارائه خواهد شد.

۲- معادلات حاکم بر جریان در نرم‌افزار FLOW-3D

معادله‌های حاکم بر جریان سیال در نرم‌افزار FLOW-3D شامل معادله‌های پیوستگی و اندازه حرکت است. معادله پیوستگی جریان از قانون بقاعی جرم و با نوشتن معادله تعادل جرم برای یک المان سیال به شکل زیر نتیجه می‌شود.

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = 0 \quad (7)$$

که در آن V_F کسر حجمی سیال، ρ چگالی سیال و (u, v, w) به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در جهات (x, y, z) هستند. A_x مساحت کسری محیط به جریان در جهت x است. به طور مشابه y و A_z مساحت کسری محیط به جریان در جهات y و z هستند. بر اساس توضیحات فوق، معادله‌های حرکت ناویر استوکس سیال با مؤلفه‌های سرعت (u, v, w) در مختصات سه بعدی، به صورت زیر نمایش داده می‌شود.

[12]. هگر برای تغییرات α در طول سرریز جانبی مستطیلی رابطه زیر را ارائه نمود [13].

$$\alpha = \left[1 + \left(q / (Q / B) \right)^2 \right]^{4/3} \quad (3)$$

که در این رابطه $q = \frac{dQ}{dx}$ دبی ریزشی در واحد عرض، Q دبی بالادست سرریز جانبی و B عرض کanal اصلی است. تیز [13] برای سرریز جانبی مستطیلی در جریان زیر بحرانی رابطه زیر را ارائه داد.

$$\alpha = \beta^2 \quad (4)$$

همچنین تیز برای ضریب β رابطه زیر را ارائه نمود.

$$\beta = 0.725 + 0.275 \left(\frac{U}{V} \right) \quad (5)$$

که در این رابطه U مؤلفه سرعت سرریز جانبی در جهت جریان و V میانگین سرعت جریان کanal اصلی است [14]. و نوتلی³ نشان داد که تغییرات α در طول سرریز جانبی در حالت فوق بحرانی، نرخ کاهشی و در حالت زیر بحرانی، نرخ افزایشی دارد برای هر شرایط معین، می‌توان نسبت بین α و β را از رابطه زیر به دست آورد [15].

$$\alpha = 2.7\beta - 1.7 \quad (6)$$

نوواک⁴ و همکاران به بررسی توزیع سرعت در سرریز جانبی برای شرایط زیر بحرانی به صورت آزمایشگاهی پرداختند. آن‌ها اظهار داشتند که به طور کلی، ضریب α در طول سرریز جانبی از $1/10^2$ تا $1/10^8$ و ضریب β از $1/10^1$ تا $1/10^3$ افزایش می‌یابند. همچنین آن‌ها برای داده‌های آزمایشگاهی انجام شده، رابطه (3) را تصدیق نمودند [16]. هگر و همکاران بیان داشتند که اثر سرعت غیر یکنواخت در جریان زیر بحرانی برای سرریز جانبی به صورت عمدی به نسبت $\frac{Q_w}{Q_1} < 0.5$ وابسته است و برای $\frac{Q_w}{Q_1} > 0.5$ فرض

مناسب است. در مقابل داده‌های آزمایشگاهی برای $\frac{Q_w}{Q_1} < 0.5$ مقادیر بزرگ تصحیح سرعت را نشان می‌دهند که بنابراین یک روش استاندارد وجود ندارد. آن‌ها در آزمایش‌های خود برای جریان زیر بحرانی به روند صعودی α و β در طول

۳- درستی آزمایی نرم افزار برای شبیه سازی جریان روی سرریز جانبی مستطیلی

قبل از شروع تحلیل عددی جریان در شرایط مختلف، لازم است توانایی نرم افزار در مدل سازی جریان سه بعدی روی سرریز جانبی بررسی شود. بدین منظور در ادامه درستی آزمایی نرم افزار با استفاده از داده های آزمایشگاهی در شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی ارائه می شود.

۱-۳- داده های آزمایشگاهی

آزمایش های مذکور برای جریان های زیر بحرانی و فوق بحرانی در یک فلوم شیشه ای به طول ۱۳ متر و عرض ۳۰ سانتی متر که در دیواره جانبی آن سرریز جانبی از جنس پلکسی گلاس نصب شده بود، انجام شد. نتایج داده های آزمایشگاهی در جدول (۱) آمده است. برای این آزمایش ها، عدد مانینگ برابر ۱۱، ۰ و ۰،۱۱ و شیب کanal اصلی صفر است. طول سرریز در این آزمایش ها مقادیر ۱۹، ۲۰، ۴۵، ۳۰ و ۷۵ سانتی متر و ارتفاع سرریز ۱، ۱۰ و ۲۰ سانتی متر و دبی جریان در کanal اصلی از حدود ۴۳ تا ۹۰ لیتر در ثانیه متغیر بود. آزمایش ها برای جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی انجام شد. نتایج داده های آزمایشگاهی مورد استفاده با شماره های ۱ تا ۱۰ در جدول (۱) آمده است [19]. که در آن عرض کanal اصلی، w ارتفاع سرریز جانبی، L طول سرریز، B عرض سرریز و Q_w دبی بالادست سرریز و Q_1 دبی عبوری از روی سرریز جانبی (دبی انشعابی) است.

۲-۳- شرایط مرزی

مطابق شکل (۲) شرایط مرزی شبیه سازی به ترتیب برای جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی نشان داده شده است. برای مرز بالادست از شرط دبی معلوم، برای دیواره از شرط «دیوار» و برای سطح آب از شرط مرزی «تقارن» استفاده شده است. تنها تفاوت شرایط مرزی جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی در شرط مرزی پایین دست است که شرط مرزی پایین دست در جریان فوق بحرانی، شرط «فشار معین» است و در جریان زیر بحرانی شرط «سرعت» داده شده است. از زیری ۰،۵ میلی متر (معادل عدد مانینگ ۱۱،۰) برای سطوح استفاده شده است. مدل آشنتگی در تمام شبیه سازی ها RNG است.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{aligned} \quad (8)$$

که در این معادلات (G_x, G_y, G_z) شتاب های جرم و (f_x, f_y, f_z) شتاب های لزجت می باشند. در نرم افزار، سطح مشترک و سطح آزاد سیال به صورت ترم های تابعی از حجم سیال تعريف می شود $F(x, y, z, t)$. این تابع بیانگر حجم سیال بر واحد حجم و معادله آن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[\frac{\partial}{\partial x} (F A_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (F A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (F A_z w) \right] = 0 \quad (9)$$

تعريف تابع F با توجه به نوع مسئله، متغیر می باشد زیرا مسائل غیرقابل تراکم شامل یک سیال با سطح آزاد یا دو سیال با سطح مشترک است. برای مسائل تک فازی، F بیانگر کسر حجمی $F=1$ اشغال شده توسط سیال است بنابراین در سلول هایی که $F=0$ است، کاملاً مایع و در سلول هایی که $F=1$ است، کاملاً گاز وجود دارد. حل معادلات حرکت در نرم افزار FLOW-3D براساس تکنیک حجم محدود (Finite Volume) می باشد. در این نرم افزار برای شبیه سازی هندسی از روش حجم سیال (VOF) برای نحوه گسترش سطح آزاد و روش FAVOR برای شبیه سازی سطوح و حجم های صلب استفاده شده است [18].

جدول ۱. مشخصات داده‌های آزمایشگاهی استفاده شده برای درستی آزمایی مدل (جلیلی قاضیزاده، ۱۳۷۳)

Experiment Number	Flow Type	B(m)	w(m)	L(m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)	Q ₁ (lit/s)	Q _w (lit/s)	Uses
1	Supercritical	0.3	0.01	0.2	0.121	0.104	44.73	6.73	
2	Supercritical	0.3	0.01	0.45	0.122	0.078	45.72	14.19	
3	Supercritical	0.3	0.01	0.45	0.147	0.101	61.34	19.20	Verification
4	Supercritical	0.3	0.1	0.75	0.18	0.137	78.51	15.45	
5	Supercritical	0.3	0.1	0.45	0.191	0.162	83.27	10.92	
6	Subcritical	0.3	0.19	0.75	0.218	0.22	43.53	6.08	
7	Subcritical	0.3	0.1	0.45	0.252	0.26	45.40	30.02	Verification
8	Subcritical	0.3	0.1	0.2	0.334	0.339	60.47	36.84	and result analysis
9	Subcritical	0.3	0.1	0.75	0.245	0.271	79.21	74.66	
10	Subcritical	0.3	0.1	0.3	0.342	0.354	90.18	59.78	
11	Subcritical	0.3	0.1	0.4	0.243	0.247	54.00	38.73	
12	Subcritical	0.3	0.1	0.4	0.271	0.28	60.00	43.80	
13	Subcritical	0.3	0.1	0.4	0.35	0.39	45.00	37.72	
14	Subcritical	0.3	0.1	0.4	0.19	0.21	31.50	15.45	
15	Subcritical	0.3	0.1	0.4	0.25	0.264	42.00	13.49	
16	Subcritical	0.2	0.1	0.4	0.29	0.295	3200	23.54	
17	Subcritical	0.4	0.1	0.4	0.314	0.33	48.00	30.33	
18	Subcritical	0.5	0.1	0.4	0.362	0.38	60.00	36.52	
19	Subcritical	0.1	0.1	0.2	0.15	0.17	12.00	10.02	
20	Subcritical	0.5	0.1	0.4	0.21	0.24	50.00	26.96	

Table 1. Specifications of the laboratory data used for model verification (Jalili ,1994)

شکل ۲. شرایط مرزی سریز جانبی مستطیلی مدل شده برای جریان (الف) زیر بحرانی (ب) فوق بحرانی

:نخ حجمی ثابت، W: دیوار، P: فشار معین، V: سرعت معین ، S: تقارن، O: جریان خروجی Q

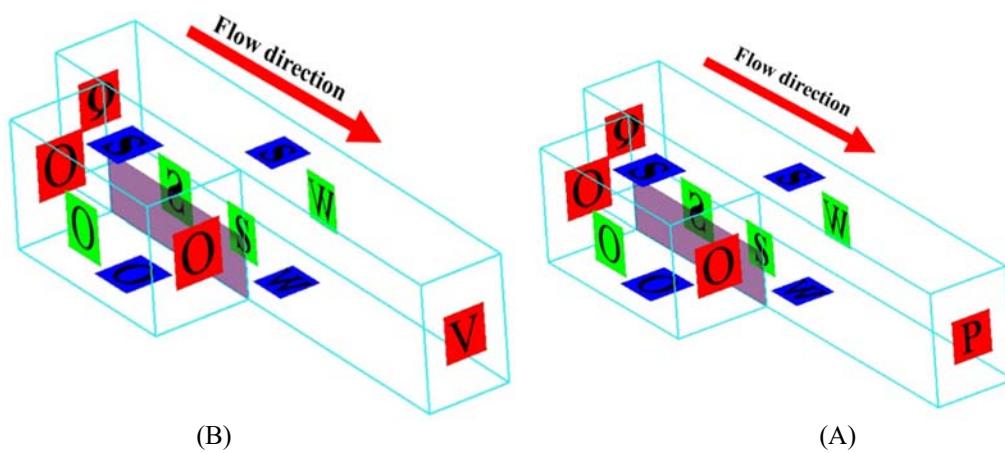


Fig. 2. The Boundary condition of a rectangular side weir modeling for flow; A) Subcritical, B) Supercritical

قرارگیری بافل در هندسه مدل در شکل (۴) نشان داده شده است.

شکل ۴. محل قرارگیری بافل برای اندازه‌گیری دبی جریان

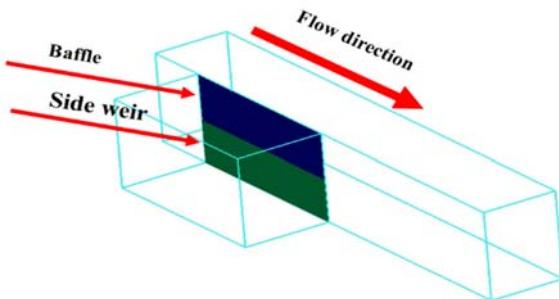


Fig. 4. Baffle position for measuring discharge

برای برقراری شرایط جریان دائمی، هر یک از شبیه‌سازی‌های جدول (۱) به مدت حداقل ۲۰ ثانیه اجرا شده است پس از گذشت این زمان، شرایط جریان به حالت پایدار رسید و تغییر محسوسی در نتایج مشاهده نشد. مدت زمان لازم برای ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی جریان تابعی از مشخصات هندسی و هیدرولیکی سرریز شبیه‌سازی شده است.

۵-۳ نتایج درستی آزمایشی ۵-۱-۵-۳ دبی عبوری

در جدول (۲) مقایسه مقادیر دبی انشعابی به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده آن است که نرم‌افزار با دقت خوبی دبی جانبه عبوری از سرریز جانبه مستطیلی را برای هر دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی محاسبه کرده است.

جدول ۲. مقادیر دبی انشعابی با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی

Experiment Number	Flow Type	Q_w (lit/s) Numerical	Q_w (lit/s) Experimental	Error (%)
1	Supercritical	7.03	6.73	4.5
2	Supercritical	15.12	14.19	6.6
3	Supercritical	21.11	19.20	10
4	Supercritical	15.35	15.45	0.7
5	Supercritical	11.53	10.92	5.6
6	Subcritical	6.08	6.08	0
7	Subcritical	29.65	30.02	1.2
8	Subcritical	37.30	36.84	1.3
9	Subcritical	74.19	74.66	0.6
10	Subcritical	59.63	59.78	0.3

Table 2. Diverted discharge values using the numerical and laboratory simulations

۳-۳-۱ استقلال نتایج از ابعاد شبکه محاسباتی

به عنوان نمونه برای بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه محاسباتی آزمایش (۵) با ابعاد مشخص $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.008, 0.01$ (m)

(۳)، پروفیل جریان روی سرریز برای ابعاد شبکه‌های متفاوت در این دو مدل باهم مقایسه شده است که استقلال برای شبکه محاسباتی انتخاب شده را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج و برای اطمینان ابعاد شبکه برای تمامی شبیه‌سازی‌ها به صورت $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.006$ (m) در نظر گرفته شد.

شکل ۳. مقایسه پروفیل سطح آب در طول سرریز با ابعاد مختلف شبکه محاسباتی برای آزمایش (۵)

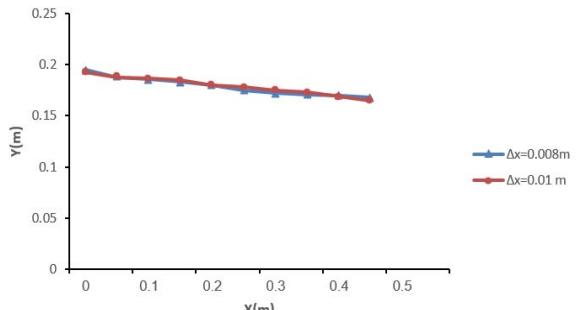


Fig.3. Comparison of water surface profile along side weir with different dimensions of computational mesh for test NO.5

۴-۳-۱ شرایط دیگر شبیه‌سازی

برای اندازه‌گیری دبی عبوری از سرریز، از یک بافل به عنوان سطح شار استفاده شده است. تخلخل بافل برابر با مقدار یک در نظر گرفته شده تا مقاومتی در برابر جریان ایجاد نکند.

جدول ۲. مقادیر دبی انشعابی با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی

کرد که نرم افزار FLOW-3D با دقت مناسبی قادر به شبیه سازی جریان سه بعدی روی سرریز جانبی مستطیلی بوده و نتایج تحلیل این جریان توسط نرم افزار، قابل استناد است. در ادامه نتایج شبیه سازی جریان روی سرریز جانبی ارائه و تحلیل خواهد شد.

شکل ۶. تغییرات عمق جریان در طول سرریز جانبی مستطیلی در جریان فوق بحرانی برای آزمایش (الف) (۱) ب) (۴)

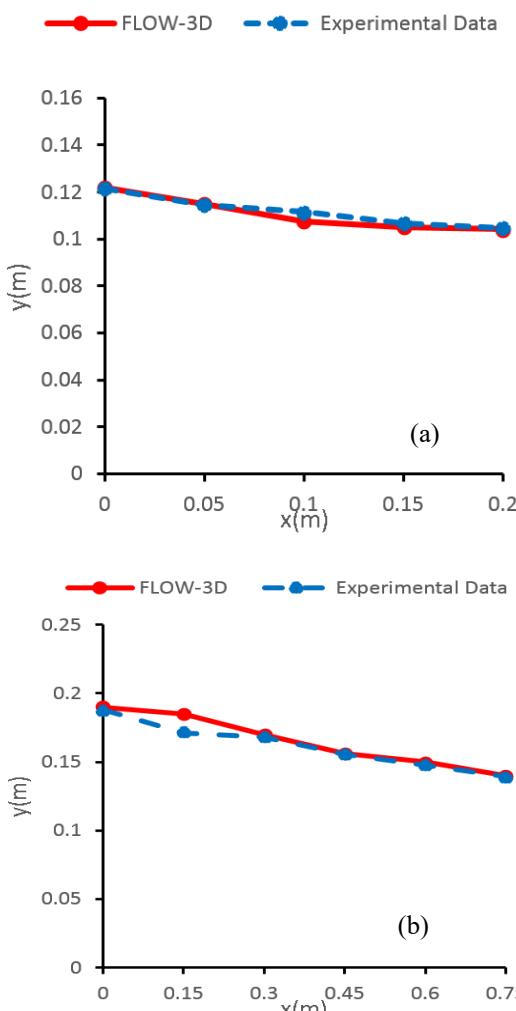


Fig.6. Variation of flow depth along rectangular side weir in supercritical flows for Tests No. a)(1)- B)(4)

۴- تحلیل جریان بر روی سرریز جانبی مستطیلی

۱- بررسی نواحی جدادشده

در جریان زیر بحرانی روی سرریزهای جانبی، مشاهده شده

۳-۵-۲- پروفیل جریان در طول سرریز

به عنوان نمونه در ادامه درستی آزمایش نرم افزار، تغییرات عمق آب در طول سرریزهای جانبی مستطیلی برای دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی در شکل های (۵) و (۶) نمایش داده شده است.

شکل ۵. تغییرات عمق جریان در طول سرریز جانبی مستطیلی در جریان زیر بحرانی برای آزمایش (الف) (۶) ب) (۸)

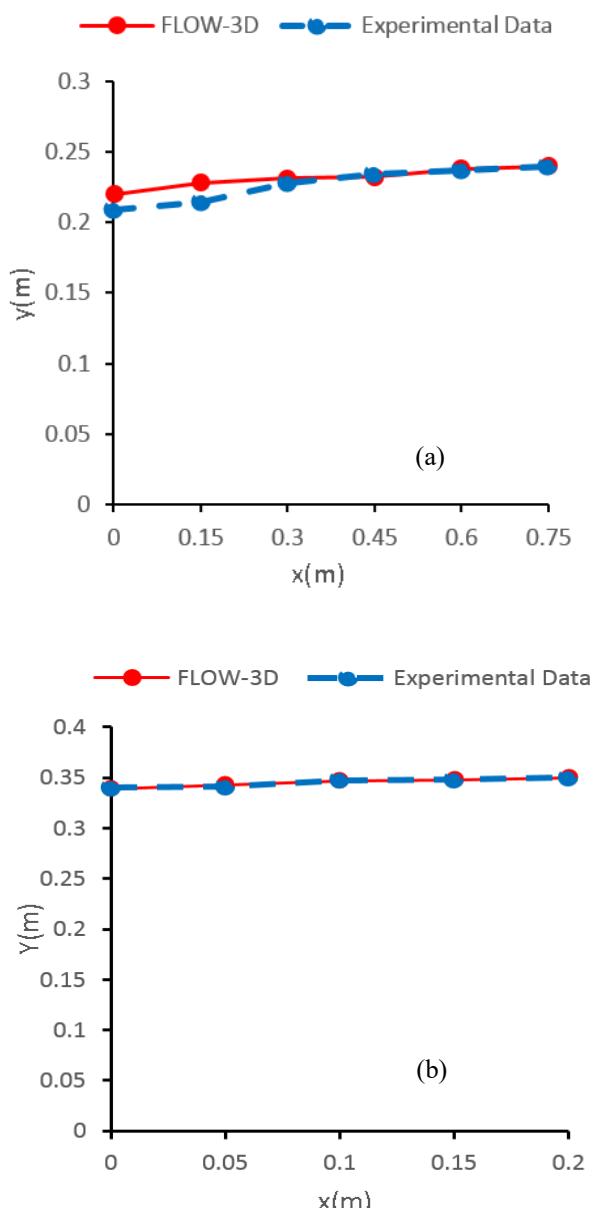


Fig. 5. Variation of flow depth along rectangular side weir in subcritical flows for Tests No. a)(6)- B)(8)

بدین ترتیب بر اساس نتایج به دست آمده می توان نتیجه گیری

تعریف شده‌اند. در این شکل بردارهای سرعت در کanal اصلی برای نتایج آزمایش شماره (۸) نشان داده شده است.

به منظور تحلیل ناحیه جداشدگی در جریان زیر بحرانی روی سریز جانبی، پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، مقادیر a' ، b' و x برای آزمایش‌های مختلف استخراج و نتایج برای شبیه‌سازی‌های موجود در جدول (۳) آورده شده است. اطلاعات نواحی جداشدگی، آزمایش‌های (۱۱ تا ۲۰) نیز در این جدول ارائه شده است.

است که آب در کanal اصلی و در قسمت پایین دست سریز در خلاف جهت جریان کanal اصلی حرکت می‌کند و نواحی جداشدگی (برگشتی) شکل می‌گیرد. از جمله مشکلات وجود نواحی جداشدگی به کاهش بازده سیستم و تجمع رسوب می‌توان اشاره کرد، پس مطالعه این نواحی حائز اهمیت است. در شکل (۷) ناحیه جداشدگی توسط مشخصه‌های a' و b' (طول و عرض ناحیه جداشدگی) و همچنین پارامتر x (فاصله ابتدای ناحیه جداشدگی از انتهای سریز جانبی مستطیلی) ابتدا ناحیه جداشدگی از انتهای سریز جانبی مستطیلی)

شکل ۷. بردارهای سرعت در کanal اصلی سریز جانبی مستطیلی (آزمایش ۸ – ارتفاع از کف ۱۰ سانتی‌متر)

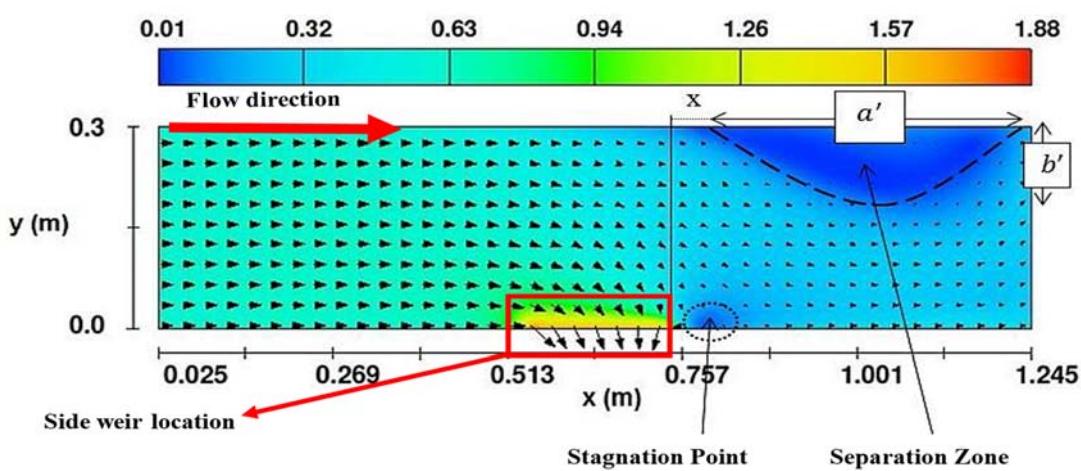


Fig.7. Vectors of velocity in the main channel of the rectangular side weir (Test No 8, $w=10$ cm)

جدول ۳. مقادیر پارامترهای a' ، b' ، x و دبی انسدادی سریز جانبی مستطیلی (جریان زیر بحرانی)

Experiment Number	$Q_w/Q_l (-)$	$a'(m)$	$b'(m)$	$A'(m^2)$	$X(m)$
6	0.14	0	0	0	-
7	0.66	0.43	0.08	0.034	-0.06
8	0.62	0.38	0.1	0.038	+0.04
9	0.94	1.02	0.25	0.255	-0.23
10	0.67	0.42	0.11	0.046	-0.05
11	0.72	0.55	0.13	0.072	-0.03
12	0.73	0.66	0.15	0.099	-0.03
13	0.84	0.86	0.19	0.163	-0.12
14	0.49	0	0	0	-
15	0.32	0	0	0	-
16	0.74	0.60	0.07	0.042	-0.07
17	0.63	0.17	0.01	0.002	+0.33
18	0.61	0.44	0.02	0.009	+0.14
19	0.84	0.57	0.03	0.017	-0.01
20	0.54	0	0	0	0

Table 3. Parameter values of a' , b' , x and diverted discharge of rectangular side weir (subcritical flows)

مستطیلی به دلیل انحراف آب از کanal اصلی به کanal جانبی تغییر می‌کند. با توجه به این موضوع که توزیع سرعت توسط ضرایب α و β می‌تواند معرفی شود، در این مطالعه تغییرات این ضرایب بررسی شده است. ضرایب α و β به ترتیب از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند.

$$\alpha = \frac{\int_A (u^2 + v^2) u dA}{U^3 A} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\int_A u^2 dA}{U^2 A} \quad (12)$$

و v به ترتیب مؤلفه‌های سرعت در راستای x و y ، A سطح مقطع جریان و U سرعت متوسط در جهت x است [۲۰]. برای محاسبه ضرایب α و β توزیع سرعت می‌باشد مشخص باشد، اما محاسبه این ضرایب از طریق روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی بسیار مشکل و با خطا می‌تواند همراه باشد. با توجه به اینکه روند تغییرات α و β در طول سرریز جانبی در دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه روند تغییرات ضرایب α و β در ادامه طول سرریز جانبی مستطیلی برای دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی (به ترتیب شبیه‌سازی‌های آزمایش شماره ۱۰ و ۵) در شکل‌های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است.

شکل ۹- تغییرات α در طول سرریز جانبی مستطیلی برای جریان

(الف) زیر بحرانی (آزمایش ۱۰) (ب) فوق بحرانی (آزمایش ۵)

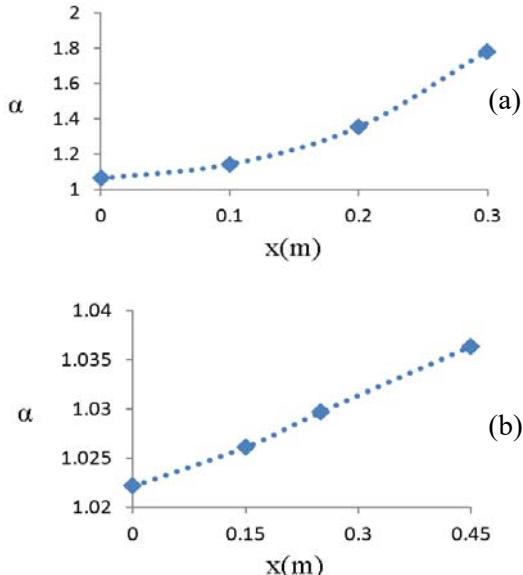


Fig.9. Variation of (a) rectangular side weir for flow
a) Subcritical, b) Supercritical

بررسی نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد با کاهش نسبت $\frac{Q_w}{Q_1}$ ، بعد و مساحت ناحیه جداشدگی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر افزایش دبی انشعابی، باعث افزایش محدوده محدوده ناحیه جداشدگی می‌شود. در این مطالعه تغییرات ناحیه جداشدگی با پارامترهای مختلف بررسی شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که تغییرات ناحیه جداشدگی، متناسب با مقدار $\frac{Q_w}{Q_1}$ می‌باشد. نسبت $\frac{Q_w}{Q_1}$ ناحیه جداشدگی شکل نمی‌گیرد اما با افزایش نسبت $\frac{Q_w}{Q_1}$ ناحیه جداشدگی تشکیل و مساحت آن به تدریج افزایش می‌یابد برای تعیین تغییرات نسبت بدون بعد $\frac{A'}{B^2}$ ، در محدوده پارامترهای مورد آزمایش در این پژوهش، رابطه زیر ارائه می‌شود.

$$\frac{A'}{B^2} = 7.97 \frac{Q_w}{Q_1} - 4.83 \quad \frac{Q_w}{Q_1} > 0.6 \quad (10)$$

شکل ۸ تغییرات $\frac{A'}{B^2}$ نسبت به $\frac{Q_w}{Q_1}$

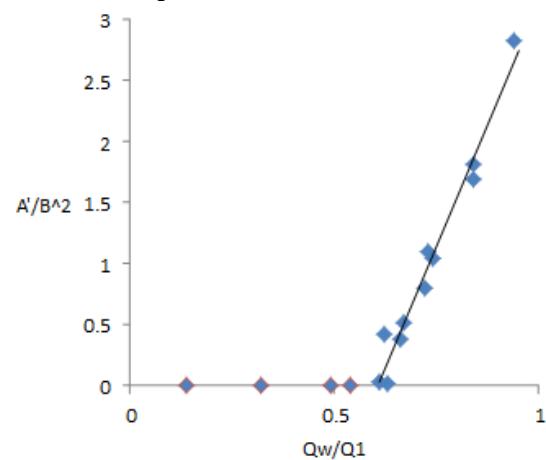


Fig.8. Variation of $\frac{A'}{B^2}$ respect to $\frac{Q_w}{Q_1}$

۴-۲- بررسی ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت

برای تحلیل جریان روی سرریز جانبی لازم است توزیع سرعت و مقادیر ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت شناخته شود. پروفیل توزیع سرعت در طول سرریز جانبی

شکل ۱۱- روند تغییرات α نسبت به β در طول سرریز جانبی
(جریان زیر بحرانی)

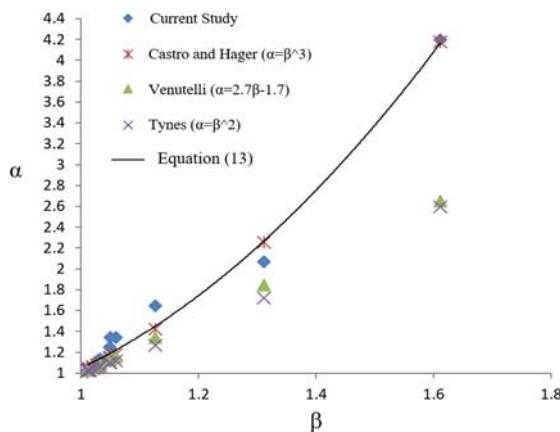


Fig.11. Variation of α respect to β alongside weir
(Subcritical flow)

چنانکه ملاحظه می‌شود روابط پیشنهادی مختلف، تطابق خوبی با یکدیگر ندارند. نتایج شبیه‌سازی حاضر، بیشترین تطابق را با رابطه پیشنهادی هگر و همکاران دارد. بر اساس نتایج مطالعه حاضر، رابطه زیر برای تغییرات بین ضریب α و β در جریان زیر بحرانی پیشنهاد می‌شود.

$$\alpha = \beta^{3.1} \quad (13)$$

به طریق مشابه این ضرایب برای جریان فوق بحرانی نیز قابل محاسبه است. در شکل (۱۲) تغییرات ضریب α نسبت به β برای روابط مختلف نشان داده شده است.

شکل ۱۲- روند تغییرات α نسبت به β در طول سرریز جانبی
(جریان فوق بحرانی)

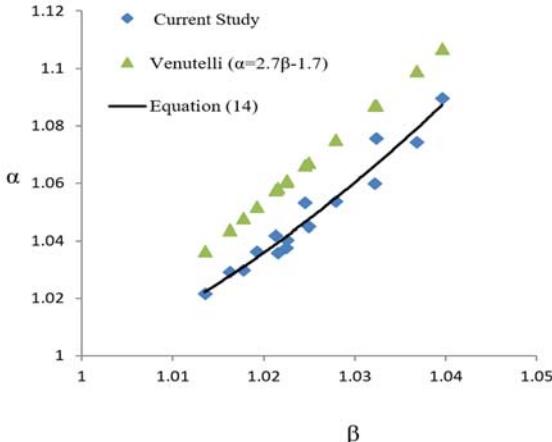


Fig. 12. Variation of α respect to β alongside weir
(Supercritical flow)

شکل ۱۰- تغییرات β در طول سرریز جانبی مستطیلی برای جریان

الف) زیر بحرانی (آزمایش ۱۰) ب) فوق بحرانی (آزمایش ۵)

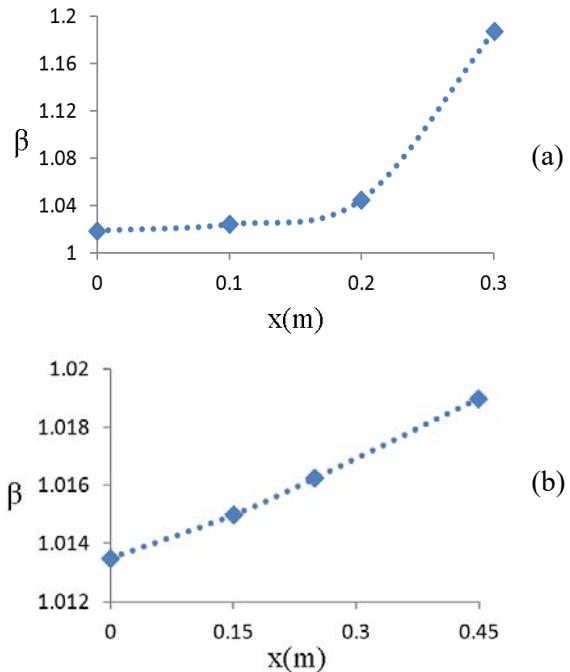


Fig.10. Variation of (β) rectangular side weir for flow
a) Subcritical, b) Supercritical

در روش عددی سرعت در هر راستا مشخص و معلوم می‌باشد، بنابراین این ضرایب با استفاده از نتایج شبیه‌سازی قابل محاسبه هستند. از مقایسه شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب) و همچنین شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب)، مشاهده می‌شود که مقادیر α و β در جریان‌های زیر بحرانی معمولاً از جریان‌های فوق بحرانی بزرگ‌تر است؛ که دلیل آن نسبت دبی ریزشی در جریان زیر بحرانی نسبت فوق بحرانی است. نکته قابل توجه دیگر اینکه α و β برای تعدادی زیادی از شبیه‌سازی‌های موجود به صورت قابل توجهی از عدد یک بزرگ‌تر است. به عبارت دیگر اگرچه برای تعداد زیادی از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مقادیر α و β به عدد یک نزدیک می‌باشند ولی نتایج تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که به صورت کلی نمی‌توان ضرایب α و β را برابر عدد یک در نظر گرفت.

با داشتن توزیع سرعت در مقاطع مختلف کanal، مقادیر ضرایب α و β از روابط (۱۱) و (۱۲) قابل محاسبه است. در شکل (۱۱) تغییرات ضریب α نسبت به β برای مطالعه حاضر و روابط پیشنهادی توسط دیگر محققین نشان داده شده است.

نتایج این مطالعه می‌تواند برای طراحی و تحلیل جریان برروی سرریزهای جانبی مستطیلی استفاده شود.

۶- منابع

- [1] Chow VT. 1959 Open channel hydraulics. *McGraw-Hill*, Singapore, 680pp.
- [2] DeMarchi G. 1934 Theoretical knowledge on the functioning of side weir. *L'Energia Elettrica*, 11,849–860 (in Italian).
- [3] Borghei SM., Jalili MR. & Ghodsian M. 1999 Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*; 125:10516.
- [4] DasA.1997 Spatially varied flow over an embankment side weir.*ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(4), 314-317.
- [5] Ghodsian M. 2004 Flow over Triangular SideWeir. *Scientia Iranica, Sharif University of Technology*, Vol. 11, Nos. 1&2, 114-120.
- [6] Keshavarzi A., Fararooi AR. & Honar T.2001 Hydraulic of flow over side weir in open-end and close-end conditions. *Irrig Sci.*
- [7] Parhizgari M.2006 Provide design relationships on rectangular lateral overflows in combined sewage pipes using laborator results .*Master thesis, Power and water university of technology*, Tehran,iran "(In Persian)".
- [8] GhodsianM. 2003 Supercritical flow over a rectangular side weir. *Can, Journal of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 3, pp. 596-600.
- [9] Swamee PK., Pathak SK., Mohan M. &Ali, MS.1994Side weir analysis using elementary discharge coefficient .*Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 4.,pp. 742-755.
- [10] Ackers P. 1957 A theoretical consideration of side weirs on storm water over floes. *Proc, Institution of civil Engineers, London, England*, 6, 305-328.
- [11] El-Khashab, A. M. M., 1975 Hydraulics of flow over side-weirs .*Ph.D.thesis, Univ. of Southampton, Southampton, U.K.*
- [12] El-Khashab A. & Smith K.V.H. 1976 Experimental investigation of flow over side weirs. *Journal of Hydraulics Division*. 102(9): 1255-1268
- [13] HagerW.1982 Hydraulic of Distribution channels, *International Association for*

همانگونه که مشاهده می‌شود، رابطه ونولی هماهنگی خوبی با داده‌های این مطالعه ندارد. علت این تفاوت می‌تواند این موضوع باشد که رابطه ونولی هم برای جریان‌های زیر بحرانی و هم برای جریان‌های فوق بحرانی ارائه شده است درصورتی که نشان داده شد توزیع سرعت جریان‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی یکسان نیست که استفاده از یک رابطه مشترک برای این دو جریان نمی‌تواند دقیق باشد. با توجه به داده‌های شبیه‌سازی این مطالعه رابطه (۱۴) برای روند تغییرات α و β به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\alpha = \beta^{1.95} \quad (14)$$

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه بیشتر مطالعات انجام شده در مورد سرریز جانبی به صورت آزمایشگاهی و یا معمولاً برای به دست آوردن ضریب دیگر است، بنابراین نتایج شبیه‌سازی عددی این سرریزهای جانبی می‌تواند اطلاعات بیشتری را از جزئیات رفتار جریان به دست دهد. در این پژوهش سرریز جانبی مستطیلی با نرم‌افزار FLOW-3D مدل شد. نواحی جداشده‌گی در کanal اصلی برای جریان زیر بحرانی Q_w مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش نسبت Q_1 ، ناحیه جداشده‌گی به علت انحراف بیشتر آب برای خارج شدن از روی سرریز افزایش می‌یابد. در بیشتر موارد ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و اندازه حرکت برابر عدد یک فرض می‌شوند که این فرض، یک فرض ساده کننده بوده و مقدار این ضرایب لزوماً برابر عدد یک نیستند. در این پژوهش، ضرایب α و β در طول سرریز جانبی مستطیلی در دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی بررسی شد. محاسبات انجام شده نشان داد که این ضرایب در جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی در طول سرریز جانبی مستطیلی، روندی افزایشی دارد که این نتایج با نتایج کلی ارائه شده توسط Castro and Hager (2012) El-khashab (1975) هماهنگی دارد اما با نتایج ارائه شده توسط Venutelli (2008) مغایر است. همچنین برای تغییرات ضرایب α و β در دو جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی روابط (۱۳ و ۱۴) ارائه شده است

- [17] Castro Orgaz, O.; Hager, W.H. Subcritical Side-Weir Flow at High Lateral Discharge. *J. Hydraul. Eng.* 2012, 138, 777–787.
- [18] FLOW-3D Help, 2017, Ver 11.2.2, Flow science Inc.
- [19] JaliliGhazizadehM. 1994 Laboratory examination of lateral overflows. *Master thesis, Sharif University of technology, Tehran, Iran* "(In Persian)".
- [20] MichelazzoG., OumeraciH. & Paris,E. 2017 Laboratory Study on 3D Flow Structures Induced by Zero-Height Side Weir and Implications for 1D Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(10).
- [14] Tynes KA. 1989 Hydraulics of side-channel Weirs for regional detention basin, *M.S.Thesis. Dep. Of Civil Engineering, University of Texas, Austin*, 128pp.
- [15] Ventutelli ME. 2008 Method of solution non uniform flow with the presence of rectangular side weirs. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 134(6):840-846.
- [16] Novak G., Steinman F. & Muller M. 2012 Study of velocity field at model Side weir using visualization method. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, No. 1.pp. 129-133.

Numerical Study of the Flow Velocity Distribution over Rectangular Side Weirs

M.R. JaliliGhazizadeh^{1*}, A.A.Mohamadalipourahari², Abbas Bakhtiariarkasi³

1-Associate Professor, Department of Civil Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

2, M.Sc. Graduate Student , Department of Civil Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

3-M.Sc. Graduate Student , Department of Civil Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran

*m_jalili@sbu.ac.ir

Abstract

Side weirs are a type of hydraulic structures used for different purposes in water transition systems, water supply, flow diversion and flood control important. Side weir, is a key structure in transition of urban sewage; the advantage of this structure in urban sewage is the pretreatment of the diverted flow due to side weir height which is in environmental engineering. The flow on these structures is spatially varied flow type with decreasing discharge. Spatially varied flow is a type of steady flow with decreasing or increasing discharge along the channel. To analyze this flow, its necessary to know the velocity distribution and the values of the kinetic energy correction factor (α) and the momentum correction factor (β).However due to complexities concerned with this type of flow and experimental limitations there hasn't been enough study on the velocity distribution for this kind of flow .In this research the velocity distribution in a rectangular side weir has been investigated using a commercial software. Before performing the numerical analysis it's necessary to check the software's ability in modeling the 3D flow on the side weir. Experimental data of JaliliGhazizadeh (1994) has been used for verification. In these experiments side weir lengths 20,30,45,75 (cm) and side weir heights 1, 10, 19 (cm) has been used while discharge in the main channel varied from 43 to 90 (lit/s). The simulation boundary conditions are volume flow rate discharge for upstream boundary, the "wall" for wall and "symmetry" boundary conditions for water surface. The only difference in boundary conditions for subcritical and supercritical flow is in downstream boundary condition which is "specified pressure" for supercritical flow and "specified velocity" for subcritical flow used respectively. Turbulence model is RNG in all simulations. Comparing the results shows that the software is capable of calculating the discharge passing the rectangular side weir with a good accuracy for both subcritical and supercritical flows. Therefore, based on obtained results we can conclude that the commercial software is capable of simulating 3D flow on rectangular side weir and the results obtained from performing analysis with this software can be cited. Velocity distribution, correction factors for kinetic energy and momentum were studied in detail. In the case of subcritical flow on the side weirs, water in the main channel and downstream area of the side weir has been observed to separate in the opposite direction of the main channels, there for it is important to study these areas. A noticeable point is that although large amounts of simulation points have (α) and (β) close to one, simulation results show that (α) and (β) cannot be considered equal to one for the whole cases. The variation of (α) and (β) in side weirs length in this research were ascending. Based on existing simulation results, new equation between (α) and (β) for subcritical and supercritical flow and quantification of separating area were proposed. Results of this research can help side weir designers to have a better understanding of the complex 3D flow on side weirs.

Keywords: Rectangular Side Weir, Energy Correction Factor, Momentum Correction Factor, Separation Zone, Numerical Simulation.

