

بررسی اثر تغییر طول سرریز جانبی واقع در کانال‌های U شکل بر سطح آزاد و الگوی جریان با استفاده از شبیه‌سازی عددی

حامد عظیمی^۱ و سعید شهبانلو^{۲*}

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

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

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۱۳، تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۸

چکیده

کانال‌های U شکل به همراه سرریزهای جانبی به‌عنوان مقطع مبدل کانال‌های مستطیلی به دایره‌ای دریاچه‌های آدمرو (Manhole) در شبکه‌های دفع فاضلاب شهری مورد استفاده مهندسان علم هیدرولیک قرار می‌گیرند. در تحقیق حاضر، آشفتگی میدان جریان و تغییرات سطح آزاد واقع در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی با استفاده از مدل آشفتگی RNG k-ε و طرح VOF شبیه‌سازی شده است. مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان، ضریب دبی، انرژی مخصوص و مقادیر مختلف دبی گذرنده از روی سرریز جانبی با طول‌های مختلف را با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند. اثر تغییر طول سرریز جانبی بر سطح آزاد و الگوی جریان واقع در کانال‌های U شکل نیز بررسی شده است. در بالادست سرریز جانبی تغییرات سطح آزاد جریان برای سرریز کوتاه‌تر ناچیز و اثر آن قابل چشم‌پوشی است. برای سرریزهای جانبی با طول مختلف، مقدار سرعت عرضی از ابتدای سرریز تا وسط دهانه سرریز در حال افزایش است و با پیشروی به سوی انتهای پایین دست سرریز جانبی این سرعت با کاهش روبه‌رو می‌شود. با افزایش طول سرریز جانبی، مقدار حداقل زاویه ریزشی جت جریان کاهش می‌یابد. برای کانال‌های دارای سرریز جانبی با طول متفاوت، جریان ثانویه بعد از سرریز جانبی به‌وجود می‌آید که سلول جریان ثانویه مذکور با پیشروی به سمت پایین دست کانال اصلی توسعه می‌یابد. اختلاف انرژی مخصوص در بالادست و پایین دست سرریز جانبی برای سرریزهای جانبی کوتاه و بلند به ترتیب ۱/۱۸ و ۲/۹۴ درصد محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی

آشفتگی جریان، انرژی مخصوص، میدان سرعت، میدان جریان

مقدمه

یوکسل (Yüksel, 2004)، ونوتلی (Venutelli, 2008)، وطن‌خواه و بی‌جن‌خان (Vatankhah & Bijankhan, 2009)، امیراوقلو و همکاران (Emiroglu et al., 2011)، باقری و حیدرپور (Bagheri & Heidarpour, 2012) و نوواک و همکاران (Novak et al., 2013). در عمل، کانال‌های U شکل به‌عنوان مقطع مبدل کانال‌های مستطیلی به دایره‌ای دریاچه‌های آدمرو و نیز به‌همراه سرریزهای سیلاب در شبکه دفع فاضلاب شهری مورد

سرریزهای جانبی به شکلی گسترده در شبکه‌های دفع فاضلاب شهری، پروژه‌های محافظت سیلاب و سیستم‌های آبیاری و زهکشی به‌کار گرفته می‌شوند. مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی فراوانی روی رفتار هیدرولیکی کانال‌های دارای سرریز جانبی اجرا شده است. مهم‌ترین مطالعات روی مشخصات جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی واقع در کانال‌های مستطیلی عبارت‌اند از مطالعات

مستطیلی دارای سرریز جانبی مثلثی کنگره‌ای را برای اعداد فرود مختلف مدل‌سازی کرد. آیدین و امیرقلو (Aydin & Emiroglu, 2013) با استفاده طرح VOF و مدل‌های آشفتگی مختلف ظرفیت آبگذری سرریزهای جانبی کنگره‌ای را شبیه‌سازی کردند. عظیمی و همکاران (Azimi *et al.*, 2014) با بررسی آشفتگی میدان جریان و الگوی جریان فوق‌بحرانی در کانال‌های دایره‌ای دارای سرریز جانبی، تغییرات سه بعدی سطح آزاد جریان را با استفاده از روش VOF مدل‌سازی کردند. با مرور مطالعات آزمایشگاهی و عددی درباره کانال‌های دارای سرریز جانبی، مشاهده می‌شود که هنوز نیاز خواهد بود تا درباره اثر طول سرریز جانبی بر مشخصات میدان جریان واقع در کانال‌های U شکل در شرایط جریان زیر بحرانی تحقیق شود. علاوه بر این، بررسی رفتار هیدرولیکی سرریزهای جانبی واقع بر کانال‌های U شکل تنها به دو مطالعه اویماز (Uyumaz, 1997) و وطن‌خواه (Vatankhah, 2013) محدود شده است. با توجه به مطالب عنوان شده به‌نظر می‌رسد که بررسی پارامترهایی مانند تغییرات سطح آزاد، سرعت عرضی، زاویه ریزشی و تغییرات انرژی مخصوص جریان در امتداد سرریز جانبی واقع بر کانال‌های U شکل حاوی نکات جدیدی برای محققان است که تا کنون ارزیابی نشده‌اند. در این مطالعه، میدان جریان آشفته و سطح آزاد در کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و طرح VOF شبیه‌سازی می‌شوند.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس برای حل میدان جریان سیال غیرقابل تراکم استفاده می‌شود (روابط ۱ تا ۴):

استفاده مهندسان علم هیدرولیک قرار می‌گیرند. همچنین رشته قنات‌های واقع در فلات مرکزی ایران از کانال‌هایی با سطح مقطع عرضی U شکل، تخم‌مرغی و نعل اسبی ساخته شده‌اند. اولین مطالعات در ارتباط با کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی توسط هاگر و همکاران (Hager *et al.*, 1983) صورت پذیرفته است. اویماز (Uyumaz, 1997) با بررسی آزمایشگاهی و عددی کانال‌های U شکل دارای سرریز جانبی، دبی عبوری از روی سرریز جانبی و پروفیل طولی سطح آزاد جریان در امتداد سرریز را برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی اندازه‌گیری کرد. وی معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی برای یک مجرای U شکل دارای سرریز جانبی را با استفاده از اصل انرژی مخصوص و روش اجزا محدود حل کرد. وطن‌خواه (Vatankhah, 2013) با استفاده از تئوری دی‌مارچی و روش انتگرال‌گیری بیضوی غیر کامل و با فرض ثابت بودن ضریب دبی سرریز جانبی، انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی و ضریب توزیع سرعت، توانست معادله دینامیکی حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی را با کاهش دبی برای یک کانال U شکل دارای سرریز جانبی در هر دو شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی حل کند. حذف هزینه‌های آزمایشگاهی و صرفه‌جویی در زمان از مهم‌ترین مزیت‌های مطالعات عددی محسوب می‌شوند. در زیر به برخی از مطالعات عددی در ارتباط با شبیه‌سازی جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی اشاره می‌شود:

کیو (Qu, 2005) با استفاده از مدل آشفتگی $k-\omega$ و روش VOF تغییرات سه بعدی جریان عبوری از روی سرریز جانبی را مدل‌سازی کرد. تدین (Tadayon, 2009) یک مدل عددی را با استفاده از مدل آشفتگی RSM و روش VOF توسعه داد. آیدین (Aydin, 2012) به کمک طرح VOF پروفیل سطح آزاد جریان واقع در یک کانال

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

که در آنها،
 $F=1$ خواهد شد. اگر $F=0$ باشد، سلول مورد نظر خالی است و $0 < F < 1$ به معنای آن است که سلول حاوی هر دو فاز آب و هواست.

شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده بر مدل عددی به شکلی در نظر گرفته شده است که بر شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی اویماز (Uyumaz, 1997) منطبق باشد. به همین منظور با توجه به داشتن دبی و عمق ورودی از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی کانال اصلی استفاده شده است. این شرایط مرزی معادل شرط مرزی "شدت جریان حجمی" است. با توجه به مشخص بودن عمق پایین دست کانال اصلی در شرایط آزمایشگاهی، در شبیه سازی مذکور از شرایط مرزی "فشار مشخص" استفاده شده است.

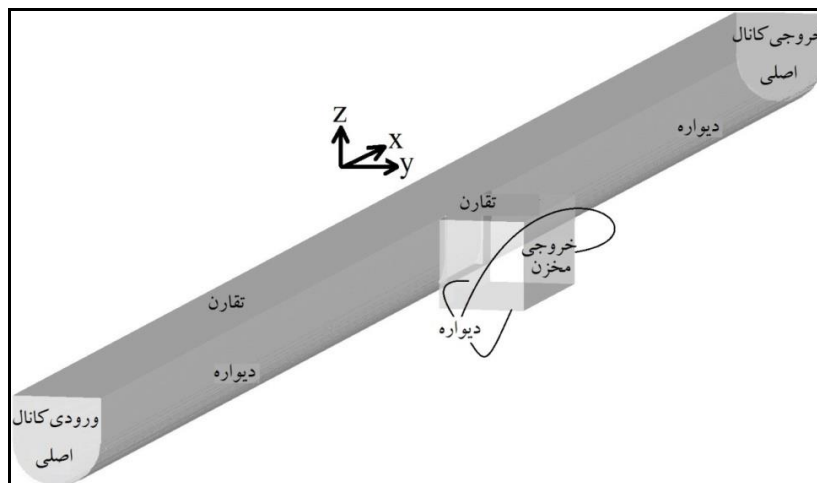
جریان عبوری از روی سرریز جانبی به داخل یک مخزن ریخته می شود، در مدل عددی گفته شده، به منظور ریزش کامل جریان از روی سرریز جانبی، عرض مخزن متصل به سرریز بزرگتر از طول سرریز جانبی در نظر گرفته شده است. در پایین دست این مخزن شرایط مرزی "خروجی" اعمال شده است. کلیه مرزهای جامد به عنوان شرایط مرزی "دیواره" تعریف شده اند. در شرایط مرزی دیواره، شرط عدم لغزش تحمیل و اصطکاک ناچیز در نظر گرفته می شود، بنابراین در شرایط مرزی دیواره هیچ زبری اعمال

به ترتیب برابر مؤلفه های سرعت، مساحت کسری محیط به جریان، نیروهای گرانشی و شتاب های ناشی از لزوجت در راستاهای (x, y, z) و ρ ، t ، R_{SOR} ، p و V_F به ترتیب برابر زمان، جرم مخصوص سیال، ترم چشمه، فشار و کسری از حجم مرتبط با جریان هستند. در این مطالعه، برای شبیه سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی RNG k-ε استفاده شده است. این مدل آشفتگی، نواحی با برش بالا و جریان های آشفته با شدت کم را با دقت بالایی شبیه سازی می کند. این مدل آشفتگی، همچنین نسبت به مدل آشفتگی k-ε دو معادله ای به ثابت های تجربی کمتری نیاز دارد و برای شبیه سازی نواحی دارای جدانشدگی جریان، عملکرد بهتری از خود نشان می دهد. در این شبیه سازی، برای پیش بینی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده شده است. در طرح VOF برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می شود (رابطه ۵).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(\frac{\partial}{\partial x} (F u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (F v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (F w A_z) \right) = 0.0 \quad (5)$$

که در آن،
 F جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی است. چنانچه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد

نشده است. کل سطح فوقانی میدان جریان با شرایط مرزی "تقارن" معرفی شده است. مکانی کلیه شارها برابر صفر است. شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی مذکور در شکل ۱ نشان داده شده است. در شرایط مرزی تقارن، اصطکاک و تغییرات زمانی و



شکل ۱- شرایط مرزی تعریف شده برای مدل عددی

مرتب شده‌اند که این مقادیر در نزدیکی دیواره‌های جامد از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

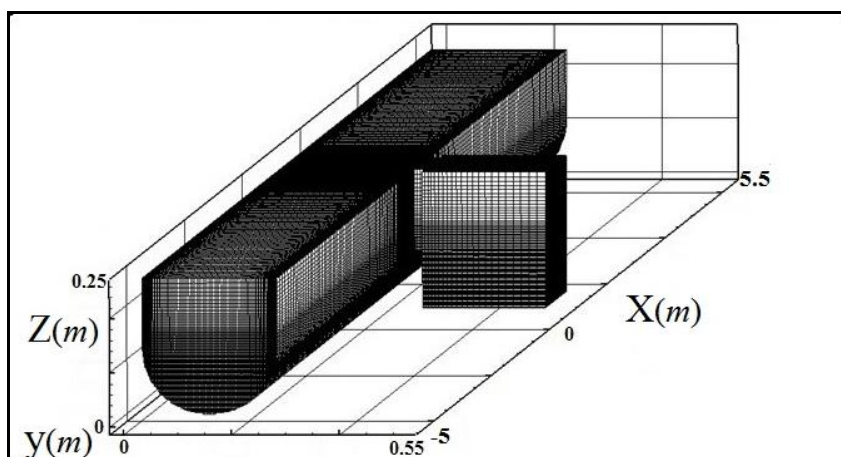
$$y^+ = \frac{Y_1 \cdot u_*}{\nu} \quad (6)$$

که در آن،

Y_1 = فاصله مرکز سلول از دیواره جامد؛ u_* = سرعت برشی دیواره؛ و ν = ویسکوزیته سینماتیکی سیال.

شبکه‌بندی میدان جریان

در این مطالعه عددی، کل دامنه محاسباتی با یک بلوک مش غیریکنواخت شبکه‌بندی شده است. در محل تقاطع کانال اصلی با سرریز جانبی و در مجاورت دیواره‌های جامد، شبکه‌بندی بسیار ریزتر در نظر گرفته شده است تا در سایر نواحی. در شکل ۲، میدان جریان شبکه‌بندی شده را می‌توان دید. در جدول ۱، تعداد سلول‌های محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازی مذکور در راستاهای مختلف

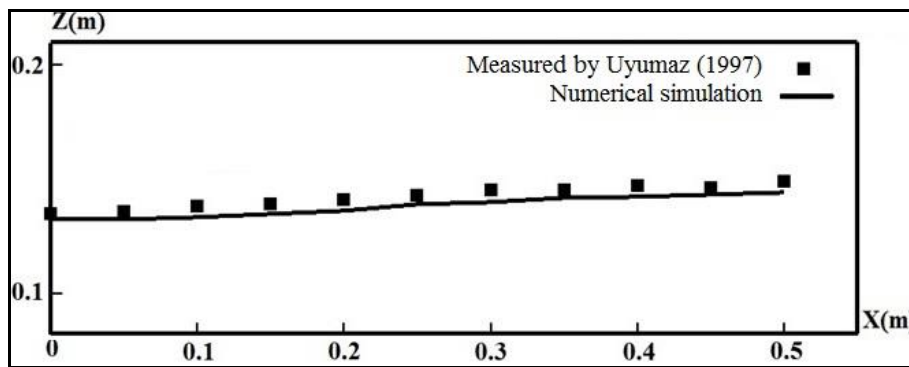


شکل ۲- نمای سه‌بعدی شبکه‌بندی میدان محاسباتی

به ترتیب برابر دبی ورودی کانال اصلی، انرژی مخصوص، جریان در امتداد سرریز جانبی را با دقت قابل قبولی عمق جریان در ورودی کانال اصلی و عمق جریان در خروجی کانال اصلی هستند. سرریز جانبی از ابتدای بالادست سرریز به سمت انتهای پایین دست آن افزایش عمق داده است. مشاهده می‌شود که مدل عددی تغییرات سطح آزاد

جدول ۳- مشخصات هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی اویماز (Uyumaz, 1997) برای $L/D=2$

پارامتر هیدرولیکی	Q_1 (مترمکعب بر ثانیه)	E (متر)	Z_1 (متر)	Z_2 (متر)
مقدار	۰/۰۱۷	۰/۱۵۵	۰/۱۳۴۷	۰/۱۴۹۱



شکل ۴- مقایسه سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی برای $L/D=2$

برای بررسی دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف میدان جریان، درصد خطای متوسط (APE) و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) نسبی با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه شده است. شبیه‌سازی عددی هستند. مقادیر (APE) و (RMSE) برای تغییرات طولی سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی برای حالت $L/D=2$ به ترتیب برابر ۲/۷۹ و ۲/۸۶ درصد محاسبه شده است. اویماز (Uyumaz, 1997) برای محاسبه دبی بر واحد طول سرریز جانبی واقع بر یک کانال U شکل، رابطه ۹ را پیشنهاد داده است:

$$-\frac{dQ_w}{dx} = q = C_d \sqrt{2g(Z-P)}(Z-P) \quad (9)$$

که در آن،

Q_w = دبی عبوری از روی سرریز جانبی؛ x فاصله طولی از ابتدای سرریز؛ dQ_w/dx یا q دبی بر واحد طول سرریز جانبی؛ g شتاب جاذبه؛ P ارتفاع تاج سرریز جانبی؛ و Z

برای بررسی دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف میدان جریان، درصد خطای متوسط (APE) و خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) نسبی با استفاده از روابط ۷ و ۸ محاسبه شده است.

$$APE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right| \quad (7)$$

$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right)^2} \quad (8)$$

که در آنها،

$R_{measured}$ و $R_{simulated}$ به ترتیب معادل نتایج آزمایشگاهی و

تجربی ۱۱ را برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در مجاری دایره‌ای در شرایط جریان زیر بحرانی پیشنهاد داده‌اند. رابطه مذکور تابعی از نسبت طول سرریز جانبی به قطر کانال اصلی (L/D) و عدد فرود بالادست سرریز جانبی (F_1) است.

اویماز (Uyumaz, 1997) پیشنهاد می‌دهد که رابطه ۱۱ را می‌توان برای محاسبه ضریب دبی سرریزهای جانبی واقع در کانال U شکل نیز به کار برد:

عمق جریان. بنابراین می‌توان ضریب دبی سرریز جانبی (C_d) را از رابطه ۱۰ محاسبه کرد:

$$C_d = \left(\frac{Q_w}{L\sqrt{2g}(Z-P)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (10)$$

اویماز و موسلا (Uyumaz & Muslu, 1985) رابطه

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

خطای نسبی (REP) ضریب دبی سرریز جانبی نیز محاسبه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، رابطه تجربی ۱۱ در مقایسه با رابطه ۱۰ مقادیر ضریب دبی آزمایشگاهی و عددی را بسیار نزدیک به هم پیش‌بینی کرده است.

در جدول ۴، مقایسه ضریب دبی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی برای حالت $L/D=2$ را می‌توان دید. C_{dn} و C_{de} به ترتیب برابر ضریب دبی حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی‌های عددی است. در جدول ۴، مقادیر درصد

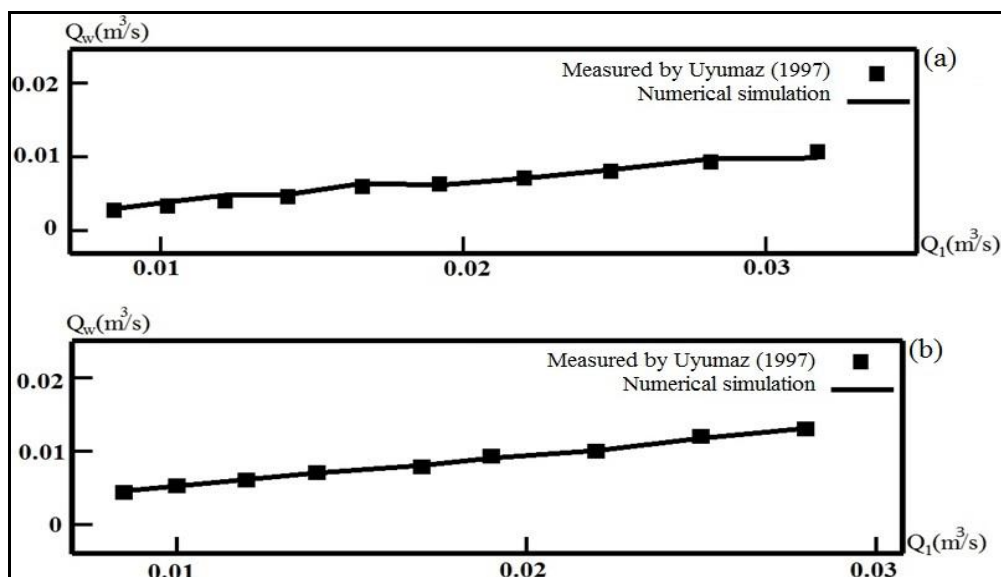
جدول ۴- مقایسه بین ضرایب دبی آزمایشگاهی و عددی برای حالت $L/D=2$

شماره رابطه	C_{de}	C_{dn}	$REP\% = \left \frac{C_{de} - C_{dn}}{C_{de}} \times 100 \right $
۱۰	۰/۳۳۹	۰/۳۹۰	۱۵/۰۴
۱۱	۰/۴۱۹	۰/۴۳۲	۳/۱۰

مقادیر (APE) و (RMSE) محاسبه شده برای دبی‌های عبوری از روی سرریز جانبی برای هر دو حالت مختلف طول سرریز جانبی به قطر کانال اصلی در جدول ۵ مرتب شده‌اند.

مشاهده می‌شود که مدل عددی مقادیر مختلف دبی گذرنده از روی سرریز جانبی با طول مختلف را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرده است.

اویماز (Uyumaz, 1997) مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی را برای دبی‌های متفاوت کانال اصلی برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ اندازه‌گیری کرده است. در شکل ۵، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی در پیش‌بینی مقادیر مختلف دبی عبوری از روی سرریز جانبی با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ مقایسه شده است.



شکل ۵- مقایسه میان نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دبی عبوری از روی سرریز جانبی واقع در کانال U شکل $L/D=2$ -a $L/D=3$ -b

جدول ۵- مقادیر درصد خطای متوسط نسبی و خطای ریشه میانگین مربعات نسبی دبی عبوری از روی سرریز جانبی

L/D	خطای متوسط نسبی (APE) (درصد)	خطای ریشه میانگین مربعات نسبی (RMSE) (درصد)
۲	۷/۵۶	۹/۵۲
۳	۲/۱۴	۲/۴۴

اویماز (Uyumaz, 1997) مقدار انرژی مخصوص (E) داخل کانال U شکل دارای سرریز جانبی برای حالت $L/D=2$ را نیز اندازه‌گیری کرده است. در جدول ۶، مقادیر انرژی مخصوص آزمایشگاهی و پیش‌بینی شده با مدل عددی (E_{Num}) و درصد خطای نسبی مربوط به آنها دیده می‌شود. بر اساس این جدول، مدل عددی مقدار انرژی مخصوص را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کرده است.

جدول ۶- مقایسه انرژی مخصوص آزمایشگاهی و عددی برای حالت $L/D=2$

رژیم جریان	(E_{EXP}) متر	(E_{Num}) متر	$REP = 100 \times \left \frac{E_{Exp} - E_{Num}}{E_{Exp}} \right $
زیربحرانی	۰/۱۵۵	۰/۱۵۴	۰/۶۵

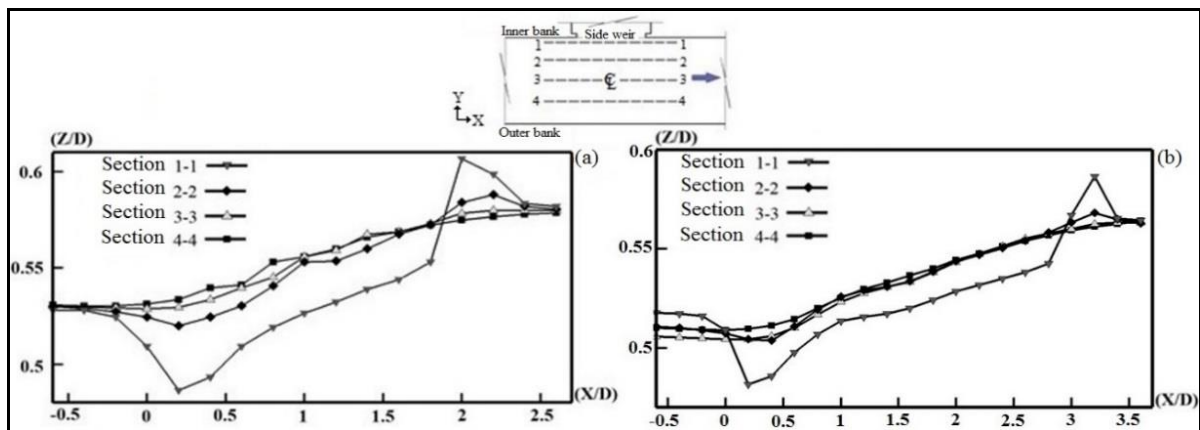
در اینجا اثر طول سرریز جانبی بر تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز برای حالت‌های $L/D=2$ و $L/D=3$ بررسی می‌شود. به‌همین منظور پروفیل‌های طولی سطح آزاد شبیه‌سازی شده در مقاطع واقع در

متر $y=0/245$ (مقطع طولی ۱-۱)، متر $y=0/1175$ (مقطع طولی ۲-۲)، متر $y=0/125$ (مقطع طولی ۳-۳) و متر $y=0/0625$ (مقطع طولی ۴-۴) در شکل ۶ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، در قبل از

جانبی اشاره کرده و در مطالعات خود گزارش داده‌اند که در امتداد پرش سطحی، انرژی جنبشی افزایش و انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد. همان‌طور که در مقطع ۱-۱ از شکل ۶ مشاهده می‌شود، برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ یک پرش سطحی در انتهای پایین دست دهانه سرریز جانبی به وقوع پیوسته است. آیدین (Aydin, 2012) با شبیه‌سازی سه بعدی جریان در داخل یک کانال مستطیلی، به وجود یک نقطه ایستایی در انتهای پایین دست سرریز جانبی اشاره کرده است؛ نقطه ایستایی دارای بیشترین تراز ارتفاعی است. برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ ، در انتهای پرش سطحی یک نقطه با حداکثر تراز ارتفاعی به وقوع پیوسته است (مقطع ۱-۱ از شکل ۶). در سایر مقاطع طولی (مقاطع طولی ۲-۲ تا ۴-۴) با دور شدن از دیواره داخلی کانال اصلی اثر سرریز جانبی کاهش می‌یابد، به شکلی که تغییرات سطح آزاد جریان در مقطع طولی ۴-۴ نسبت به سایر مقاطع طولی کمتر است.

سرریز جانبی تغییرات سطح آزاد جریان برای حالت $L/D=2$ ناچیز و اثر سرریز جانبی در آنجا قابل صرف نظر کردن است. اما برای حالت $L/D=3$ سطح آزاد جریان قبل از سرریز جانبی تحت تأثیر سرریز قرار گرفته و اختلاف تراز در کلیه مقاطع طولی مشاهده می‌شود (شکل ۶ b).

امیراقلو و همکاران (Emiroglu et al., 2011) در مطالعات آزمایشگاهی خود روی رفتار سطح آزاد جریان در کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی، به وجود یک افت ناگهانی در ابتدای بالادست سرریز جانبی اشاره کرده و علت این افت ناگهانی را اثر ورودی سرریز جانبی دانسته‌اند. در شکل ۶ دیده می‌شود که افت سطح آزاد برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ در ابتدای بالادست دهانه سرریز جانبی به وقوع پیوسته است (مقطع ۱-۱)، پس از آن عمق جریان بعد از این افت به سرعت افزایش می‌یابد. امیراقلو و همکاران (Emiroglu et al., 2011) به وجود یک پرش سطحی در انتهای طول دهانه سرریز

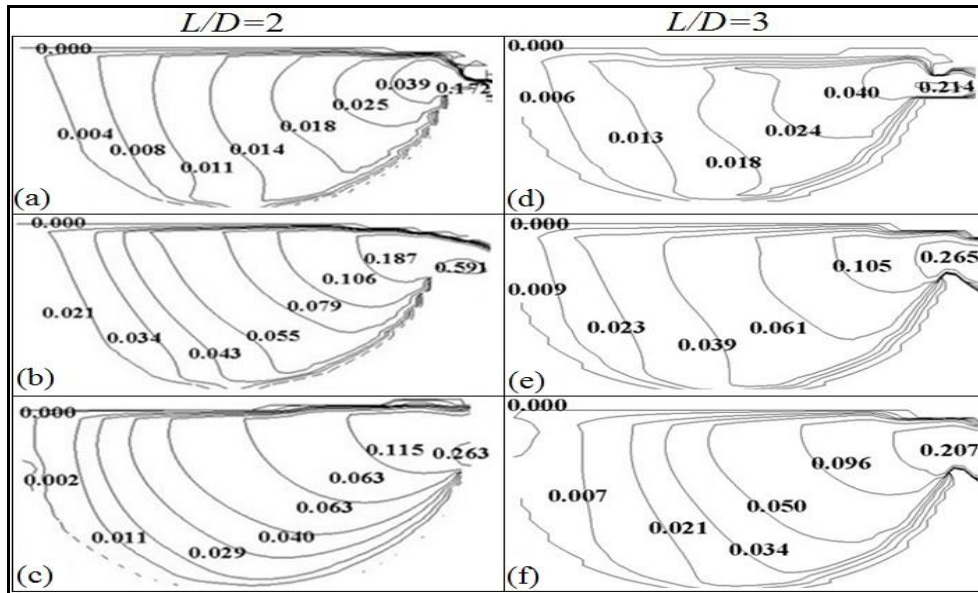


شکل ۶- تغییرات سطح آزاد شبیه‌سازی شده جریان در امتداد سرریز جانبی (a) $L/D=2$ و (b) $L/D=3$

سرریز جانبی برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، سرعت جانبی برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ از ابتدای سرریز تا وسط دهانه سرریز در حال افزایش است و با پیشروی به سوی انتهای پایین دست سرریز جانبی مقدار آن

با نصب یک سرریز جانبی روی یکی از دیواره‌های کانال اصلی و با نزدیک شدن جریان به صفحه سرریز جانبی، مؤلفه عرضی سرعت جریان به وجود می‌آید. در شکل ۷، خطوط هم سرعت مؤلفه عرضی جریان در امتداد سرریز جانبی در مقاطع عرضی واقع شده در ابتدا، وسط و انتهای

کاهش می‌یابد. در هر مقطع عرضی، مقدار سرعت جانبی در مجاورت دیواره خارجی کانال اصلی ناچیز است و با پیشروی به سمت دیواره داخلی به شکلی چشم‌گیر افزایش می‌یابد.



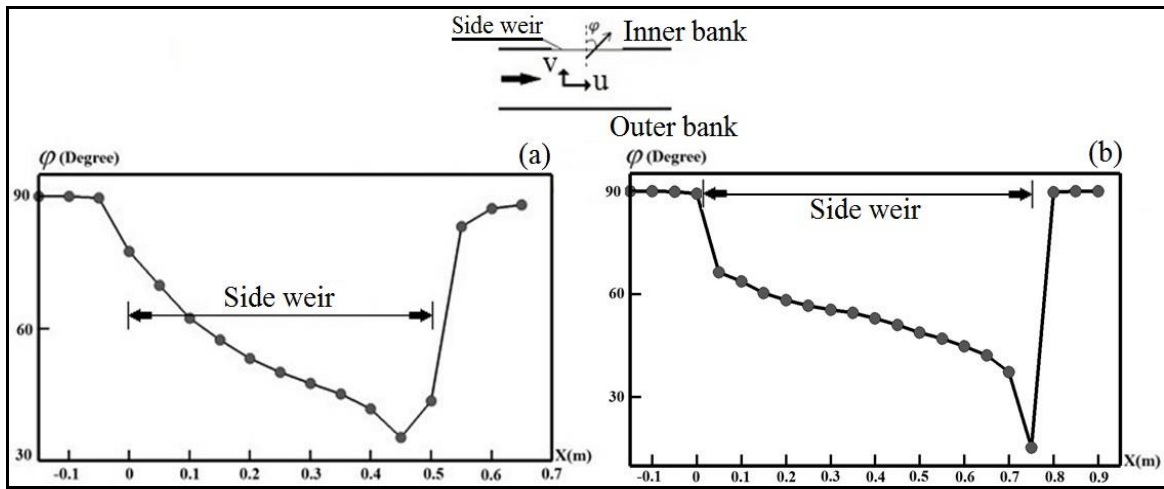
شکل ۷- خطوط هم سرعت مؤلفه عرضی جریان (متر بر ثانیه) در امتداد سرریز جانبی (a, d) ابتدای دهانه سرریز، (b, e) وسط دهانه سرریز و (c, f) انتهای دهانه سرریز

دو حالت $L/D=3$ و $L/D=2$ در شکل ۸ مشاهده می‌شود. در این شکل‌ها، اندازه زاویه ریزشی جت جریان بر حسب درجه اندازه‌گیری شده است. در شکل ۸ دیده می‌شود در هر دو حالت $L/D=3$ و $L/D=2$ اندازه ϕ در قبل و بعد از سرریز جانبی نزدیک به ۹۰ درجه است. الگوی تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در هر دو حالت $L/D=3$ و $L/D=2$ مشابه نتایج آزمایشگاهی باقری و حیدرپور (Bagheri & Heidarpour, 2012) است، به شکلی که با ورود جریان به صفحه سرریز جانبی، اندازه ϕ کاهش می‌یابد و حداقل آن برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ به ترتیب در یک پنجم و یک هفتم انتهایی دهانه سرریز جانبی به وقوع می‌پیوندد و پس از آن اندازه زاویه گفته شده به سرعت افزایش می‌یابد و بعد از سرریز جانبی به زاویه ۹۰ درجه میل می‌کند. با توجه به شکل ۸ با افزایش طول سرریز جانبی، اندازه زاویه ریزشی جت جریان با کاهش بیشتری همراه است.

زاویه ریزشی جت جریان (ϕ) یکی از مشخصات هیدرولیکی سرریزهای جانبی در شکل‌گیری جریان انحرافی شناخته می‌شود. رابطه ۱۲ را باقری و حیدرپور (Bagheri & Heidarpour, 2012) برای محاسبه ϕ در مجاورت تاج سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی پیشنهاد داده‌اند:

$$\phi = \text{Arc tan}\left(\frac{u}{v}\right) \quad (12)$$

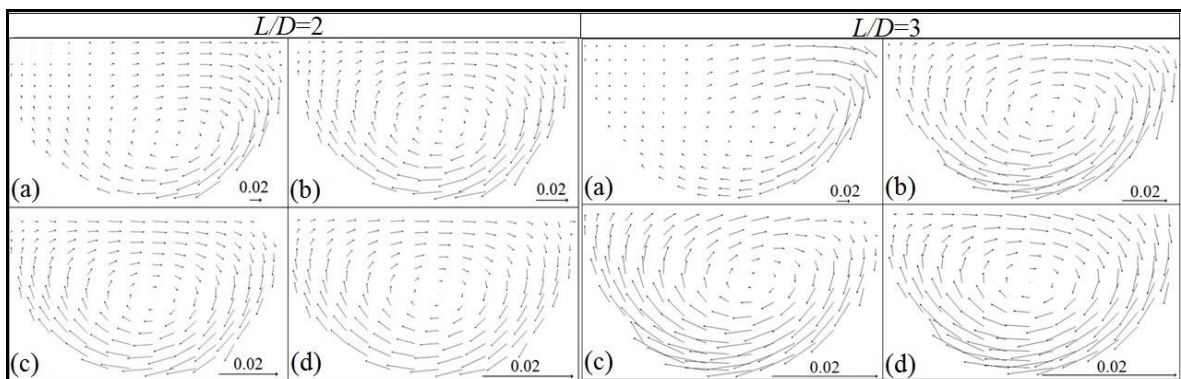
که در آن، u و v به ترتیب برابر مؤلفه طولی و عرضی سرعت در امتداد تاج سرریز جانبی هستند. باقری و حیدرپور (Bagheri & Heidarpour, 2012)، در مطالعه آزمایشگاهی، اندازه زاویه ϕ را قبل و بعد از سرریز جانبی نزدیک به ۹۰ درجه اندازه‌گیری کرده‌اند. تغییرات زاویه ریزشی جت جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی برای هر



شکل ۸- تغییرات زاویه ریزشی بر حسب درجه جت جریان در امتداد تاج سرریز جانبی (a) $L/D=2$ و (b) $L/D=3$

که سلول جریان ثانویه مذکور با پیشروی به سمت پایین دست کانال اصلی توسعه یافته است. با توجه به مقیاس‌های رسم شده، بزرگای بردارهای سرعت جریان مزبور با فاصله از انتهای سرریز جانبی کاهش می‌یابد، به طوری که بزرگای بردارهای سرعت عرضی در مقطع a ($x=1$ متر) بیش از ده برابر بزرگای بردارهای واقع شده در مقطع d ($x=4$ متر) اندازه‌گیری شده است.

هنگامی که سرریز جانبی روی دیواره کانال اصلی نصب می‌شود، یک جریان ثانویه به علت جریان جانبی به وجود می‌آید. در شکل ۹، جریان ثانویه تولید شده در داخل کانال U شکل دارای سرریز جانبی در مقاطع عرضی مختلف برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ رسم شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، جریان ثانویه‌ای بعد از سرریز جانبی به وجود آمده است، به گونه‌ای



شکل ۹- جریان ثانویه شبیه‌سازی شده در مقاطع عرضی واقع شده در (a) متر $x=1$ (b) متر $x=2$ (c) متر $x=3$ و (d) متر $x=4$

با فرض اینکه شیب کف کانال کم باشد، مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی ثابت و برابر است با (رابطه ۱۳):

$$E = Z + \left(\frac{Q_1^2}{2gA^2} \right) \quad (13)$$

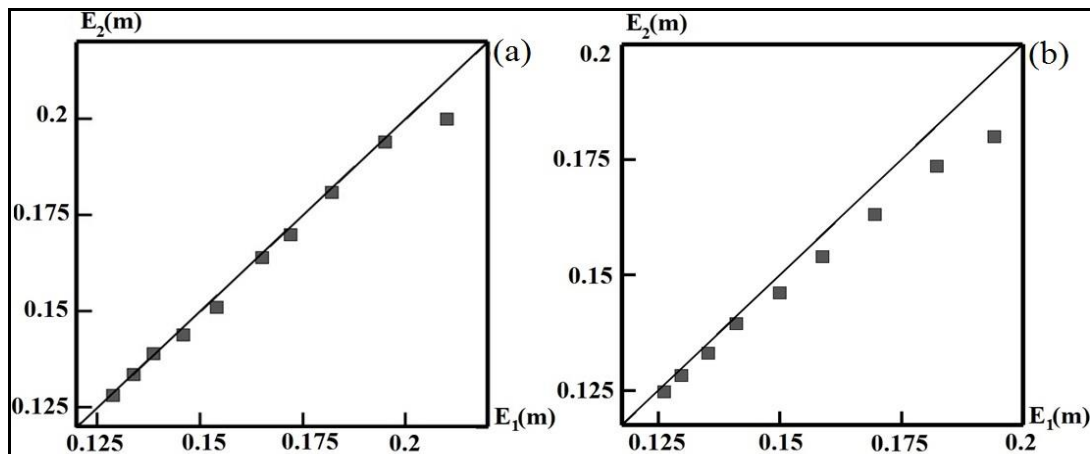
که در آن،

E = انرژی مخصوص؛ Q_1 = دبی در داخل کانال اصلی؛ و A = سطح مقطع عرضی جریان. فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در حل معادلات حاکم بر جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی از اصول اساسی این نوع از جریان‌ها محسوب می‌شود.

بر اساس فرضیات دی مارچی (De Marchi, 1934) در صورت کوتاه بودن طول سرریز جانبی، انرژی مخصوص بین ابتدای بالادست سرریز و انتهای پایین‌دست آن ثابت است و نتایج تجربی نیز نشان می‌دهد که این فرض منطقی است. انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی را برخی از محققان بررسی کرده‌اند. الخشاب و اسمیت (El-Khashab & Smith, 1976) و همکاران (Borghai et al., 1999) می‌گویند مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی تقریباً ثابت است. آنها همچنین در مطالعات آزمایشگاهی خود اختلاف بین انرژی مخصوص در بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی را به ترتیب برابر ۵

و ۳/۷ درصد محاسبه کرده‌اند.

در این بخش از مطالعه، برای بررسی فرضیه ثابت بودن انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی، مقادیر انرژی مخصوص در ابتدای بالادست و انتهای پایین‌دست سرریز جانبی (مقاطع ۱ و ۲ در شکل ۳) مقایسه شده‌اند. در شکل ۱۰ مقایسه مقدار انرژی مخصوص در ابتدای بالادست (E_1) و انتهای پایین‌دست (E_2) سرریز جانبی برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ برای مقادیر مختلف دبی عبوری از داخل کانال اصلی قابل مشاهده است. با توجه به شکل a-۱۰، مدل عددی مقدار انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی کوتاه‌تر ($L/D=2$) را تقریباً ثابت پیش‌بینی کرده است و افت انرژی در امتداد سرریز جانبی ناچیز است. اختلاف انرژی مخصوص در بالادست و پایین‌دست سرریز جانبی برای حالت $L/D=2$ به‌طور متوسط در حدود ۱/۱۸ درصد محاسبه شده است. تغییرات انرژی مخصوص در ابتدا و انتهای سرریز جانبی بلندتر ($L/D=3$) در شکل b-۱۰ رسم شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی، مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی با طول بیشتر نیز تقریباً ثابت است. هر چند اختلاف انرژی مخصوص در بالادست (E_1) و پایین‌دست (E_2) سرریز جانبی برای حالت $L/D=3$ به‌طور متوسط برابر ۲/۹۴ درصد محاسبه شده که در مقایسه با سرریز جانبی کوتاه‌تر ($L/D=2$) تقریباً ۲/۵ برابر است.



شکل ۱۰- مقایسه انرژی مخصوص در بالادست و پایین دست سرریز جانبی برای دبی های مختلف عبوری از داخل کانال U شکل، (a) $L/D=2$ و (b) $L/D=3$

ناچیز است و اثر سرریز جانبی در آنجا قابل چشم پوشی است. اما برای حالت $L/D=3$ سطح آزاد جریان قبل از سرریز جانبی تحت تأثیر سرریز قرار گرفته و یک اختلاف تراز در کلیه مقاطع طولی مشاهده شده است. با توجه به نتایج مدل عددی و در ادامه بررسی تغییرات سطح آزاد جریان، مشاهده شده است که برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ یک پرش سطحی در انتهای پایین دست دهانه سرریز جانبی اتفاق افتاده که در امتداد پرش سطحی مذکور، مقدار انرژی جنبشی افزایش و انرژی پتانسیل کاهش یافته است. - سرعت جانبی برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ از ابتدای سرریز تا وسط دهانه سرریز در حال افزایش است و با پیشروی به سوی انتهای پایین دست سرریز جانبی مقدار آن کاهش می یابد. در هر مقطع عرضی، سرعت جانبی در مجاورت دیواره خارجی کانال اصلی ناچیز و با پیشروی به سمت دیواره داخلی به شکلی چشمگیر افزایش می یابد. برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ به ترتیب در یک پنجم و یک هفتم انتهای دهانه سرریز جانبی به وقوع پیوسته است؛ پس از آن، اندازه زاویه ریزشی جت جریان به سرعت افزایش یافته و بعد از سرریز جانبی به زاویه ۹۰

نتیجه گیری

مهم ترین نتایج به دست آمده از این تحقیق به صورت زیر خلاصه می شود: - مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی و اندازه گیری های آزمایشگاهی نشان داده است که مدل عددی مشخصات میدان جریان را با دقت قابل قبولی پیش بینی می کند. مقادیر $RMSE$ و APE برای دبی های مختلف عبوری از روی سرریز جانبی در هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ به ترتیب برابر ۷/۵۶، ۹/۵۲ درصد و ۲/۱۴ و ۲/۴۴ درصد محاسبه شده که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در شبیه سازی جریان عبوری از روی سرریز جانبی است. - بررسی اثر تغییر طول سرریز جانبی بر تغییرات سطح آزاد و الگوی جریان واقع در کانال های U شکل نشان داده است که بر اساس نتایج شبیه سازی، در قبل از سرریز جانبی تغییرات سطح آزاد جریان برای حالت $L/D=2$ - در هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ ، اندازه زاویه ریزشی جت جریان در قبل و بعد از سرریز جانبی نزدیک به ۹۰ درجه محاسبه شده است و با ورود جریان به صفحه سرریز جانبی، اندازه این زاویه کاهش یافته و حداقل آن

درجه میل کرده است. برای هر دو حالت $L/D=2$ و $L/D=3$ جریان ثانویه‌ای بعد از سرریز جانبی به وجود آمده به گونه‌ای که سلول جریان ثانویه با پیشروی به سمت پایین دست کانال اصلی توسعه یافته است؛ همچنین، بزرگای بردارهای سرعت جریان ثانویه مذکور با فاصله گرفتن از انتهای سرریز جانبی کاهش یافته است. مقدار انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی کوتاه‌تر ($L/D=2$) را مدل عددی تقریباً ثابت پیش‌بینی کرده و افت انرژی در امتداد سرریز جانبی ناچیز است. اختلاف

انرژی مخصوص در بالادست و پایین دست سرریز جانبی برای حالت $L/D=2$ به طور متوسط در حدود ۱/۱۸ درصد محاسبه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، مقدار انرژی مخصوص در امتداد سرریز جانبی با طول بیشتر نیز تقریباً ثابت است. هر چند اختلاف انرژی مخصوص در بالادست (E_1) و پایین دست (E_2) سرریز برای حالت $L/D=3$ به طور متوسط برابر ۲/۹۴ درصد محاسبه شده که در مقایسه با سرریز جانبی کوتاه‌تر ($L/D=2$) حدود ۲/۵ برابر است.

مراجع

- Aydin, M. C. 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Adv. Eng. Software*. 45(1): 159-166.
- Aydin, M. C. and Emiroglu, M. E. 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Meas. Instrum.* 29(1): 1-8.
- Azimi, H., Shabanlou, S. and Salimi, M. S. 2014. Free surface and velocity field in a circular channel along the side weir in supercritical flow conditions. *Flow Meas. Instrum.* 38(1): 108-115.
- Bagheri, S. and Heidarpour, M. 2012. Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 138(6): 541-547.
- Borghai, S. M., Jalili, M. R. and Ghodsian, M. 1999. Discharge coefficient for sharp crested side-weirs in subcritical flow. *J. Hydraul. Div.* 125(10): 1051-1056.
- De Marchi, G. 1934. Saggio di teoria del funzionamento degli stramazzi laterali. *Energia Elettrica*. 11(11): 849-860. (in Italian)
- El-Khashab, A. and Smith, K. V. H. 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *J. Hydraul. Div.* 102(9): 1255-1268.
- Emiroglu, M. E., Agaccioglu, H. and Kaya, N. 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Meas. Instrum.* 22(4): 319-330.
- Hager, W. H., Hager, K. and Weyermann, H. 1983. Die hydraulische Berechnung von Streichwehren in Entlastungsbauwerken der kanalis ationstechnik. *Gas-Wasser-Abwasser*, 63, 309-329. (in German)
- Novak, G., Kozelj, D., Steinman, F. and Bajcar, T. 2013. Study of flow at side weir in narrow flume using visualization techniques. *Flow Meas. Instrum.* 29(1): 45-51.
- Qu, J. 2005. Three dimensional turbulence modeling for free surface flows. Ph. D. Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Tadayon, R. 2009. Modeling curvilinear flows in hydraulic structures. Ph. D. Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Uyumaz, A. 1997. Side weir in U-shaped channels. *J. Hydraul. Eng.* 123(7): 639-646.

- Uyumaz, A. and Muslu, Y. 1985. Flow over side weirs in circular channels. *J. Hydraul. Eng.* 111(1): 144-160.
- Vatankhah, A. R. 2013. Water surface profiles along a rectangular side weir in a U-shaped channel. *J. Hydrol. Eng.* 18(5): 595–602.
- Vatankhah, A. R. and Bijankhan, M. 2009. Discussion of ‘method of solution of non-uniform flow with the presence of rectangular side weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 135(6): 812-814.
- Venutelli, M. 2008. Method of solution of nonuniform flow with the presence of rectangular side weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134(6): 840-846.
- Yüksel, E. 2004. Effect of specific energy variation on lateral overflows. *Flow Meas. Instrum.* 15(5-6): 259-269.

Effects of Length Variation of Side Weir Located on U-Shape Channel on Free Surface and Flow Pattern

H. Azimi and S. Shabanlou*

*Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. Email: saeid.shabanlou@gmail.com

Received: 2 February 2018, Accepted: 18 June 2018

Abstract

In practice, U-shaped channels are used in urban sewer networks. Also, most of aqueducts in Iran are made of U-shaped channels. In this study the flow field turbulence and free surface variations within the U-shaped channels along a side weir are simulated using the FLOW-3D and RNG $k-\varepsilon$ turbulence models and the volume of fluid (VOF) scheme, respectively. Comparison between the experimental and numerical results shows that the numerical model predicts the flow field characteristic with reasonable accuracy. Then, the effects of the side weir length change on the free surface and the flow pattern in U-shaped channels are investigated. According to the simulation results, the free surface variations are not significant at the side weir upstream and, so the side weir effects could be ignored. For the $L/D=3$ case, before the side weir, the free surface flow is affected by the weir and a height difference is observed in all longitudinal profiles. Also, a surface jump occurs for both $L/D=2$ and $L/D=3$ cases in the downstream end of the side weir. According to the simulation results, a secondary flow is created after the side weir so that the cell of this secondary flow develops by proceeding to the main channel downstream. The specific energy variation in the upstream and the downstream of the side weir for $L/D=2$ case is computed to be about 1.18% in average.

Keywords: Flow Field, Specific Energy, Turbulence Flow, Velocity Field