

## تأثیر عمق آب پایین دست بر مشخصات پرش هیدرولیکی در امتداد سرریز جانبی

نگار باقری سیدشکری<sup>۱\*</sup>، افشین اقبال زاده<sup>۲</sup>، میترا جوان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۹/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۶

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: negarbagheri125@gmail.com

### چکیده

سرریز جانبی یکی از سازه‌های انحراف آب است که به طور گسترده برای اهداف گوناگونی از جمله انحراف آب اضافی در سیستم‌های جمع آوری فاضلاب شهری، شبکه‌های آبیاری، کنترل ارتفاع سیلاب‌ها و موارد دیگر به کار گرفته می‌شود. در بعضی شرایط ممکن است جریان متغیر مکانی بر روی سرریز جانبی همراه با پرش هیدرولیکی باشد که این حالت کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. در این مقاله پس از شبیه‌سازی پرش هیدرولیکی با استفاده از نرم افزار Flow-3D و اعتبارسنجی مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، مشخص شد که مدل عددی قادر به شبیه‌سازی مناسب پرش هیدرولیکی می‌باشد. سپس تأثیر تغییر عمق پایین دست بر خصوصیات پرش هیدرولیکی بررسی شد. با کاهش عمق پایین دست، محل شروع پرش هیدرولیکی بسمت انتهای پایین دست سرریز حرکت می‌کند و با افزایش عمق پایین دست پرش هیدرولیکی حذف می‌گردد. با حرکت به سمت انتهای سرریز توزیع سرعت طولی به علت تشکیل ناحیه جدایی جریان در نزدیکی بسترکانال اصلی غیریکنواخت شده و نواحی با سرعت‌های منفی در این ناحیه تشکیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پرش هیدرولیکی، سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی، عمق پایین دست، Flow-3D

## The Effect of Downstream Water Depth on Hydraulic Jump Characteristics Along a Side Weir

N Bagheri Seyyed Shekari<sup>1\*</sup>, A Eghbalzadeh<sup>2</sup>, M Javan<sup>3</sup>

Received: November 26, 2015 Accepted: March 17, 2019

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

<sup>2,3</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

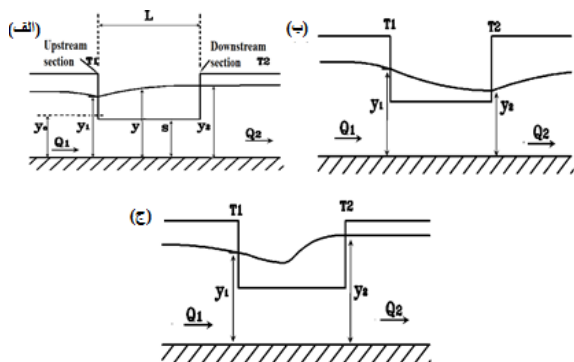
\* Corresponding Author, Email: negarbagheri125@gmail.com

### Abstract

Side weir is one of the water diversion structures which is widely used for different purposes such as deviation of the excess water in the urban wastewater collection systems, irrigation networks, control of the floods' elevation, etc. In some conditions, a spatially varied flow over the side weir might include hydraulic jump which has been less studied yet. In present study the hydraulic jump issue was investigated using a Flow-3D software model. The model was validated with experimental data and the results showed that the numerical model was able to simulate the hydraulic jump with reasonable accuracy. Then, the effect of the downstream water depth on the characteristics of the hydraulic jump was investigated. By decreasing the downstream water depth, the location of the hydraulic jump moved toward the weir downstream end while the hydraulic jump was removed by increasing the downstream water depth. By moving towards the end of the weir, the longitudinal velocity distribution became non-uniform due to formation of the separation zone near the main channel bed flow and the areas with negative velocities were formed.

**Keywords:** Downstream depth, Flow-3D, Hydraulic jump, Numerical simulation, Side weir

باشد (مانگاروکار ۲۰۱۰). تحقیقات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری بر روی سرریزهای جانبی مستطیلی در دو حالت جریان زیربحرانی و فوق بحرانی در کل طول سرریز انجام شده است.



شکل ۱- پروفیل‌های مختلف جریان در طول سرریز جانبی: (الف) جریان زیر بحرانی (ب) جریان فوق بحرانی (ج) جریان مرکب (مانگاروکار ۲۰۱۰).

### مقدمه

سرریزهای جانبی از جمله سازه‌های آبی می‌باشند که معمولاً به عنوان سازه‌های اضطراری در تأسیسات هیدرولیکی بزرگ چون سدها، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، انحراف آب اضافی در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری، جداسازی رسوب و کاهش بار بستر و موارد دیگر به کار برده می‌شوند و به علت حساسیت موضوع نیاز به طراحی و بررسی دقیق دارند. سرریزهای جانبی باعث تبدیل جریان در کانال اصلی به جریان متغیر مکانی همراه با کاهش دبی می‌شوند. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، جریان در سرریزهای جانبی ممکن است به صورت جریان زیر بحرانی در کانال‌های بدون شیب و یا کانال‌های با شیب کم و جریان فوق‌بحرانی در کانال‌های با شیب تند یا جریان مرکب که باعث تشکیل پرش هیدرولیکی می‌شود،

تحت شرایط هیدرولیکی خاصی در امتداد سرریز جانبی پرش هیدرولیکی تشکیل می‌شود، اما این پدیده به صورت آزمایشگاهی و خیلی محدود مورد بررسی قرار گرفته است. قبادیان (۱۳۹۰) با شبیه‌سازی آزمایشگاهی جریان عبوری از سرریز جانبی در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی، مدلی کامپیوتری تهیه کرد که قادر بود وقوع پرش هیدرولیکی در محدوده سرریز، موقعیت پرش، دبی خروجی از سرریز و پروفیل جریان را محاسبه کند. او برای ارزیابی و واسنجی مدل از نتایج آزمایشگاهی استفاده کرده و برای حل معادلات حاکم بر جریان در محدوده سرریز جانبی روش رانگ کوتای مرتبه چهارم را به کار برد. محمدی و حسین‌زاده دلیر (۱۳۹۲) به بررسی آزمایشگاهی نیم‌رخ سطح آب و ضریب تخلیه سرریز جانبی در شرایط وقوع پرش هیدرولیکی پرداختند و روش جدید سابرامانیای واسنجی شده را برای تعیین شکل پروفیل سطح آب پرش هیدرولیکی در طول سرریز جانبی ارائه دادند. نتایج نشان داد که پرش هیدرولیکی در جریان متغیر مکانی همراه با نوساناتی در سطح آب بوده و شکل نسبتاً ثابتی دارد. همچنین پس از وقوع پرش امواجی تشکیل می‌شود که به پایین‌دست انتقال می‌یابد. به دلیل محدودیت‌های حاضر در کارهای آزمایشگاهی، بررسی و اندازه‌گیری دقیق بسیاری از پارامترهای موثر برالگوی جریان میسر نیست. لذا استفاده از مدل‌های عددی که قادر به شبیه‌سازی جریان هستند، می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بررسی دقیق جریان داشته و منجر به طراحی اقتصادی و شناخت پارامترهای موثر بر الگوی جریان شود. تاکنون تحقیقات عددی بسیاری در خصوص شبیه‌سازی الگوی جریان در مجاورت سرریزهای جانبی مستطیلی انجام شده است.

کیو (۲۰۰۵) جریان روی سرریز جانبی را به صورت سه‌بعدی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و مدل -سازگی سطح آزاد به روش VOF برای یک مورد خاص که دارای نسبت  $\frac{L}{B}$  برابر  $\frac{1}{4}$  بود، شبیه‌سازی نمود و مدل

دی ماریچی (۱۹۳۴) برای اولین بار با صرف‌نظر از اصطکاک و افت انرژی در طول سرریز و حل معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی، ضریب دبی دی ماریچی را ارائه داد. سابرامانیا و آواستی (۱۹۷۲) با بررسی آزمایشگاهی جریان بر روی سرریزهای جانبی لبه تیز در کانال مستطیلی و شناسایی پارامترهای موثر بر ضریب دبی، عبارتی را برای تغییرات ضریب دبی سرریز جانبی با ارتفاع صفر، بر حسب عدد فرود بالادست کانال اصلی ارائه دادند. ناسامورتی و تامسون (۱۹۷۲) روابطی که توسط سابرامانیا و آواستی ارائه شده بود را مورد بررسی قرار دادند و رابطه جدیدی برای ضریب دبی بدست آوردند. هاگر (۱۹۸۷) با بررسی آزمایشگاهی، فرمول جدیدی برای سرریزهای جانبی با ارتفاع تاج صفر ارائه داد. سینگ و همکاران (۱۹۹۴) نشان دادند که ضریب شدت جریان علاوه بر عدد فرود بالادست به نسبت ارتفاع سرریز به عمق جریان بالادست نیز بستگی دارد. پاتیرانا و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی لبه تیز در حالت جریان فوق بحرانی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی پرداختند. دورگاراو و پیلایی (۲۰۰۸) به مطالعه جریان در سرریزهای جانبی مستطیلی در شرایط جریان فوق بحرانی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که اصل مومنت بسیار مناسب‌تر از اصل انرژی برای بررسی جریان متغیر مکانی در شرایط جریان فوق بحرانی است. امیراگلو و همکاران (۲۰۱۱) با بررسی آزمایشگاهی بیان داشتند که در معادلات ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی لبه تیز باید اثر پارامترهای نسبت طول سرریز به عرض کانال اصلی و ارتفاع بالادست جریان را نیز در نظر گرفت. باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) به بررسی آزمایشگاهی مولفه‌های مختلف سرعت و توزیع دبی موضعی و تغییرات زاویه خروجی جت جریان روی تاج و مجاورت سرریز جانبی مستطیلی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که ناحیه سکون در انتهای سرریز جانبی رخ می‌دهد.

ترازهای مختلف به این نتیجه رسیدند که با کاهش طول سرریز، ناحیه جدایی به سمت پایین دست حرکت می‌کند. بر اساس اطلاعات موجود تاکنون تاثیر عمق پایین دست بر پرش هیدرولیکی تشکیل شده در امتداد سرریز جانبی توسط محققین مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار Flow-3D، الگوی جریان در کانال اصلی و در طول سرریز جانبی در شرایطی که پرش هیدرولیکی تشکیل شود، مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا اعتبارسنجی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی انجام و در ادامه تاثیر عمق جریان پایین دست بر الگوی جریان بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

#### معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان معادله پیوستگی و

مومنتم هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = R_{SOR} \quad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y \quad [3]$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} (uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z \quad [4]$$

در اینجا  $(u, v, w)$  مولفه‌های سرعت،  $(A_x, A_y, A_z)$

مساحت کسری محیط به جریان،  $(G_x, G_y, G_z)$  نیروهای گرانشی و  $(f_x, f_y, f_z)$  شتاب‌های ناشی از لزجت در راستاهای  $(x, y, z)$  می‌باشند.  $P$  فشار و  $\rho$  چگالی سیال،

عددی خود را با نتایج آزمایشگاهی سابرامانیا و آوستی (۱۹۷۲) مورد اعتبارسنجی قرار داد و به این نتیجه دست یافت که محل ناحیه سکون در نزدیکی لبه پایین دست سرریز جانبی می‌باشد. تدین (۲۰۰۹) مدلی سه بعدی با مدل انتقال تنش رینولدز RSM و طرح VOF برای به دست آوردن دبی جریان، پروفیل سطح آزاد و توزیع سرعت در سرریز جانبی استفاده کرد. او پیش بینی مدل خود را با استفاده از نتایج آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۷) در رابطه با دبی جریان و پروفیل سطح آزاد آب و برای توزیع سرعت با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی سابرامانیا و آوستی (۱۹۷۲) اعتبارسنجی کرد. مانگاروکار (۲۰۱۰) به بررسی آزمایشگاهی و عددی سرریز جانبی مستطیلی با ارتفاع هم تراز بستر در کانال های افقی با شیب بستر افقی پرداخت. بررسی‌های آزمایشگاهی برای تعیین توزیع سرعت، ناحیه سکون، ناحیه جدایی و پروفیل سطح آب انجام شد. همچنین سرریز جانبی را به صورت سه بعدی در ANSYS 12 با استفاده از روش VOF و مدل آشفتگی RNG k-ε و با ۲۹۸۵۰۰ سلول مدل سازی کرد. محمودی نیا و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی عددی اثر عدد فرود بر سطح آزاد جریان در مقطع سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز با استفاده از نرم افزار فلونت پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که با افزایش عدد فرود، نقطه ایستایی به سمت بالادست حرکت کرده و ناحیه جدایی به سمت انتهای پایین دست سرریز جانبی حرکت می‌کند. محمودی نیا و همکاران (۲۰۱۴-الف) به بررسی عددی تاثیر ارتفاع تاج بر سطح آزاد در جریان‌های آشفتگی با استفاده از نرم افزار فلونت پرداختند. محمودی نیا و همکاران (۲۰۱۴-ب) به بررسی عددی تاثیر طول سرریز بر سطح آزاد و الگوی جریان پرداختند و با بررسی خطوط جریان در

در کانال اصلی پرش هیدرولیکی رخ می‌دهد، با استفاده از نرم افزار Flow-3D به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و به منظور اعتبارسنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. این آزمایشات در یک کانال مستطیلی به طول ۶ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۵ متر انجام شد. سرریز در فاصله ۲/۷ متری از ابتدای کانال قرار گرفته و طول آن ۰/۸ متر بود. شیب کف این کانال از صفر تا ۰/۰۳ قابل تغییر است. دبی جریان ورودی برابر ۴۰ لیتر بر ثانیه و شرایط جریان در بالادست سرریز جانبی زیر بحرانی است. در مدل عددی میدان محاسباتی شامل کانال اصلی با طول ۶ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۱۵ متر و کانال جانبی با طول ۱ متر، عرض ۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۱۵ متر در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن این کانال جانبی، یکی از شروط مرزی در پایین‌دست تعریف شده و دیگر نیازی به تعریف شرط مرزی در محل سرریز نیست. طول شبکه محاسباتی برابر طول کانال اصلی و عرض آن معادل مجموع عرض کانال اصلی و طول کانال جانبی می‌باشد. برای شبکه بندی میدان جریان در اطراف سرریز جانبی، به علت تغییرات شدید مشخصات جریان در این ناحیه شبکه بندی ریزتری مورد استفاده قرار گرفته است. ابتدا آنالیز حساسیت نتایج مدل عددی نسبت به تعداد سلول‌ها انجام شد تا شبکه‌ای به دست آید که با ریزتر شدن آن تغییری در نتایج حاصل نشود. برای اینکه از محاسبات در زیر ناحیه لزج اجتناب شود، فاصله اولین سلول از کف کانال و جداره های مقطع،  $y_p$ ، با استفاده از رابطه ۹ به نحوی محاسبه شد که مقدار پارامتر بدون بعد  $y^+$  در محدوده ۳۰ قرار گیرد.

$$y^+ = \frac{y_p \times u_*}{\nu} \quad [9]$$

که در آن  $y_p$  فاصله اولین گره از دیواره در جهت عمود بر آن،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی می‌باشند. آزمون مستقل از شبکه، به منظور تعیین شبکه بهینه جهت مدل‌سازی عددی به کار برده

$V_F$  کسری از حجم مرتبط با جریان و  $R_{SOR}$  ترم چشمه می‌باشند. مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG به منظور مدل‌سازی آشفتگی استفاده شده است. دلیل استفاده از این مدل دقت بالا در شبیه‌سازی جریان‌های آشفته با شدت کم و نواحی با برش بالا نسبت به مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد است (سیلیسیان و هارپر ۱۹۸۷). معادلاتی که در این مدل به کار برده می‌شوند به صورت زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \rho k) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho \rho_i k) = \frac{\partial}{\partial X_i}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i}) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad [5]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho \rho_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial X_i}(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad [6]$$

که در آن  $G_k$  نرخ ایجاد انرژی جنبشی و  $R$  چگالی آشفتگی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k}, \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad [7]$$

در این معادلات  $\beta=0.012$  و  $\eta_0=1.38$  می‌باشد. تغییرات پروفیل سطح آب با روش VOF مدل‌سازی شده و معادله انتقال جزء حجم سیال در یک سلول،  $F$ ، به صورت زیر برای تعیین سطح آزاد حل می‌شود. که در آن  $F=1$  معرف حالتی است که سلول پر از آب بوده و  $F=0$ ، حالتی است که سلول پر از هوا می‌باشد.  $F=0.5$  نشان‌دهنده سطح آزاد می‌باشد (هیرت و نیکلسون ۱۹۸۱).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \left( \frac{\partial}{\partial x} (FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y} (FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z} (FwA_z) \right) \right\} [8] = 0$$

#### مدل آزمایشگاهی و میدان محاسباتی

در این مقاله سطح آزاد جریان بر روی سرریز جانبی مستطیلی در شرایطی که در طول سرریز جانبی و

$$APE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right| \quad [۱۱]$$

که در آن‌ها  $R_{(measured)}$  و  $R_{(simulated)}$  به ترتیب مقادیر آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشند. خصوصیات مش استفاده شده در مدل عددی، RMSE و APE مربوط به شبیه‌سازی سطح آزاد با به کارگیری هر مش در جدول ۱ آمده است. با توجه به این که اختلاف مش‌بندی شماره ۳ و ۴ ناچیز است، لذا مش‌بندی شماره ۳ بعنوان مش‌بندی مورد استفاده برای مدل عددی به کار گرفته شد. الگوی شبکه‌بندی در شکل ۲ و تعداد گره‌های مورد استفاده در راستاهای مختلف در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

می‌شود. برای این منظور، تعداد سلول‌های شبکه مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان تغییر داده می‌شود و از حل عددی هر شبکه، خصوصیات جریان بدست می‌آید. بعد از آنالیز حساسیت در خصوص اندازه شبکه، تعداد سلول‌ها طوری تعیین شد که نتایج مدل عددی دیگر نسبت به ریز شدن شبکه حساسیتی نشان ندهد. به منظور بررسی میزان دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف میدان جریان، از دو معیار درصد خطای نسبی متوسط (APE) و خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (R_{(measured)} - R_{(simulated)})^2} \quad [۱۰]$$

جدول ۱- خصوصیات مش‌بندی‌های مختلف در شبیه‌سازی سطح آزاد.

شماره مش بندی	تعداد سلول ها	RMSE	APE
۱	۵۹۸۲۰۰	۳/۳۵	۶/۶۳
۲	۷۲۸۳۲۲	۱/۹۴	۴/۲۴
۳	۹۴۴۶۸۰	۰/۲۷۵	۳/۰۲
۴	۱۲۳۹۵۴۰	۰/۲۶۹	۲/۹۸

جدول ۲- تعداد گره‌های استفاده شده میدان محاسباتی در راستاهای مختلف.

تعداد گره‌ها در راستای Z	تعداد گره‌ها در راستای Y	تعداد گره‌ها در راستای X	محدوده شبکه بندی
۲۲	۷۸	۲۸۳	کانال اصلی
۲۲	۳۵	۹۷	کانال جانبی

### شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل عددی باید طوری انتخاب شوند که قادر باشند شرایط مدل آزمایشگاهی را به خوبی شبیه‌سازی نمایند. به همین منظور در مرز ورودی بالادست کانال اصلی از شرط مرزی سرعت مشخص، در مرز خروجی پایین‌دست کانال اصلی از شرط مرزی

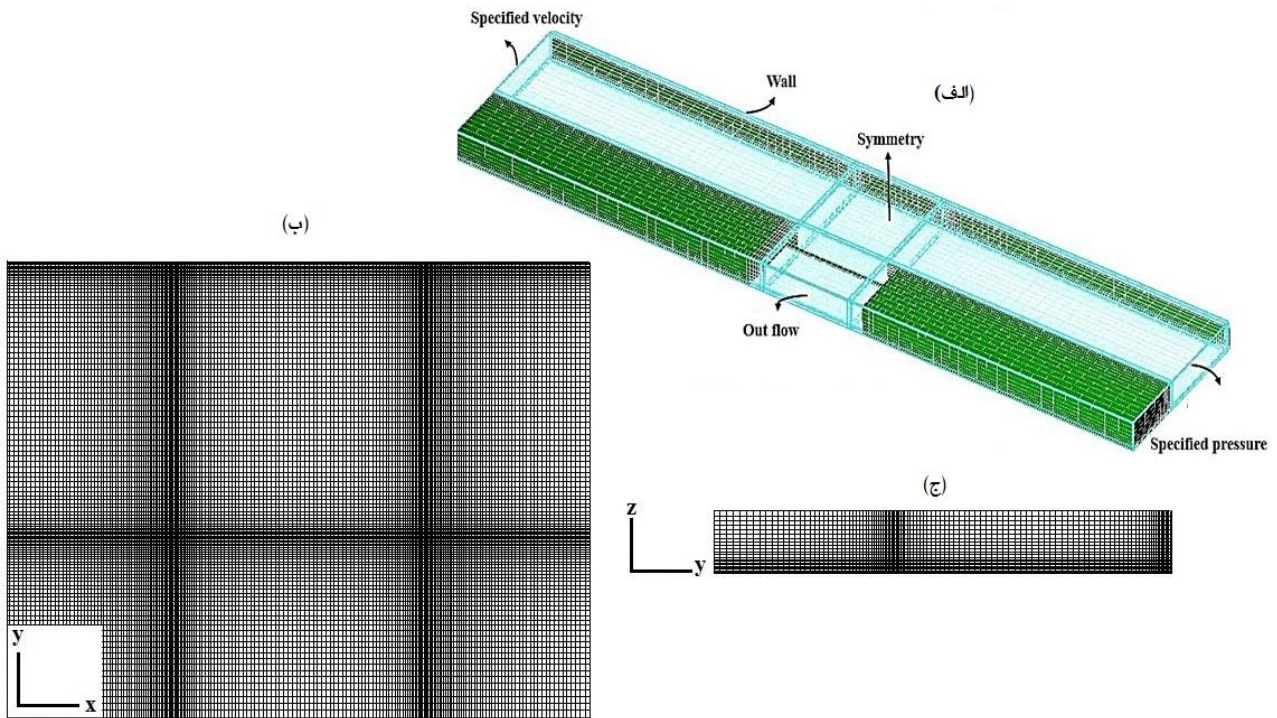
فشار مشخص، در کف و دیواره کانال اصلی شرط مرزی دیواره، در انتهای کانال جانبی در پایین‌دست سرریز جانبی از شرط مرزی جریان خروجی و برای سطح آزاد از شرط مرزی تقارن استفاده شد (شکل ۲- الف). لازم به ذکر است که با در نظر گرفتن کانال جانبی، یکی از شروط مرزی در

منظور بررسی تاثیر عمق پایین دست ( $y_{ds}$ )، عمق‌های بالاتر و پایین‌تر نسبت به عمق پایین دست صحت سنجی شده و برابر ۶/۲۳، ۷/۲۳، ۸/۲۳، ۹/۲۳ و ۱۰/۲۳ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۴ وضعیت سطح آزاد جریان را در اعماق پایین دست متفاوت در محور مرکزی کانال نشان می‌دهد. در این شکل فاصله از ابتدای سرریز ( $x$ ) نسبت به طول سرریز ( $L$ ) بدون بعد شده است. در این شکل ( $x/L=0$ ) ابتدای سرریز و ( $x/L=1$ ) انتهای سرریز را مشخص می‌کند. در اعماق پایین دست ۶/۲۳، ۷/۲۳، ۸/۲۳ سانتی‌متر پرش هیدرولیکی تشکیل شده و با افزایش عمق پایین دست و در اعماق پایین دست برابر ۹/۲۳ و ۱۰/۲۳ سانتی‌متر پرش هیدرولیکی حذف می‌گردد. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، محل شروع پرش هیدرولیکی با کاهش عمق پایین دست به سمت پایین دست سرریز جانبی حرکت می‌کند.  $h$  عمق جریان و  $h_1$  عمق جریان در ورودی کانال اصلی است.

پایین دست تعریف شده و دیگر نیازی به تعریف شرط مرزی در محل سرریز نیست.

### نتایج و بحث

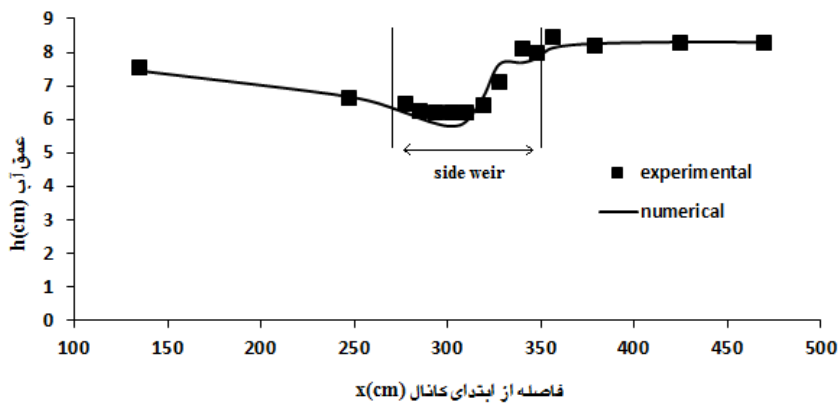
پس از آماده نمودن مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان در امتداد سرریز جانبی لازم بود که از صحت نتایج مدل اطمینان حاصل شود. در شکل ۳ نتایج پروفیل سطح آزاد شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی در خط مرکزی کانال مقایسه شده‌اند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق مناسبی با هم دارند. با توجه به شکل در کانال اصلی پرش هیدرولیکی رخ داده که محل شروع آن در حدود ۳ متری از ورودی کانال است. معیارهای خطای APE و RMSE در شبیه‌سازی سطح آزاد به ترتیب برابر ۲/۰۲ درصد و ۰/۲۷۵ محاسبه شدند که نمایانگر تطابق مناسب بین مدل عددی و آزمایشگاهی می‌باشد. پس از اطمینان از صحت عملکرد مدل می‌توان از این مدل برای به دست آوردن داده‌هایی که برداشت آن‌ها در آزمایشگاه کاری پرهزینه و در برخی مواقع زمان‌بر می‌باشد، بهره برد. به



شکل ۲- الگوی شبکه بندی میدان محاسباتی (الف) نمای سه بعدی و شرایط مرزی، (ب) پلان و (ج) مقطع Y-Z.

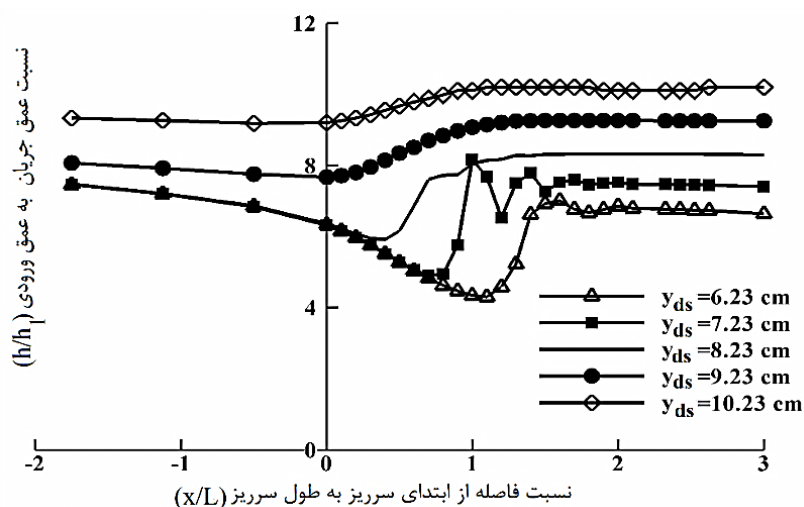
در شکل های ۵ و ۶ به ترتیب توزیع سرعت طولی و قائم در محور مرکزی کانال برای اعماق پایین دست متفاوت مقایسه شده اند. مولفه های سرعت طولی و قائم ( $V_z, V_x$ ) نسبت به سرعت ورودی ( $V_1$ ) بدون بعد شده اند. در شکل ۵ مشاهده می شود که در اعماق پایین دست ( $y_{ds}$ ) ۶/۲۳ تا

۸/۲۳ که پرش تشکیل می شود، سرعت طولی پس از شروع سرریز ابتدا به علت کاهش عمق جریان در نتیجه وقوع پرش هیدرولیکی افزایش یافته و سپس در طول پرش کاهش می یابد تا به مقدار ثابتی برسد.



شکل ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی برای پروفیل سطح آزاد آب در محور مرکزی کانال ( $y_{ds}=8.23$  cm).





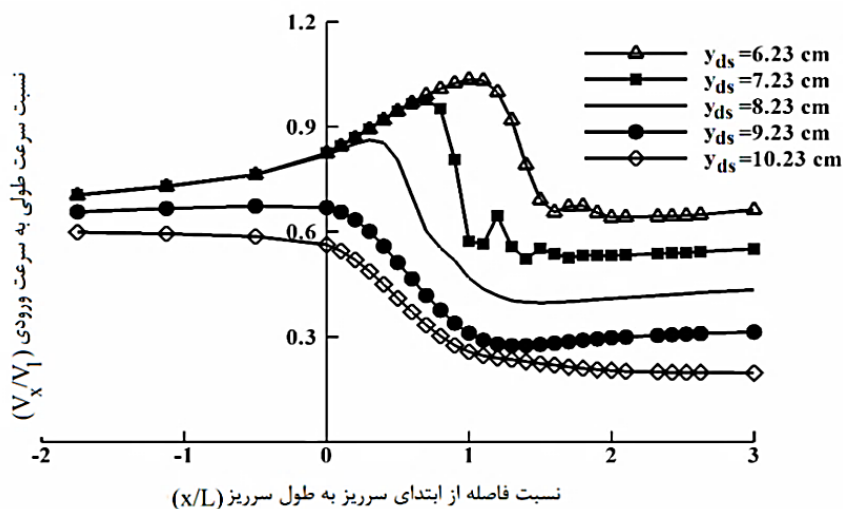
شکل ۴- پروفیل سطح آزاد در محور مرکزی کانال.

انتهای آن کاهش می‌یابد. در این حالت نوساناتی در سرعت قائم مشاهده نمی‌شود.

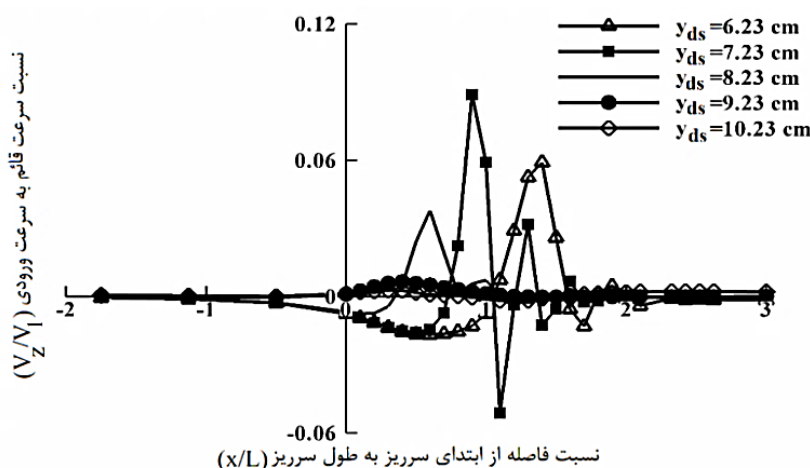
همچنین در شکل ۷ الگوی خطوط جریان در حالت سه بعدی و پلان خطوط جریان برای اعماق پایین دست متفاوت نمایش داده شده است. در عمق پایین دست ۱۰/۲۳ سانتی‌متر که پرش هیدرولیکی حذف می‌شود، خطوط جریان در کل عرض کانال اصلی به سمت سرریز جانبی منحرف شده و در پایین دست سرریز جریان گردابه‌ای تشکیل می‌گردد. به نظر می‌رسد این جریان گردابه‌ای به صورت مانعی در مقابل جریان کانال اصلی عمل نموده و جریان بیشتری را به سمت سرریز جانبی منحرف می‌نماید که باعث می‌شود سهم بیشتری از دبی جریان کانال اصلی از سرریز خارج شود. امیراغلو و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی آزمایشگاهی سرریز جانبی مستطیلی لبه تیز، جداسدگی جریان در کانال اصلی را ناشی از کاهش مومنتم در جهت کانال اصلی بدلیل سرریز شدن جریان جانبی به کانال جانبی دانستند.

باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) با بررسی جریان زیر بحرانی در سرریز جانبی مستطیلی بیان داشتند که حداکثر سرعت طولی جریان در ابتدای سرریز و حداقل سرعت طولی در انتهای سرریز اتفاق می‌افتد. مشاهده می‌شود که در حالت اعماق پایین دست ۹/۲۳ و ۱۰/۲۳ که پرش هیدرولیکی تشکیل نمی‌شود جریان در کل طول سرریز زیر بحرانی است و حداکثر سرعت طولی در ابتدای سرریز و حداقل سرعت طولی در انتهای سرریز رخ می‌دهد. با توجه به شکل ۶ با کاهش عمق پایین دست به دلیل تشکیل پرش هیدرولیکی، نوساناتی در سرعت قائم ایجاد شده و محل سرعت قائم بیشینه به سمت پایین دست جا به جا می‌شود. در حالت عمق پایین دست ۹/۲۳ و ۱۰/۲۳ که پرش هیدرولیکی تشکیل نمی‌شود، مشابه حالتی که باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) بیان داشتند، سرعت قائم تا قبل از شروع سرریز و همچنین بعد از انتهای آن دارای مقادیر بسیار کوچکی بوده اما با شروع سرریز مقدار این سرعت افزایش و با حرکت به سمت





شکل ۵- تغییرات سرعت طولی در اعماق پایین دست متفاوت.

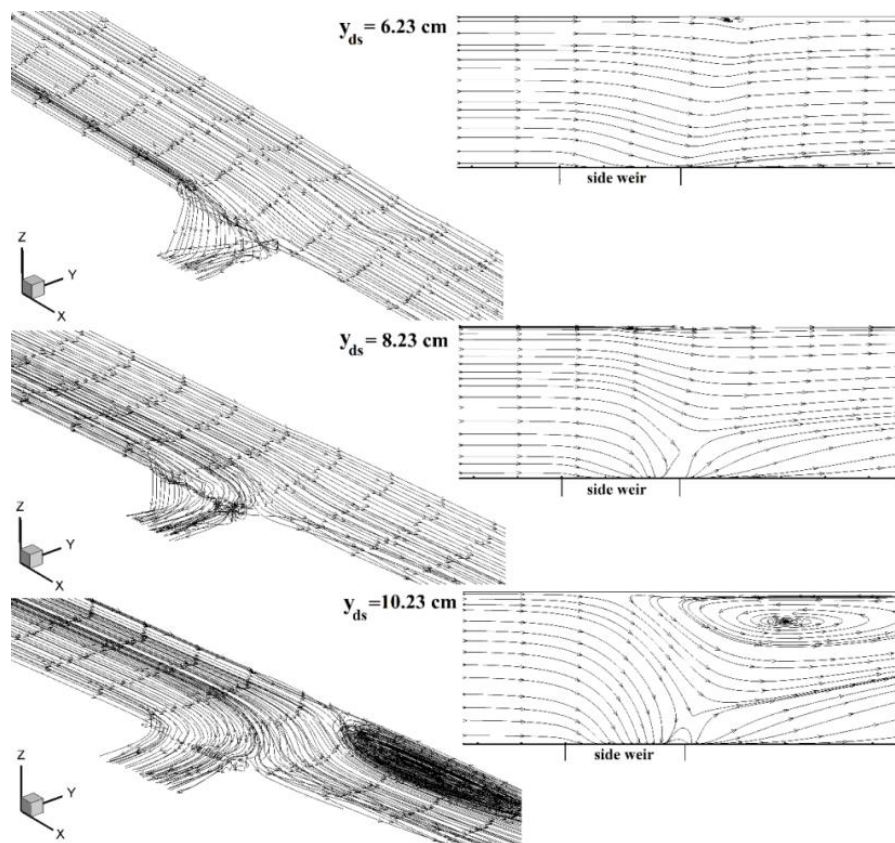


شکل ۶- تغییرات سرعت قائم در اعماق پایین دست متفاوت.

شود. محمودی نیا و همکاران (۲۰۱۲) در بررسی های خود به منفی شدن سرعت در انتهای سرریز جانبی در اثر تشکیل جریان های ثانویه اشاره کردند. با افزایش عمق پایین دست سرعت طولی در ارتفاع بیشتری از جریان منفی شده، بطوریکه در عمق پایین دست ۱۰/۲۳ سرعت کاملاً منفی می شود. همانطور که در شکل ۸- ب مشخص است، در ابتدای سرریز سرعت جانبی تا ارتفاع معینی از روی تاج سرریز افزایش می یابد و سپس با افزایش ارتفاع و نزدیک شدن به سطح آزاد جریان مقدار آن کاهش می یابد. در شکل ۸- ج مشاهده می شود که سرعت قائم در ابتدای سرریز بیشتر دارای مقادیر منفی

در شکل ۸ توزیع سرعت در عمق جریان بر روی سرریز جانبی برای اعماق پایین دست متفاوت و در ابتدای سرریز ( $x=2.7m$ )، وسط سرریز ( $x=3.1m$ ) و انتهای سرریز ( $x=3.5m$ ) نشان داده شده است. در این شکل مولفه های مختلف سرعت و فاصله از کف کانال،  $h$ ، به ترتیب نسبت به سرعت ماکزیمم در همان مقطع،  $V_m$ ، و ارتفاع ماکزیمم جریان روی تاج سرریز در همان مقطع،  $h_m$ ، بی بعد شده است. با توجه به شکل ۸- الف مشاهده می شود که با حرکت به سمت انتهای سرریز توزیع سرعت طولی به علت جریان های ثانویه غیرکنواخت شده و نواحی با سرعت منفی در این ناحیه تشکیل می-

بوده که نشان‌دهنده جهت رو به پایین جریان است. با افزایش عمق پایین دست در

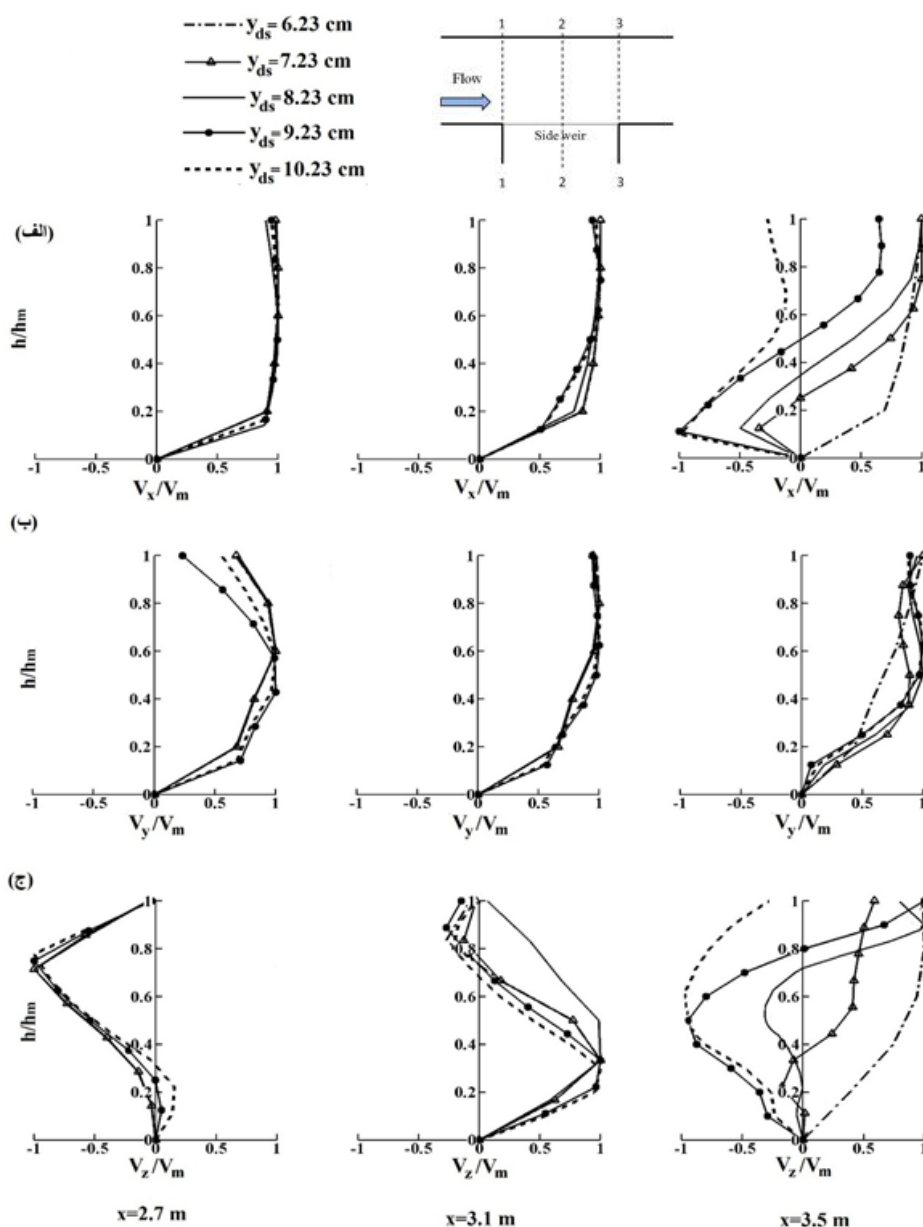


شکل ۷- نمایش سه بعدی و پلان خطوط جریان برای اعماق پایین دست متفاوت.

است. در دو عمق پایین دست ۶/۲۳ و ۸/۲۳ که پرش هیدرولیکی تشکیل می‌شود، کانتورهای سرعت در مقاطع ابتدا و وسط سرریز تقریباً مشابه بوده، اما در انتهای سرریز به علت وقوع پرش هیدرولیکی متفاوت است. بیشینه سرعت طولی با حرکت به سمت پایین دست به تدریج از مجاورت سرریز بسمت مجاورت دیواره مقابل حرکت می‌کند و با افزایش عمق پایین دست مقدار آن کاهش می‌یابد.

مقطع انتهایی سرریز، سرعت قائم به علت جریان برگشتی به طرف سرریز به سمت مقادیر منفی پیش می‌رود که وقوع جریان گردابه‌ای را در پایین دست سرریز در پی دارد.

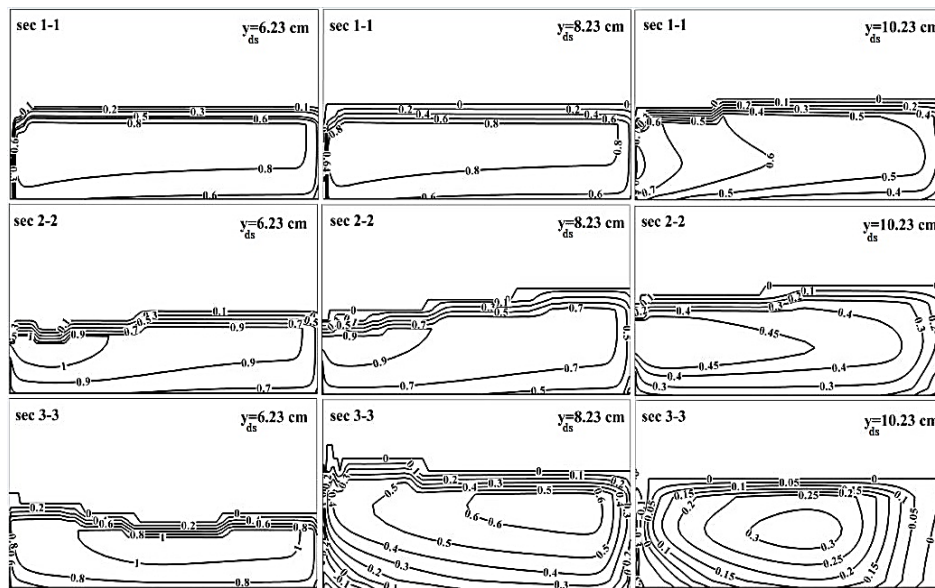
در شکل ۹ کانتورهای سرعت طولی در مقاطع عرضی در ابتدای سرریز (Sec 1-1)، وسط سرریز (Sec 2-2) و انتهای سرریز (Sec 3-3) برای اعماق پایین دست ۶/۲۳، ۸/۲۳ و ۱۰/۲۳ سانتی متر نشان داده شده



شکل ۸- توزیع مؤلفه‌های مختلف سرعت در مقاطع ابتدا، وسط و انتهای سرریز: الف) سرعت طولی، ب) سرعت جانبی و ج) سرعت قائم.

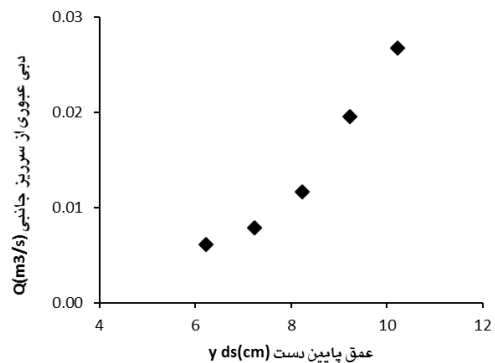
در شکل ۱۰ میزان دبی جریان خروجی از سرریز جانبی برای اعماق پایین دست متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایین دست میزان دبی جریان خروجی از سرریز افزایش می‌یابد. با انتقال از حالت جریان مرکب همراه با پرش هیدرولیکی به جریان زیربحرانی از عمق پایین دست ۸/۲۳ به ۹/۲۳ اختلاف چشمگیر شده و میزان دبی جریان خروجی از سرریز جانبی افزایش چشمگیری پیدا می‌کند.

در شکل ۱۰ میزان دبی جریان خروجی از سرریز جانبی برای اعماق پایین دست متفاوت نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پایین دست میزان دبی جریان خروجی از سرریز افزایش می‌یابد. با انتقال از



شکل ۹- کانتورهای سرعت طولی در مقاطع عرضی ابتدا، وسط و انتهای سرریز برای اعماق پایین دست متفاوت.

حرکت کرده و با افزایش عمق پایین دست، پرش هیدرولیکی حذف می‌گردد. در حالت تشکیل پرش هیدرولیکی، با کاهش عمق پایین دست بیشینه سرعت طولی بیشتر شده و محل وقوع آن به سمت پایین دست حرکت می‌کند. همچنین بیشینه سرعت طولی با حرکت به سمت پایین دست به تدریج از مجاورت سرریز به سمت مجاورت دیواره مقابل حرکت می‌کند و با افزایش عمق پایین دست مقدار آن کاهش می‌یابد. با افزایش عمق پایین دست در مقطع انتهایی سرریز، سرعت قائم به علت جریان برگشتی به طرف سرریز به سمت مقادیر منفی پیش می‌رود که وقوع جریان گردابه‌ای را در پایین دست سرریز در پی دارد.



شکل ۱۰- دبی جریان خروجی از سرریز جانبی برای اعماق پایین دست متفاوت.

### نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله تأثیر عمق پایین دست بر الگو و مشخصات پرش هیدرولیکی تشکیل شده در کانال‌های روباز دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم افزار Flow-3D مورد مطالعه قرار گرفت. روش VOF برای مدل‌سازی تغییرات پروفیل سطح آب و مدل آشفتگی RNG k-ε برای مدل‌سازی آشفتگی به کار برده شد. پس از اعتبارسنجی و اطمینان از صحت عملکرد مدل، تأثیر عمق پایین دست بر مشخصات پرش هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش عمق پایین دست، محل شروع پرش هیدرولیکی به سمت پایین دست سرریز جانبی

- Bagheri S and Heidarpour M, 2012. Characteristics of flow over rectangular sharp-crested side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138(6): 541–547.
- Bagheri S, Kabiri-Samani S and Heidarpour AR, 2014. Discharge coefficient of rectangular sharp-crested side weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 35: 109–115.
- De Marchi G, 1934. Essay on the performance of lateral weirs. *L'Energia Electrica Milan* 11(11): 849–860 (in Italian).
- Durga Rao KHV and Pillai CRS, 2008. Study of flow over side weirs under supercritical conditions. *Water Resource Management* 22: 131–141.
- Emiroglu M, Agaccioglu H and Kaya N, 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(4): 319-330.
- Ghobadian R, 2010. Experimental and numerical simulation of flow passing through a side weir under hydraulic jump condition. Tenth Iranian Hydraulic Conference.
- Hager WH, 1987. Lateral outflow over side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 113(12): 491-504.
- Hirt C and Nichols B, 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* 39: 201-225.
- Mahmodinia S, Javan M and Eghbalzadeh A, 2012. The effects of the upstream Froude number on the free surface flow over the side weirs. *International Conference on Modern Hydraulic Engineering* 28(1): 644–647.
- Mahmodinia S, Javan M and Eghbalzadeh A, 2014. The effects of side-weir height on the free surface turbulent flow. *KSCSE Journal of Civil Engineering* 18(7): 2244-2251.
- Mahmodinia S, Javan M and Eghbalzadeh A, 2014. The flow field and free surface pattern of the submerged side weir with different lengths. *Arabian Journal for Science and Engineering* 39: 4461-4472.
- Mangarulkar K, 2010. Experimental and numerical study of the characteristics of side weir flows. M.sc Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Mohammadi K and Hossein Zadeh Dalir A, 2012. Experimental Investigation of Hydraulic Jump in Side Weirs. *Journal Knowledge of Soil and Water* 23(4): 117-129.
- Nadesamoorthy T and Thamson A, 1972. Discussion of spatially varied flow over side weirs by K Subramanaya and S C Awasthy. *Journal of Hydraulic Engineering* 98(12): 2234–2235.
- Pathirana KPP, Munas MM and Jaleel ALA, 2006. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in supercritical flow. *Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka* 2: 17-24.
- Qu J, 2005. Three dimensional turbulence modeling for free surface flows, PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Sicilian JH and Harper RP, 1987. FLOW-3D: Computational Modeling Power for Scientists and Engineers. Report FSI-87-00-1, Flow Science, Los Alamos, NM.
- Singh R, Manivannan D and Satyanarayana T, 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 120(4): 814–819.
- Subramanya K and Awasthy SC, 1972. Spatially varied flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division* 98(1):1–10.
- Tadayon R, 2009. Modelling curvilinear flows in hydraulic structures, PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.