

## مقایسه عددی الگوی جریان زیربحرانی و فوق بحرانی در کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی

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

### چکیده

در این پژوهش، تغییرات سطح آزاد و آشفتگی میدان جریان در کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، طرح VOF و مدل آشفتگی RNG k- $\epsilon$  شبیه‌سازی عددی می‌شود. در مقاله حاضر، الگوی جریان‌های متغیر مکانی با کاهش دبی در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی برای کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی مقایسه می‌گردد. مدل عددی حاضر، تغییرات سطح آزاد و انرژی مخصوص را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است. در شرایط جریان زیربحرانی، عمق جریان از ابتدای سرریز به سمت انتهای آن با افزایش و در شرایط جریان فوق بحرانی با کاهش همراه است. برای هر دو رژیم زیربحرانی و فوق بحرانی، یک افت سطح آزاد در یک سوم ابتدایی دهانه سرریز و یک پرش سطحی در یک سوم انتهایی طول دهانه به وقوع پیوسته است. در امتداد پرش سطحی مذکور مقدار انرژی جنبشی افزایش و انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، حداکثر سرعت طولی برای رژیم زیربحرانی در یک سوم ابتدایی طول دهانه تاج سرریز و برای جریان فوق بحرانی تقریباً در وسط دهانه سرریز جانبی اتفاق می‌افتد. در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، حداکثر سرعت عرضی در یک سوم انتهایی طول دهانه تاج سرریز جانبی رخ می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** جریان زیربحرانی و فوق بحرانی، سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی، کانال مثلثی.

**ارجاع:** عظیمی ح. و شعبانلو س. ۱۳۹۶. مقایسه عددی الگوی جریان زیربحرانی و فوق بحرانی در کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۶: ۱۹-۲۶.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی، کرمانشاه.  
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه.

\* نویسنده مسئول: [saeid.shabanlou@gmail.com](mailto:saeid.shabanlou@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۳۰

## مقدمه

سرریزهای جانبی، برای اهدافی همچون کنترل سطح جریان و هدایت آب‌های اضافی در پروژه‌های کنترل سیلاب، شبکه‌های آبیاری و زهکشی، سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری و سایر طرح‌های زیست‌محیطی مورد استفاده مهندسين علم هیدرولیک قرار می‌گیرند. اویماز (۱۹۹۲) یک روش تحلیلی برای محاسبه پروفیل سطح آزاد و دبی عبوری از روی سرریزهای جانبی واقع بر دیواره اصلی کانال‌های مثلثی ارائه کرد. روش تحلیلی این محقق بر پایه اصول انرژی و یک روش تحلیلی تئوریه شده است که برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی استفاده می‌شود. قدسیان (۲۰۰۳) به مطالعه آزمایشگاهی جریان فوق‌بحرانی گذرنده از روی سرریز جانبی واقع در یک کانال مستطیلی پرداخته است. وی ضریب دبی پایه‌ای سرریز جانبی در شرایط فوق‌بحرانی را تابعی از نسبت هد روی سرریز به ارتفاع تاج سرریز و عدد فرود معرفی کرده است. وطن‌خواه (۲۰۱۲) با استفاده از اصل انرژی مخصوص و روش انتگرال‌گیری مستقیم، پروفیل سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی را برای هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی پیش‌بینی کرد. از طرفی صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های آزمایشگاهی از مهم‌ترین مزایای شبیه‌سازی‌های عددی محسوب می‌شود. کیو (۲۰۰۵) با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  و روش VOF تغییرات سه بعدی جریان عبوری از روی سرریز جانبی را مدل‌سازی کرد. تدین (۲۰۰۹) به کمک نتایج آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲) و سوبرامانیا و اواستی (۱۹۷۲) یک مدل عددی را با استفاده از مدل آشفتگی RSM و روش VOF توسعه داد. آیدین (۲۰۱۲) به کمک طرح VOF پروفیل سطح آزاد جریان واقع در یک کانال مستطیلی دارای سرریز جانبی مثلثی کنگره‌ای را برای اعداد فرود مختلف پیش‌بینی کرد. آیدین و امیرقلو (۲۰۱۳) توسط طرح VOF و مدل‌های آشفتگی مختلف، ظرفیت آبگذری و جریان عبوری از روی سرریز جانبی کنگره‌ای را مدل‌سازی عددی کردند. با مرور مطالعات گذشتگان بر روی کانال‌های مختلف دارای سرریز جانبی، مشاهده می‌شود که مطالعه کافی بر روی الگوی جریان و تغییرات سطح آزاد جریان در کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی در هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی انجام نشده است؛ بنابراین در این مطالعه، آشفتگی میدان جریان و

تغییرات سطح آزاد در کانال‌های مثلثی دارای سرریز جانبی در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG و روش جزء حجمی سیال (VOF) شبیه‌سازی عددی می‌شود.

## مواد و روش‌ها

## معادلات حاکم

برای حل عددی میدان جریان، از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس استفاده می‌شود:

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

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

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

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

در معادلات (۱) تا (۴)  $(u, v, w)$  برابر مؤلفه‌های سرعت، مساحت جزئی از محیط به جریان<sup>۱</sup>  $(A_x, A_y, A_z)$  نیروهای گرانشی و  $(f_x, f_y, f_z)$  شتاب‌های ناشی از لزجت در راستاهای  $(X, Y, Z)$  است. پارامترهای  $t, \rho, R_{SOR}, p$  و  $V_F$  به ترتیب برابر زمان، چگالی سیال، ترم چشمه، فشار و حجم جزئی از محیط به جریان<sup>۲</sup> است. در مدل‌سازی عددی آشفتگی میدان جریان با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG شبیه‌سازی می‌شود. تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از الگوی VOF مدل‌سازی شده است. در روش VOF معادله پیوستگی (۵) برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آزاد میدان محاسباتی حل می‌شود.

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

1- Fractional areas open to flow

2- Fractional volume open to flow

است. کلیه جداره‌های جامد که شامل دیواره‌های جانبی و کف کانال اصلی و مخزن است، به‌عنوان شرط مرزی Wall تعریف شده است. کل لایه فوقانی فاز هوا به‌عنوان شرط مرزی تقارن در نظر گرفته شده است.

### مدل آزمایشگاهی

در مطالعه عددی حاضر برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی عددی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۲) استفاده شده است. تجهیزات آزمایشگاهی متشکل از یک کانال مثلی است که یک سرریز جانبی لبه تیز روی دیواره اصلی آن نصب شده است. طرح کلی کانال مثلی دارای سرریز جانبی برای هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل،  $\alpha$  زاویه رأس کف کانال مثلی است که بر اساس رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{2}} Z^2 \sqrt{g(E - Z)} \quad (8)$$

در این رابطه،  $Q$  دبی جریان در داخل کانال مثلی،  $Z$  عمق جریان در داخل کانال اصلی،  $g$  شتاب گرانش و  $E$  انرژی مخصوص جریان در داخل کانال اصلی است. در جدول ۱ مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۲) مرتب شده است. در این جدول  $Q_1$  دبی ورودی کانال اصلی در مقطع ۱،  $Z_1$  عمق جریان در بالادست سرریز جانبی،  $Z_2$  عمق جریان در پایین‌دست سرریز جانبی،  $P$  ارتفاع تاج سرریز جانبی،  $L$  طول سرریز جانبی،  $S_0$  شیب کف کانال اصلی می‌باشند.

در اینجا  $F$  جزء حجمی سیال در یک سلول محاسباتی است. چنان‌چه یک سلول محاسباتی مشخص پر از آب باشد،  $F = 1$  خواهد شد. اگر  $F = 0$  باشد، سلول مورد نظر خالی است و در صورتی که  $0 < F < 1$  باشد، سلول دارای هر دو فاز آب و هوا است.

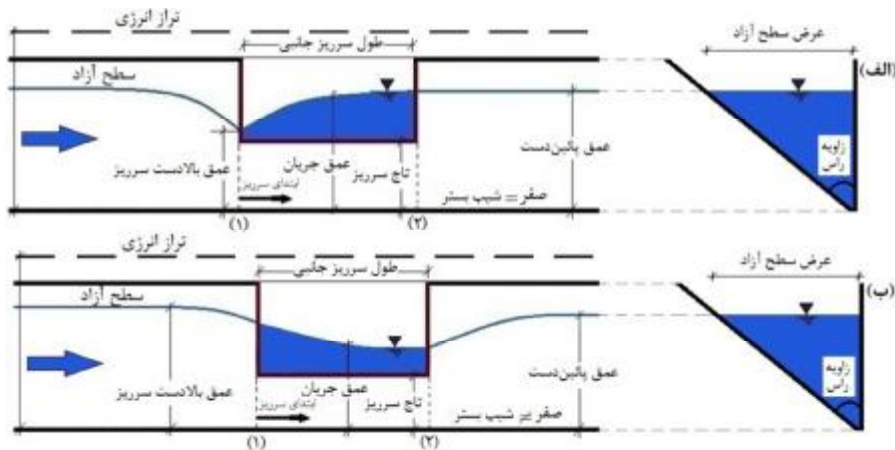
### شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمال شده بر مدل عددی به شکلی در نظر گرفته شده است که بر شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۲) منطبق باشد. بنابراین با توجه به مقادیر دبی و عمق ورودی جریان از شرایط مرزی دبی جریان مشخص در مقطع ورودی کانال اصلی استفاده شده است. در شرایط مرزی ورودی، پارامترهای آشفتگی که شامل انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف آشفتگی است، با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$k_t = \frac{3}{2} (n_t \times T_{len})^2 \quad (6)$$

$$e_t = C_u \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{k_t^{\frac{3}{2}}}{T_{len}} \quad (7)$$

در اینجا  $n_t$  لزجت سینماتیکی آشفتگی،  $T_{len}$  مقیاس طول آشفتگی که در کانال‌های باز برابر ۷٪ قطر هیدرولیکی در نظر گرفته می‌شود و  $C_u$  یک مقدار ثابت است که در مدل آشفتگی RNG k- $\epsilon$  برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود [راهنمای کاربر نرم‌افزار FLOW-3D]. در مقطع خروجی کانال مثلی از مقادیر معلوم فشار مشخص و عمق جریان استفاده شده است. جریان عبوری از روی سرریز جانبی به داخل یک مخزن هدایت می‌شود که در پایین‌دست این مخزن شرایط مرزی خروجی تعریف شده



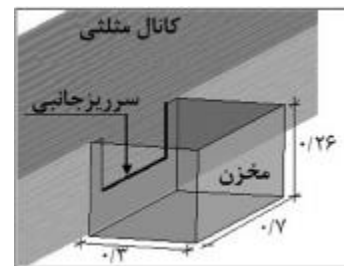
شکل ۱- طرح شماتیک کانال مثلی دارای سرریز جانبی رژیم جریان (الف) زیربحرانی (ب) فوق‌بحرانی [سرریز دروجه قائم قرار دارد]

جدول ۱- مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌های آزمایشگاهی

$Q_1 (m^3/s)$	$E (m)$	$Z_1 (m)$	$Z_2 (m)$	$P (m)$	$L (m)$	$S_0$	رژیم جریان
۰/۰۲۵	۰/۱۶۶۱	۰/۱۴۸۲	۰/۱۶۱۵	۰/۱	۰/۶	۰	زیر بحرانی
۰/۰۵	۰/۲۱۱۶	۰/۱۲۴۱	۰/۰۹۱۳	۰/۰۶	۰/۶	۰/۰۰۴	فوق‌بحرانی

## مدل عددی

در مطالعه عددی حاضر، یک کانال مثلثی به طول ۱۰/۵ متر و ارتفاع ۰/۲۶ متر تعریف و سرریز جانبی در میانه کانال اصلی و بر روی دیواره اصلی نصب شده است. با توجه به اینکه در مدل آزمایشگاهی ابعاد و مشخصات مخزن متصل به سرریز جانبی تعیین نشده بود؛ بنابراین جریان عبوری از روی سرریز جانبی به داخل یک مخزن به ابعاد ۰/۷، ۰/۳ و ۰/۲۶ متر ریخته می‌شود. به منظور ریزش کامل جریان عبوری از روی سرریز جانبی و در محل اتصال کانال مثلثی دارای سرریز جانبی، عرض مخزن بزرگ‌تر از طول سرریز جانبی در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نمایی از ابعاد مخزن و سرریز جانبی متصل به کانال مثلثی قابل مشاهده است.



شکل ۲- نمایی از ابعاد مخزن و سرریز جانبی متصل به کانال مثلثی

شبیه‌سازی پروفیل سطح آزاد جریان در شرایط زیربحرانی مرتب شده است. جهت تخمین دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف جریان، مقادیر درصد خطای ریشه میانگین مربعات نسبی (RMSE) و درصد خطای متوسط نسبی (APE) با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) محاسبه شده است. در این روابط  $R_{(measured)}$  و  $R_{(simulated)}$  به ترتیب معادل نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشند:

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

$$APE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{R_{(measured)} - R_{(simulated)}}{R_{(measured)}} \right| \quad (11)$$

جدول ۲- مشخصات مش‌بندی‌ها، RMSE و APE جریان زیربحرانی برای پروفیل سطح آزاد شبیه‌سازی شده

مش‌بندی	تعداد سلول‌ها	RMSE (%)	APE (%)
۱	۳۳۱۸۷۵	۲۴/۵۳	۲۱/۱۷
۲	۵۲۰۱۰۰	۱۹/۱۷	۱۷/۹۲
۳	۹۹۰۷۴۰	۱۴/۴۸	۱۳/۷۳
۴	۱۶۲۱۰۰۰	۱۱/۴۶	۱۰/۸۰
۵	۱۹۵۱۱۸۰	۱۱/۲۳	۱۰/۵۷

همان‌گونه که از جدول ۲ مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج شبکه‌بندی ۴ و ۵ قابل صرف‌نظر کردن و شبکه‌بندی ۴ برای انفصال میدان محاسباتی انتخاب شده است. بنابراین کانال مثلثی در راستاهای X، Y و Z به ترتیب به وسیله ۲۲۲، ۱۳۵ و ۵۰ المان و مخزن متصل به سرریز جانبی در راستاهای X، Y و Z با ۷۰، ۳۵ و ۵۰ المان مستطیلی مش‌بندی شده است. شبکه‌بندی استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است.

فاصله اولین سلول از دیواره‌ها طوری انتخاب شد که از محاسبات در زیر ناحیه لزوج اجتناب شود. به همین منظور اولین گره در محلی قرار داده شد که پارامتر بدون بعد  $y^+$  که بر اساس رابطه (۹) تعریف می‌شود، بزرگ‌تر از ۳۰ باشد.

$$y^+ = \frac{y_1 u_*}{\nu} \quad (9)$$

در اینجا  $y_1$  فاصله اولین گره از دیواره در جهت عمود بر آن،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال هستند. کل میدان محاسباتی توسط یک بلوک مش غیریکنوخت منفصل شده است. در جدول ۲ مشخصات یک نمونه مستقل از شبکه‌بندی‌های مورد استفاده در

مقادیر درصد خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) و خطای متوسط نسبی ( $APE$ ) برای پروفیل‌های طولی سطح آزاد جریان در هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار خطای حداکثر، حداقل و متوسط برای مدل زیر بحرانی به ترتیب برابر  $۱۴/۳۵$ ،  $۷/۲۵$  و  $۱۰/۸$  محاسبه شده است. همچنین برای مدل فوق‌بحرانی خطای متوسط برابر  $۶/۸۷$ ، خطای حداکثر مساوی  $۹/۷۱$  و خطای حداقل نیز برابر  $۴/۰۳$  به دست آمده است.

جدول ۳- مقادیر درصد خطای ریشه میانگین مربعات ( $RMSE$ ) و خطای متوسط نسبی پروفیل طولی سطح آزاد در هر دو رژیم جریان

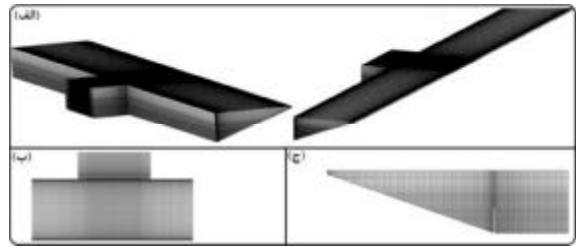
رژیم جریان	$(APE)\%$	$(RMSE)\%$
زیربحرانی	۱۰/۸	۱۱/۴۶
فوق‌بحرانی	۶/۸۷	۷/۹۰

اویماز (۱۹۹۲) مقدار انرژی مخصوص ( $E$ ) را داخل کانال مثلثی دارای سرریز جانبی در هر دو شرایط جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی اندازه‌گیری کرده است. در جدول ۴ مقادیر انرژی مخصوص آزمایشگاهی ( $E_{Exp}$ ) و پیش‌بینی شده توسط مدل عددی ( $E_{Num}$ ) و درصد خطای نسبی ( $REP$ ) مربوط به آنها قابل مشاهده است. بر اساس این جدول مدل عددی، مقدار انرژی مخصوص را نیز با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است.

جدول ۴- مقایسه انرژی مخصوص آزمایشگاهی و عددی

رژیم جریان	$\%REP = 100 \cdot \frac{E_{Exp} - E_{Num}}{E_{Exp}}$	$E_{Num} (m)$	$E_{Exp} (m)$
زیربحرانی	۵/۷۸	۰/۱۵۶۵	۰/۱۶۶۱
فوق‌بحرانی	۷/۸۹	۰/۲۲۸۳	۰/۲۱۱۶

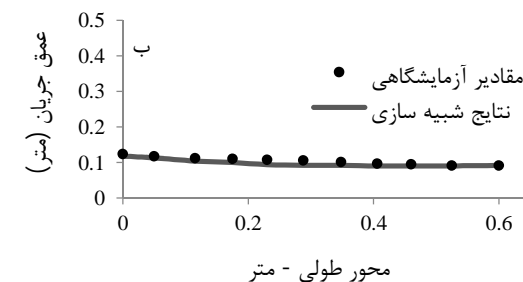
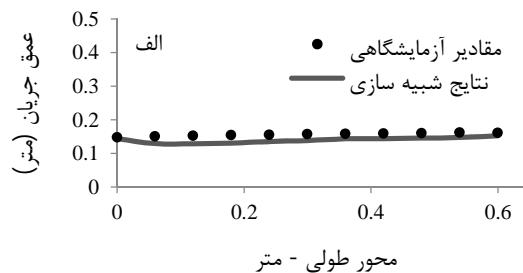
در ادامه، تغییرات سطح آزاد جریان در داخل کانال اصلی و در مجاورت تاج سرریز جانبی واقع بر کانال مثلثی برای هر دو رژیم جریان زیر و فوق‌بحرانی بررسی می‌شود. به همین منظور پروفیل‌های طولی سطح آزاد شبیه‌سازی شده در مجاورت تاج سرریز جانبی در شکل ۵ ارائه شده است. برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی به علت آثار ورودی سرریز جانبی یک افت ناگهانی در یک سوم ابتدایی بالادست سرریز جانبی به وقوع پیوسته است. برای شرایط جریان زیربحرانی، عمق جریان بعد از افت



شکل ۳- شبکه‌بندی مورد استفاده در انفصال میدان محاسباتی (الف) نمای سه‌بعدی (ب) پلان (ج) مقطع عرضی

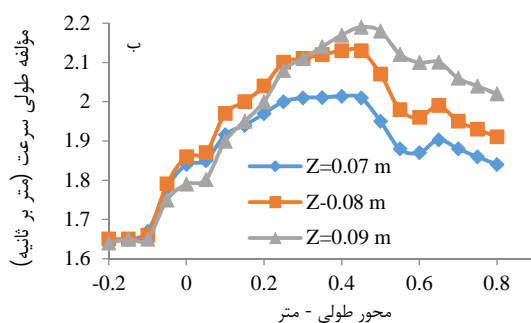
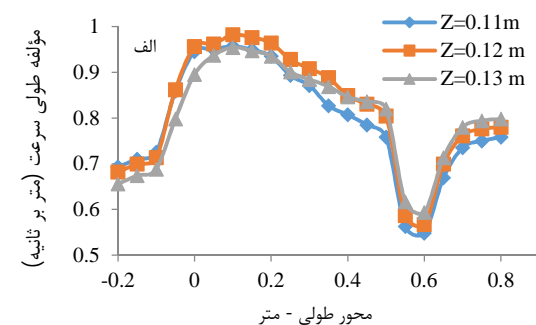
## نتایج و بحث

با توجه به اینکه نتایج شبیه‌سازی حاضر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اویماز (۱۹۹۲) اعتبارسنجی شده است؛ بنابراین در شکل ۴ مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی تغییرات سطح آزاد جریان برای هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدل عددی برای هر دو رژیم جریان، تغییرات سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده و در شرایط جریان زیربحرانی سطح آزاد جریان در امتداد سرریز جانبی از ابتدای بالادست سرریز به سمت انتهای پائین‌دست آن افزایش عمق داده است (شکل ۴- الف). این درحالی است که در شرایط جریان فوق‌بحرانی، سطح آزاد جریان از ابتدای بالادست به سمت انتهای پائین‌دست سرریز جانبی کاهش عمق می‌دهد (شکل ۴- ب).



شکل ۴- مقایسه سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی در شرایط جریان (الف) زیربحرانی (ب) فوق‌بحرانی

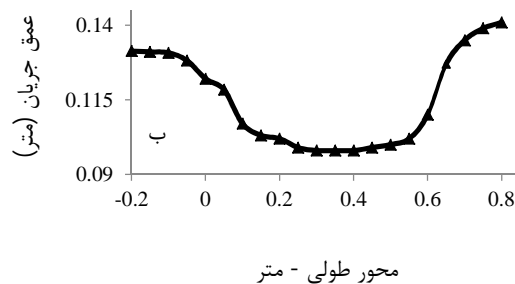
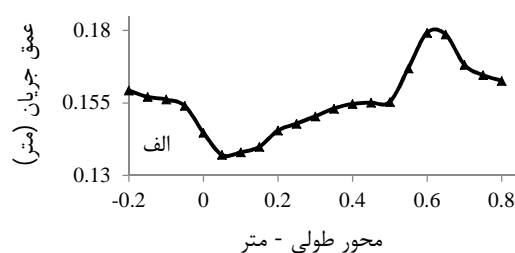
با خارج شدن جریان از صفحه سرریز جانبی مؤلفه طولی سرعت جریان افزایش می‌یابد (شکل ۶- الف). در شرایط جریان فوق‌بحرانی با وارد شدن جریان به صفحه سرریز جانبی، مؤلفه طولی سرعت جریان افزایش می‌یابد و با خارج شدن جریان از صفحه سرریز جانبی مقدار سرعت مذکور با کاهش همراه است. افزایش سرعت طولی در رژیم فوق‌بحرانی برای کلیه ترازها، تقریباً تا وسط دهانه تاج سرریز جانبی وجود دارد سپس مقدار سرعت مذکور با کاهش روبرو می‌شود (شکل ۶- ب).



شکل ۶- توزیع سرعت طولی شبیه‌سازی شده برای ترازهای مختلف در مجاورت تاج سرریز جانبی رژیم (الف) زیربحرانی (ب) فوق‌بحرانی

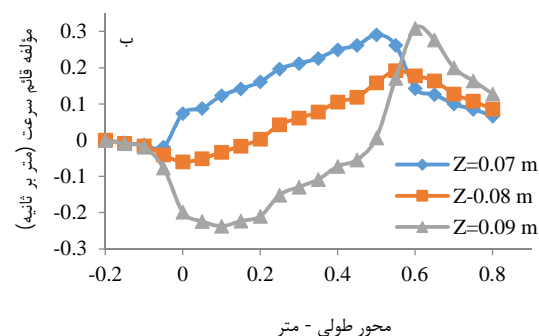
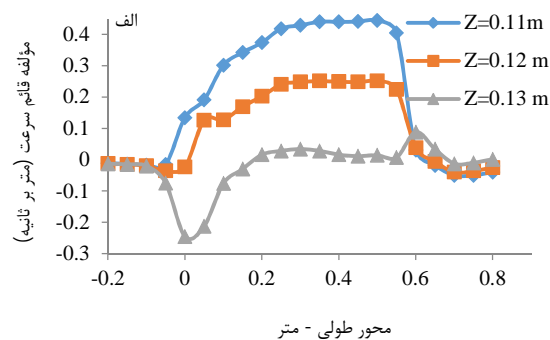
مؤلفه جانبی سرعت ( $V$ ) نشان دهنده ویژگی‌های جریان انحرافی عبوری از روی سرریز جانبی می‌باشد. شکل ۷ توزیع سرعت عرضی شبیه‌سازی شده برای ترازهای مختلف در مجاورت تاج سرریز جانبی در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، مقدار سرعت عرضی در قبل و بعد از سرریز جانبی برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ناچیز است. در هر دو رژیم جریان، با وارد شدن جریان به صفحه سرریز جانبی مقدار سرعت عرضی جریان افزایش و این افزایش تا یک سوم انتهایی دهانه سرریز جانبی ادامه می‌یابد. به گونه‌ای که حداکثر سرعت عرضی در یک سوم

مذکور به سرعت افزایش می‌یابد، این در حالی است که در رژیم جریان فوق‌بحرانی عمق آب به تدریج کاهش می‌یابد؛ به گونه‌ای که در یک سوم انتهایی طول دهانه سرریز جانبی به کمترین مقدار خود می‌رسد. در هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، یک پرش سطحی در یک سوم انتهایی طول دهانه سرریز جانبی اتفاق می‌افتد؛ به گونه‌ای که در امتداد این پرش سطحی، انرژی جنبشی افزایش و انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد. برای هر دو رژیم جریان، در انتهای پرش سطحی یک نقطه ایستایی با حداکثر تراز ارتفاعی آب به وقوع می‌پیوندد.



شکل ۵- تغییرات سطح آزاد جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی جریان (الف) زیربحرانی (ب) فوق‌بحرانی

در شکل ۶ توزیع سرعت طولی شبیه‌سازی شده در ترازهای مختلف مجاور تاج سرریز جانبی برای هر دو رژیم جریان زیر و فوق‌بحرانی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مربوط به هر رژیم جریان برای ترازهای بالاتر از تاج سرریز و به فاصله یک سانتی‌متری اندازه‌گیری شده‌اند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، در شرایط جریان زیربحرانی مشابه نتایج باقری و حیدرپور (۲۰۱۲)، حداکثر سرعت طولی در بالادست سرریز جانبی پیش‌بینی شده است. با توجه به شکل ۶، برای کلیه ترازها با وارد شدن جریان به صفحه سرریز جانبی، حداکثر سرعت طولی در یک سوم ابتدایی دهانه تاج سرریز اتفاق می‌افتد سپس با پیشروی به سمت انتهای پایین‌دست سرریز جانبی، مقدار سرعت طولی کاهش می‌یابد. حداقل سرعت طولی در یک سوم انتهایی دهانه تاج سرریز جانبی به وقوع می‌پیوندد و

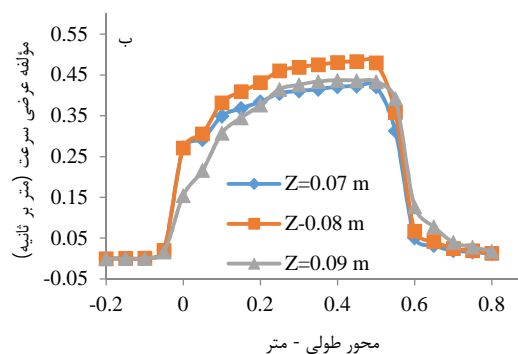
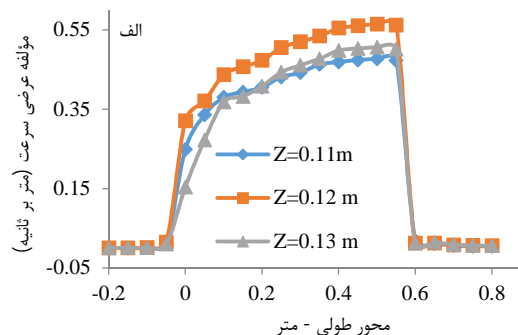


شکل ۸- توزیع سرعت قائم شبیه‌سازی شده برای ترازهای مختلف در مجاورت تاج سرریز جانبی رژیم (الف) زیربحرانی (ب) فوق‌بحرانی

### نتیجه‌گیری

- برای هر دو رژیم زیربحرانی و فوق‌بحرانی، یک افت سطح آزاد در یک‌سوم ابتدایی دهانه سرریز و یک پرش سطحی در یک‌سوم انتهایی طول دهانه به وقوع پیوسته است.
- برای هر دو رژیم جریان، در انتهای پرش سطحی یک نقطه ایستایی با حداکثر تراز ارتفاعی آب به وقوع می‌پیوندد.
- در شرایط زیربحرانی، حداکثر سرعت طولی در یک سوم ابتدایی دهانه تاج سرریز اتفاق می‌افتد، سپس با پیشروی به سمت انتهای پایین‌دست سرریز جانبی، مقدار سرعت طولی کاهش می‌یابد.
- در رژیم جریان فوق‌بحرانی با وارد شدن جریان به صفحه سرریز جانبی، مؤلفه طولی سرعت جریان افزایش و با خارج شدن جریان از صفحه سرریز مقدار سرعت مذکور کاهش می‌یابد.
- مقدار سرعت عرضی در قبل و بعد از سرریز جانبی برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی ناچیز است. در هر دو رژیم جریان، با وارد شدن

انتهایی طول دهانه تاج سرریز به وقوع می‌پیوندد. سپس به خارج شدن جریان از صفحه سرریز جانبی مقدار سرعت عرضی به صفر نزدیک می‌شود.



شکل ۷- توزیع سرعت عرضی شبیه‌سازی شده برای ترازهای مختلف در مجاورت تاج سرریز جانبی رژیم (الف) زیربحرانی (ب) فوق‌بحرانی

توزیع سرعت قائم ( $W$ ) شبیه‌سازی شده برای ترازهای مختلف در مجاورت تاج سرریز جانبی برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشابه الگوی تغییرات مؤلفه عرضی سرعت در هر دو رژیم جریان، مقدار سرعت قائم در قبل از سرریز جانبی بسیار کوچک پیش‌بینی شده است. سرعت قائم جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی با پیشروی روی دهانه تاج افزایش می‌یابد. برای هر دو رژیم جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی، در کلیه ترازهای ارتفاعی حداکثر مؤلفه قائم سرعت در یک سوم انتهایی طول دهانه سرریز جانبی اتفاق افتاده است. همچنین با خارج شدن جریان از صفحه سرریز جانبی، مقدار سرعت مذکور دوباره کاهش می‌یابد.

جریان به صفحه سرریز جانبی مقدار سرعت عرضی جریان افزایش و این افزایش تا یک‌سوم انتهایی دهانه سرریز جانبی ادامه می‌یابد.

- مقدار سرعت قائم در قبل از سرریز جانبی بسیار کوچک پیش بینی شده است. سرعت قائم جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی با پیشروی روی دهانه تاج افزایش و با خارج شدن جریان از صفحه سرریز جانبی، مقدار سرعت مذکور مجدداً کاهش می‌یابد.

### منابع

1. Aydin M. C. 2012. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. *Advances in Engineering Software*. 45(1): 159-166.
2. Aydin M. C. and Emiroglu M. E. 2013. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. *Flow Measurement and Instrumentation*. 29(1): 1-8.
3. 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.
4. Ghodsian M. 2003. Supercritical Flow over a Rectangular Side Weir. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 30(3): 596-600.
5. Hager W. H. 1982. *Die Hydraulik von Verteilkanälen. Theorie der Verteilkanäle*. VAW d. ETH.
6. Hirt C. W. 2011. *FLOW-3D user manual version 10*. Flow Science.
7. Qu J. 2005. Three dimensional turbulence modeling for free surface flows. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada. 205 p.
8. Subramanya K. and Awasthy S. C. 1972. Spatially varied flow over side-weirs. *Journal of the Hydraulics Division*. 98(1): 1-10.
9. Tadayon R. 2009. Modeling Curvilinear Flows in Hydraulic Structures. PhD thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada. 111 p.
10. Uyumaz A. 1992. Side weir in triangular channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 118(6): 965-970.
11. Vatankhah A. R. 2012. Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. *Flow Measurement and Instrumentation*. 23(1): 76-79.