

## شبیه‌سازی عددی الگوی جریان روی سرریزهای جانبی لبه تیز و لبه پهن

مجید حیدری<sup>۱\*</sup>، سعید شعبانلو<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۳۰

۱- استادیار سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲- دانشیار منابع آب، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه

مسئول مکاتبات، پست الکترونیک: mheydari@basu.ac.ir

### چکیده

سرریزهای جانبی بر روی دیواره جانبی کانال‌های اصلی تعبیه می‌شوند. با رسیدن جریان به سرریز جانبی، جریان اضافی از روی تاج سرریز جانبی ریزش کرده و به سمت کانال جانبی هدایت می‌شود. جریان درون کانال‌های دارای سرریز جانبی جزء جریان‌های متغیر مکانی محسوب می‌شود. در این مطالعه، جریان سه بعدی درون کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و  $k-\varepsilon$  RNG استفاده شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی، دقت مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  RNG بیشتر از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد بود. همچنین برای تخمین تغییرات سطح آزاد جریان از روش حجم سیال استفاده شد. در این مطالعه، سرعت با دقت قابل قبولی پیش‌بینی شد. به عبارت دیگر، مقادیر میانگین قدر مطلق خطای نسبی ( $MARE$ ) برای مولفه‌های طولی، ضخامت و قائم به ترتیب برابر  $۰/۴۸۰$ ،  $۰/۴۶۸$  و  $۳/۵۱۹$  درصد محاسبه شد. سپس تاثیر عرض سرریزهای جانبی لبه تیز و لبه پهن بر روی مشخصات میدان جریان درون کانال اصلی در امتداد سرریز جانبی برای سه مدل مختلف با ضخامت‌های  $۰/۰۱$ ،  $۰/۰۵$  و  $۰/۱۵$  متر مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حل عددی، با افزایش مقدار ضخامت تاج سرریز جانبی، مقدار تنش برشی در مجاورت تاج سرریز جانبی به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، سرریز جانبی لبه تیز و لبه پهن، شبیه‌سازی عددی، کانال مستطیلی

## Numerical Simulation of the Flow Pattern on Sharp and Broad Crested Side Weirs

M Heydari<sup>1</sup>, S Shabanlou<sup>2</sup>

Received: November 14, 2018 Accepted: May 19, 2020

<sup>1</sup>Assit. Prof., Department of Science and Water Engineering, BuAli Sina University, Hamadan, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Prof., Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

\*Corresponding Author, Email: mheydari@basu.ac.ir

### Abstract

Side weirs are installed on the side wall of main channels. By reaching the flow to the side weir, the exceeded flow falls from the side weir crest and is directs to the side channel. The flow within the channels with side weirs is considered as spatially varied flow. In this study, the three-dimensional flow in a rectangular channel with side weir was simulated by the FLOW-3D software. For simulating the turbulence of the flow, the standard and RNG turbulence models were used. According to the modeling results, the accuracy of the RNG turbulence model was higher than that of the standard model. Furthermore, the Volume of Fluid (VOF) model was used for estimating the variations of the flow free surface. In the study, the velocity was predicted with an acceptable accuracy. Also, the *MARE* values for the longitudinal, transverse and vertical components were estimated 0.480, 0.468 and 3.519 percent, respectively. Then, the effects of sharp and broad crested weirs on the characteristics of the flow field in the main channel along the side weir for three different models with width of 0.01, 0.05 and 0.15 m were investigated. According to the numerical modeling results, by increasing the width of the side weir crest the shear stress value in the vicinity of the side weir crest increase significantly.

**Keywords:** Flow pattern, Numerical simulation, Rectangular channel, Sharp-crested and broad-crested side weir

### مقدمه

جانبی پرداختند. آنها مطالعات خود را با معرفی پارامتر بدون بعد ضریب آبگذری و ارتفاع آب روی تاج سرریز به سه بخش قوس بدون سرریز، قوس با سرریزهای جانبی تاج کوتاه، قوس با سرریزهای جانبی تاج بلند تقسیم کردند. آقاچی اوغلو و یوکسل (۱۹۹۸) به مطالعه جریان در یک قوس ۱۸۰ درجه همراه با سرریز جانبی پرداختند. آنها در نتایج تحقیقات خود به این نکته اشاره داشتند که قرارگیری سرریزجانبی در دهانه انشعاب موجب می شود سطح آب در انتهای بالا دست سرریز به میزان بسیار جزئی افت داشته باشد. برقی و همکاران (۱۹۹۹) در مطالعه آزمایشگاهی بر روی مشخصات جریان روی سرریزهای جانبی مستطیلی یک رابطه برای محاسبه ضریب دبی این نوع از سرریزهای جانبی ارائه نمودند. رابطه ضریب دبی آنها تابع عدد

با توجه به ساختار سه بعدی و پیچیده الگوی جریان در سرریز جانبی، همواره بررسی هیدرولیک این جریان مورد توجه محققین بسیاری بوده است. اولین آزمایشها روی سرریزهای جانبی توسط سابرامانیا و آوستی (۱۹۷۲) پیرامون جریان در سرریز جانبی با ارتفاع صفر یا محدود انجام شد. آنها در تحقیقات خود ۲۰۰ مدل آزمایشگاهی را مورد بررسی قرار دادند. سابرامانیا و آوستی (۱۹۷۲) با اندازه گیری پروفیل های سرعت در کانال اصلی نشان دادند که سرریز جانبی مستطیلی تاثیر قابل ملاحظه ای در توزیع سرعت در مجاورت دهانه سرریز دارد. فارس و هربرتسون (۱۹۹۳) با قرار دادن سرریز لبه پهن مستطیلی در یک قوس ۶۰ درجه به بررسی الگوی جریان اطراف سرریز

کردند که در ورودی‌های گرد گوشه به نحو چشمگیری از میزان جداسازی جریان در لبه‌های ورودی سرریز جانبی و همچنین از میزان جریان‌های چرخشی غیر موثر روی سرریز جانبی کاسته می‌شود که این امر باعث افزایش راندمان آبیگری خواهد شد. علاوه بر این، عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۶) و (۲۰۱۸) میدان جریان درون کانال‌های دایره‌ای دارای سرریز جانبی را شبیه‌سازی نمودند.

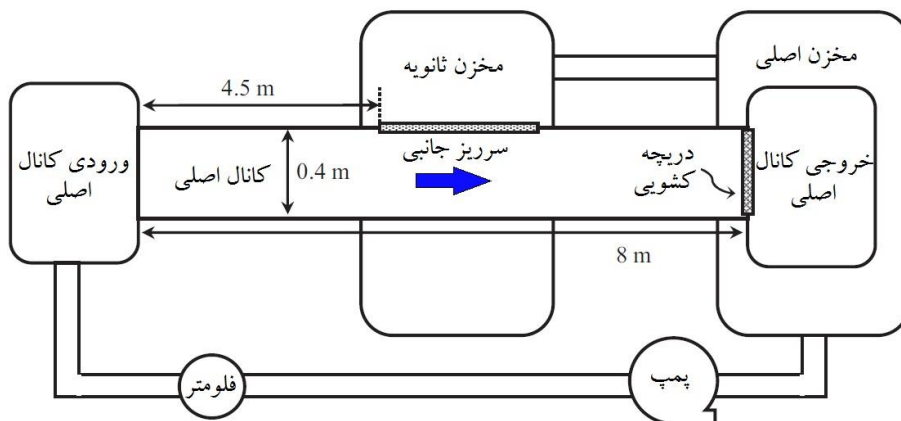
همان گونه که ملاحظه می‌شود، بررسی عددی تاثیر ضخامت سرریز بر روی الگوی جریان درون کانال‌های دارای سرریز جانبی تاکنون انجام نشده است. بنابراین در مطالعه حاضر این مهم صورت می‌پذیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### مدل آزمایشگاهی

برای اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی عددی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) استفاده شده است. مدل مذکور متشکل از یک کانال مستطیلی باز به طول ۸ متر است که یک سرریز جانبی مستطیلی در فاصله ۴/۵ متری از ورودی کانال اصلی بر روی دیواره جانبی نصب شده است. عرض و ارتفاع کانال اصلی به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۶ متر بوده و شیب بستر کانال مستطیلی افقی است. در مدل آزمایشگاهی باقری و حیدرپور (۲۰۱۲)، دبی داخل کانال اصلی در بالادست سرریز جانبی ( $Q_1$ ) برابر  $0.0435 \text{ m}^3/\text{s}$ ، عدد فرود جریان در بالادست سرریز جانبی ( $F_1$ ) مساوی ۰/۲۵۶، طول سرریز جانبی (I) مساوی ۰/۳ متر، ارتفاع تاج سرریز جانبی (P) برابر ۰/۱۵ متر و عرض کانال اصلی (B) برابر ۰/۴ متر است. طرح کلی مدل آزمایشگاهی باقری و حیدرپور (۲۰۱۲) در شکل ۱ نشان داده شده است.

فرود بالادست سرریزجانبی و مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی ارائه شده است. هنر و جوان (۲۰۰۷) مطالعاتی را در ارتباط با ضریب دبی سرریزهای جانبی مورب واقع بر دیواره جانبی کانال‌های مستطیلی ارائه نمودند. آنها نشان دادند که ضریب دبی سرریز جانبی بستگی به مشخصات هندسی سرریزجانبی و کانال اصلی دارد. آنها همچنین ضریب دبی آزمایشگاهی و محاسباتی را با هم مقایسه نمودند. رائو و پیلائی (۲۰۰۸) با به کار گیری معادله اندازه حرکت و معادله انرژی برای تخمین ضریب دبی رابطه‌ای درجه دو بر حسب عدد فرود بالا دست ارائه کردند و با مقایسه دبی حاصل از به کار بردن این ضرایب با نتایج آزمایشگاهی به این نتیجه دست یافتند که با استفاده از معادله اندازه حرکت می‌توان به نتایج منطبق تری با نتایج آزمایشگاهی دست یافت. امیراوغلو و همکاران (۲۰۱۱) یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی کانال‌های مستطیلی دارای سرریزجانبی لبه تیز انجام دادند، همچنین آنها معادله ضریب دبی سرریزهای جانبی مستطیلی را به عنوان تابعی از نسبت ارتفاع تاج سرریزجانبی به عمق جریان در بالادست سرریز، طول سرریز به عرض کانال اصلی، طول سرریز به عمق جریان در بالادست سرریز و عدد فرود مربوط به بالادست سرریز معرفی نمودند. ایزدی نیا و همکاران (۲۰۰۸) خصوصیات جریان روی سرریز جانبی تاج دایره‌ای در حالت جریان زیر بحرانی را بررسی کردند. آنها در نتایج خود اذعان داشتند که در گوشه بالادست سرریز ناحیه جدایی جریان دیده می‌شود که طول این ناحیه به عواملی چون نسبت عمق آب در بالا دست به عمق آب در پایین سرریز، عرض کانال به عمق آب در پایین دست و عدد فرود بالادست بستگی دارد. کاریزی و هنر (۲۰۰۸) به بررسی الگوی جریان و توزیع تنش برشی روی سرریزهای جانبی لبه پهن مستطیلی با ورودی تیز گوشه و گرد گوشه پرداختند. آنها با مقایسه الگوهای جریان در دو حالت ورودی گردگوشه و تیزگوشه بیان



شکل ۱- طرح کلی مدل آزمایشگاهی باقری و حیدرپور (۲۰۱۲).

### معادلات حاکم

در این شبیه‌سازی عددی برای حل میدان جریان سیال غیرقابل تراکم در دستگاه مختصات کارتزین از معادله پیوستگی و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس استفاده می‌شود که توسط روابط زیر معرفی شده است [راهنمای کاربر نرم‌افزار فلوتری دی ۲۰۱۱].

[۱]

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0.0$$

[۲]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -p \delta_{ij} + \rho \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

در اینجا  $U_i, U_j$  و  $x$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) به ترتیب مؤلفه‌های سرعت و محورهای مختصات در سیستم مختصات کارتزین می‌باشند. همچنین  $t$  زمان،  $\rho$  چگالی سیال،  $p$  فشار،  $\delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) دلتای کرونیکر<sup>۱</sup>،  $\nu_t$  لزوجت آشفتگی<sup>۲</sup> است. همچنین در این مطالعه عددی، برای پیش‌بینی تغییرات سطح آزاد جریان از طرح VOF استفاده شده است. در طرح VOF برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می‌شود:

[۳]

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0.0$$

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  $F = 0$  سلول مورد نظر خالی است و اگر  $0 < F < 1$  سلول مورد نظر حاوی هر دو فاز آب و هوا می‌باشد. در این مطالعه آشفتگی میدان جریان توسط مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  دو معادله‌ای و  $RNG k-\varepsilon$  شبیه‌سازی شد. به طور کلی در مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  دو معادله‌ای از دو معادله‌ی دیفرانسیلی انرژی جنبشی و معادله نرخ اتلاف انرژی جنبشی استفاده می‌شود. این در حالی است که در مدل  $RNG$  از معادلاتی شبیه معادلات مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای مانند مدل  $k-\varepsilon$  استفاده می‌گردد. نرم افزار FLOW-3D مدل آشفتگی جدیدتری بر مبنای گروه‌های نرمال شده رینولدز پیاده سازی کرده است. این دیدگاه شامل روش‌های آماری برای استحصال یک معادله متوسط‌گیری شده برای کمیت‌های آشفتگی است. مدل‌های بر پایه  $RNG$ ، کمتر بر ارقام ثابت تجربی تکیه می‌کنند و این مدل از معادلاتی استفاده می‌کند که شبیه معادله‌های مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  است، اما مقادیر ثابت معادله که به صورت عملی در مدل استاندارد  $k-\varepsilon$  یافت شده‌اند، صریحاً از مدل  $RNG$  گرفته شده‌اند. از این رو مدل  $RNG$  قابلیت اجرایی گسترده تری نسبت به مدل

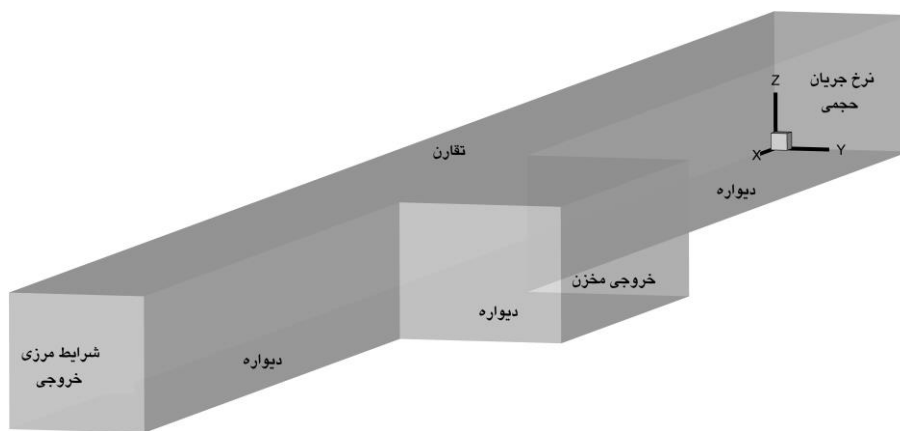
<sup>1</sup> Kronecker delta

<sup>2</sup> Turbulent eddy-viscosity

جریان حجمی است. برای خروجی کانال اصلی شرایط مرزی خروجی اعمال شده است. کلیه مرزهای جامد به عنوان شرایط مرزی دیواره تعریف و کل سطح فوقانی میدان جریان توسط شرایط مرزی تقارن معرفی گردیده است. در شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده برای حل عددی مورد نظر به تصویر کشیده شده است.

استاندارد  $k-\epsilon$  دارد. به ویژه مدل RNG برای توصیف دقیق تر آشفتگی جریان با شدت های کمتر و جریان هایی با مناطق دارای برش، قوی تر شناخته شده است.

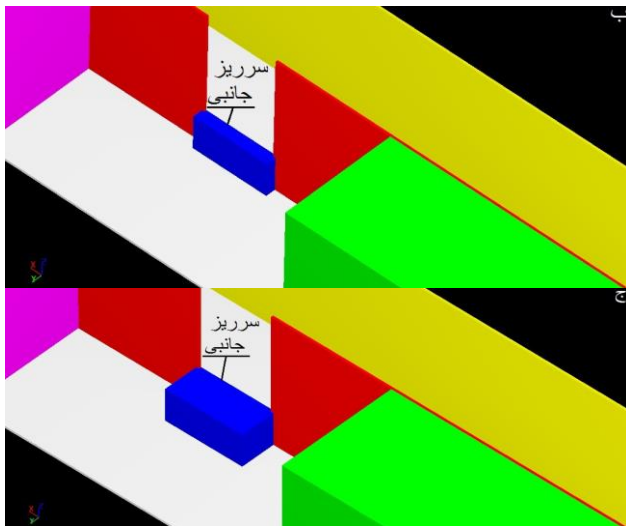
**شرایط مرزی**  
با توجه به داشتن دبی و عمق ورودی برای حل معادلات حاکم بر میدان جریان، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی سرریز اوجی استفاده شده است. این شرایط مرزی معادل شرط مرزی نرخ



شکل ۲- شرایط مرزی اعمال شده برای حل عددی.

### سرریزهای با ضخامت مختلف

در این مطالعه، برای بررسی تاثیر سرریزهای لبه تیز و لبه پهن بر روی میدان جریان درون کانال اصلی در امتداد سرریز جانبی، سه مدل سرریز جانبی مختلف با ضخامت های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ متر تعریف شد. در شکل ۳ مدل سرریزهای با ضخامت مختلف به صورت سه بعدی به تصویر کشیده شده است.



شکل ۳- مدل سرریزهای با ضخامت جانبی الف- ۰/۰۱ متر  
ب- ۰/۰۵ متر ج- ۰/۱۵ متر.



## نتایج و بحث

## آرایش و شبکه‌بندی میدان جریان

با توجه به اینکه در مدل‌سازی، تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از طرح VOF شبیه‌سازی شده است، ارتفاع کانال باید به گونه‌ای تعیین شود که شرط مرزی در نظر گرفته شده برای فاز هوا تاثیری روی میدان جریان فاز آب نداشته باشد. بر اساس مطالعه انجام گرفته توسط تارک و همکاران (۲۰۰۴) در مدل‌سازی تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از طرح VOF، ارتفاع اولیه لایه هوا باید بیشتر از یک سوم ارتفاع آب ورودی باشد. بنابراین در حل عددی مذکور، ارتفاع اولیه لایه هوا بیشتر از یک سوم کل ارتفاع ورودی جریان در مقطع ابتدایی در نظر گرفته شده است. برای انفصال میدان محاسباتی از یک بلوک مش غیریکنواخت متشکل از المان‌های مستطیلی استفاده شده است که فاصله اولین سلول از دیواره‌ها طوری انتخاب شد که از محاسبات در زیر ناحیه لزج اجتناب شود بنابراین اولین گره در محلی قرار داده شد که پارامتر بدون بعد  $y^+$  که بر اساس رابطه ۴ تعریف می‌شود، بزرگتر از ۳۰ باشد:

$$y^+ = \frac{y_1 u_*}{\nu} \quad [4]$$

در اینجا  $y_1$  فاصله اولین گره از کف کانال در جهت عمود بر آن،  $u_*$  سرعت برشی دیواره و  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند. حساسیت حل عددی به

نحوه شبکه‌بندی، همواره یکی از مسائل مهم در مطالعات عددی بوده است. در جدول ۱ مشخصات شبکه‌بندی‌های به کار رفته در حل عددی مذکور ارائه شده است. به منظور تخمین دقت حل عددی در پیش-بینی پارامترهای مختلف جریان، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ )، درصد میانگین قدر مطلق خطای نسبی ( $MARE$ ) از رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((R)_{(Simulated)i} - (R)_{(Measured)i})^2} \quad [5]$$

$$MARE = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{|(R)_{(Simulated)i} - (R)_{(Measured)i}|}{(R)_{(Measured)i}} \right) \quad [6]$$

در اینجا  $R_{(simulated)}$  و  $R_{(measured)}$  به ترتیب معادل نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشند. با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی، خطای بیشینه پروفیل طولی سطح آزاد جریان پیش‌بینی شده توسط حل عددی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به عنوان مثال برای شبکه‌بندی‌های ۳، ۴ و ۵ مقدار  $MARE$  به ترتیب برابر ۰/۶۱۷، ۰/۴۸۰ و ۰/۴۱۱ درصد محاسبه گردیده است. همچنین مقدار شاخص آماری  $RMSE$  برای شبکه‌بندی‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب مساوی ۸/۲۷۰، ۸/۰۵۲ و ۸/۰۵۲ تخمین زده شده است.

جدول ۱ - مشخصات مش بندی های استفاده شده به منظور حساسیت سنجی میدان حل (نتایج خطا برای سطح آزاد شبیه سازی شده).

مش بندی شماره	تعداد سلول محاسباتی در راستاهای X, Y, Z	%MARE	RMSE
۱	۱۱۵ × ۶۵ × ۳۰	۱/۷۸۳	۱۱/۰۷۱
۲	۱۳۵ × ۷۸ × ۳۸	۰/۸۰۶	۹/۴۵۱
۳	۱۴۹ × ۸۵ × ۴۲	۰/۶۱۷	۹/۰۱۴
۴	۱۷۵ × ۹۲ × ۴۶	۰/۴۸۰	۸/۲۷۰
۵	۱۸۲ × ۹۸ × ۴۸	۰/۴۱۱	۸/۰۵۲
۶	۱۹۴ × ۱۰۲ × ۵۲	۰/۴۰۸	۷/۹۵۷

واسنجی حل عددی

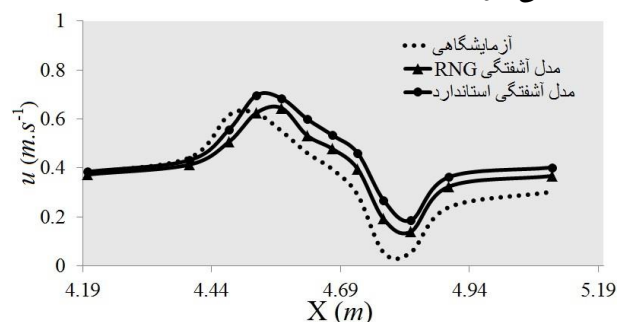
جدول ۲ - RMSE و MARE برای مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و k-ε RNG در پیش بینی سرعت طولی.

مدل آشفتگی	%MARE	RMSE
k-ε Standard	۰/۷۳۹	۱۲/۳۴۰
k-ε RNG	۰/۴۸۰	۸/۲۷۰

صحت سنجی نتایج عددی

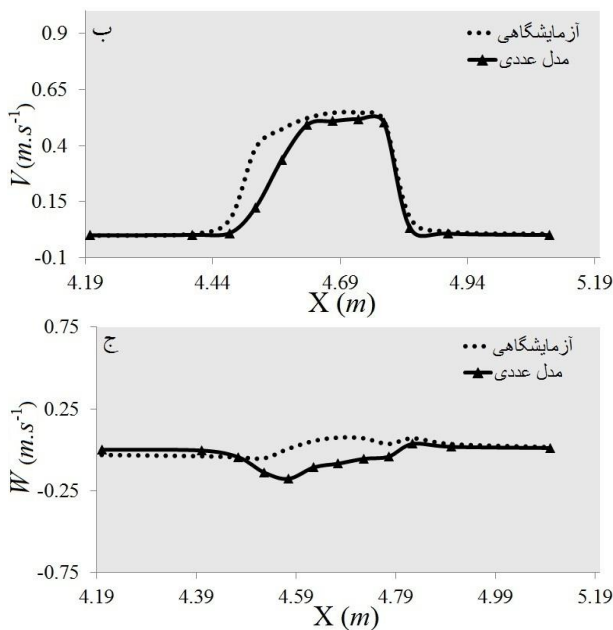
در ادامه اعتبار سنجی نتایج عددی با مولفه های مختلف سرعت آزمایشگاهی ارائه می گردد. مقایسه نتایج حل عددی و آزمایشگاهی مولفه های طولی، عرضی و قائم سرعت جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه سازی، برای مولفه طولی سرعت جریان ( $u$ ) مقدار ریشه میانگین مربعات خطا را مساوی ۸/۲۷۰ پیش بینی شده است. در مقابل برای مولفه عرضی سرعت جریان ( $v$ ) مقدار RMSE برابر ۹/۰۱۵ بدست آمده است. همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای مولفه قائم سرعت جریان ( $w$ ) مساوی ۹/۹۲۵ محاسبه شده است. مقادیر RMSE و MARE برای مولفه های مختلف سرعت جریان در جدول ۳ مرتب شده است. همچنین مقادیر MARE برای مولفه های طولی، عرضی و قائم به ترتیب برابر ۰/۴۸۰، ۰/۶۱۷ و ۳/۵۱۹ درصد تخمین زده شده است. منفی بودن مقادیر سرعت قائم به معنای مخالف

در شکل ۴ تاثیر مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و k-ε RNG برای شبیه سازی مقدار سرعت طولی نشان داده شده است. همچنین مقادیر RMSE، MARE برای مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و k-ε RNG در پیش بینی سرعت طولی در جدول ۲ مرتب شده که با توجه به نتایج جدول مذکور و شکل ۴ مدل آشفتگی RNG k-ε دارای مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای کمتری است. به عبارت دیگر مقدار RMSE برای مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و k-ε RNG به ترتیب برابر ۱۲/۳۴۰ و ۸/۲۷۰ محاسبه گردیده است. همچنین برای مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و k-ε RNG مقدار MARE به ترتیب مساوی ۰/۷۳۹ و ۰/۴۸۰ درصد بدست آمده است. بنابراین در ادامه مطالعه، برای شبیه سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی k-ε RNG بهره گرفته می شود.



شکل ۴ - تاثیر مدل های آشفتگی k-ε استاندارد و k-ε RNG در شبیه سازی مولفه طولی سرعت.





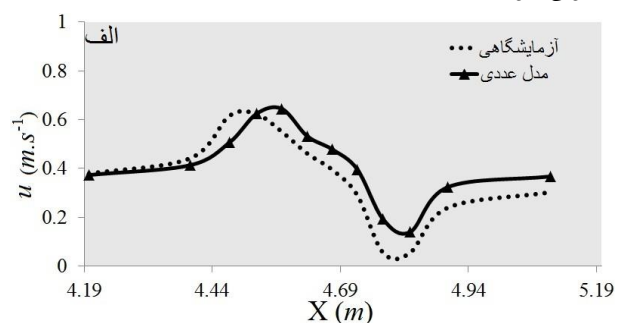
شکل ۵ - مقایسه الف- مولفه طولی (u) ب- مولفه عرضی (v) ج- مولفه قائم (w) سرعت با مقادیر آزمایشگاهی.

جدول ۳ - مقادیر RMSE، MARE برای مولفه‌های مختلف

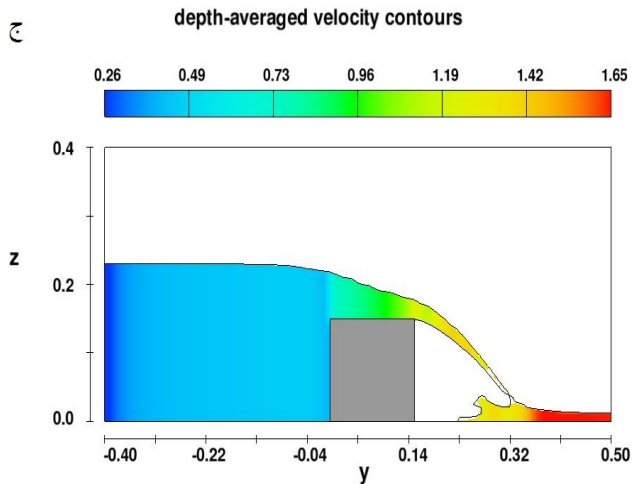
سرعت جریان		
مولفه سرعت	%MARE	RMSE
مولفه طولی (u)	۰/۴۸۰	۸/۲۷۰
مولفه عرضی (v)	۰/۴۶۸	۹/۰۱۵
مولفه قائم (w)	۳/۵۱۹	۹/۹۲۵

در این بخش تاثیر ضخامت تاج سرریز جانبی بر روی تغییرات سرعت متوسط گیری شده در عمق برای مدل‌های ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱۵ متر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. لازم به یادآوری است که مقاطع عرضی در محل مقطع میانی دهانه سرریز جانبی استخراج شده است. به همین منظور تغییرات پارامتر مذکور برای سرریزهای با ضخامت مختلف در شکل ۶ به تصویر کشیده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار سرعت متوسط گیری شده بر روی لبه تاج، برای مدل سرریز با ضخامت ۰/۰۱ متر تقریباً مساوی ۱ متر بر ثانیه، برای مدل با ضخامت ۰/۰۵ متر تقریباً برابر ۱/۰۶ متر بر ثانیه و برای مدل سرریز با ضخامت ۰/۱۵ متر تقریباً مساوی ۱/۱۹ متر بر ثانیه محاسبه شده است.

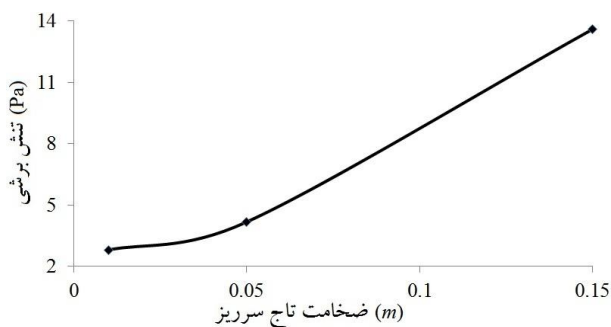
جهت بودن مقادیر مذکور با جهت قراردادی مدل‌های عددی و آزمایشگاهی است. در اکثر مطالعات عددی که میدان جریان توسط مدل‌های عددی و نرم افزارهای کامپیوتری شبیه‌سازی می‌شود، وجود اختلاف بین مقادیر عددی و مشاهداتی کاملاً معقول و پذیرفتنی است. وجود این خطا به عوامل مختلفی از قبیل تعداد سلول‌های محاسباتی، مدل‌های آشفتگی، توانایی حل عددی، نحوه تنظیمات حل عددی، وجود خطای انسانی در برداشت‌های آزمایشگاهی و غیره وابسته است. در نتیجه هنگامی که میدان جریان توسط یک مدل عددی شبیه‌سازی می‌شود، مجموعه‌ای از خطاها وجود دارد که به طور کلی مقدار آن‌ها باید در حد قابل قبولی باشد. در این مطالعه بر اساس نتایج مدل‌سازی، مولفه‌های طولی و عرضی سرعت دارای خطای کمتری در مقایسه با مولفه قائم میدان جریان هستند. هر چند که در محل نقاط بیشینه و کمینه اختلاف بیشتری وجود دارد که علت آن را می‌توان به پیچیدگی جریان و سه بعدی بودن آن در محل سرریز جانبی مرتبط دانست که حل عددی به خوبی توانایی درک و شبیه‌سازی این بخش‌ها را نداشته است. علاوه بر این، مولفه سرعت قائم شبیه‌سازی شده جریان در بالادست و پائین‌دست سرریز جانبی تقریباً منطبق بر مقادیر آزمایشگاهی است اما در دهانه سرریز جانبی به دلیل آشفتگی بالا و ماهیت سه بعدی جریان، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و عددی در مقایسه با سایر بخش‌ها بیشتر است. بنابراین به طور کلی با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج صحت سنجی، حل عددی مقادیر سرعت جریان را با دقت مناسبی مدل‌سازی کرده است.







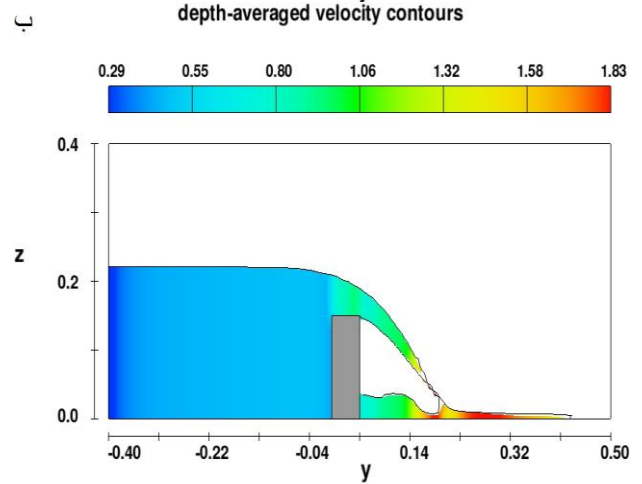
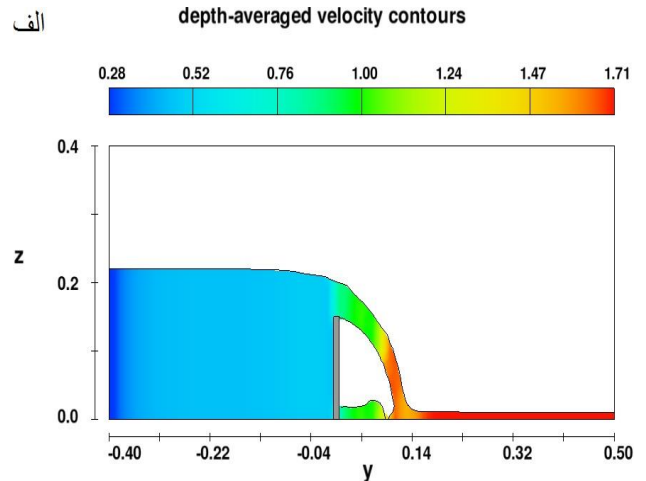
شکل ۶- تغییرات سرعت متوسط گیری شده در عمق برای سرریزهای جانبی با ضخامت الف- ۰/۰۱ متر ب- ۰/۰۵ متر ج- ۰/۱۵ متر.



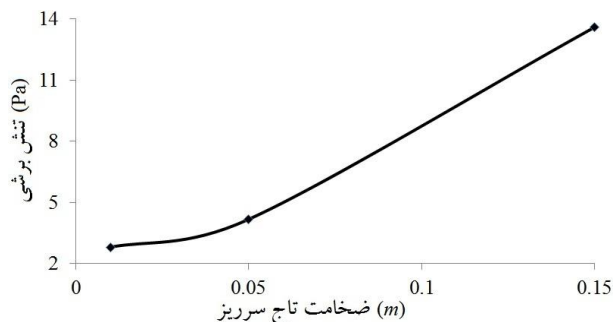
شکل ۷- تغییرات بیشینه سرعت متوسط گیری شده در عمق برای سه مدل سرریز جانبی.

در ادامه، تاثیر ضخامت تاج سرریزهای جانبی بر روی مقدار تنش برشی در محل تاج سرریز جانبی مورد مطالعه قرار می گیرد. در شکل ۸ تغییرات تنش برشی شبیه سازی شده برای سرریزهای جانبی با ضخامت های تعریف شده به تصویر کشیده شده است. بر اساس نتایج مدل سازی های عددی، مقدار تنش برشی بیشینه برای مدل سرریز جانبی با ضخامت ۰/۰۱ متر برابر ۲/۸ پاسکال تخمین زده شده است. همچنین مقدار پارامتر مذکور برای مدل های سرریز جانبی با ضخامت های ۰/۰۵ متر و ۰/۱۵ متر به ترتیب برابر ۴/۱۷ و ۱۳/۶ پاسکال پیش بینی گردیده است. بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده، به دلیل کاهش ارتفاع سیال در محل

بنابراین با افزایش ضخامت تاج سرریز جانبی، مقدار سرعت متوسط گیری شده در عمق بر روی لبه تاج سرریز جانبی افزایش می یابد. زیرا مطابق پیوستگی جریان، با کاهش عمق جریان برای یک دبی خاص سرعت جریان افزایش می یابد. بنابراین مطابق نتایج مدل سازی، عمق جریان روی لبه خارجی تاج سرریز جانبی با افزایش ضخامت تاج سرریز کاهش یافت. علاوه بر این، تغییرات بیشینه سرعت متوسط گیری شده در عمق برای سه مدل سرریز جانبی با ضخامت متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است.



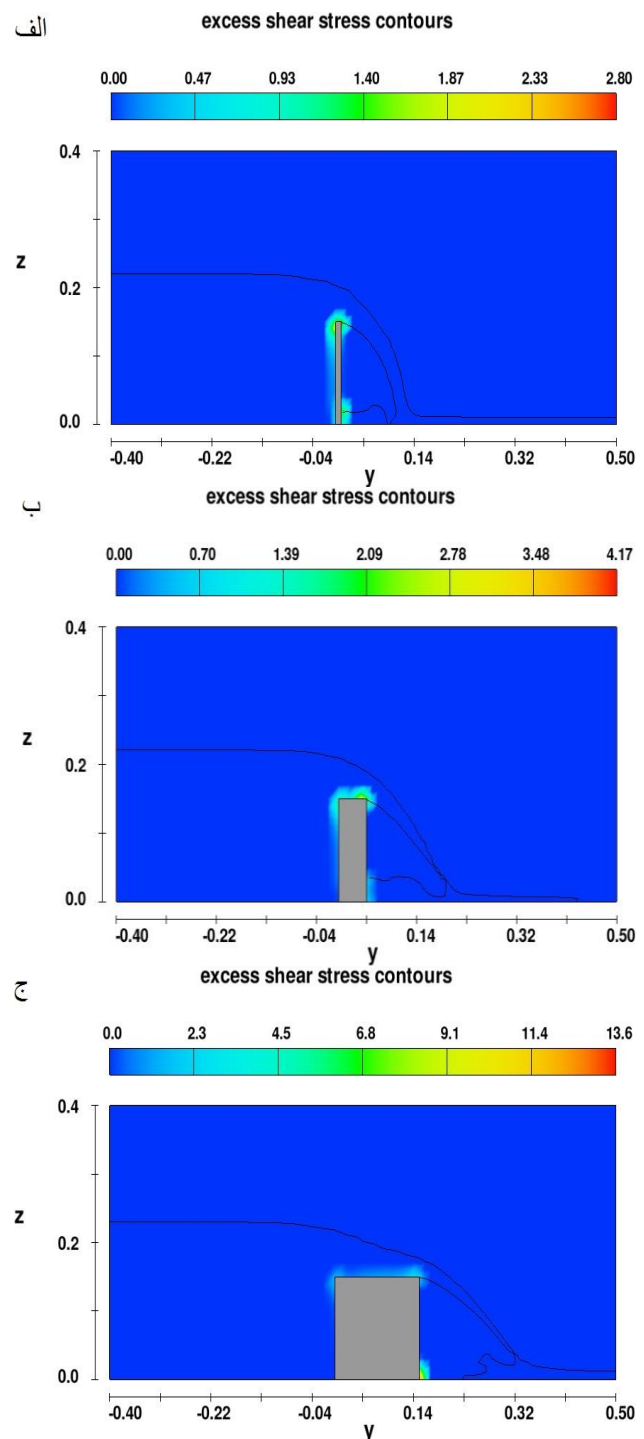
شکل ۸- تغییرات تنش برشی شیب‌سازی شده برای سرریزهای جانبی با ضخامت الف- ۰/۰۱ متر ب- ۰/۰۵ متر ج- ۰/۱۵ متر.

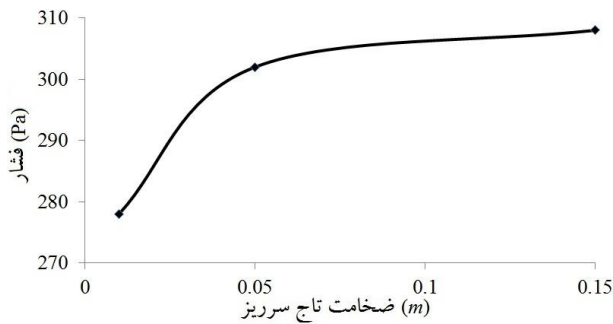


شکل ۹- تغییرات بیشینه تنش برشی برای سه مدل سرریز جانبی.

در این قسمت از مطالعه، تاثیر ضخامت تاج سرریزهای جانبی بر روی تغییرات فشار جریان در امتداد سرریز جانبی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل ۱۰ تغییرات فشار جریان برای سرریزهای جانبی با ضخامت‌های معرفی شده به تصویر کشیده شده است. با توجه به نتایج شیب‌سازی‌های عددی، مقدار فشار جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی با ضخامت ۰/۰۱ متر برابر ۲۷۸ پاسکال محاسبه گردیده است. همچنین مقدار فشار برای مدل‌های سرریزهای جانبی با ضخامت‌های ۰/۰۵ و ۰/۱۵ متر به ترتیب مساوی ۳۰۲ و ۳۰۸ پاسکال تخمین زده شده است. بنابراین با افزایش مقدار ضخامت تاج سرریز جانبی، مقدار فشار جریان بر روی لبه تاج سرریز جانبی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر فشار هیدرودینامیکی روی لبه تاج سرریز جانبی با افزایش مقدار سرعت جریان روی لبه تاج، با افزایش رو به رو شد. همچنین در شکل ۱۱ تغییرات بیشینه فشار برای سه مدل سرریز جانبی به تصویر کشیده شده است.

تاج با افزایش مقدار ضخامت تاج سرریز جانبی، مقدار تنش برشی در مجاورت تاج سرریز جانبی به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. همچنین در شکل ۹ تغییرات بیشینه تنش برشی برای سه مدل سرریز جانبی قابل مشاهده است

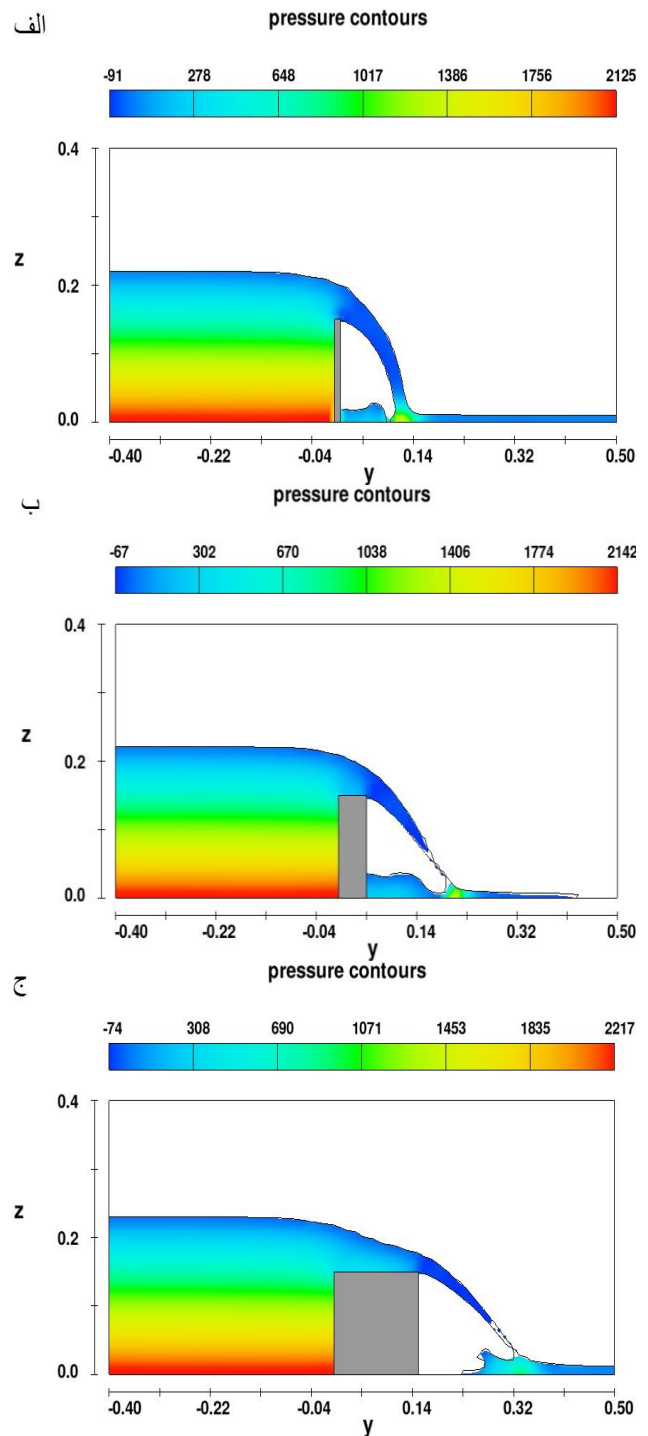




شکل ۱۱- تغییرات بیشینه فشار برای سه مدل سرریز جانبی.

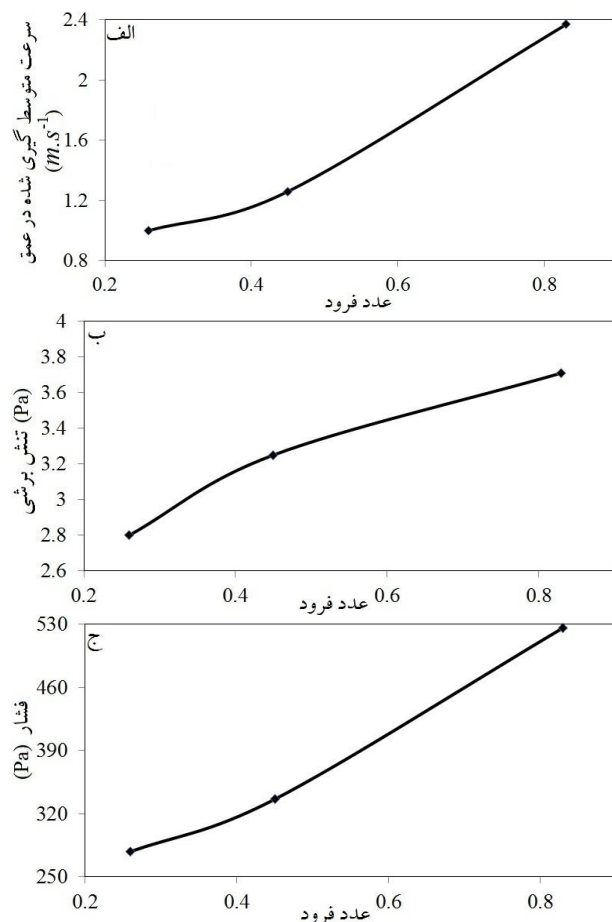
تأثیر عدد فرود

در این قسمت از مطالعه حاضر تاثیر عدد فرود در بالادست سرریز جانبی بر روی تغییرات سرعت متوسط گیری شده در عمق، تنش برشی و فشار جریان مورد مطالعه قرار می گیرد. لازم به ذکر است میدان جریان برای سه عدد فرود ۰/۲۶، ۰/۴۵ و ۰/۸۳ مورد بررسی قرار می گیرد. در شکل ۱۲ نحوه تغییرات مقدار سرعت متوسط گیری شده در عمق، تنش برشی و فشار جریان در مقابل عدد فرود در مجاورت تاج سرریز جانبی به تصویر کشیده شده است. بر اساس نتایج مدل سازی، با افزایش عدد فرود، مقدار بیشینه سرعت متوسط گیری شده در عمق، تنش برشی و فشار در نزدیکی تاج سرریز افزایش می یابد. به عنوان مثال برای عدد فرودهای ۰/۲۶، ۰/۴۵ و ۰/۸۳ بیشینه مقدار سرعت متوسط گیری شده در نزدیکی تاج سرریز جانبی به ترتیب مساوی با یک، ۱/۲۶ و ۲/۳۷ متر بر ثانیه تخمین زده شدند. علاوه بر این مقادیر تنش برشی بیشینه در مجاورت تاج سرریز جانبی برای این مقادیر عدد فرود به ترتیب برابر با ۲/۸، ۳/۲۵ و ۳/۷۱ پاسکال تخمین زده شدند. همان طور که مشاهده می شود، برای عدد فرود ۰/۲۶ مقدار بیشینه فشار جریان در نزدیکی تاج سرریز جانبی برابر با ۲۷۸ پاسکال محاسبه شده است.



شکل ۱۰- تغییرات فشار برای سرریزهای جانبی با ضخامت الف- ۰/۰۱ متر ب- ۰/۰۵ متر ج- ۰/۱۵ متر.

مدل آشفتگی RNG  $k-\varepsilon$  بهره گرفته شد. بر اساس نتایج شبیه سازی، برای مولفه طولی سرعت جریان ( $u$ ) مقدار ریشه میانگین مربعات خطا مساوی  $۸/۲۷۰$  پیش‌بینی شده است. در مقابل برای مولفه عرضی سرعت جریان ( $v$ ) مقدار  $RMSE$  برابر  $۹/۰۱۵$  بدست آمده است. همچنین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا برای مولفه قائم سرعت جریان ( $w$ ) مساوی  $۹/۹۲۵$  محاسبه شده است. همچنین مقادیر  $MARE$  برای مولفه‌های طولی، عرضی و قائم به ترتیب برابر  $۰/۴۸۰$ ،  $۰/۴۶۸$  و  $۳/۵۱۹$  درصد تخمین زده شده است. بنابراین با توجه به تجزیه و تحلیل نتایج صحت‌سنجی، حل عددی مقادیر سرعت جریان را با دقت مناسبی مدل‌سازی کرده است. در ادامه تاثیر ضخامت تاج سرریز جانبی بر روی میدان جریان درون کانال اصلی در امتداد سرریز جانبی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار سرعت متوسط گیری شده بر روی لبه تاج، برای مدل سرریز با ضخامت  $۰/۰۱$  متر تقریباً مساوی  $۱$  متر بر ثانیه، برای مدل با ضخامت  $۰/۰۵$  متر تقریباً برابر  $۱/۰۶$  متر بر ثانیه و برای مدل سرریز با ضخامت  $۰/۱۵$  متر تقریباً مساوی  $۱/۱۹$  متر بر ثانیه محاسبه شده است. تاثیر ضخامت تاج سرریزهای جانبی بر روی تغییرات فشار جریان در امتداد سرریز جانبی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج شبیه سازی‌های عددی، مقدار فشار جریان در مجاورت تاج سرریز جانبی با ضخامت  $۰/۰۱$  متر برابر  $۲۷۸$  پاسکال محاسبه گردیده است.



شکل ۱۲. نحوه تغییرات در مقابل عدد فرود الف- سرعت متوسط‌گیری شده در عمق ب- تنش برشی ج- فشار.

### نتیجه‌گیری کلی

مقدار  $RMSE$  برای مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و  $k-\varepsilon$  RNG به ترتیب برابر  $۱۲/۳۴۰$  و  $۸/۲۷۰$  محاسبه گردیده است. همچنین برای مدل‌های آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد و  $k-\varepsilon$  RNG مقدار  $MARE$  به ترتیب مساوی  $۰/۷۳۹$  و  $۰/۴۸۰$  درصد بدست آمده است. بنابراین در ادامه مطالعه، برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از

### منابع مورد استفاده

- Agaccioglu H and Yüksel Y, 1998. Side-weir flow in curved channels. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE 124(3): 163-175.
- Azimi H and Shabanlou S, 2016. Numerical simulation of flow free surface and field in circular channel along the side weir in subcritical flow conditions. Water and Soil Science-University of Tabriz 26(1-1): 225-238.

- Azimi H and Shabanlou S, 2018. 3D Simulation of supercritical flow characteristics in circular channels with side weirs. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 28(1): 119-130.
- Bagheri S and Heidarpour M, 2012. Characteristics of Flow over Rectangular Sharp-Crested Side Weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 138 (6): 541-547.
- Borghai SM, Jalili MR and Ghodsian M, 1999. Discharge coefficient for sharp crested side weirs in subcritical flow. *Journal of the Hydraulic Division ASCE* 125 (10): 1051-1056.
- Durga Rao KHV and Pillai CRS, 2008. Study of Flow Over Side Weirs under Supercritical Conditions. *Water Resources Management* 22(1): 131-143.
- Emiroglu ME, Agaccioglu H and Kaya N, 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Measurement and Instrumentation* 22(4): 319-330.
- Fares YR and Herbertson JG, 1993. Behaviors of flow in a channel bend with a side overflow (flood relief) channel. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 31(3): 383-402.
- Anonymous, 2011. FLOW 3D User's Manual, Version 10.0. Flow Science Inc.
- Honar T and Javan M, 2007. Discharge coefficient in oblique side weirs. *Iran Agricultural Research* 25(2): 27-36.
- IzadiNia E, Heidarpour A and Kabiri Samani M, 2008. Study of flow pattern on circular crest side weirs. *Journal of Agricultural and Natural Resources* 12(46 b): 815-826.
- Karizi A and Honar T, 2008. Investigation of flow pattern and shear stress of broad edge rectangular side weir. *Journal of Agricultural and Natural Resources, Soil and Water Sciences* 14(51): 15-25.
- Subramanya K and Awasthy SC, 1972. Spatially varied flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 98(1): 1-10.
- Tarek M, Imran J and Chaudhry H, 2004. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 130 (2): 91-100.