

مقاله پژوهشی

بررسی عددی اثرات طول دهانه سرریز جانبی بر روی مشخصات میدان جریان کانال اصلی

مجید حیدری^{۱*}، سعید شعبانلو^۲، بابک سان احمدی^۳

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۱/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۴

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

۳- دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

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

چکیده

در این مطالعه، میدان جریان آشفته درون کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم افزار FLOW-3D شبیه‌سازی شد. برای صحت سنجی نتایج مدل‌سازی از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی هاگر استفاده شد. همچنین برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $k-\varepsilon$ RNG بهره برده شد. نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG از دقت بیشتری برخوردار است. بر اساس نتایج مدل‌سازی، مقدار R^2 و RMSE برای مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد به ترتیب برابر $0/005$ و $0/969$ محاسبه گردیده است. این در حالی است که مقادیر مذکور برای مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ RNG به ترتیب $0/004$ و $0/971$ تخمین زده شده است. همچنین تجزیه و تحلیل نتایج عددی حاکی از دقت مناسب مدل عددی در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی است. به عنوان مثال مقادیر RMSE و ضریب همبستگی برای مدل مذکور به ترتیب برابر $0/004$ و $0/971$ محاسبه گردیده است. در ادامه اثرات طول دهانه سرریز جانبی بر روی الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور سه مدل عددی مختلف با سرریزهای به طول 1 ، $0/7$ و $0/5$ متر تعریف شد. بر اساس نتایج مدل‌سازی، با کاهش طول دهانه سرریز جانبی مقدار عدد فرود در امتداد سرریز جانبی کاهش می‌یابد. حداکثر مقدار فشار میدان جریان برای مدل با طول دهانه 1 ، $0/7$ و $0/5$ متر پیش‌بینی شد. حداکثر مقادیر فشار برای مدل‌های با سرریز به طول 1 ، $0/7$ و $0/5$ متر به ترتیب برابر 271 ، 286 و 317 پاسکال محاسبه گردید که نشان می‌دهد با کاهش طول دهانه سرریز جانبی، حداکثر مقدار فشار میدان جریان افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی، شبیه‌سازی عددی، طول دهانه، کانال مستطیلی، مدل FLOW-3D.

Numerical Study of the Effects of Side Weir Inlet Length on Characteristics of Main Channel Flow Field

M Heydari¹, S Shabanlou², B Sanahmadi³

Received: January 22, 2018

Accepted: February 2, 2021

¹Assist. Prof., Dept. of Science and Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

²Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University Kermanshah, Iran

³Ph.D. Candidate, Dept. of Science and Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

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

Abstract

In this study, the turbulent flow field in rectangular channels with side weir was simulated using the FLOW-3D software. To verify the modeling results, the experimental measurements obtained by Hager were used. Also, for simulating the flow turbulence the standard k- ϵ and RNG k- ϵ turbulence models were used. The numerical modeling results showed that the RNG k- ϵ turbulence model has more accuracy. According to the modeling results, the values of RMSE and R2 for the standard k- ϵ turbulence model were calculated 0.005 and 0.969, respectively. Meanwhile, these values for the RNG k- ϵ turbulence model were estimated 0.004 and 0.971, respectively. Also, analysis of the numerical results indicated the acceptable accuracy of the numerical model in predicting the experimental results. For example, the values of RMSE and correlation coefficient for the mentioned model were calculated 0.004 and 0.971, respectively. Subsequently, the effects of the side weir inlet length on the flow pattern were investigated. For this purpose, three different numerical models of weirs with lengths of 1m, 0.7m and 0.5m were defined. According to the modeling results, by decreasing the inlet length of the side weir the value of Froude number along the side weir decreased. The maximum value of the flow field pressure for the model with an inlet length of 1m, 0.7m and 0.5m was predicted. The value of maximum pressure for the models with side weirs lengths of 1m, 0.7m and 0.5m were calculated 271pa, 286pa and 317pa, respectively showing that as the length of the side weir decreased, the maximum pressure amount of the flow field increased.

Keywords: FLOW-3D model, Inlet length, Numerical simulation, rectangular channel, Side weir

مقدمه

ارائه نمودند. تحقیقات رانگا راجو و همکاران (۱۹۷۹) در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه رورکی هندوستان که در ابتدا به منظور بررسی صحت معادله دی مارچی در برآورد میزان تخلیه از سرریزهای لبه تیز و لبه پهن انجام شد، در نهایت منجر به ارائه روابطی برای محاسبه ضریب تخلیه برای هر یک از سرریزهای ذکر شده گردید. هاگر (۱۹۸۷) با صادق ندانستن فرض رابطه دبی سرریز نرمال در سرریزهای جانبی فرمول جدیدی را برای سرریزهای جانبی پیشنهاد کرد و اظهار داشت که ضریب دبی جریان وابسته به عوامل نسبت سرعت به عمق جریان، زاویه جریان خروجی و شکل کانال می‌باشد. وی بر روی جریان در کانال جانبی با مقطع مستطیلی در کانال‌های زهکشی، تحقیقاتی انجام

سرریزجانبی، از جمله سازه‌های هیدرولیکی است که برای تنظیم و تخلیه جریان آب به کار می‌رود. با توجه به حساس بودن و کاربرد فراوان این سازه آب در بخش‌های مختلف، سرریز جانبی باید سازه‌ای قوی، مطمئن و با راندمان بالا بوده تا هر لحظه برای بهره برداری آمادگی داشته باشد. یوتچ (۱۹۷۲) با مطالعه روابط ارائه شده توسط سابرامانیا و آوستی بیان کرد که معادله ارائه شده توسط نامبردگان برای سرریزهایی با ارتفاع بزرگتر از صفر و عدد فرود بیشتر از ۰/۶ خطا دارد و رابطه‌ای را برای تعیین ضریب دبی در سرریزهای جانبی مستطیلی شکل پیشنهاد کرد. ناسامورتی و تامسون (۱۹۷۲) ضمن نقد و بررسی روابط دبی جریان سابرامانیا و آوستی رابطه‌ای برای محاسبه ضریب دبی

رابطه ارائه شده پارامترهای موثر بر عمق آب بالای سرریز را می‌توان به گونه‌ای تغییر داد تا تغییرات سطح آب در طول سرریز ثابت شود. کاریزی و هنر (۲۰۱۰) با استفاده از نرم افزار فلوئنت شرایط آزمایشگاهی را شبیه‌سازی و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. آنها به بررسی الگوی جریان و توزیع تنش برشی روی سرریزهای جانبی لبه پهن مستطیلی با ورودی تیز گوشه و گرد گوشه پرداختند. کاریزی و هنر (۲۰۱۰) نشان دادند که در حالت گرد گوشه درصد کمی از جریان عبوری بر روی سرریز جانبی به صورت چرخشی در آمده و جدا شدگی جریان به میزان قابل توجهی کمتر شده است. همین امر باعث افزایش راندمان آبیگری می‌گردد.

در این مطالعه الگوی سه بعدی میدان جریان درون کانال‌های مستطیلی دارای سرریز جانبی شبیه‌سازی می‌شود. برای رسیدن به این هدف از نرم افزار FLOW-3D استفاده می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آزاد از طرح VOF بهره گرفته می‌شود. سپس نحوه تولید مدل عددی ارائه می‌گردد. در بخش‌های بعد اثرات طول دهانه سرریز جانبی بر الگوی جریان درون کانال اصلی بررسی شده و در انتها مهمترین نتایج ارائه می‌گردد. به عبارت دیگر، در مطالعه حاضر، تاثیر تغییرات طول سرریز جانبی بر روی الگوی جریان درون کانال اصلی توسط نرم افزار FLOW-3D مورد مطالعه قرار می‌گیرد و این بخش مهمترین هدف این تحقیق محسوب می‌شود. به بیان دیگر، با بررسی مطالعات گذشته مشخص شد که تاثیر تغییرات طول دهانه سرریز جانبی بر روی مشخصات هیدرولیکی و هیدرودینامیکی میدان جریان تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است که این مهم در مطالعه حاضر انجام خواهد شد و نوآوری این پژوهش در نظر گرفته می‌شود.

دادند. همچنین ونوتلی (۲۰۰۸) یک راه حل تحلیلی برای شناسایی رفتار هیدرولیک جریان عبوری از روی تاج سرریزهای جانبی مستطیلی ارائه نمود. روش ارائه شده توسط وی برای هر دو شرایط جریان زیر بحرانی و فوق بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پروانه و همکاران (۲۰۱۲) جریان عبوری از روی سرریزهای جانبی مستطیلی، زیگزگی متقارن و زیگزگی غیر متقارن را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین رابطه‌ای را برای سرریزهای جانبی زیگزگی نامتقارن ارائه نمودند. جلیلی قاضی زاده و همکاران (۱۹۹۷) نشان دادند، که در جریان‌های زیر بحرانی فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز جانبی، با خطای کمتر از چهار درصد قابل قبول می‌باشد. جلیلی قاضی زاده و همکاران (۱۹۹۷) به این نکته اشاره نمودند که در جریان‌های فوق بحرانی فرض ثابت بودن انرژی مخصوص در طول سرریز صحیح نمی‌باشد و توصیه کردند در تحلیل سرریزهای جانبی در حالت جریان فوق بحرانی از معادله اندازه حرکت استفاده شود. ایزدی نیا و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از مدل سازی یک سرریز جانبی تاج دایره ای در حالت جریان زیر بحرانی به بررسی و مقایسه الگوی جریان بین این نوع سرریز و سرریز لبه تیز پرداختند. در طی آزمایشات انجام گرفته توسط آنها در گوشه بالادست سرریز ناحیه جدایی جریان دیده شد. نقطه جدایی نقطه‌ای است که در آن گرادیان سرعت مساوی صفر است، پس از نقطه جدایی توزیع فشار روی سطح جسم به طور کامل تغییر می‌کند، به نحوی که این تغییر موجب ایجاد یک نیروی بزرگ و نا متعادل در مقابل حرکت سیال می‌گردد. آقاییاری و هنر (۲۰۰۹) به منظور بررسی حالت بهینه تغییرات سطح آب فرمولی را ارائه کردند که در آن عمق آب بالای تاج سرریز در طول سرریز به عنوان پارامتری وابسته و پارامترهای دبی، ارتفاع ابتدای سرریز، ارتفاع انتهای سرریز، شیب تاج سرریز و طول سرریز به عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شده است. با توجه به

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی

در این تحقیق، جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی از داده‌های مدل آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲) بهره گرفته شده است. مدل آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲)، کانال مستطیل شکل به عرض ۳۰ سانتی‌متر، طول ۵/۷۰ متر و دهانه سرریز به عرض ۱ متر با ضریب مانینگ ۰/۰۱۱ است. در جدول ۱ داده‌های استفاده شده در شبیه‌سازی عددی، به‌طور خلاصه آورده شده است. در جدول زیر (P) ارتفاع سرریز، (Z₁) عمق بالادست جریان، (Z₂) عمق پایین دست جریان، (Q₁) دبی ورودی در کانال اصلی، (Q₂) دبی خروجی از کانال جانبی می‌باشد. لازم به ذکر است که مدل مزبور در شرایط جریان زیر بحرانی قرار دارند و رژیم هیدرولیکی آنها با توجه به ضریب مانینگ ۰/۰۱۱ فلز آلومینیوم، صاف (k_s⁺<5) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- مشخصات و شرایط هندسی و هیدرولیکی در مدل آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲).

P (m)	Z ₁ (m)	Z ₂ (m)	Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)
۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۱۷۱	۰/۰۳۸۵۵	۰/۰۱۸۵۲

معادلات حاکم

در این مطالعه برای شبیه‌سازی میدان جریان از نرم افزار Flow3D استفاده می‌شود که معادلات حاکم بر آن بصورت زیر می‌باشند:

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

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

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

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

در اینجا (u, v, w) ، (A_x, A_y, A_z) ، (G_x, G_y, G_z) و

(f_x, f_y, f_z) به ترتیب برابر مولفه‌های سرعت، مساحت

کسری محیط به جریان، نیروهای گرانشی و شتاب‌های ناشی از لزجت در راستاهای (x, y, z) است. همچنین ρ ، R_{SOR} ، p و V_F به ترتیب برابر زمان، چگالی سیال، ترم چشمه، فشار و کسری از حجم مرتبط با جریان است. در نرم افزار Flow3D برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آزاد از روش VOF استفاده می‌شود. در این روش برای محاسبه جزء حجمی سیال، معادله انتقال زیر حل می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(\frac{\partial}{\partial x}(FuA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(FvA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(FwA_z) \right) = 0.0 \quad [5]$$

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

شرایط مرزی اعمال شده بر مدل عددی

شرایط مرزی اعمال شده برای مدل عددی به-گونه‌ای انتخاب شده است که با شرایط فیزیکی مدل آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲) انطباق داشته باشد. به همین دلیل با توجه به داشتن مشخصات هیدرولیکی ورودی، از مقدار دبی و عمق جریان مشخص در مقطع ورودی کانال اصلی استفاده شده است. این شرایط مرزی در نرم‌افزار FLOW-3D معادل شرط مرزی "نرخ جریان حجمی" است. کلیه مرزهای جامد به عنوان شرایط مرزی "دیواره" تعریف شده‌اند. کل سطح فوقانی میدان جریان توسط شرایط مرزی "تقارن" معرفی گردیده است. در شرایط مرزی تقارن اصطکاک و تغییرات زمانی و مکانی کلیه پارامترها برابر صفر است. در خروجی کانال اصلی از شرایط مرزی "فشار مشخص" استفاده شده است. همچنین برای مرز خروجی مخزن متصل به کانال اصلی از شرایط مرزی "خروجی" استفاده گردیده است.

شبکه‌بندی میدان محاسباتی

با توجه به اینکه در مدل‌سازی تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از طرح VOF مدل‌سازی شده است،

شد که پارامتر بدون بعد y^+ که بر اساس رابطه ۶ تعریف می‌شود، بزرگتر از ۳۰ باشد:

$$y^+ = \frac{y_1 u_*}{\nu} \quad [6]$$

در اینجا y_1 فاصله اولین گره از دیواره در جهت عمود بر آن، u_* سرعت برشی دیواره و ν لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند. حساسیت مدل‌های عددی به نحوه شبکه بندی، همواره یکی از مسائل مهم در مطالعات عددی بوده است. به منظور تخمین دقت مدل عددی در پیش‌بینی پارامترهای مختلف جریان، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار ضریب همبستگی (R^2) از رابطه‌های ۷ و ۸ محاسبه می‌شود:

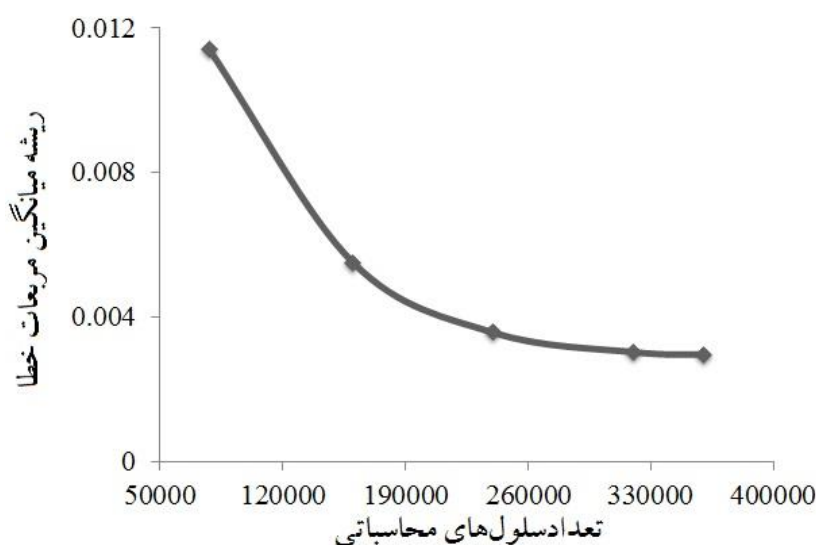
$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_{(measured)_i} - R_{(simulated)_i})^2} \quad [7]$$

$$R^2 = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n (R)_{(simulated)_i} (R)_{(measured)_i} - \sum_{i=1}^n (R)_{(simulated)_i} \sum_{i=1}^n (R)_{(measured)_i} \right)^2}{\left(n \sum_{i=1}^n ((R)_{(simulated)_i})^2 - \sum_{i=1}^n ((R)_{(measured)_i})^2 \right) \left(n \sum_{i=1}^n ((R)_{(simulated)_i})^2 - \sum_{i=1}^n ((R)_{(measured)_i})^2 \right)} \quad [8]$$

شبکه بندی سوم (شکل ۱) با ۲۴۰۰۰۰ سلول محاسباتی برای انفصال میدان جریان استفاده می‌شود. برای این شبکه بندی مقادیر $RMSE$ و R^2 به ترتیب برابر ۰/۰۰۴ و ۰/۹۷۱ محاسبه گردیده است. گام زمانی انتخاب شده برای این مطالعه به صورت پیش‌فرض مساوی با ۰/۱ در نظر گرفته شد زیرا برای این گام زمانی عملکرد مدل عددی در حالت بهینه قرار داشت. به بیان دیگر، مدل عددی در این وضعیت کمترین میزان خطا و بالاترین مقدار خطا بود.

ارتفاع کانال باید به گونه‌ای تعیین شود که شرط مرزی در نظر گرفته شده برای فاز هوا تأثیری روی میدان جریان فاز آب نداشته باشد. بر اساس مطالعه انجام گرفته توسط عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۹) 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 مدل 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. به همین منظور اولین گره در محلی قرار داده

در اینجا $R_{(measured)}$ و $R_{(simulated)}$ به ترتیب معادل نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی می‌باشند. در شکل ۱ مشخصات یک نمونه استقلال از شبکه‌بندی‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی مقادیر مولفه طولی سرعت جریان در مجاورت سرریز جانبی مرتب شده است. همان‌گونه که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی، خطای حداکثر پروفیل طولی سطح آزاد جریان پیش‌بینی شده توسط مدل عددی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که



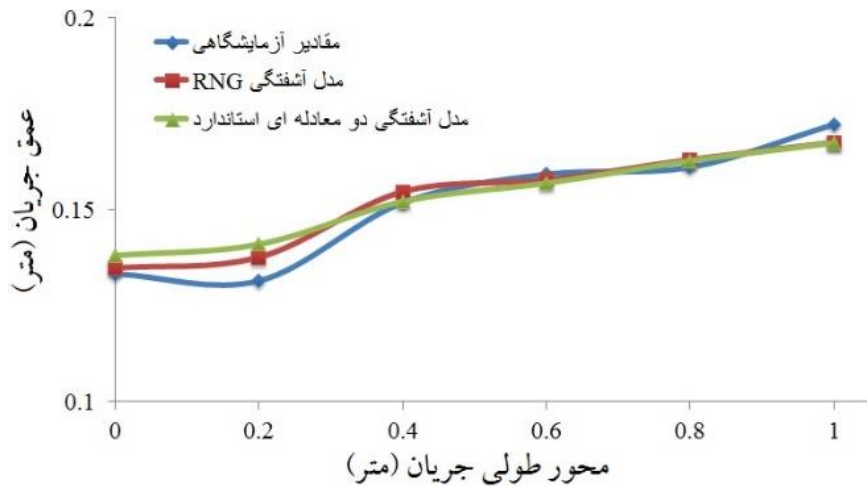
شکل ۱- نمودار استقلال از شبکه مدل عددی برای شبیه‌سازی سطح آزاد جریان.

نتایج و بحث

اثرات مدل‌های آشفتگی

در ادامه اثرات مدل‌های آشفتگی بر روی نتایج مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ دو معادله‌ای از دو معادله 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 پیاده‌سازی 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 گسترده‌تری نسبت به مدل استاندارد $k-\varepsilon$ دارد. به ویژه مدل RNG

برای توصیف دقیق‌تر آشفتگی جریان با شدت‌های کمتر و جریان‌هایی با مناطق دارای برش، قوی‌تر شناخته شده است. در شکل ۲ نتایج اثرات مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG $k-\varepsilon$ بر روی نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج شبیه‌سازی مولفه طولی سرعت در مجاورت تاج سرریز جانبی برای مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و RNG $k-\varepsilon$ نشان داده شده است. نتایج مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) در جدول ۲ مرتب شده که با توجه به نتایج جدول ۲ و شکل ۲ مدل آشفتگی RNG $k-\varepsilon$ دارای مقادیر خطای کمتری و ضریب تبیین بیشتری است. به عبارت دیگر مقدار $RMSE$ و R^2 برای مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد به ترتیب برابر ۰/۰۰۵ و ۰/۹۶۹ محاسبه گردیده است. این در حالی است که مقادیر مذکور برای مدل آشفتگی RNG $k-\varepsilon$ به ترتیب مساوی ۰/۰۰۴ و ۰/۹۷۱ تخمین زده شده است. بنابراین در ادامه، برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی RNG $k-\varepsilon$ استفاده می‌شود.



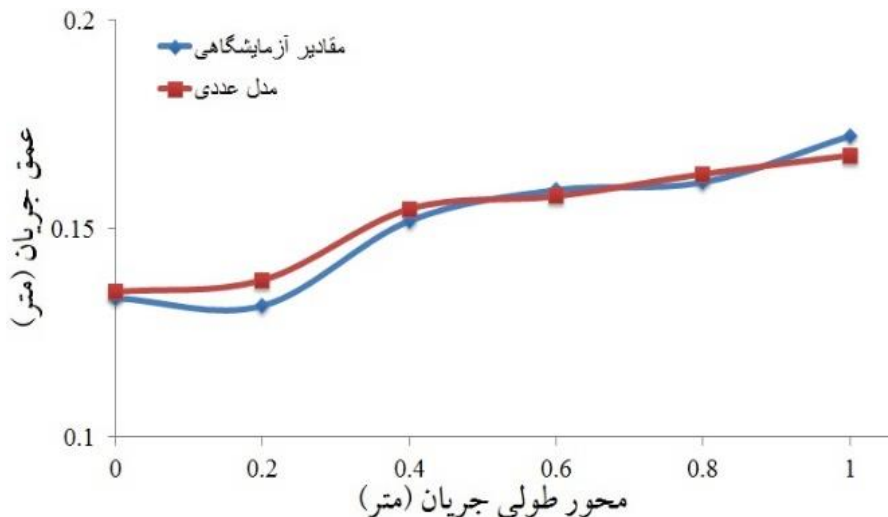
شکل ۲- مقایسه اثرات مدل‌های آشفتگی مختلف برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آزاد جریان.

در ادامه تغییرات سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. به همین منظور تغییرات پارامتر مذکور در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است. همچنین مقادیر $RMSE$ و ضریب تبیین برای شکل ۳ به ترتیب برابر مساوی $۰/۰۰۴$ و $۰/۹۷۱$ محاسبه گردیده است.

جدول ۲ مقایسه مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و ضریب تبیین (R^2) برای مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و $RNG k-\epsilon$.

مدل آشفتگی	ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)	ضریب تبیین (R^2)
$k-\epsilon$ استاندارد	$۰/۰۰۵$	$۰/۹۶۹$
$RNG k-\epsilon$	$۰/۰۰۴$	$۰/۹۷۱$

اعتبار سنجی نتایج مدل عددی



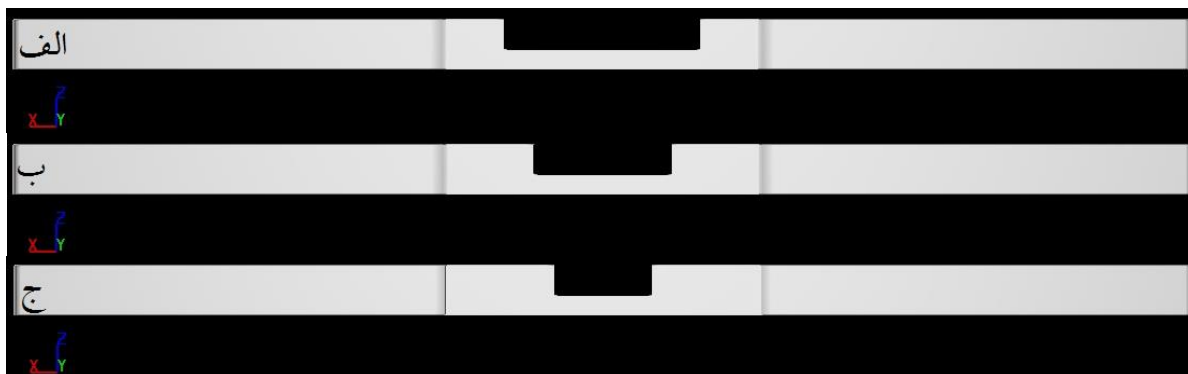
شکل ۳- تغییرات سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده با مقادیر آزمایشگاهی هاگر (۱۹۸۲).

در این بخش از مطالعه حاضر، اثرات طول دهانه سرریز جانبی بر روی پارامترهای هیدرولیکی و

تأثیرات طول دهانه سرریز جانبی

تأثیر طول دهانه سرریز جانبی بر روی ویسکوزیته دینامیکی، عدد فرود جریان، فشار میدان جریان، تنش برشی، افت آشفتگی جریان، انرژی آشفتگی جریان و مولفه طولی سرعت جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

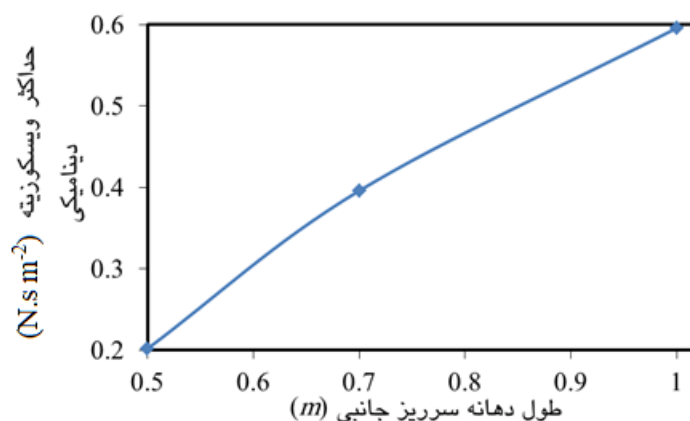
هیدرودینامیکی میدان جریان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به همین منظور سه مدل عددی مختلف با سرریزهای به طول یک، $0/7$ و $0/5$ متر تعریف می‌شود. در شکل ۴ طرح مدل‌های مورد نظر نشان داده شده است. در ادامه



شکل ۴- مدل سرریزهای جانبی با دهانه الف- یک متر ب- $0/7$ متر ج- $0/5$ متر.

جانبی مقدار ویسکوزیته دینامیکی حداکثر نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال حداکثر مقدار ویسکوزیته دینامیکی برای مدل با طول دهانه یک متر برابر $0/596$ $N.s.m^{-2}$ بدست آمده است. این در حالی است که مقدار پارامتر مذکور برای مدل با طول دهانه $0/5$ متر، مساوی $0/202$ $N.s.m^{-2}$ پیش‌بینی گردیده است.

در این قسمت، اثرات طول دهانه سرریز جانبی بر روی مشخصات میدان جریان در امتداد سرریز جانبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۵ اثرات طول دهانه سرریز جانبی بر روی پارامتر هیدرودینامیکی جریان، ویسکوزیته دینامیکی، نشان داده شده است. بر اساس نتایج شبیه سازی عددی، با کاهش طول دهانه سرریز

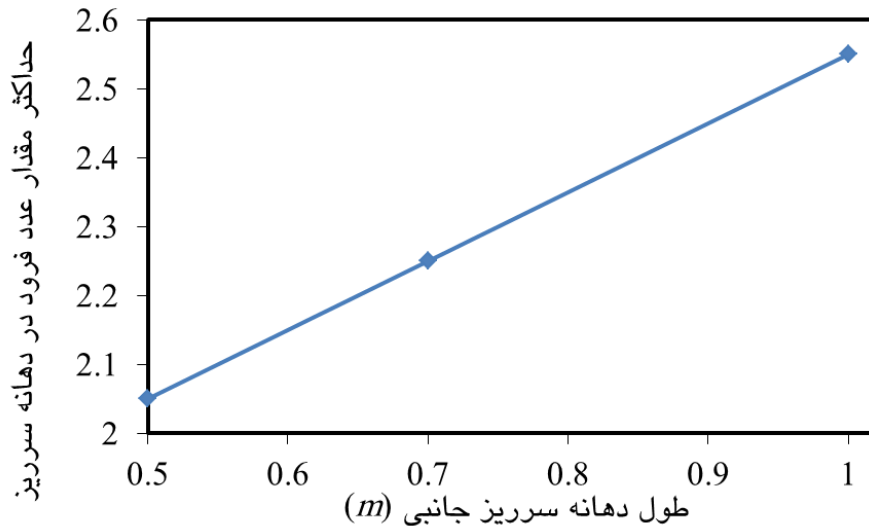


شکل ۵- تغییرات ویسکوزیته دینامیکی در دهانه سرریز جانبی با طول‌های مختلف.

طول دهانه سرریز جانبی مقدار عدد فرود جانبی در امتداد سرریز جانبی کاهش می‌یابد. همچنین حداکثر عدد فرود برای مدل با سرریز بلندتر بدست آمده است. به عبارت دیگر مقدار عدد فرود حداکثر برای مدل‌ای دارای

در ادامه، اثرات طول سرریز جانبی بر روی عدد فرود جریان در امتداد سرریز جانبی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در شکل ۶ تغییرات عدد فرود جریان در امتداد سرریزهای جانبی به طول یک، $0/7$ و $0/5$ متر نشان داده شده است. با توجه به خروجی مدل‌های عددی، با کاهش

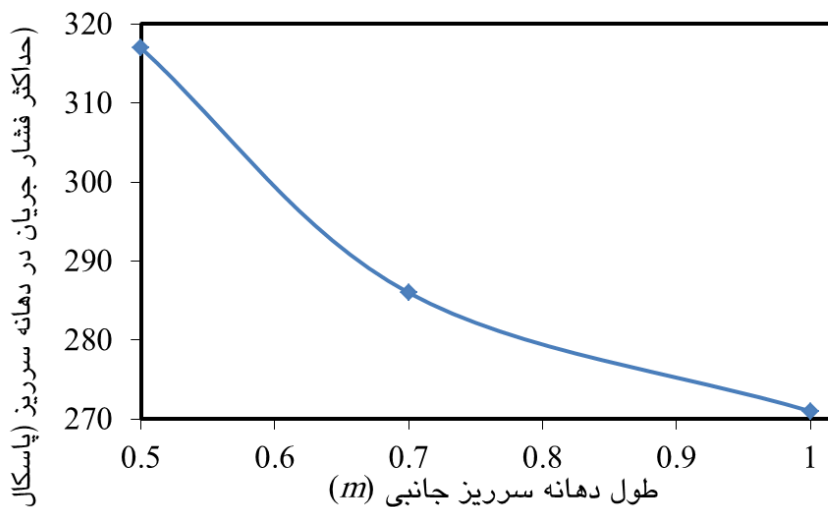
سرریزهای جانبی به طول یک، ۰/۷ و ۰/۵ متر به ترتیب مساوی ۲/۵۵، ۲/۲۵ و ۲/۰۵ محاسبه گردیده است.



شکل ۶- تغییرات عدد فرود در دهانه سرریز جانبی با طولهای مختلف.

همچنین با کاهش طول دهانه سرریز جانبی، حداکثر مقدار فشار میدان جریان برای مدل با طول دهانه ۰/۵ متر پیش‌بینی شده است. به عبارت دیگر حداکثر مقادیر فشار برای مدل‌های با سرریز به طول ۱، ۰/۷ و ۰/۵ متر به ترتیب برابر ۲۷۱، ۲۸۶ و ۳۱۷ پاسکال محاسبه گردیده است.

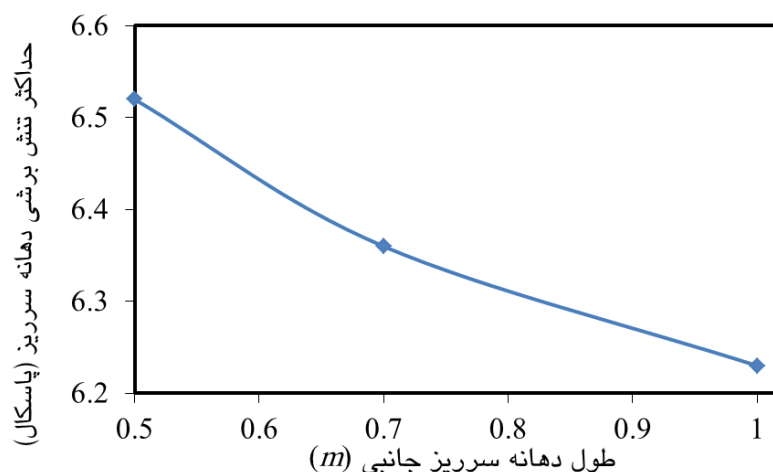
در ادامه بررسی فشار میدان جریان در امتداد سرریز جانبی برای مدل‌های تعریف شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در شکل ۷ تغییرات فشار جریان در امتداد سرریزهای جانبی به طول یک، ۰/۷۵ و نیم متر نشان داده شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی عددی، حداکثر مقدار فشار میدان جریان در امتداد سرریز جانبی در انتهای پائین دست سرریز جانبی به وقوع پیوسته است.



شکل ۷- تغییرات فشار میدان جریان در دهانه سرریز جانبی با طولهای مختلف.

مربع محاسبه گردیده است. این در حالی است که حداکثر مقدار تنش برشی برای مدل‌های با طول دهانه ۰/۷ و ۰/۵ متر به ترتیب برابر ۶/۳۶ و ۶/۵۲ نیوتن بر مترمربع پیش‌بینی گردیده است.

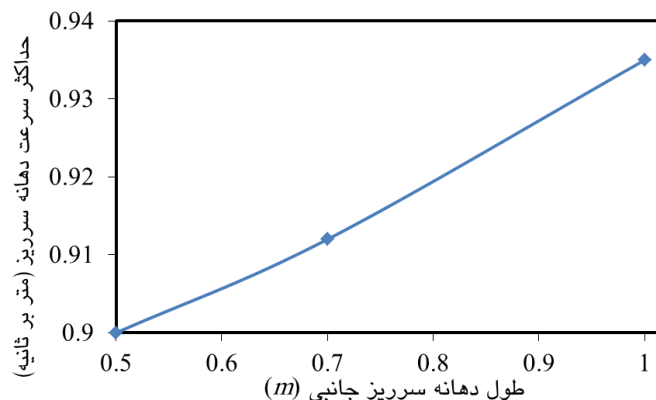
در شکل ۸ نیز تغییرات مقدار تنش برشی در امتداد سرریزهای جانبی به طول‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش طول دهانه سرریز جانبی مقدار تنش برشی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال مقدار حداکثر پارامتر مذکور برای مدل با سرریز به طول یک متر برابر ۶/۲۳ نیوتن بر متر



شکل ۸- تغییرات تنش برشی جریان در دهانه سرریز جانبی با طول‌های مختلف.

شبییه‌سازی شده، با کاهش مقدار طول سرریز جانبی، مقدار سرعت طولی در امتداد سرریز با کاهش همراه است. به عبارت دیگر بیشترین سرعت برای سرریز با طول بیشتر و کمترین مقدار سرعت طولی برای سرریز با طول کوتاه‌تر پیش‌بینی گردید.

همچنین در ادامه این بخش، تغییرات مولفه طولی سرعت جریان در امتداد سرریزهای جانبی به طول‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. به همین منظور در شکل ۹ دامنه تغییرات مولفه طولی سرعت جریان برای مدل‌های دارای سرریز جانبی به طول یک، ۰/۷ و ۰/۵ متر قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به نتایج مدل‌های



شکل ۹- تغییرات مولفه طولی جریان در دهانه سرریز جانبی با طول‌های مختلف.

نتیجه‌گیری کلی

عبارت دیگر مقدار عدد فرود حداکثر برای مدل‌های دارای سرریزهای جانبی به طول ۱، ۰/۷ و ۰/۵ متر به ترتیب مساوی ۲/۵۵، ۲/۲۵ و ۲/۰۵ محاسبه گردید. سایر محققین از قبیل کاریزی و هنر (۲۰۱۰) و عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۹) نیز نتایج مشابهی در ارتباط با تغییرات سطح آزاد جریان و الگوی تنش برشی بدست آوردند. به‌عنوان مثال، عمق جریان در امتداد سرریز جانبی با افزایش همراه بود. نتایج بدست آمده نشان داد که شبیه‌سازی سه بعدی یک ابزار قابل اطمینان و دقیق برای کاهش هزینه‌های مطالعات آزمایشگاهی محسوب می‌شوند که برای شناسایی دقیق‌تر میدان جریان در مجاورت سرریزهای جانبی درون کانال-های اصلی به مطالعات آزمایشگاهی و عددی بیشتری نیاز است. علاوه بر این، عظیمی و همکاران (۲۰۱۸) به نتایج مشابهی در ارتباط با الگوی تغییرات فشار میدان جریان در امتداد سرریز جانبی دست یافتند. این نویسندگان نشان دادند که بیشینه مقدار فشار در امتداد تاج سرریز جانبی به وقوع پیوست. تاثیر عدد فرود بر روی پارامترهای میدان جریان از قبیل سطح آزاد و میدان سرعت توسط غفاری و همکاران (۲۰۱۶) مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان دادند که با افزایش عدد فرود، عمق سطح آب در انتهای سرریز جانبی دچار تغییرات شدیدی می‌شود. همچنین عظیمی و شعبانلو (۲۰۱۶) بیان نمودند که با پیشروی در امتداد سرریز جانبی مقدار تنش برشی بستر کانال با کاهش همراه بود.

در این مطالعه عددی، سطح آزاد و آشفتگی جریان درون کانال‌های مستطیلی شکل دارای سرریز جانبی برای رژیم جریان زیر بحرانی شبیه‌سازی شد. تغییرات سطح آزاد جریان با استفاده از طرح VOF پیش‌بینی شد و آشفتگی میدان جریان با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد و $RNG k-\varepsilon$ شبیه‌سازی گردید. با افزایش تعداد سلول‌های محاسباتی، خطای حداکثر پروفیل طولی سطح آزاد جریان پیش‌بینی شده توسط مدل عددی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که شبکه بندی با ۲۴۰۰۰۰ سلول محاسباتی برای انفصال میدان جریان استفاده شد. برای شبیه‌سازی آشفتگی میدان جریان از مدل آشفتگی $RNG k-\varepsilon$ استفاده می‌شود. در ادامه تغییرات سطح آزاد جریان شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شد. مدل عددی تغییرات سطح آزاد جریان را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است. همچنین مقادیر $RMSE$ و ضریب همبستگی برای این پارامتر به ترتیب برابر مساوی ۰/۰۰۴ و ۰/۹۷۱ محاسبه گردیده است. در ادامه، اثرات طول سرریز جانبی بر روی عدد فرود جریان در امتداد سرریز جانبی مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به خروجی مدل‌های عددی، با کاهش طول دهانه سرریز جانبی مقدار عدد فرود جانبی در امتداد سرریز جانبی کاهش یافت. همچنین حداکثر عدد فرود برای مدل با سرریز بلندتر بدست آمده است. به

منابع مورد استفاده

- Aghayari F and Honar T, 2009. Study of water surface variations and discharge coefficient on rectangular inclined broad crest weirs. Fourth National Congress of Civil Engineering. 6-7 May. Faculty of Civil Engineering, University of Tehran. (In Persian with English abstract)
- Azimi H and Shabanlou, S, 2019. The effect of Froude number on flow field of U-shaped channel along a side weir in supercritical flow regime. Computational Mathematics and Modeling 30(3): 254-266.
- Azimi H, Shabanlou S and Kardar S, 2018. Turbulent flow in the vicinity of side weirs in subcritical conditions. Mathematical Models and Computer Simulations, 10(6): 784-797.
- Azimi H and Shabanlou S. 2016. Numerical simulation of flow free surface and field in circular channel along the sideweir in subcritical flow conditions. Water and Soil Science-University of Tabriz 26(1-1): 225-238. (In Persian with English abstract)
- Borghei SM and Jalili Ghazizade MR, 1997. Supercritical spatial variable flow in channels and side weirs. Fourth International Conference of Civil Engineering. 4-7 May. Sharif University of Technology, Tehran. (In Persian with English abstract)

- Ghaffari S, Eghbalzadeh A and Javan M. 2016. Numerical study of the effect of upstream Froude number on the flow characteristics along a rectangular sharp-crested side weir. *Modares Civil Engineering journal*, 16(2): 215-228. (In Persian with English abstract)
- Hager WH, 1982. *Die Hydraulik von Verteilkanaelen. Teil 1-2, Mitteilung Nr.55 56, Versuchsanstalt fur Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich* (in German).
- Hager WH, 1987. Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(4): 491-504.
- Izadi Nia A, Heidarpour M and Kabiri Samani E, 2009. Study of flow pattern on circular crest side weirs. *Journal of Agricultural and Natural Resources Sciences and Techniques*, 12 (46 B): 815-826.
- Jalili Ghazizade MR, Borghei SM and Ghodsian M, 1997. Experimental study of subcritical flow on side weirs, Fourth International Conference of Civil Engineering. 17-18 Dec. Architecture and Urban Management. Tehran. (In Persian with English abstract)
- Karizi A and Honar T, 2010. Evaluation of flow pattern and shear stress distribution on broad crested side weirs with rounded and sharp entrances. *Journal of Water and Soil Science*, 14 (51):15-25. (In Persian with English abstract)
- Nadesamoorthy T and Thamson A, 1972. Discussion of spatially varied flow over side weirs by Subramanaya K and Awasthy SC. *Journal of Hydraulic* 98(12): 2234-2235.
- Parvaneh A, Borghei SM and Jalili Ghazizadeh MR, 2012. Hydraulic performance of asymmetric labyrinth side weirs located on a straight channel. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(8): 766-772.
- RangaRaju KG, Prasad B and Gupta SK, 1979. Side weirs in rectangular channels. *Journal of Hydraulic* 105(5): 547-554
- Venutelli M, 2008. Method of solution of nonuniform flow with the presence of rectangular side weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6): 840-846.
- Yu-Tech L, 1972. Discussion of spatially varied flow over side weirs by Subramanaya K and Awasthy SC. *Journal of Hydraulic Engineering* 98(11): 2046-2048.