

شبیه سازی عددی جریان روی سرریز لبه پهن مستطیلی با وجوه شیب دار بالادست و پایین دست با مدل فلوئنت



اکرم عباسپور¹، میلاد عبدالله پور^{2*} و فرزین سلماسی³



تاریخ دریافت: 91/07/03 تاریخ پذیرش: 92/02/14

¹- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

²- دانش آموخته کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

³- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.abdolahpour@yahoo.com

چکیده

سرریز، از قدیمی‌ترین سازه‌های هیدرولیکی ساخته بشر است، که برای اندازه‌گیری و تنظیم جریان آب بکار می‌رود. جریان روی سرریز متلاطم بوده و با اختلاط آب و هوا همراه می‌باشد. در این تحقیق جریان روی دو نوع سرریز لبه پهن ARB و BRA با وجه‌های شیب دار پایین‌دست و بالادست با استفاده از مدل $k-\epsilon$ استاندارد و بکارگیری نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی FLUENT به صورت دو بعدی شبیه سازی شد و سطح آزاد جریان با روش جزء حجم سیال VOF تعیین گردید. نتایج مدل عددی برای پارامترهای هیدرولیکی ضریب دبی، سرعت جریان و توسعه لایه مرزی با نتایج آزمایشگاهی و روابط موجود مقایسه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و روش جزء حجم سیال VOF برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب روی سرریزهای لبه‌پهن، برآورد ضریب دبی (C_d) و پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف روی تاج مناسب می‌باشد. حداکثر خطای نسبی برای بار هیدرولیکی و ضریب دبی به ترتیب برابر 4/06 و 6/54 درصد است که قابل قبول می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جزء حجم سیال، سرریز لبه پهن، ضریب دبی، فلوئنت، مدل آشفتگی $k-\epsilon$

Numerical Simulation of Flow over Rectangular Broad-crested Weir with Upstream and Downstream Side Slopes Using Fluent Model

A Abbaspour¹, M Abdolapour^{2*} and F Salmasi³

Received: 24 September 2012 Accepted: 4 May 2013

¹- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

²- Master of Hydraulic Engin., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

³- Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author Email: m.abdolapour@yahoo.com

Abstract

Weir is one of the oldest human-made hydraulic structures that is used for measurement and regulation of the flow. The flow over weir is turbulent, with water and air being mixed together. In this study two-dimensional model of water flow over two kinds of broad-crested weirs including ARB and BRA with upstream and downstream side slopes has been simulated. The FLUENT computational fluid dynamic codes which uses standard k- ϵ model was employed to compute the free surface of water using the VOF model. The results for hydraulic parameters of discharge coefficient, velocity and boundary layer development were compared with those obtained from the experimental results and previous equations. The results showed that the standard k- ϵ turbulence and VOF models were suitable to predict water surface profile over broad-crested weirs and to determine the discharge coefficient and velocity profiles at different distances over the weir's crest. The maximum relative error of the predicted hydraulic head and discharge coefficient were acceptable with the values of 4.06 and 6.54 % respectively.

Keywords: Broad-crested weir, Discharge coefficient, FLUENT, k- ϵ Turbulence model, Volume of fluid

کاربردی خاصی برخوردار می‌باشند. متداول‌ترین نوع سرریزها شامل لبه پهن، لبه تیز، استوانه‌ای، تاج دایره‌ای و اوجی شکل می‌باشند. سرریزهای لبه پهن معمولاً از جنس بتن و عمود بر جهت جریان آب ساخته می‌شوند. محققین زیادی به بررسی عملکرد سرریزهای لبه پهن با طراحی‌های مختلف پرداخته‌اند. تحقیقات انجام شده عموماً مربوط به شیب وجه‌های پایین دست و بالادست متقارن می‌باشد.

مقدمه

سرریزها یکی از اجزای اصلی پروژه‌های آبی و سدسازی و از جمله سازه‌های مهمی هستند که به منظورهای مختلف ساخته می‌شوند. از مهم‌ترین وظایف سرریزها، اندازه‌گیری دبی آب و تنظیم سطح آب برای آبیگری از طریق دریچه‌ها از کانال‌های فرعی و اصلی است (حیدر پور و همکاران 1381). سرریزها از لحاظ سادگی ساخت و اقتصادی بودن از ویژگی‌های

روی این سرریزها با استفاده از مدل‌های آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و با در نظر گرفتن روش جزء حجم سیال¹ (VOF) به نتایج دقیق‌تری منجر می‌شود. لیوو همکاران (2002) جریان روی سرریزهای نیم‌دایره‌ای را شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و روش VOF برای بررسی پروفیل سطح آب استفاده شده است. هارگریوز و همکاران (2007) روش VOF را برای شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در سرریز لبه پهن ارزیابی نمودند و نتایج مناسبی بدست آوردند. شبیه‌سازی عددی جریان روی سرریزهای لبه پهن نوزنقه‌ای شکل توسط هان و همکاران (2011) انجام گرفت، در این تحقیق از مدل عددی Flow3D و روش VOF برای بررسی پروفیل سطح آب استفاده شد. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی عددی جریان و توزیع سرعت بر روی سرریز لبه پهن و تأثیر شیب بالادست و پایین دست بر روی دبی جریان با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ است. این تحقیق با بکارگیری نرم افزار FLUENT و روش حجم محدود با حل معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدزی انجام گرفته و سطح آب با روش VOF تعیین شده است. بررسی توزیع سرعت و توسعه لایه مرزی بر روی تاج سرریز لبه پهن با وجوه شیب دار و مقایسه آن با سرریز لبه پهن قائم از اهداف دیگر این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های آزمایشگاهی سارگیسون و پرس (2009) برای شبیه‌سازی جریان روی سرریز لبه پهن با وجوه شیب دار استفاده شده است. آزمایش‌ها بر روی فلومی با کف افقی به عرض 0/2 متر، ارتفاع 0/4 متر و طول 5/4 متر انجام شده است. سطح آب در پایاب در سطح پایین نگه داشته شده است تا بر روی جریان سرریز تأثیر نگذارد. سرریز از

هاگر و شوالت (1994) توزیع سرعت جریان و فشار هیدرواستاتیک را در فواصل مختلف روی تاج سرریز لبه پهن با شیب 90 درجه بررسی نمودند. فیتز و هاگر (1998) ضریب دبی جریان را برای سرریزهایی با شیب وجوه‌های مساوی (2H:1V) ارائه دادند. آنها نشان دادند دبی جریان را می‌توان در صورتی که جداسازی روی گوشه‌های بالادست کاهش یابد افزایش داد. جانسون (2000) ضریب دبی جریان (C_d) را برای سرریزهای لبه پهن و لبه تیز بدست آورد. او متوجه شد در صورتی که نمودار C_d در مقابل H_1/W رسم شود، برای $H_1/W < 2$ روی منحنی C_d یک افتادگی وجود دارد. در این نمودارها H_1 ، بار هیدرولیکی و W ارتفاع سرریز می‌باشد. گوگاس و همکاران (2006) با ساخت مدل‌های فیزیکی مختلف تحقیقات وسیعی روی عملکرد سرریز لبه پهن با مقطع مرکب با ارتفاع‌های مختلف ارائه نمودند. شکری و همکاران (1387) تأثیر شیب دار کردن وجه بالادست و پایین دست سرریزهای لبه پهن مستطیلی بر ضریب دبی و مشخصات جریان را مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها نشان داد که ضریب دبی جریان سرریز با تغییرات شیب پایین دست تقریباً ثابت می‌ماند در حالی که با تغییر شیب وجه بالادست سرریز، ضریب دبی جریان و در نتیجه ظرفیت تخلیه (C_d) سرریز متناسب با کاهش شیب بالادست افزایش می‌یابد. فلدر و چنسون (2012) توزیع سرعت و فشار و توسعه لایه مرزی را بر روی تاج سرریز لبه پهن بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که به ازای فاصله 0/7 $x/w < x/w$ ضخامت لایه مرزی از رابطه $\delta \approx x^{0.8}$ بدست می‌آید.

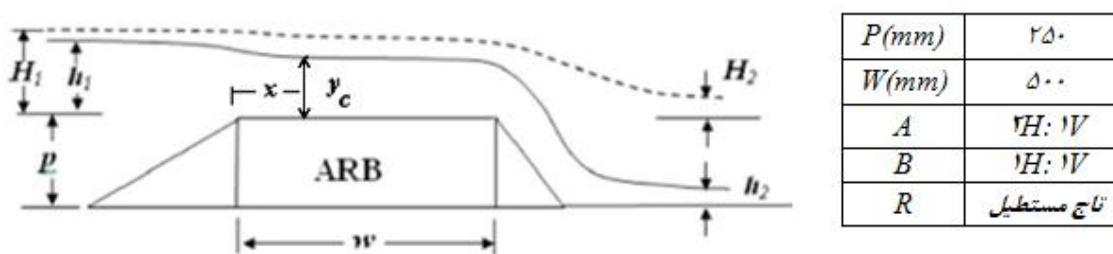
با توسعه تکنیک‌های پیشرفته عددی قابلیت مدل سازی جریان متلاطم امکان پذیر شده است. از این روش‌ها برای تعیین پروفیل سرعت، توسعه لایه مرزی، دبی جریان و تلاطم جریان می‌توان استفاده نمود. با توجه به اینکه در جریان متلاطم روی سرریز لبه پهن متلاطم دو فاز آب و هوا وجود دارد، شبیه‌سازی جریان

¹Volume of fluid

کف فلوم (P) برابر 0/25 متر و طول سرریز در راستای جریان (W) برابر 0/5 متر بوده است. همچنین منظور از مدل سرریز ARB سرریز لبه‌پهن با شیب بالادست برابر 2 افقی به یک عمودی (A) و شیب وجه پایین‌دست یک افقی به یک عمودی (B) است که در مورد سرریز BRA این مسئله بر عکس می‌شود. شکل 1 نمایی از مدل سرریز ARB آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (2009) و همچنین مشخصات مربوط به آن را نشان می‌دهد.

سه قسمت وجه بالادست، وجه پایین‌دست و تاج مستطیلی شکل تشکیل شده است. وجه پایین‌دست و بالادست با شیب‌های مختلف 1H:1V و 2H:1V بوده و طول تاج ثابت است. سرریزها بر اساس عدد فرود شبیه‌سازی شده است. با توجه به اینکه عدد رینولدز در محدوده 90500 - 24000 می‌باشد جریان کاملاً متلاطم برقرار است.

مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل‌ها در جدول 1 ارائه گردیده است. ضمناً مقدار ارتفاع سرریز از



شکل 1- نمایش مدل فیزیکی سرریز ARB در تحقیقات سارگیسون و پرسی (2009).

جدول 1- مشخصات هیدرولیکی جریان بر روی سرریز در آزمون‌های تجربی سارگیسون و پرسی (2009).

مدل سرریز	شماره آزمون	$Q(m^3/s)$	$h_1(m)$	$H_1(m)$	$e=H_1/(H_1+W)$
ARB	1	0/0181	0/147	0/15	0/23
	2	0/0152	0/130	0/133	0/209
	3	0/0109	0/105	0/106	0/175
	4	0/0079	0/086	0/087	0/147
	5	0/0055	0/065	0/066	0/116
BRA	1	0/0164	0/140	0/142	0/221
	2	0/0133	0/122	0/124	0/198
	3	0/0102	0/103	0/104	0/172
	4	0/0073	0/083	0/084	0/142
	5	0/0043	0/065	0/066	0/111

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(ru_i) = 0 \quad [1]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(ru_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(ru_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}(m + m_i)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + rg_j \quad [2]$$

معادلات حاکم

معادلات ناویر-استوکس متوسط رینولدزی

برای هر یک از فازهای جریان (آب و هوا) به فرم زیر در نظر گرفته می‌شوند (لیو و همکاران 2002).

فرض می شود که فصل مشترک دو سیال در هر سلول بصورت خط شیب دار بوده و جابجایی سیال در سلول-ها با توجه به شکل خطوط بدست می آید (بی نام 2006).

در این تحقیق از مدل های آشفتگی دو معادله ای $k-\epsilon$ استاندارد استفاده گردید.

در مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ روابط زیر برقرار است (پاپیجوراکیس و آسنیس 1999).

$$r \frac{DK}{Dt} = P - re + \frac{\partial}{\partial x_i} (m a_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) \quad [7]$$

$$r \frac{De}{Dt} = \frac{e}{k} (C e_1 P - C e_2 re) - rR + C e_3 re \nabla \cdot u + \frac{\partial}{\partial x_i} (m a_e \frac{\partial e}{\partial x_i}) \quad [8]$$

در این روابط k انرژی جنبشی آشفتگی، ϵ نرخ اتلاف انرژی و P تولید انرژی که از رابطه زیر بدست می آید.

$$P = 2C_m r \frac{k^2}{e} [S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} (\nabla \cdot U)^2] - \frac{2}{3} r k \nabla \cdot U \quad [9]$$

در معادله های (7)، (8) و (9) ضرایب تجربی مدل $k-\epsilon$ استاندارد $C_{e1}=1/44$ ، $R=0$ ، $\alpha_e=0/77$ ، $\alpha_k=1$ ، $C_m=0/09$ ، $C_{e2}=1/68$ و $C_{e3}=-1$ می باشند.

مشخصات عددی مدل و شرایط مرزی و اولیه

برای تحلیل عددی جریان روی سرریز ابتدا هندسه مدل در محیط Gambit ایجاد و شبکه بندی شد. برای شبکه بندی مدل عددی از شبکه های غیرساختاری استفاده گردید. تعداد المان برای شبکه بندی سرریز در محدوده 5000 تا 13000 بررسی گردید. با بررسی انجام گرفته تعداد المان بیشتر از 11000 و 9000 بترتیب برای مدل های ARB و BRA تأثیری بر روی دقت محاسبات ندارد بر این اساس تعداد المان مناسب مطابق جدول 2 در نظر گرفته شده است. جدول 2 تعداد گره ها،

$$r = a_A r_A + a_w r_w \quad [3]$$

در رابطه های فوق U_j ، U_i نشان دهنده مولفه های سرعت جریان در جهات x و y ، α_A و α_w نسبت هوا و آب ρ_w ، ρ_A و ρ به ترتیب جرم مخصوص هوا، آب و جرم مخصوص مخلوط آب و هوا می باشد. همچنین μ ، μ_i به ترتیب ویسکوزیته گردابی و ویسکوزیته مخلوط آب و هوا بوده که از روابط (4) و (5) بدست می آید.

$$m_i = r C_m \frac{k^2}{e} \quad [4]$$

$$m = a_A m_A + a_w m_w \quad [5]$$

که در آن m_A و m_w ویسکوزیته هوا و آب است.

روش جزء حجم سیال (VOF)

بر آورد ضریب دبی در سرریز لبه پهن با وجه های شیب دار با استفاده از روش جزء حجم سیال (VOF) انجام شد. در روش جزء حجم سیال (VOF) تابع $F(x,y,t)$ برای تعیین پروفیل سطح آب تعریف می شود. تابع F به فرم رابطه زیر بوده و مقدار آن بین 0 تا 1 متغیر می باشد (بی نام 2006).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_j \frac{\partial F}{\partial x_j} = 0 \quad [6]$$

برای حل معادله فوق در سلولی که پر از آب است مقدار تابع F برابر یک می باشد. در سلول خالی (پر از هوا) مقدار تابع برابر صفر است و در سلول هایی که سطح آب وجود دارد این مقدار بین صفر و یک می باشد. معادله جزء حجم سیال با روش های مختلف حل می شود که در این تحقیق از روش بازسازی هندسی¹ استفاده شده است.

در روش بازسازی هندسی سطح مشترک جریان بین دو فاز به روش خطوط جزء بدست می آید که در شبکه بندی غیرساختاری متداول بوده و از دقت بیشتری برخوردار است. در روش بازسازی هندسی

¹ Geometric Reconstruction

و پرسى (2009) پرداخته شده است. با شبیه‌سازی عددی جریان بر روی سرریزهای لبه‌پهن ARB و BRA مشخصات ضریب دبی و پروفیل سطح آب در حالت‌های مختلف تعیین گردید. شبیه‌سازی عددی برای 2 نوع سرریز ARB و BRA با هندسه متفاوت که هر سرریز با 5 دبی (جمعاً 10 مدل) توسط نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفت.

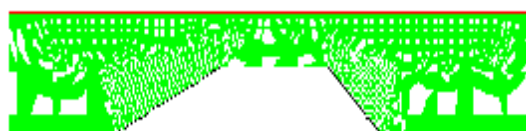
پروفیل سطح آب

پروفیل سطح آب بر روی سرریز لبه‌پهن با وجه‌های شیب‌دار متفاوت، با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد تعیین گردید. در شکل‌های 3 و 4 پروفیل‌های سطح آزاد آب بدست آمده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد و جزء حجم سیال VOF برای آزمون ARB و BRA نشان داده شده است. از روی این شکل‌ها می‌توان استنباط کرد که در پروفیل‌های سطح آب نمودارها از یک روند ثابتی پیروی می‌کنند. هر یک از 5 منحنی پروفیل سطح آب متعلق به دبی‌های پنج‌گانه مشخص شده در جدول 1 می‌باشد. پایین افتادگی سطح آب در ابتدای تاج سرریزها بیانگر تطابق مطلوب مدل عددی و آزمون‌های تجربی می‌باشد.

وجوه و سلول‌ها را در دو مدل نشان می‌دهد. شرایط مرزی بصورت فشار ورودی جریان آب، فشارخروجی و دیواره در بستر کانال تعریف شد. روش حل مدل عددی جریان روی سرریز غیرماندگار است. شرایط اولیه در همه سلول‌های بالادست سرریز فشار ورودی، سیال آب بوده و تابع F برابر یک می‌باشد. در شکل 2 نمایی از شبکه‌بندی وارد شده در محیط Gambit داده شده است.

جدول 2- مشخصات شبکه بندی مدل عددی.

مدل	گره ها	وجوه	سلول‌ها
ARB	11445	22552	11108
BRA	9311	18317	9007



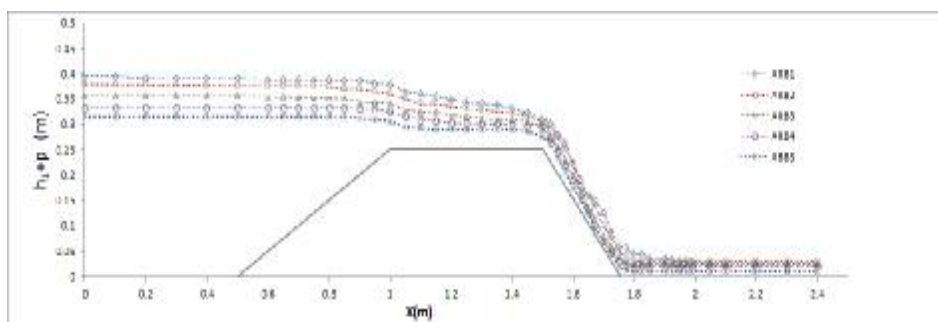
Grid .

Grid 5.3 126. pms. 507. r238. 1. neteey.

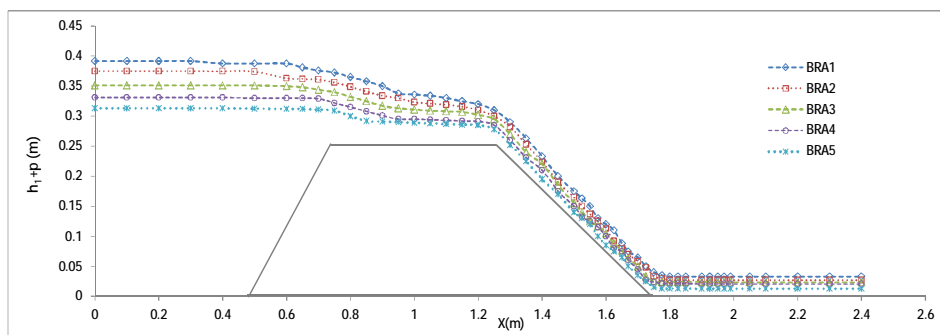
شکل 2- نمایش شبکه‌بندی سرریز ARB در محیط Gambit

نتایج و بحث

در این تحقیق به بررسی مدل عددی جریان روی سرریز و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی سارگیسون



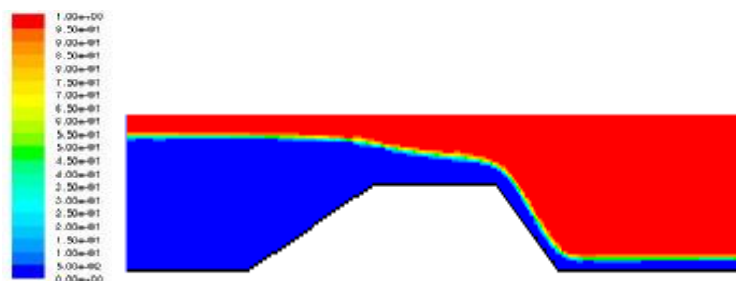
شکل 3- پروفیل‌های سطح آزاد آب محاسبه شده برای مدل ARB .



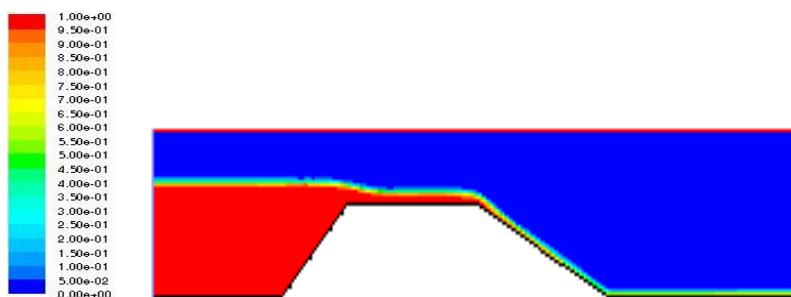
شکل 4- پروفیل‌های سطح آزاد آب محاسبه شده برای مدل BRA.

بعد x/w محاسبه گردید. مقادیر x/w در سرریزهای ARB و BRA در جدول 3 نشان داده شده است. در شکل‌های 5 و 6 پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار فلوئنت برای آزمون‌های ARB1 و BRA5 نمایش داده شده است.

همچنین محل تشکیل عمق بحرانی بر روی سرریز لبه پهن از روی پروفیل‌های سطح آب (شکل های 3 و 4) تعیین گردید. در این بررسی فاصله تشکیل عمق بحرانی از ابتدای تاج سرریز به صورت پارامتری



شکل 5- شبیه سازی پروفیل سطح آزاد آب با روش VOF در آزمون ARB1.



شکل 6- شبیه سازی پروفیل سطح آزاد آب با روش VOF در آزمون BRA 5.

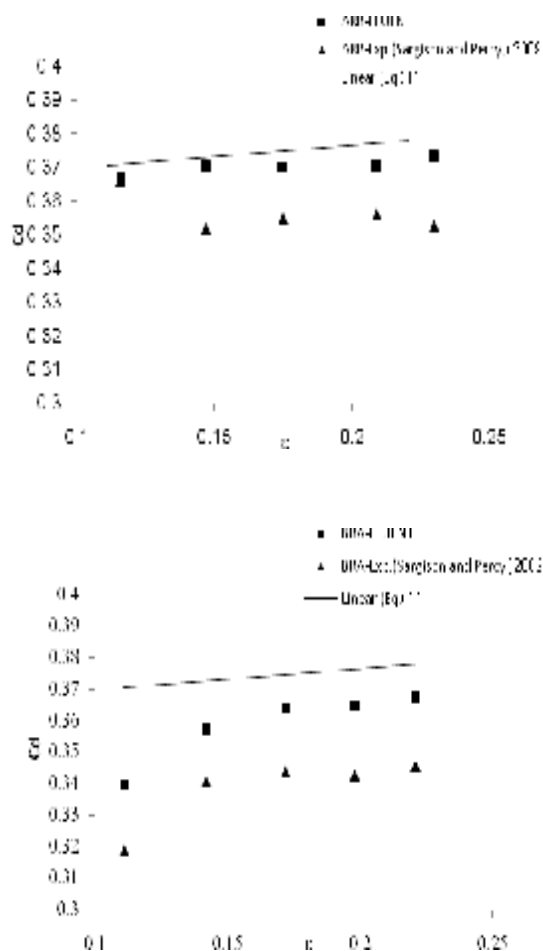
ضریب دبی (C_d)

$$Q = C_d b \sqrt{2gH_1^3}$$

[10]

بر اساس تحقیقات فیتز و هاگر (1998) ضریب دبی برای سرریزهای لبه پهن از معادله 10 بدست می‌آید.

تجربی سارگیسون و پرسی (2009) به ازای $\varepsilon < 0.175$ دارای اختلاف بیشتری با مقادیر رابطه 11 دارد و با افزایش ε اختلاف مقادیر ضریب دبی کاهش می‌یابد.



شکل 7- مقایسه ضرایب دبی بدست آمده از مدل آشفتگی با داده‌های تجربی سارگیسون و پرسی (2009) و معادله 11.

همچنین هنگامی که نمودار C_d به ازای $\varepsilon = H_1/(H_1+W)$ رسم گردد ($0 < \varepsilon < 1$) C_d را می‌توان از معادله 11 نیز بدست آورد.

$$C_d = 0.43 + 0.06 \sin[p(e - 0.55)] \quad [11]$$

به منظور ارزیابی توانایی مدل فلونت در شبیه‌سازی دقیق دبی جریان شاخص آماری خطای نسبی RE^1 محاسبه گردید. خطای نسبی از رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$RE = \frac{|Y_o - Y_c|}{Y_o} \quad [12]$$

که در این رابطه Y_o و Y_c به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

جدول 3 ضریب دبی (C_d) و دبی‌های بدست آمده از مدل عددی برای آزمون‌های مختلف را نشان می‌دهد. با مقایسه مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که اختلاف اندکی بین ضریب دبی آزمایشگاهی و مدل وجود دارد. مقادیر خطای نسبی ضریب دبی بدست آمده از مدل عددی و داده‌های تجربی سارگیسون و پرسی (2009) برای آزمون‌های مختلف در محدوده 0/14 تا 6/54 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده انطباق مقادیر ضریب دبی مدل عددی و آزمایشگاهی است.

در شکل 7 ضرایب دبی بدست آمده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و داده‌های آزمایشگاهی برای آزمون‌های ARB و BRA نشان داده شده است. از طرفی با مقایسه ضریب دبی مدل آشفتگی در سرریز ARB با ضرایب دبی تجربی سارگیسون و پرسی (2009) و رابطه 11 می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر ضریب دبی بدست آمده از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد تطابق خوبی با ضریب دبی آزمایشگاهی دارد. همچنین در سرریز BRA مقادیر ضریب دبی بدست آمده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و ضرایب

¹ Relative Error

جدول 3- مشخصات جریان در مدل عددی و آزمایشگاهی.

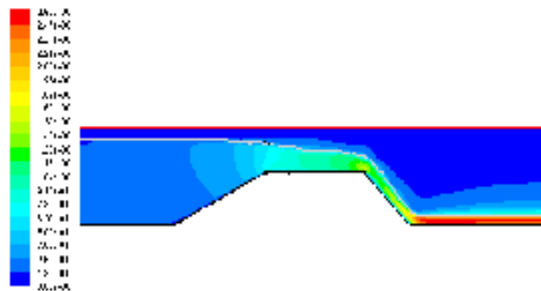
مدل سرریز	آزمون	$Q(m^3/s)$ (Fluent)	$h_f(m)$ (Fluent)	Cd (exp)	Cd (Fluent)	Cd رابطه 11	e	$\frac{RE}{Cd(F)-Cd(exp)/Cd(exp)^2}$	$\frac{RE}{h(F)-h(exp)/h(exp)}$	محل تشکیل عمق بحرانی x/w
ARB	1	0/0192	0/145	0/353	0/3734	0/3793	0/23	5/79	1/36	0/48
	2	0/0159	0/13	0/356	0/3704	0/3773	0/209	4/046	0	0/4
	3	0/0113	0/106	0/355	0/361	0/3745	0/175	4/22	0/95	0/4
	4	0/0084	0/0825	0/352	0/3699	0/3727	0/147	5/078	4/06	0/36
	5	0/0055	0/065	0/366	0/3665	0/3712	0/116	0/143	0	0/4
BRA	1	0/0174	0/141	0/346	0/3674	0/3784	0/221	6/193	0/71	0/36
	2	0/0141	0/124	0/343	0/3649	0/3762	0/198	6/377	1/63	0/4
	3	0/0108	0/101	0/344	0/3639	0/3743	0/172	5/772	1/94	0/3
	4	0/0077	0/081	0/341	0/3574	0/3725	0/142	4/803	2/4	0/3
	5	0/0053	0/063	0/319	0/3532	0/3711	0/111	6/541	3/07	0/3

h(F) و h(exp) به ترتیب مقادیر بار هیدرولیکی اندازه گیری شده و شبیه سازی عددی می باشد.

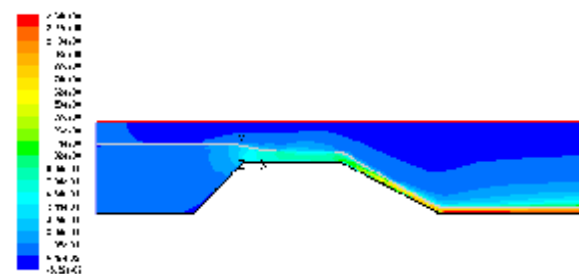
سرعت متوسط جریان در بالادست سرریزهای ARB2 و BRA4 به ترتیب برابر 0/204 و 0/109 متر بر ثانیه است که با مقادیر سرعت متوسط آزمایشگاهی برابر 0/2 و 0/11 تطابق خوبی دارد. همچنین حداکثر سرعت در پایین دست سرریزهای ARB2 و BRA4 به ترتیب برابر 2/6 و 2/3 متر بر ثانیه می باشد.

منحنی های هم سرعت

با استفاده از نرم افزار فلونت می توان منحنی های هم سرعت را نیز بدست آورد. شکل 8 و 9 منحنی های سرعت شبیه سازی شده برای مدل های ARB2 و BRA4 را نشان می دهد. با توجه به منحنی های هم سرعت برای مدل های ARB2 و BRA4 مشاهده می شود که سرعت در بالادست سرریز کم بوده و در پایین دست افزایش می یابد. از این نمودارها می توان نتیجه گرفت که



شکل 9- شبیه سازی منحنی های هم سرعت در سرریز BRA4.

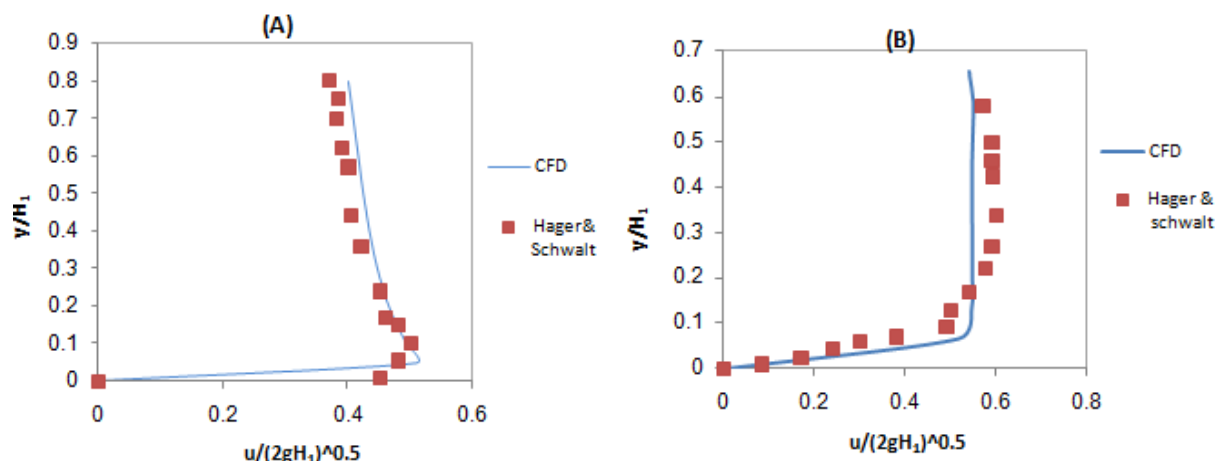


شکل 8- شبیه سازی منحنی های هم سرعت در سرریز ARB2.

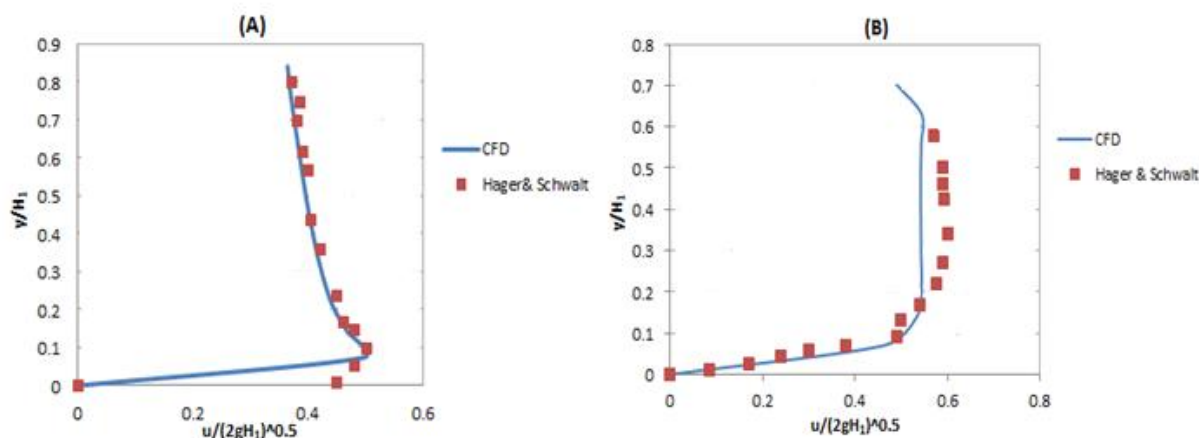
چرخشی) دارای دقت بیشتری در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

شکل‌های (A)، (B) مربوط به سرریز ARB1 و شکل‌های (A)، (B) مربوط به سرریز BRA1 بوده که در هر دو سرریز آزمون با حداکثر دبی جریان برای مقایسه با داده‌های تجربی هاگر و شوالت (1994) انتخاب شده است. با توجه به شکل‌های ارائه شده در سرریز BRA1 تطابق بیشتری بین سرعت مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی در فواصل $x/H_1=0$ و $x/H_1=1$ وجود دارد که احتمالاً ناشی از شیب بیشتر وجه بالادست این سرریز در مقایسه با سرریز ARB1 است.

در شکل‌های 10 و 11 تغییرات سرعت‌های بی بعد $u/(2gH_1)^{0.5}$ در عمق‌های بی بعد جریان y/H_1 بر روی تاج سرریز شیب‌دار نشان داده شده است. برای ارزیابی نتایج مدل عددی در پیش بینی سرعت طولی از داده‌های تجربی هاگر و شوالت (1994) استفاده گردید. به طور کلی تغییرات سرعت (شکل‌های 10 و 11) به طرف تاج سرریز با افزایش فاصله از ابتدای تاج ($x=0$) افزایشی است. با توجه به نمودارهای سرعت و روند تغییرات آن می‌توان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی هاگر و شوالت (1994) و مدل عددی وجود دارد. همچنین مدل عددی در نزدیکی دیواره‌ها و در مناطق با سرعت‌های منفی (جریان

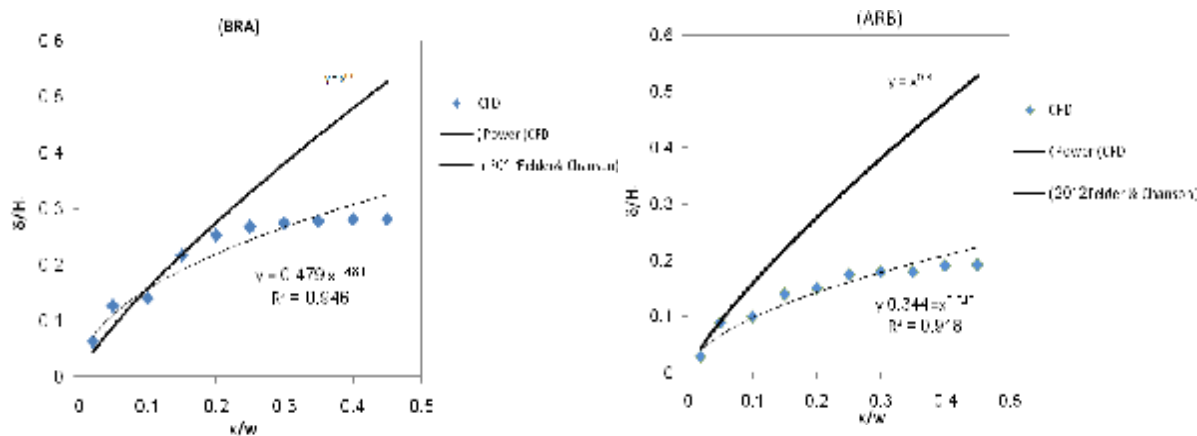


شکل 10- مقایسه تغییرات سرعت طولی بی بعد در فواصل مختلف تاج سرریز در مدل ARB1 (A) $x/H_1=0$, $x/H_1=1$ (B)



شکل 11- مقایسه تغییرات سرعت طولی بی بعد در فواصل مختلف تاج سرریز در مدل BRA1 (A) $x/H_1=0$, $x/H_1=1$ (B)

(2012) به صورت سرریز لبه پهن با وجوه قائم می-توان چنین استنباط نمود که توسعه لایه مرزی در فاصله کوتاه تری بر روی تاج انجام می-گیرد که این فاصله در سرریزهای ARB و BRA تقریباً برابر $x/w \approx 0.4$ می-باشد. معادلات توانی ارائه شده در شکل های 12 برای سرریزهای ARB5 و BRA5 به ترتیب دارای توان 0/55 و 0/48 است که در مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی فلدر و چنسون (2012) ($\delta \approx x^{0.8}$) مقادیر کمتری دارند بنابراین ضخامت لایه مرزی δ در این نوع سرریزها کمتر از سرریزهای لبه پهن معمولی است.



شکل 12- مقایسه توسعه لایه مرزی بر روی تاج سرریزهای ARB5 و BRA5 با رابطه فلدر و چنسون (2012).

است که می-توان خصوصیات هیدرولیکی جریان از جمله کنتورهای سرعت، پروفیل های سرعت و توسعه لایه مرزی را به دست آورد که در این تحقیق الگوی سرعت در نواحی مختلف محدوده محاسباتی نمایش داده شده است. نتایج منحنی های هم سرعت در مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد نشان می-دهد که در بالادست سرریز سرعت کم و در پایین دست سرریزهای لبه پهن سرعت افزایش می-یابد. مقادیر سرعت متوسط در بالا-دست سرریزها با مقادیر عددی شبیه سازی شده تطابق دارد. با توجه به نمودارهای سرعت میتوان نتیجه گرفت که تطابق بسیار خوبی بین داده های آزمایشگاهی هاگر و شوالت (1994) و مدل عددی وجود دارد. مقایسه

تغییرات سرعت جریان در نزدیکی و روی تاج سرریز نشان دهنده توسعه لایه مرزی بر روی تاج سرریز می-باشد (فلدر و چنسون 2012). ضخامت لایه مرزی δ در هر مقطع طولی از تاج سرریز برابر عمقی است که در آن سرعت جریان 0/99 سرعت یکنواخت است. برای بررسی توسعه لایه مرزی بر روی تاج سرریز از نتایج مدل عددی دو آزمون ARB5 و BRA5 استفاده گردید که به صورت شکل های 12 نشان داده شده است. با مقایسه توسعه لایه مرزی در سرریزهای با وجوه شیب دار و مدل آزمایشگاهی فلدر و چنسون

نتیجه گیری کلی

مقایسه نتایج مدل عددی برای شبیه سازی پروفیل سطح آب با مدل فلوئنت نشان می-دهد که نتایج مدل عددی با مقادیر آزمایشگاهی سارگیسون و پرسی (2009) همخوانی دارد و خطای محاسباتی مقادیر بار هیدرولیکی (h) در سرریزهای ARB و BRA در محدوده صفر تا 4/06 درصد قرار دارد. ضرایب دبی بدست آمده از مدل عددی نیز با مقادیر آزمایشگاهی تحقیق سارگیسون و پرسی (2009) تطابق خوبی دارد. همچنین مقادیر ضرایب دبی با نمودار مربوط به معادله 11 مقایسه شده است که این ضریب تقریباً برابر 0/37 بدست آمده است. یکی دیگر از مزایای مدل عددی این

طول تاج (w) به دست آمد در صورتی که در سرریزهای لبه‌پهن توسعه ضخامت لایه مرزی در فاصله $x/w \geq 0.6$ است. همچنین ضخامت لایه مرزی δ در سرریزهای با وجوه شیب دار کمتر از سرریزهای لبه‌پهن معمولی است.

توسعه لایه مرزی در سرریزهای ARB و BRA با مدل آزمایشگاهی فلدر و چنسون (2012) به صورت سرریز لبه‌پهن با وجوه قائم نشان داد که در این سرریزها توسعه لایه مرزی در فاصله کوتاه‌تری بر روی تاج سرریز انجام می‌گیرد که این فاصله تقریباً 0/4 برابر

منابع مورد استفاده

حیدرپور م، افضل‌ی مهر ح و خرمی ا، 1381. کاربرد تابع جریان در اطراف سیلندر دایره‌ای شکل در سرریزهای تاج دایره‌ای. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد سوم، شماره ششم. صفحه‌های 51 تا 60.

شکری ن، فرهودی ج و گودرزی ا، 1387. تأثیر شیب وجه پایین‌دست و بالادست سرریز مستطیلی لبه‌پهن بر شرایط جریان. دانشکده فنی، دانشگاه تبریز. شماره 37. صفحه‌های 9 تا 19.

Anonymous, 2006. Fluent 6.3 User's Guide. Chap. 23. Fluent Incorporated. Lebanon.

Felder S and Chanson H, 2012. Velocity and pressure measurements on broad-crested weir: physical measurement. 4th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, 9-11 February, Porto, Portugal.

Fitz HM and Hager WH, 1998. Hydraulics of embankment weirs. Journal of Hydraulic Engineering 124(9): 963-971.

Gogus M, Defne Z and Ozkandemir V, 2006. Broad-crested weirs with rectangular compound cross sections. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 132(3): 272-280.

Hager W H and Schwalt M, 1994. Broad-crested weir. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 120(1):13-26.

Haun S, Reidar BN, Feurich O and Feurich R, 2011. Numerical modeling of flow over trapezoidal broad crested weir. Journal of Engineering Application of Computational Fluid Mechanics 5(3): 327-405.

Hargreaves DM, Morvan HP and Wright NG, 2007. Validation of the volume of fluid method for free surface calculation: the broad crested weir. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 1(2):136-146.

Johnson MC, 2000. Discharge coefficient analysis for flat-topped and sharp-crested weirs. Irrigation Sciences 19:133-137.

Liu CR, Ma WJ and HuHe AD, 2002. Numerical investigation of flow over a weir. Journal of Acta Mechanica Sinica 18: 594-602.

Papageorgakis GC and Assanis DN, 1999. Comparison of linear and nonlinear RNG-based models for incompressible turbulent flows. Journal of Numerical Heat Transfer 35:1-22.

Sargison J E, and Percy A, 2009. Hydraulics of broad-crested weirs with varying side slopes. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 135(1): 115-118.