

شبیه‌سازی عددی جریان آشفته با سطح آزاد در کانال دارای سرریز جانبی شراره محمودی نیا¹، میترا جوان² و افشین اقبال زاده²

تاریخ دریافت: 90/10/26 تاریخ پذیرش: 91/03/09

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه رازی

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی - پژوهشکده تحقیقات پیشرفته آب و فاضلاب، دانشگاه رازی

*مسئول مکاتبه: E-mail: javanmi@gmail.com

چکیده

سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که در انحراف آب اضافی در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری و همچنین در شبکه‌های آبیاری و زهکشی به عنوان تنظیم کننده سطح آب به کار برده می‌شوند. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار فلوئنت الگوی جریان و سطح آزاد آب در یک کانال همراه با سرریز جانبی لبه تیز با بهره‌گیری از مدل آشفتگی RSM و روش VOF شبیه‌سازی شده است. مقایسه تغییرات طولی تراز سطح آب و دبی عبوری از کانال اصلی شبیه‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده قابلیت مدل عددی در شبیه‌سازی الگوی جریان از روی سرریزهای جانبی می‌باشد. با مقایسه الگوهای جریان عبوری از روی سرریز جانبی در بیشترین و کمترین نسبت آبگیری مشخص گردید که فاصله صفحه تقسیم جریان از دیواره سمت آبگیر در عمق تغییر می‌نماید. همچنین اندازه و محل قرارگیری جریان گردابه‌ای سه بعدی تشکیل شده، متاثر از نسبت آبگیری سرریز جانبی است.

واژه‌های کلیدی: سرریز جانبی، سطح آزاد، شبیه‌سازی عددی، فلوئنت.

Numerical Simulation of Turbulent Free Surface Flow in Channel with Side -Weir

Sh Mahmoodinia¹, M Javan^{*2} and A Eghbalzadeh²

Received: 16 January 2012 Accepted: 29 May 2012

¹MSc Student, Dept. of Civil Eng., Razi Univ., Kermanshah, Iran.

²Assist. Prof., Dept. of Civil Eng., Razi Univ. Water and Wastewater Research Center, Razi Univ., Kermanshah, Iran.

* Corresponding Author: E-mail: javanmi@gmail.com

Abstract

Side weirs are flow diversion devices which are widely used in irrigation and drainage systems as a head regulator of distributaries, land drainage and urban sewage systems. In this research, flow pattern and free surface of water in a channel with a sharp crested side -weir is simulated by using FLUENT software. The volume of fluid (VOF) scheme and RSM turbulence model are used for numerical simulation of the turbulent free surface flow. Comparison between numerical results and laboratory measurements of water surface profile and channel discharge show that the model can predict the flow pattern over side weir with reasonable accuracy. By comparing flow patterns over a side-weir within the maximum and minimum discharge ratio it was revealed that, distance of the dividing stream surface from left wall varies in depth. Also size and location of 3D vortex flow is dependent on discharge ratio of side-weir.

Keywords: FLUENT, Free surface, Numerical simulation, Side- weir.

مقدمه

جریان بر روی این سرریزها، از نوع جریان متغیر مکانی بوده و بنابراین حل تحلیلی معادلات حاکم بر جریان روی سرریزهای جانبی بسیار پیچیده می باشد. قرارگیری سرریز جانبی تاثیر قابل توجهی بر پروفیل سرعت در مجاورت سرریز و انرژی مخصوص دارد. به طوری که افزایش انرژی مخصوص در این نوع سرریزها بیش از سرریزهای معمولی بوده است و وجود اثر مکشی در نزدیکی سرریز جانبی موجب ایجاد ناحیه جدایی جریان در دیواره خارجی کانال اصلی و تقسیم خطوط جریان می شود. با توجه به

سرریزهای جانبی از انواع سازه های هیدرولیکی می باشند که در دیواره کانال اصلی احداث شده و هنگامی که سطح آب در کانال بالاتر از تاج سرریز قرار می گیرد، قسمتی از جریان توسط آن به خارج از کانال هدایت می گردد. این سازه در انحراف آب اضافی در سیستم های جمع آوری فاضلاب شهری، همچنین در کنترل سیلاب و به عنوان سازه اضطراری در تأسیسات هیدرولیکی بزرگ چون سدها و شبکه های آبیاری و زهکشی به کار برده می شود. به طور کلی

مستطیلی در کانال‌های زهکشی، مطالعاتی را انجام دادند. در این مطالعات، اثر سطح مقطع غیر منشوری و شیب بستر بر پروفیل سطح آزاد آب بررسی شده‌است. براساس نتایج ارائه شده توسط آنها، در جریان زیر بحرانی تفاوت پروفیل‌های سطحی محور کانال و دیوارهای جانبی مختصر می‌باشد. همچنین حالت‌های مختلف جریان از جمله شرایط ورودی فوق بحرانی و امکان شکل‌گیری پرش هیدرولیکی در طول جریان مورد بحث قرار گرفته است. هاگر (1999) مفاهیم و معادلات اساسی حاکم بر جریان در کانال‌های جانبی را مطرح نمود. جلیلی قاضی زاده و همکاران (1376) 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. فرض انرژی ثابت که اساس روش‌های مرسوم تحلیل سرریزهای جانبی است، دلالت بر این نکته دارد که در هر مقطع مولفه طولی (در راستای کانال اصلی) بردار سرعت جریان ریزشی معادل با سرعت متوسط در کانال اصلی است. دورگا و پیلای (2008) به بررسی سرریزهای لبه پهن در شرایط جریان فوق بحرانی پرداختند. آنها مشاهده نمودند که مولفه طولی بردار سرعت جریان عبوری از روی سرریز همواره بیشتر از سرعت متوسط در کانال اصلی می‌باشد. ایزدی نیا و همکاران (1387) با ارائه مدل فیزیکی در یک کانال مستقیم به بررسی جریان عبوری از روی سرریز جانبی تاج دایره‌ای پرداختند و با استفاده از آنالیز ابعادی و تحلیل آماری و ایجاد رگرسیون، معادله‌ای برای ناحیه جداولگی جریان ارائه کردند.

استفاده از مدل‌های عددی در شبیه‌سازی جریان سبب کاهش هزینه‌های زیاد مدل‌های آزمایشگاهی می‌گردد. از جمله تحقیقات عددی انجام شده بر روی سرریزهای جانبی می‌توان به تحقیق انجام شده توسط کاریزی و هنر (1387) اشاره کرد. کاریزی و هنر (1387) به بررسی آزمایشگاهی و عددی توزیع تنش

ساختار سه بعدی و پیچیده الگوی جریان گذرنده از سرریز جانبی در کانال مستقیم، تحقیقات بسیاری پیرامون جریان فوق انجام گرفته‌است. اولین آزمایش‌ها روی این نوع سرریزها توسط انگلس (1920) و سپس توسط کلمن و اسمیت (1923) انجام گرفته‌است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها با یکدیگر تطابق نداشت. در آزمایش‌های اول، پروفیل سطح آب افزایشی و در آزمایش‌های دوم این پروفیل کاهشگی گزارش داده شده‌است. به دنبال مطالعات دقیق فورشه‌ایمر (1930) یک روش تحلیلی با فرض موازی بودن خط انرژی با تاج سرریز و کف کانال و همچنین فرض خطی بودن پروفیل سطح آب برای سرریزهای جانبی لبه تیز ارائه شد. دی‌مارچی (1934) برای اولین بار معادله جریان متغیر مکانی با کاهش دبی را با فرض ثابت بودن انرژی در طول سرریز، برای کانال‌های افقی مستطیلی زمانی که بتوان از اصطکاک صرف نظر کرد را حل نمود. اکرز (1957) در حالتی که مقدار عمق جریان در راستای محور نزدیک به دیواره بیرونی اندازه‌گیری شود پیشنهاداتی در مورد مقدار ضریب شدت جریان ارائه داد. سابرامانیا و آوستی (1972) پیرامون ضریب دبی جریان روی این سرریزها در شرایط فوق بحرانی و زیر بحرانی مطالعاتی انجام دادند. آنها نشان دادند افت جریان در اثر وجود سرریز جانبی در ابتدای سرریز ناچیز می‌باشد. هم چنین با اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت نشان دادند سرریز جانبی مستطیلی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در توزیع سرعت در مجاورت سرریز خواهد داشت. هاگر (1987) سرریز-های جانبی با سرریزهایی که در جهت جریان قرار می‌گیرند را با ثابت بودن شرایط، مورد مطالعه قرار داد و مشاهده نمود که میزان انرژی مخصوص در سرریزهای جانبی بیش از سرریزهای معمولی است و عمق جریان در این نوع سرریزها تقریباً برابر با میزان انرژی مخصوص در سرریزهای معمولی است. برمن و هاگر (1989) بر روی جریان در کانال جانبی با مقطع

$$\frac{\partial(ru_i)}{\partial t} + \frac{\partial(ru_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(p)}{\partial x_i} \quad [2]$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_j} m \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-ru'_i u'_j)}{\partial x_j}$$

در معادلات فوق، $u_i (i=1,2,\dots)$ به عنوان مؤلفه‌های متوسط سرعت در سه جهت متناظر، p فشار، r چگالی، m ویسکوزیته دینامیکی و جمله $\overline{ru'_i u'_j}$ به عنوان تنش‌های رینولدز شناخته می‌شوند. این معادلات دارای سه مجهول شامل مؤلفه‌های سرعت در سه جهت (u, v, w) و فشار می‌باشند. از طرفی معادله اندازه حرکت حاوی چهار مؤلفه مجهول تنش رینولدز است، لذا سیستم معادلات فوق کامل نیست و بایستی با استفاده از مدل آشفتگی مناسب تنش‌های رینولدز محاسبه شوند. در این تحقیق از مدل RSM به واسطه توانایی آن در شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه، نواحی چرخشی و توزیع تنش برشی استفاده شده است. همچنین جهت شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده شده است. در روش VOF از یک تابع متغیر بنام a استفاده می‌شود که جزء حجم آب در سلول محاسباتی است. با حل معادله پیوستگی زیر برای جزء حجمی آب a ، جزء حجمی درکل میدان حل تعیین می‌گردد:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} + w \frac{\partial a}{\partial z} = 0 \quad [3]$$

اگر a برابر 1 باشد نشان دهنده پر بودن سلول از آب می‌باشد و اگر a برابر صفر باشد یعنی سلول پراز هوا است. برای $0 < a < 1$ درصدی از سلول آب و درصدی از آن هوا می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن سطح آزاد در یک جزء حجمی معین می‌توان سطح آزاد جریان را مشخص کرد. در تحقیق حاضر، سطح آزاد جریان در جزء حجمی آب برابر 0/5 تعریف شده است.

برشی روی سرریزهای جانبی لبه پهن مستطیلی با ورودی تیز گوشه و گرد گوشه پرداختند. آنها با مقایسه تنش برشی حاصل از شبیه‌سازی عددی با نرم افزار فلونتت بیان کردند که در ورودی‌های گرد گوشه به نحو چشمگیری از میزان جداسازی جریان در لبه‌های ورودی سرریز جانبی و همچنین از میزان جریان‌های ثانویه غیرموثر روی سرریز جانبی کاسته می‌شود که این امر باعث افزایش راندمان آبگیری خواهد شد. مانگارولکار (2010) با بهره‌گیری از نرم افزار ANSYS ICEM به شبیه‌سازی عددی سطح آزاد سرریز جانبی با ارتفاع تاج صفر با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ (RNG) پرداخت و محل تشکیل نقطه ایستایی بدست آمده از بررسی تحلیلی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه کرد.

مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تاکنون الگوی جریان در کانال دارای سرریز جانبی لبه تیز با ارتفاع تاج بزرگتر از صفر مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از تحقیق حاضر استفاده از نرم افزار فلونتت نسخه 6/3/26 به منظور بررسی الگوی جریان و سطح آزاد آب در یک کانال مستقیم همراه با سرریز جانبی لبه تیز با بهره‌گیری از مدل آشفتگی RSM و روش VOF می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم بر جریان

قوانین حاکم بر جریان عبارتند از قانون بقای جرم و اندازه حرکت که در حالت جریان آشفتگی و به صورت متوسط‌گیری شده در زمان، معادله پیوستگی (رابطه 1) و رینولدز (رابطه 2) از آنها استخراج می‌شود (دیلی 1973):

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

معادلات حاکم حل عددی

همان طور که اشاره شد جهت حل معادلات از نرم افزار فلونت استفاده شده است. این نرم افزار کل میدان جریان را به صورت حجم کنترل‌های مجزا در نظر می‌گیرد. از معادلات حاکم بر جریان سیال روی هر حجم کنترل انتگرال گرفته و با استفاده از طرح‌های مختلف انفعال، معادلات جبری منفصل می‌شوند. به منظور تهیه هندسه میدان جریان و شبکه‌بندی آن از نرم افزار پیش پردازنده گمبیت¹ استفاده شده است. در این تحقیق از طرح پرستو² برای گسسته‌سازی فشار، روش کوئیک³ برای انفعال جملات جابجایی معادلات اندازه حرکت، طرح آپ ویند مرتبه اول⁴ برای انفعال جملات جابجایی معادلات آشفتگی و همچنین از الگوریتم پیزو برای کوپل نمودن سرعت و فشار استفاده گردیده است. همچنین به منظور جلوگیری از واگرایی حل، ضرایب زیر تخفیف کوچکتر از یک برای فشار، اندازه حرکت، انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی (e) مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق گام‌های زمانی برای حل مساله 0/01 ثانیه انتخاب شده است. در ضمن معیار همگرایی بر اساس یک مقدار ثابت باقیمانده‌های خطای نسبی نمی‌باشد، بلکه محاسبات تا زمان دائمی شدن حل ادامه دارد و در لحظه دائمی شدن باقیمانده خطای نسبی مقداری بین 0/0001 و 0/00001 خواهند داشت.

مشخصات میدان حل و شبکه‌بندی

در این تحقیق به منظور صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی هاگر (1982) بهره‌گرفته شده-

است. مدل آزمایشگاهی هاگر (1982)، کانال مستطیل شکل به عرض 30 سانتی متر، طول 5/70 متر و دهانه آبیگیر به عرض 1 متر است. در جدول 1 داده‌های استفاده شده در شبیه‌سازی عددی، به طور خلاصه آورده شده است. در جدول 1 (s) ارتفاع سرریز، (y_1) عمق بالادست جریان، (y_2) عمق پایین دست جریان، (Q_1) دبی ورودی در کانال اصلی، (Q_2) دبی خروجی از کانال جانبی می‌باشد.

شبکه‌بندی میدان حل در مدل عددی حاضر غیر-یکنواخت است. در محل سرریز جانبی به علت وجود گردان بالایی متغیرهای جریان از شبکه‌بندی ریزتر استفاده شده است. شبکه‌بندی در عرض کانال اصلی و جانبی به صورت یکنواخت می‌باشد. در طول کانال با توجه به وجود جریان یکنواخت در بالادست و پایین دست مقطع سرریز، شبکه‌بندی با ضریب 1/2 به سمت بالا دست و پایین دست افزایش یافته است. با توجه به اینکه در مدل آشفتگی RSM از تابع دیواره برای برقراری ارتباط بین ناحیه متأثر از لزجت مولکولی و ناحیه کاملاً آشفته استفاده می‌شود، لازم گردیده است که از شبکه‌بندی مناسبی در نزدیکی دیواره استفاده شود. به همین منظور فاصله اولین گره واقع در ناحیه کاملاً آشفته از دیواره برابر 2/45 میلی متر و به تدریج و با دور شدن از دیواره، فواصل گره‌ها از یکدیگر بیشتر و شبکه درشت تر شده است. به طور کلی شبکه محاسباتی در کانال اصلی از 140×15×35 و در کانال جانبی از 100×20×35 سلول به ترتیب در سه راستای x ، y و z تشکیل شده است (شکل 1).

¹Gambit²Presto³Quick⁴First order upwind

جدول 1- مشخصات هندسی و هیدرولیکی در مدل هاگر (1982).

$Q_2 (m^3/s)$	$Q_1 (m^3/s)$	$y_2 (m)$	$y_1 (m)$	$s (m)$	مدل آزمایشگاهی هاگر (1982)
0/01852	0/03855	0/171	0/13	0/10	D
0/01935	0/03887	0/209	0/192	0/15	E
0/01809	0/03979	0/257	0/244	0/20	F
0/00946	0/03906	0/194	0/177	0/15	G

شرایط مرزی

تقارن در نظر گرفته شده است. در کف کانال و جداره- های مقطع، شرط مرزی دیواره به همراه تابع استاندارد دیواره بکار رفته است. تابع دیواره مانند یک پل، پاسخ‌های نقاط داخلی میدان را به نواحی نزدیک دیوار مرتبط می‌سازد و بدین ترتیب از به کار گیری شبکه ریز در نواحی نزدیک دیواره با گرادیان شدید پرهیز می‌گردد.

نتایج و بحث

همان گونه که قبلاً بیان گردید، به منظور صحت- سنجی مدل عددی از نتایج آزمایش‌های هاگر (1982) استفاده گردیده است. در شکل 2 پروفیل طولی سطح آب در مرکز کانال اصلی در امتداد سرریز جانبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی هاگر (1982) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، انطباق پروفیل‌های سطح آزاد پیش بینی شده با نتایج آزمایشگاهی در مرکز کانال اصلی بسیار خوب می- باشد. این موضوع به خوبی قابلیت شبیه‌سازی عددی را در تعیین سطح آزاد آب نشان می‌دهد. شکل 3 تغییرات دبی در کانال اصلی را در طولی که سرریز جانبی واقع شده، نشان می‌دهد. با توجه به شکل 3 مشاهده می‌شود که مدل عددی به خوبی توانسته تغییرات طولی دبی در کانال اصلی را پیش بینی نماید.

با توجه به آنکه جهت صحت‌سنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی هاگر (1982) استفاده شده، لازم است که شرایط مرزی در مدل عددی منطبق بر آزمایش‌های انجام شده باشند. شرط مرزی ورودی کانال اصلی "سرعت ورودی" می‌باشد که به صورت مجزا برای آب و هوا تعریف شده است. سرعت در ورودی فاز آب برابر مقدار آزمایشگاهی و در ورودی فاز هوا برابر با 0/00001 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

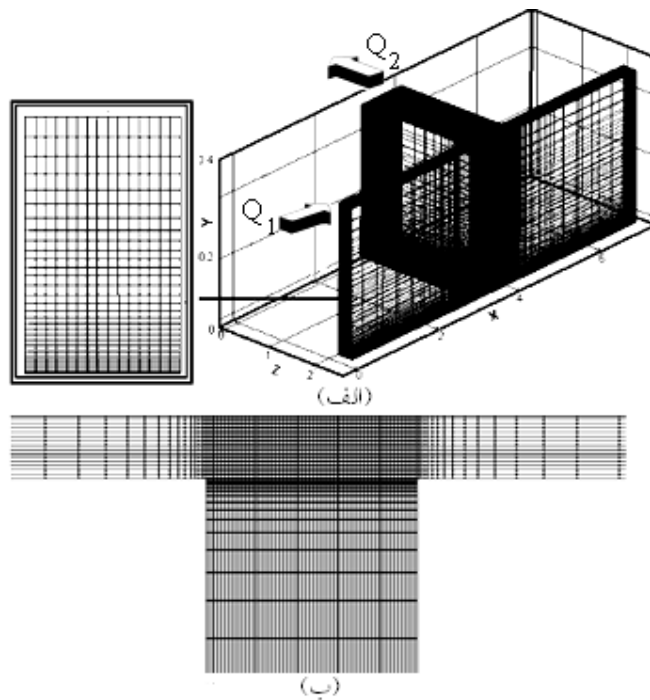
مقدار انرژی جنبشی آشفتگی ورودی (k_0) و نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفتگی ورودی (e_0) نیز از روابط 4 و 5 محاسبه می‌شوند.

$$k_0 = \frac{3}{2}(T_u U_0)^2 \quad [4]$$

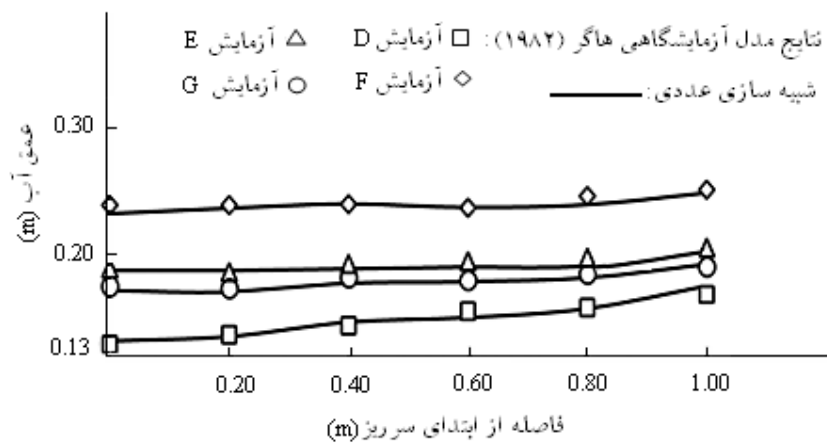
$$e_0 = C_m^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad [5]$$

که در آن T_u شدت آشفتگی ورودی عددی بین 1% - 6%، C_m ثابت تجربی برابر با 0/09 و l طول آشفتگی است که 0/07 برابر قطر هیدرولیکی کانال در نظر گرفته می‌شود.

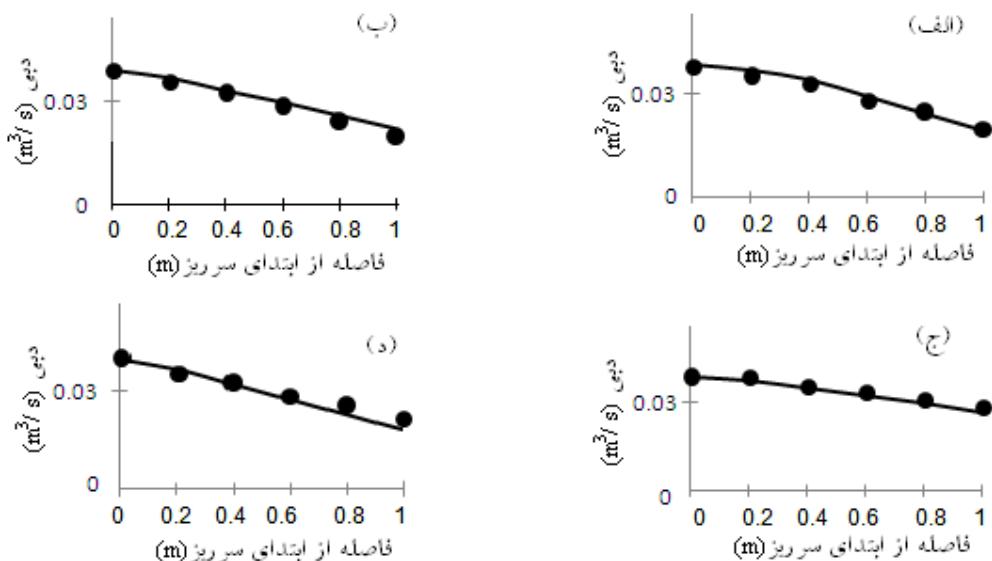
در مدل حاضر شرط مرزی "فشار خروجی" در حالت کانال باز در خروجی کانال اصلی و جانبی به کار گرفته شده است. در مرز فوقانی فاز هوا، شرط مرزی



شکل 1 - شبکه بندی میدان جریان الف - در مقطع عرضی کانال (صفحه y-z) ب - در پلان (صفحه x-z).



شکل 2- مقایسه پروفیل طولی سطح آب شبیه‌سازی شده در امتداد سرریز جانبی با نتایج آزمایشگاهی هاگر (1982).



شکل 3 - مقایسه تغییرات دبی کانال اصلی در طولی که سرریز جانبی واقع شده بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی هاگر (1982) (نقاط) (الف) - آزمایش D (ب) - آزمایش E (ج) - آزمایش F (د) - آزمایش G.

جانبی و F_1 عدد فرود در انتهای بالا دست سرریز جانبی، $\left(\frac{dQ}{dx}\right)$ تغییرات دبی نسبت به مکان و h ارتفاع جریان روی سرریز جانبی است که از تفاضل عمق متوسط جریان در طول سرریز جانبی و روی آن و ارتفاع سرریز حاصل می‌گردد. بررسی خطای نسبی میان ضریب شدت جریان تخمینی از نتایج عددی و آزمایشگاهی (جدول 2) بیانگر این نکته است که مدل عددی حاضر به خوبی دبی عبوری از سرریز جانبی را برآورد کرده است. در ادامه به بررسی الگوی جریان گذرنده از روی سرریز جانبی در دو آزمایش E و G با نسبت آگیری 49% و 24% که دارای بیشترین و کمترین نسبت آگیری با ارتفاع سرریز یکسان هستند، پرداخته می‌شود.

در جدول 2 ضریب دبی جریان محاسبه شده با به کارگیری نتایج مدل‌سازی عددی (C_{dn}) در مقایسه با ضریب دبی جریان تخمین زده شده با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (C_{de}) ارائه شده است. لازم به ذکر است در تخمین ضریب دبی جریان با استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی با داشتن دبی عبوری از روی سرریز جانبی و عمق جریان در طول سرریز از رابطه 6 و در حالت مشاهداتی از رابطه تجربی 7 برقی و صالحی (1382) استفاده شده است.

$$-\frac{dQ}{dx} = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \cdot h^2 \quad [6]$$

$$C_d = 0.82 - 0.38F_1 - 0.22 \frac{s}{y_1} + 0.08 \frac{L}{b} \quad [7]$$

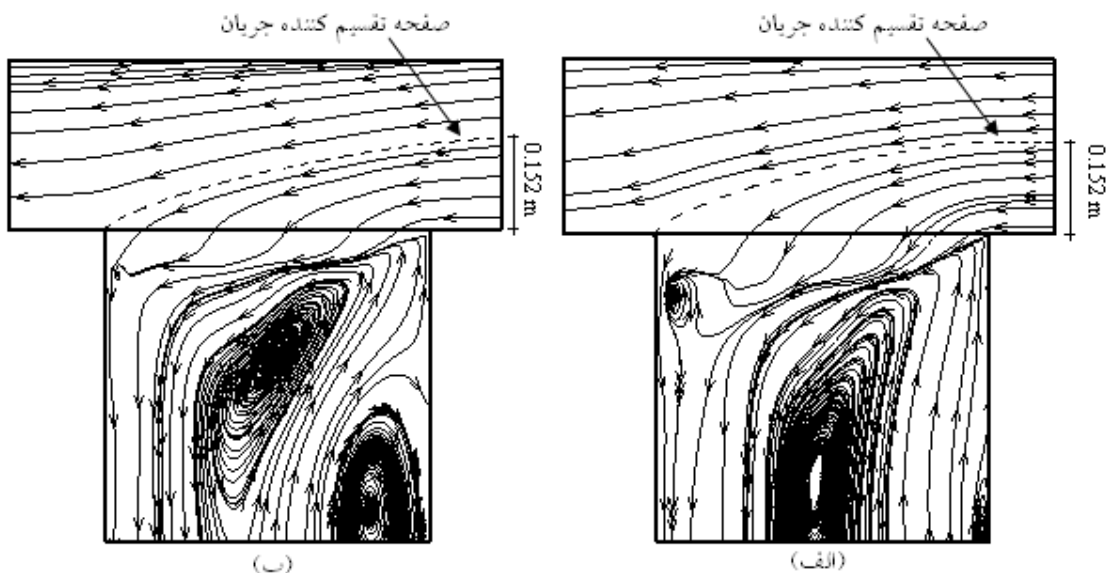
که در آنها L طول سرریز، b عرض کانال، y_1 عمق آب در بالا دست سرریز جانبی، s ارتفاع سرریز

جدول 2- مقایسه ضریب دبی جریان محاسبه شده از داده های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی.

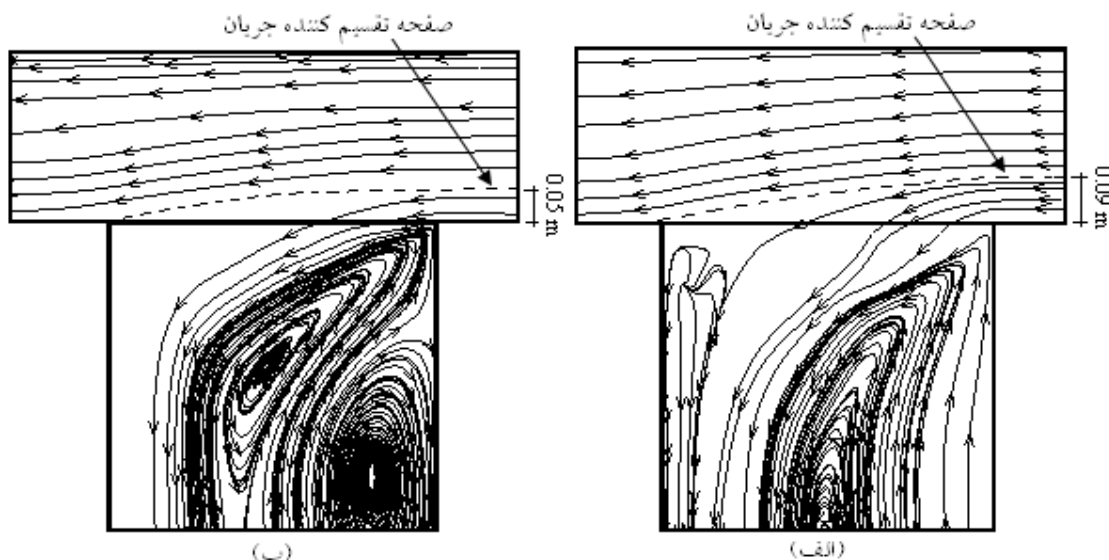
مدل آزمایشگاهی	C_{dn}	C_{de}	درصد خطای نسبی = $\left(\frac{C_{de} - C_{dn}}{C_{de}} * 100 \right)$
D	0/545	0/586	7%
E	0/692	0/728	4/9 %
F	0/799	0/773	3/5 %
G	0/73	0/688	6/13 %

راستای مختلف منجر به تشکیل ناحیه گردابه‌ای در کانال جانبی می‌شود. وجود این ناحیه گردابه‌ای در کانال جانبی باعث تنگ شدن مقطع کانال فرعی در این ناحیه می‌شود. نیری و همکاران (1999) در مطالعات آزمایشگاهی خود بر روی هیدرولیک جریان عبوری در آبگیر جانبی به وجود این ناحیه گردابه‌ای تشکیل شده در دیواره سمت چپ آبگیر جانبی اشاره کرده‌اند. مقایسه خطوط جریان در تراز نزدیک تاج سرریز و سطح آب نشان می‌دهد که صفحه تقسیم‌کننده جریان در تراز نزدیک تاج سرریز نسبت به تراز سطح آب به دیوار سمت چپ کانال اصلی نزدیک‌تر می‌باشد (شکل-های 4 و 5). به طوری که می‌توان گفت قسمتی از جریان در کانال اصلی که وارد کانال جانبی می‌گردد، دارای مقطعی دوزنقه‌ای با قاعده‌ای بزرگتر در سطح آب می‌باشد. با مقایسه خطوط جریان در تراز نزدیک تاج سرریز در دو آزمایش E و G مشخص می‌گردد که صفحه تقسیم‌کننده جریان در آزمایش G به دیواره کانال بسیار نزدیک شده است. به عبارتی با کاهش نسبت آبگیری فاصله صفحه تقسیم‌کننده جریان از دیواره کانال کاهش می‌یابد.

شکل‌های 4 و 5 خطوط جریان را در سطح آب و نزدیک تاج سرریز در دو آزمایش E و G نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل‌ها مشخص است با نزدیک شدن جریان به دهانه سرریز جانبی به علت وجود فشار مکشی اعمال شده از طرف کانال جانبی، جریان در جهت عرضی شتاب گرفته و به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمتی از جریان وارد دهانه سرریز جانبی شده و مابقی در کانال اصلی پایین دست جریان می‌یابد. در ناحیه تقسیم خطوط جریان قسمتی از جریان که وارد کانال جانبی می‌شود به وسیله صفحه برشی به نام "صفحه تقسیم‌کننده جریان" تفکیک می‌گردد. لازم به ذکر است که این صفحه از تراز سطح آزاد آب شروع شده و تا تراز تاج سرریز ادامه می‌یابد (شکل‌های 4 و 5). با توجه به شکل 4 مشخص می‌گردد که در دو آزمایش E و G محل قرارگیری صفحه تقسیم جریان و فاصله آن از دیوار سمت چپ کانال اصلی در سطح آزاد آب ثابت و برابر 0/152 متر است. نکته دیگری که در شکل 4 قابل بررسی می‌باشد، وجود ناحیه گردابه‌ای در کانال جانبی است. به علت اینکه اندازه حرکت جریان در راستای کانال اصلی بیشتر از کانال جانبی بوده، اندرکنش اندازه حرکت در دو



شکل 4- خطوط جریان شبیه‌سازی شده در تراز سطح آب برای آزمایش‌های E (الف) و G (ب) (خط چین امتداد صفحه تقسیم کننده جریان را نمایش می‌دهد).

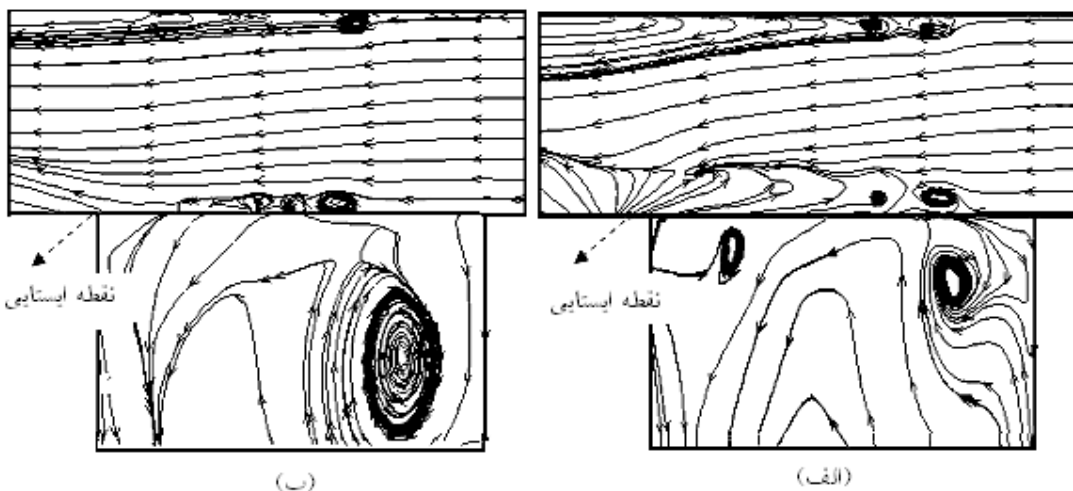


شکل 5- خطوط جریان شبیه‌سازی شده در تراز نزدیک تاج سرریز برای آزمایش‌های E (الف) و G (ب) (خط چین امتداد صفحه تقسیم کننده جریان را نمایش می‌دهد).

علت آن را می‌توان گرادیان فشار عرضی و مکش اعمالی از طرف جریان عبوری از روی سرریز جانبی دانست. نکته دیگر در الگوی جریان عبوری از سرریزهای جانبی وجود گردابه‌هایی در قسمت زیر تاج سرریز، در نزدیک بستر کانال اصلی می‌باشد

به منظور بررسی اثر سرریز جانبی بر الگوی جریان در نزدیک بستر، در شکل 6 خطوط جریان در تراز نزدیک بستر نشان داده شده‌است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در مجاورت دیوار سمت راست کانال اصلی ناحیه جداشدگی ایجاد می‌شود که

میزان سرعت طولی با بیشترین میزان تراز سطح آب ظاهر شده و یک نقطه ایستایی تشکیل می‌شود. در این نقطه مقدار تنش برشی نزدیک به صفر است و در صورت حمل رسوب توسط جریان، در این نقطه ذرات رسوبی به دام افتاده و به خاطر عدم وجود تنش برشی و سرعت پائین جریان، ذرات رسوبی ته‌نشین شده و باعث تشکیل پشته‌های ماسه‌ای می‌شوند (نیری و همکاران 1999).



شکل 6- خطوط جریان شبیه سازی شده در تراز نزدیک بستر برای آزمایش E (الف) و آزمایش G (ب).

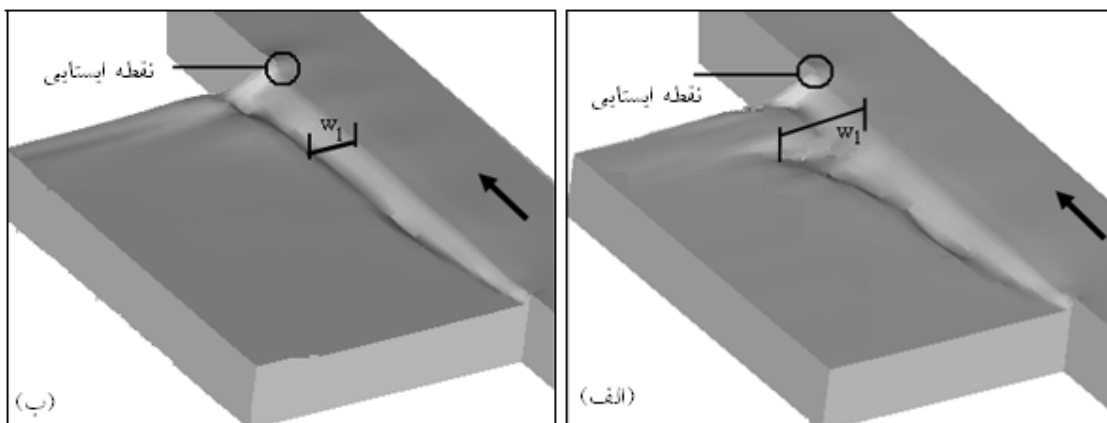
داده شده است 0/25 متر و در آزمایش G 0/10 متر است. بنابراین با کاهش نسبت آبگیری، عرض این ناحیه کاهش می‌یابد. در شکل 7 می‌توان مشاهده کرد بیشترین میزان افت تراز آب در نزدیکی دیوار سمت راست کانال جانبی اتفاق می‌افتد. با انحراف جریان به درون کانال جانبی سرعت بیشینه به نزدیکی دیوار سمت راست کانال جانبی منحرف شده، که این امر منجر به افت شدید تراز سطح آب در مجاورت این دیواره می‌گردد. در مطالعات آزمایشگاهی نیری و همکاران (1999) بر روی آبگیر جانبی نیز به این موضوع اشاره شده است.

شبیه‌سازی عددی جریان با سطح آزاد آشفته در کانال دارای سرریز جانبی (شکل 6). با توجه به شکل 6 می‌توان مشاهده کرد که محل تشکیل گردابه‌ها به طور مستقیم متأثر از نسبت آبگیری بوده و با کم شدن این نسبت محل تشکیل گردابه‌ها به سمت پایین دست دهانه سرریز جابجا می‌شود. نکته دیگری که می‌توان در بررسی خطوط جریان به آن اشاره کرد، وجود نقطه ایستایی در انتهای دهانه سرریز جانبی است (شکل 6). در این ناحیه در اثر برخورد خطوط جریان به جداره پایین- دست کانال جانبی، با فرض ثابت بودن انرژی، حداقل

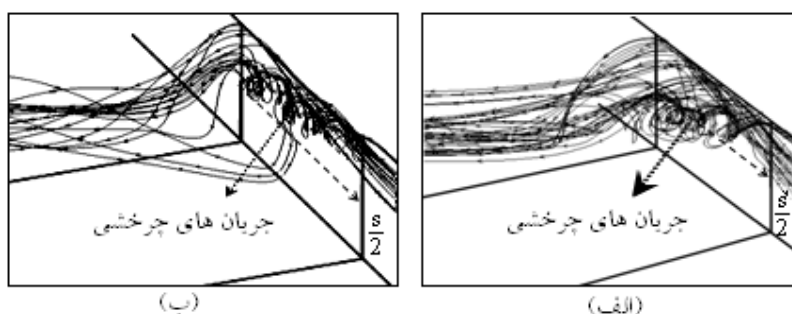
با توجه به شکل 7 که نمای سه بعدی از تغییرات سطح آب را نشان می‌دهد می‌توان در انتهای دهانه آبگیر در کانال اصلی بالا آمدگی سطح آب را مشاهده کرد که این ناحیه محل شکل‌گیری نقطه ایستایی است. همان طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود در آبگیر جانبی بلافاصله بعد از سرریز، تراز سطح آب افت قابل توجهی دارد. با مقایسه شکل‌های 7- الف و 7- ب مشاهده می‌شود که روند افت تراز آب در کانال جانبی به طور مستقیم متأثر از نسبت آبگیری سرریز جانبی است. به طوری که در آزمایش E، ماکزیمم عرض این ناحیه پایین افتادگی تراز آب که در شکل با (w_1) نشان

جریان در کانال جانبی بلافاصله بعد از سرریز مشاهده می‌شود. این جریان‌های چرخشی از ابتدای سرریز جانبی تشکیل شده و در کانال جانبی ادامه می‌یابند. همان طور که در شکل 8 مشخص است، عمق این جریان‌های چرخشی تا نیمه ارتفاع سرریز می‌باشد.

در شکل 8 خطوط جریان گذرنده از تاج سرریز به صورت سه بعدی نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود خطوط جریان در روی تاج سرریز دارای انحنا قابل ملاحظه‌ای بوده و این انحنا در پایین دست دهانه سرریز بیشتر می‌شود. با توجه به شکل 8 نواحی چرخشی عمود بر مقطع



شکل 7 - نمایش سه بعدی تغییرات سطح آب شبیه‌سازی شده برای آزمایش‌های E (الف) و G (ب).



شکل 8 - خطوط جریان گذرنده از روی سرریز جانبی برای آزمایش‌های E (الف) و G (ب).

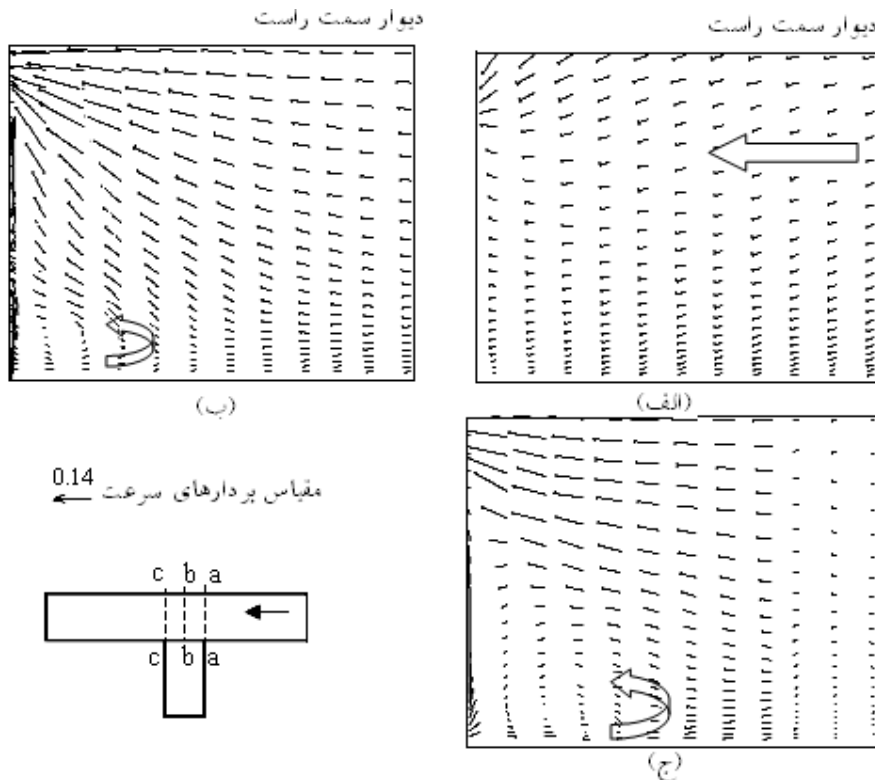
(1999) نیز در بررسی‌های خود در مورد جریان در آبگیر جانبی، به وجود جریان‌های ثانویه در راستای طولی کانال اصلی اشاره کرده‌اند.

به منظور بررسی این جریان‌های ثانویه در طول سرریز جانبی، بردارهای سرعت در راستای z و y (به ترتیب w, v) در سه مقطع عرضی در شکل 9 نشان داده

در ادامه جهت شناخت بیشتر الگوی جریان در کانال اصلی به بحث و بررسی بردارهای سرعت و تنش برشی در مدل عددی آزمایش E پرداخته می‌شود. در بررسی الگوی بردار سرعت شبیه‌سازی شده می‌توان به ایجاد جریان ثانویه در کانال اصلی، در اثر وجود سرریز جانبی اشاره نمود. نیری و همکاران

کانال اصلی وجود دارد. به تدریج با پیشروی در طول سرریز جانبی، جریان چرخشی در وجه داخلی کانال اصلی در محل سرریز جانبی شروع به شکل گرفتن می‌کند. با پیشروی به سمت پایین دست سرریز جانبی ابعاد جریان چرخشی به تدریج بزرگتر می‌شود.

شده‌است. مقاطع مذکور شامل مقطع a-a در ابتدای بالادست سرریز جانبی ($x=3$ m)، مقطع b-b در میانه طول سرریز جانبی ($x=3.5$ m) و مقطع c-c در انتهای پایین دست سرریز جانبی ($x=4$ m) می‌باشند. همان طور که در شکل 9 مشخص است، در مقطع ابتدایی سرریز جانبی (مقطع a-a) جریان یکسویه در عرض

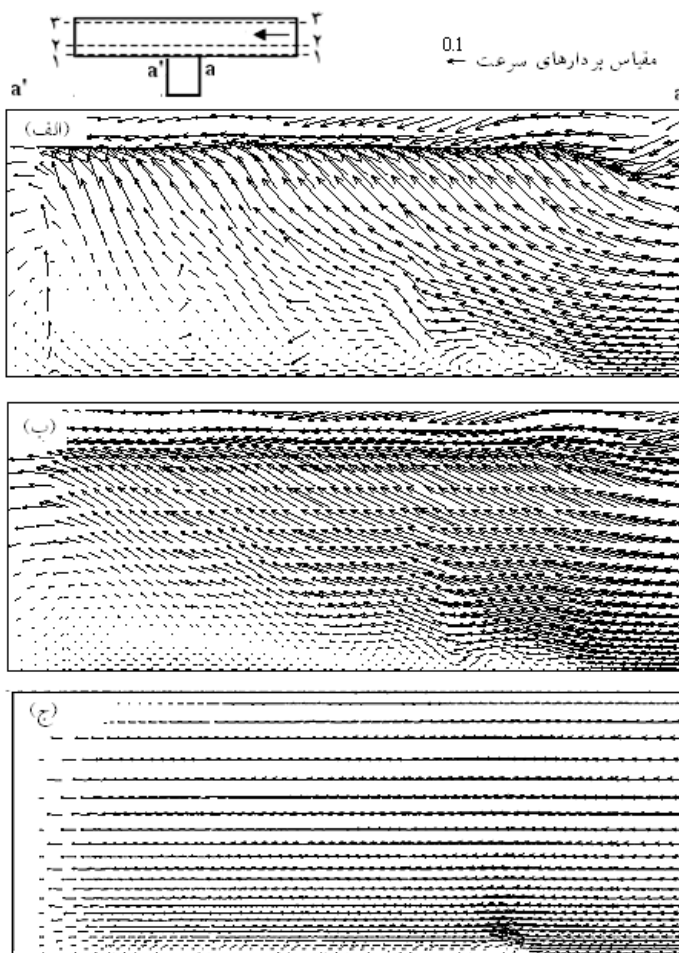


شکل 9- بردارهای سرعت شبه‌سازی شده در مقاطع عرضی کانال اصلی در آزمایش E
(الف)-محور a-a (ب)-محور b-b (ج)-محور c-c.

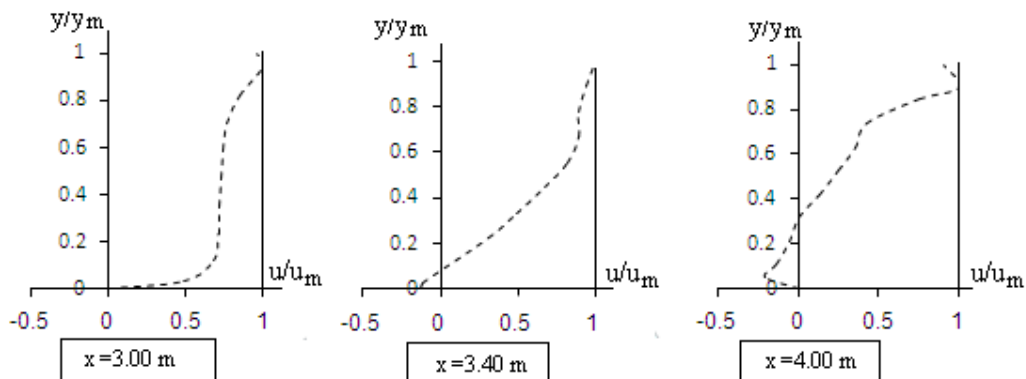
مقایسه شکل‌های 10- الف، ب و ج با یکدیگر مشخص می‌گردد که با دور شدن از محل سرریز جانبی، سلول‌های چرخشی کوچکتر می‌شوند. در شکل 11 نیمرخ-های سرعت طولی در سه مقطع ابتدا، انتها و میانه دهانه سرریز بر روی محور 1-1 که در شکل 10 مشخص شده، نشان داده شده‌است. در این شکل در هر مقطع محور افقی نسبت به سرعت ماکزیمم در همان مقطع بی بعد شده‌است. با بررسی نیمرخ‌های سرعت این نتیجه به دست می‌آید که در پایین‌دست دهانه سرریز سرعت ماکزیمم در نزدیک سطح آزاد

شکل 10 بردارهای سرعت در راستای x و y (به ترتیب u و v) را در آزمایش فوق در سه مقطع طولی 1-1، 2-2 و 3-3 نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که سه مقطع طولی فوق به ترتیب در مجاورت سرریز جانبی و در فاصله $0/12$ و $0/297$ متر از آن قرار دارند. همان طور که در شکل 10- الف مشاهده می‌شود اندکی پایین‌تر از ابتدای بالادست سرریز جانبی سلول چرخشی نزدیک بستر ایجاد شده است که با پیشروی به سمت پایین‌دست دهانه سرریز سلول چرخشی بزرگتر شده و از کف فاصله می‌گیرد. با

ایجاد می‌شود. علت این امر وجود جریان‌های ثانویه در این ناحیه است. در این ناحیه جریان بیش از آنکه تحت تاثیر تنش برشی ناشی از مقاومت هوا باشد تحت تاثیر جریان‌های ثانویه است. نکته قابل توجه در شکل 11 سرعت‌های منفی در نیمه دوم دهانه سرریز جانبی در نزدیک بستر است. همان طور که در شکل مشخص است با نزدیک شدن به پایین‌دست سرریز مقدار سرعت‌های منفی بیشتر است



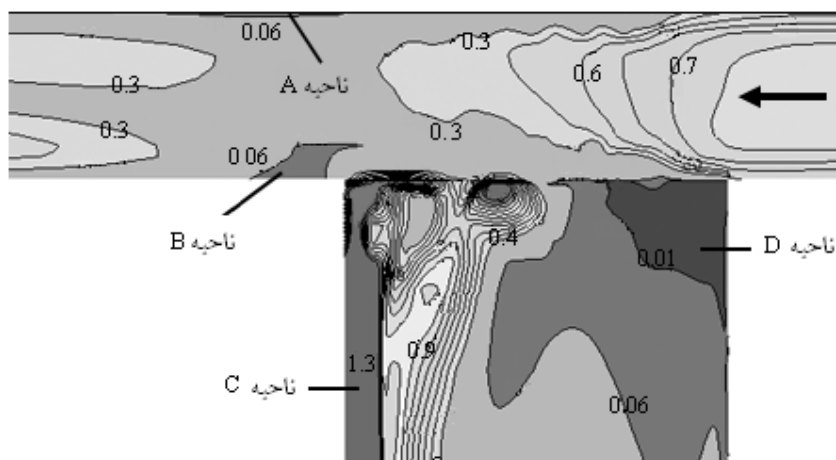
شکل 10 - بردارهای جریان ثانویه در مقاطع مختلف کانال اصلی در آزمایش E (الف) - محور 1-1 (ب) - محور 2-2 (ج) - محور 3-3.



شکل 11 - نیمرخ‌های مولفه سرعت طولی (u) شبیه‌سازی شده در کانال اصلی برای آزمایش E.

بیشترین میزان تنش برشی در "ناحیه C" و کمترین میزان تنش برشی در "ناحیه D" رخ داده‌است. با توجه به شکل 12 می‌توان بیان کرد که در نواحی A و B با میزان تنش برشی کم، امکان رسوبگذاری در مجاورت دیواره‌های کانال اصلی وجود دارد. همچنین در ناحیه C در کانال جانبی به علت بالا بودن تنش برشی احتمال آبشستگی بستر کانال افزایش می‌یابد. در ناحیه D در کانال جانبی نیز رسوبات وارده به کانال جانبی می‌توانند در نزدیکی دهانه ورودی آن ته‌نشین شده و توده‌های رسوبی را تشکیل دهند.

با توجه به آن که بررسی مقدار تنش برشی در بستر دید مناسبی از چگونگی نحوه فرسایش و رسوبگذاری در بستر را در اختیار می‌گذارد، در شکل 12 الگوی تنش برشی در تراز بستر نشان داده شده است. لازم به ذکر می‌باشد که در این شکل تنش برشی در بستر به چهار ناحیه A، B، C و D تقسیم شده است. در "ناحیه A" و "ناحیه B" که به ترتیب در نزدیکی دیواره سمت راست و چپ کانال اصلی در پایین‌دست سرریز جانبی قرار دارند، تنش برشی کمترین مقدار را داراست. همچنین در کانال جانبی



شکل 12- الگوی تنش برشی شبیه‌سازی شده در بستر برای آزمایش E.

نتیجه‌گیری کلی

وجود سرریز جانبی در کانال منجر به تشکیل نواحی جریان‌های گردابه‌ای در محل سرریز جانبی می‌گردد. محل تشکیل گردابه‌ها به طور مستقیم متأثر از نسبت آبگیری بوده و با کم شدن این نسبت محل تشکیل گردابه‌ها به سمت پایین دست دهانه سرریز حرکت می‌کنند.

مقایسه خطوط جریان در تراز نزدیک تاج سرریز در دو نسبت آبگیری مختلف نشان می‌دهد که در نزدیک تراز تاج سرریز با کاهش نسبت آبگیری فاصله صفحه تقسیم‌کننده جریان از دیوار سمت سرریز کاهش می‌یابد.

در انتهای دهانه سرریز جانبی حداقل میزان سرعت طولی با بیشترین میزان تراز سطح آب منجر به تشکیل یک نقطه ایستایی می‌شود. در این نقطه مقدار تنش برشی نزدیک به صفر است و در صورت حمل رسوب توسط جریان، در این نقطه امکان ته‌نشینی ذرات رسوبی و تشکیل پشته‌های ماسه‌ای وجود دارد. بررسی بردارهای سرعت در محل سرریز مبین وجود جریان‌های ثانویه است که منجر به انتقال سرعت بیشینه به ترازهای پایین‌تر می‌گردد.

سرریزهای جانبی از انواع سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند که در انحراف آب اضافی در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب شهری، همچنین در کنترل سیلاب و به عنوان سازه اضطراری در تأسیسات هیدرولیکی بزرگ چون سدها و شبکه‌های آبیاری و زهکشی به کار برده می‌شوند. در تحقیق حاضر، میدان جریان در کانال دارای سرریز جانبی با استفاده از نرم افزار فلونت و بهره‌گیری از مدل آشفتگی RSM شبیه‌سازی شده است. همچنین جهت شبیه‌سازی سطح آزاد از روش VOF استفاده گردیده است. تطابق مناسب نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی موجود، ضمن تأیید صحت نتایج شبیه‌سازی، کمک شایانی به تحلیل الگوی جریان نموده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی می‌توان نتیجه‌گیری نمود:

بررسی خطوط جریان در دو تراز نزدیک بستر و نزدیک سطح آب بیانگر وجود دو ناحیه جداشدگی، یکی در کانال جانبی و دیگری در دیواره سمت راست کانال اصلی است.

منابع مورد استفاده

- ایزدی نیا، حیدرپور م و کبیری سامانی ع، 1387. بررسی الگوی جریان روی سرریزهای جانبی تاج دایره‌ای. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال 12، شماره 46 ب. صفحه‌های: 815-826.
- برقعی سم و صالحی ح، 1382. بررسی آزمایشگاهی ضریب دبی سرریزهای جانبی با استفاده از مدل آزمایشگاهی. ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی اصفهان. اصفهان.
- جلیلی قاضی زاده م، برقعی سم و قدسیان م، 1376. بررسی آزمایشگاهی جریان زیر بحرانی بر روی سرریزهای جانبی. چهارمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف تهران-تهران.
- کاریزی آ، و هنر ت، 1387. بررسی الگوی جریان و تنش برشی سرریز جانبی لبه پهن مستطیلی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال 14، شماره 51. صفحه‌های 25-15.
- Ackers P, 1957. A Theoretical Consideration of Side-weirs as Storm Water Overflows. Proceeding of Institute of Civil Engineers 6: 250-269.
- Bremen R, Hager WH, 1989. Experiments in side channel spillways (Experimente Sammelkanälen). Journal of Hydraulic Engineering ASCE 115(5): 617-635.
- Coleman GS, Smith D, 1923. The discharging capacity of side weirs. 6:288-304. Proceeding of Institute of Civil Engineers.

- Daily JW, 1973. Fluid Dynamics. Addison-Westley Publishing Company, Boston.
- DeMarchi G, 1934. Essay on the performance of lateral weirs. *L'Energia elettrica Milan* (in Italian) 11(11): 849-860.
- Durga Rao KHV, Pillai CRS, 2008. Study of flow over side weirs under supercritical conditions. *Water Resources Management* 22(1): 131-143.
- Engels H, 1920. Releases from the dresdner river engineering laboratory. *Z ver Dtsch Ing* (in German) 64(5): 101-106.
- Forchheimer P, 1930. Hydraulics Teubner Verlagsgeveltschaft, 3rd ed. Leibzig, Berlin.
- Hager WH, 1982. The hydraulics of distributed channel, Part1-2. *Mitteilungen der versuchsanstalt wasserbau, hydrologie und glaziologie* (in German).
- Hager WH, 1987. Lateral outflow over side weirs. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 113(4): 491-504.
- Hager WH, 1999. Wastewater hydraulics theory and practice. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- Mangarulkar K, 2010. Experimental and numerical study of the characteristics of side weir flows. Master Thesis, Concordia University, Canada.
- Neary VS, Odgaard A and Sotiropoulos F, 1999. Three-dimensional numerical model of lateral-intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 125(2): 126-140.
- Subramanya K, Awasthy SC, 1972. Spatially varied flow over side weirs. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 98(1):1-10.