

بررسی عددی تغییرات الگوی جریان و پروفیل‌های سرعت در اثر اختلاف رقوم بستر کانال‌ها در آبگیرهای جانبی

سهراب کریمی^{۱*} و حسین بنکداری^۲

چکیده

در آبگیرهای جانبی، هنگامی که سیال در کانال اصلی جریان دارد، به علت اعمال نیروی مکشی از طرف کانال جانبی شتاب عرضی ایجاد شده وارد کانال جانبی می‌شود. به هنگام ورود جریان به کانال جانبی، به علت گسترش جریان، ناحیه جداشدگی در یک سمت دیواره کانال انشعابی و انقباض جریان در سمت دیواره مقابل شکل می‌گیرد. این پدیده‌ها موجب می‌شوند جریان، رفتاری کاملاً سه‌بعدی داشته باشد. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS-CFX، رفتار جریان به صورت سه‌بعدی در محل انحراف شبیه‌سازی شده است. برای صحت‌سنجی، نتایج مدل عددی آبگیر جانبی با زاویه اتصال ۹۰ درجه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و سپس اثر اختلاف رقوم بستر کانال‌های متلاقی بر ساختار الگوی جریان مطالعه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد افزایش تراز بستر کانال اصلی نسبت به بستر کانال فرعی، موجب بالارفتن جریان از کف به سطح آب و از بین رفتن ناحیه جداشدگی نزدیک کف در کانال انشعابی می‌شود و کاهش قدرت جریان ثانویه و آثار فرسایش در کف کانال فرعی را باعث خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: اختلاف رقوم بستر، شتاب عرضی، زاویه‌ی اتصال ۹۰ درجه، نرم‌افزار ANSYS-CFX.

ارجاع: کریمی س. و بنکداری ح. ۱۳۹۷. بررسی عددی تغییرات الگوی جریان و پروفیل‌های سرعت در اثر اختلاف رقوم بستر کانال‌ها در آبگیرهای جانبی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۹: ۹-۱۷.

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

* نویسنده مسئول: sohrab_karimi68@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۲۶

مقدمه

کانال‌های انحرافی در مهندسی هیدرولیک برای اهداف گوناگونی همچون تأمین آب کشاورزی و جمع‌آوری فاضلاب شهری استفاده می‌شوند. الگوی جریان در محل انحراف جریان بسیار پیچیده و رفتار جریان کاملاً سه‌بعدی است و پارامترهایی از قبیل اندازه، شکل، شیب، زاویه بین کانال اصلی و کانال انشعابی، اعداد رینولدز و فروید جریان بر آن مؤثر هستند (رامامورتی و همکاران، ۲۰۰۷).

در محدوده‌ی ورودی کانال فرعی، به علت ایجاد شتاب عرضی در جریان از طرف کانال فرعی، جریان دچار شتاب عرضی شده و از کانال اصلی به سمت کانال فرعی کشیده می‌شود که این امر باعث جدایی جریان از کناره‌های کانال، در دهانه‌ی آبگیر می‌شود. در همین مقطع، در دیواره‌ی مقابل، بنابر رابطه بقای جرم، سرعت در مقابل ناحیه جداسازی جریان، افزایش می‌یابد (بارکدل و همکاران، ۱۹۹۵؛ کاستوری و پونداریکانتان، ۱۹۸۷). به علت ورود جریان به کانال فرعی، نیروی گریز از مرکز، یک جریان شعاعی سطحی به سمت دیواره مقابل ناحیه جداسازی ایجاد می‌کند و جریان به سمت بستر کانال حرکت می‌کند. این مسأله منجر به ایجاد جریان‌های ثانویه می‌شود و فرسایش و سرعت در ناحیه افزایش می‌یابد (لاکشانانا و همکاران، ۱۹۶۸ و تیلور، ۱۹۴۴). طی پنجاه سال گذشته با استفاده از روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی، محققان مختلفی جریان‌های انشعابی در کانال‌ها و آبگیرهای جانبی را مطالعه کرده‌اند. نقطه‌ی مشترک همه‌ی این مطالعات، این است که کاربرد آنها نیاز به دانش قبلی از هیدرولیک جریان دارد و واضح است که نیاز به یکسری پیش‌فرض‌های هیدرولیکی از مشخصه‌های هیدرولیکی جریان دارد (هگر، ۱۹۸۷؛ بارکدل و همکاران، ۱۹۹۸؛ بارکدل، ۱۹۹۸؛ همکاران، ۱۹۹۹؛ نیری و همکاران، ۱۹۹۹؛ شابایک و همکاران، ۲۰۰۲).

لاو و رینولدز (۱۹۶۶) مطالعه‌ای تحلیلی و آزمایشگاهی روی کانال اصلی و آبگیر با عرض مساوی انجام دادند و موفق به ارایه رابطه‌ای برای نسبت دبی‌ها و عدد فروید قبل و بعد از تقاطع شدند. نیری و ادگارد (۱۹۹۳) درباره‌ی مشخصات جریان و قدرت جریان ثانویه در داخل کانال جانبی متصل به یک کانال مستقیم مستطیلی آزمایش‌هایی انجام دادند. آنها آثار زبری کف کانال را روی میدان سرعت و خطوط جریان در مجاورت کانال

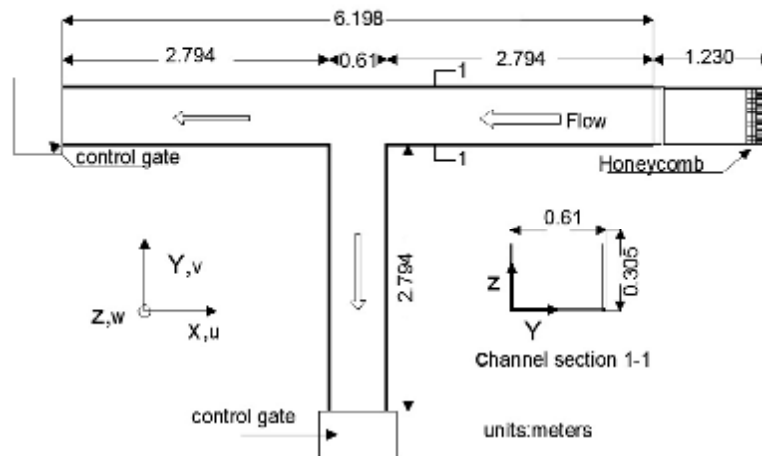
انشعابی بررسی کردند. نیری و ساتیرپولوس (۱۹۹۶) هیدرولیک جریان را در آبگیرهای جانبی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. آنها نتایج مدل سه‌بعدی خود را با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های دوبعدی که محققین دیگر انجام داده بودند، مقایسه کردند و نشان دادند نتایج مدل سه‌بعدی دقت بالاتری نسبت به مدل دوبعدی دارد. عیسی و اولویرا (۱۹۹۴) جریان آشفته در کانال‌های انحرافی را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند. آنها معادلات ناویر استوکس میانگین‌گیری شده زمانی به روش رینولدز را در حالت سه‌بعدی (RANS) با مدل k-ε استاندارد با توابع دیواره‌ای حل کردند. رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷) با مطالعه سه‌بعدی جریان در کانال‌های انشعابی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، ناحیه جداسازی تشکیل شده در کانال آبگیر را بررسی و بیان کردند که با افزایش نسبت دبی‌آبگیری، قدرت گردابه افزایش و به سمت پایین دست کانال انشعابی، قدرت گردابه کاهش می‌یابد. در اکثر مطالعات انجام شده ارتفاع کف کانال‌های متقاطع، یکسان در نظر گرفته شده است. بایرون و همکاران (۱۹۹۶)، به صورت کمی تأثیر اختلاف ارتفاع کف دوکانال اصلی و انشعابی، بر جریان تقاطع کانال باز را بررسی کردند.

مطالعه حاضر با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و به کمک نرم‌افزار ANSYS-CFX به بررسی عددی تأثیر اختلاف کف بستر کانال انشعابی نسبت به کانال اصلی، بر ساختار الگوی جریان، پروفیل‌های سرعت و ابعاد ناحیه گردابی در آبگیرهای جانبی می‌پردازد. ابتدا مدل فیزیکی کانال آبگیر جانبی با اختلاف کف بستر کانال فرعی نسبت به کانال اصلی به میزان ۰/۰۵ متر ساخته، سپس آبگیر جانبی دیگری با تراز همکف ساخته شده است. هیدرولیک جریان در مدل‌های عددی ساخته شده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای اعتبارسنجی مدل CFX از نتایج آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. در این مطالعه نسبت دبی و هندسه کانال اصلی ثابت فرض شده است و در ادامه تغییر به وجود آمده در الگوی جریان ثانویه و شدت فرسایش و تغییرات به وجود آمده در پروفیل‌های سرعت و ابعاد ناحیه گردابی بررسی شده است.

مشخصات مدل آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷)

در این مطالعه برای بررسی دقت مدل عددی ساخته شده، از نتایج آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. آن‌ها آزمایش‌های خود را در یک کانال افقی با انحراف ۹۰ درجه، که جریان را به دو کانال اصلی و

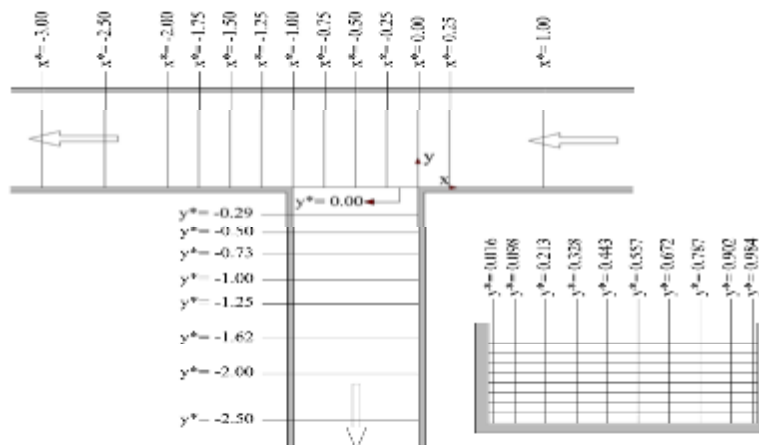
فرعی هدایت می‌کند، انجام دادند (شکل ۱). در آزمایش‌های آنان طول کانال اصلی ۶/۱۹۸ متر و طول کانال انشعابی ۲/۷۹۴ متر، عرض کانال‌ها برابر با ۰/۶۱ متر و ارتفاع آن‌ها برابر با ۰/۳۰۵ متر بوده است و کانال انشعابی در فاصله ۲/۷۹۴ متری از ورودی کانال اصلی قرار داشته است.



شکل ۱- پلان مدل آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷)

دست کانال اصلی v_c بی‌بعد شده‌اند و بدین ترتیب محورهای مختصات به صورت بی‌بعد ($y^*=y/b$, $x^*=x/b$) و $z^*=z/b$ تعریف شده‌اند. سرعت‌های بی‌بعد در مختصات z, y, x به ترتیب با w^*, v^*, u^* مشخص شده‌اند. موقعیت‌های اندازه‌گیری شده در کانال‌ها را می‌توان در شکل ۲ مشاهده کرد.

دبی ورودی در ورودی کانال اصلی (Q_{in}) برابر با ۰/۴۷ مترمکعب بر ثانیه و در کانال فرعی (Q_b) برابر با ۰/۰۳۵ مترمکعب بر ثانیه بوده و نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی ($Q_f=Q_b/Q_{in}$) برابر ۰/۸۳۸ بوده است. در آزمایش‌های رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷)، تمام پارامترها توسط عرض کانال $b=0/61$ متر و سرعت بحرانی در بالا



شکل ۲- موقعیت‌های اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷)

روش عددی

با افزایش سرعت و ظرفیت کامپیوترها در دهه‌های اخیر، کاربرد روش‌های عددی در دینامیک سیالات محاسباتی، در علوم مهندسی روبه افزایش است. از جمله کدهای دینامیک سیالات محاسباتی، ANSYS-CFX است که برای حل معادلات از روش حجم محدود استفاده می‌کند. در عمل اغلب جریان‌ها در عدد رینولدزهای بالا رخ می‌دهند، نتایج آزمایشگاهی، حاکی از آن است که در کانال‌های انحرافی، عدد رینولدز بین ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰۰ است؛ بنابراین برای رسیدن به جواب‌های عددی صحیح، نیاز به تعریف یک مدل آشفتگی است. دو معادله‌ی اصلی برای حرکت سیال در کانال‌های روباز عبارتند از: معادلات پیوستگی (۱) و معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس (۲):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} + \frac{\partial \rho W}{\partial z} = 0 \rightarrow \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0$$

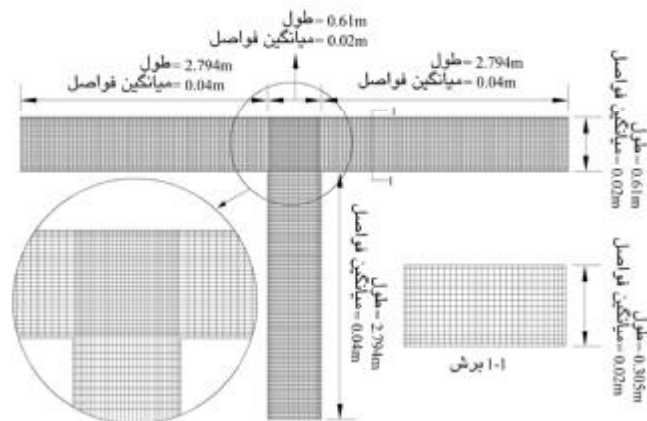
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_j}{\partial x_i} \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

در این معادلات u_i سرعت در جهت محور X و u_j سرعت در جهت محور Y است، p فشار کل، ρ دانسیته‌ی سیال و τ_{ij} دلتای کرونگر هستند. $u_i u_j$ معرف تانسور تنش رینولدز است. در معادله (۲)، $(\rho \overline{u'_i u'_j})$ ، تنش‌های

رینولدزی‌اند (بنکداری و همکاران، ۲۰۱۱). در این شبیه‌سازی عددی، از مدل آشفتگی $k-\omega$ استفاده شده است.

برای تعریف شرایط مرزی در مدل عددی برای شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷)، در ورودی کانال اصلی و خروجی کانال‌های فرعی و اصلی، از سرعت نرمال استفاده شده است. برای دیواره‌ها و بستر کانال‌ها، از صفحات صاف و بدون حرکت و برای سطح بالای کانال از شرایط مرزی متقارن، استفاده شده است. تعریف سطح آزاد جریان، طبق دیدگاه اوپلری مشخص شده و از VOF برای تعریف سطح آزاد جریان بهره برده شده است.

در مدل‌های عددی، شبکه‌بندی مناسب باعث افزایش سرعت اجرای مدل می‌شود. در این مطالعه در مدل شبیه‌سازی شده، برای اجرای شبکه‌بندی بهینه، کانال اصلی به سه بخش جدا از هم تقسیم شده است. طول بخش اول آن که در قسمت بالادست کانال اصلی قرار دارد، ۲/۷۹۴ متر، طول بخش دوم آن که در میانه‌ی کانال اصلی قرار دارد ۰/۶۱ متر می‌باشد و طول بخش سوم آن که در قسمت پایین دست کانال اصلی واقع شده ۲/۷۹۴ متر در نظر گرفته شده است. ابعاد سلول‌ها در بالادست و پایین دست کانال اصلی ۴×۲×۲ سانتی‌متر و در قسمت میانی آن ۲×۲×۲ سانتی‌متر اختیار شد. ابعاد سلول‌های شبکه کانال آبگیر ۴×۲×۲ سانتی‌متر انتخاب شد. شکل ۳، پلان و نمای شبکه‌بندی میدان محاسباتی را در آبگیر ۹۰ درجه نشان می‌دهد.

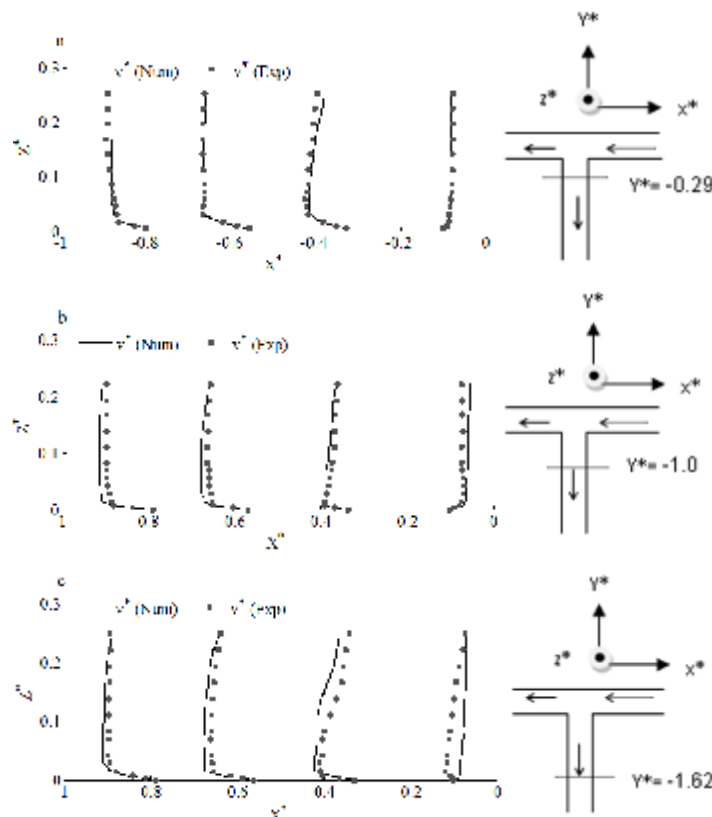


شکل ۳- شبکه‌بندی پلان و مقطع مدل شبیه‌سازی شده با استفاده از ANSYS-CFX

صحت‌سنجی نتایج مدل عددی

در این بخش برای بررسی صحت نتایج مدل عددی، از نتایج مدل آزمایشگاهی رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شده است. در شکل ۴ سرعت‌های طولی بی‌بعد (v^*)، به دست آمده از مدل CFX با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند. در این شکل، محور افقی بیان‌کننده فاصله‌های عرضی (x^*) در کانال فرعی و محور عمودی

معرف عمق جریان (z^*) است. مقایسه‌ی بین نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی در نسبت دبی ($Q=Q_b/Q_u$) برابر با ۰/۸۳۸ انجام شده است و با توجه به مقاطع اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی، نتایج صحت‌سنجی در سه مقطع $y^* = -۱/۶۲, -۱/۰, -۰/۲۹$ در کانال فرعی ارزیابی شده‌اند.



شکل ۴- صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل CFD و نتایج مدل آزمایشگاهی

جدول ۱ نتایج مدل عددی و مدل آزمایشگاهی را در مقاطع عرضی مختلف (y^*) با استفاده از شاخص‌های آماری، نشان می‌دهد. در این مقایسه میانگین خطای نسبی MAPE حدود ۵ درصد به دست آمده است؛ با توجه به جدول ۱، میانگین خطای نسبی MAPE در سه مقطع عرضی $y^* = -۱/۶۲, -۱/۰, -۰/۲۹$ به ترتیب در حدود ۲٪، ۵/۲٪ و ۶/۹۵٪ به دست آمده است. در جدول، مقدار RMSE برای سه مقطع مقطع $y^* = -۱/۶۲, -۱/۰, -۰/۲۹$ به ترتیب ۰/۰۱۷، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۱ است. در پایین دست کانال فرعی $y^* = -۱/۶۲, -۱/۰$ به علت وجود جریان‌های چرخشی و جدایی جریان مقدار سرعت طولی در راستای

برای بررسی دقت مدل CFX ساخته شده از دو شاخص آماری RMSE و MAPE استفاده شده است که این شاخص‌ها از معادلات زیر محاسبه می‌شوند:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{EXP_i} - nV_{CFD_i})^2 \right)} \quad (3)$$

$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|V_{EXP_i} - nV_{CFD_i}|}{V_{EXP_i}} \right) \right) \times 100 \quad (4)$$

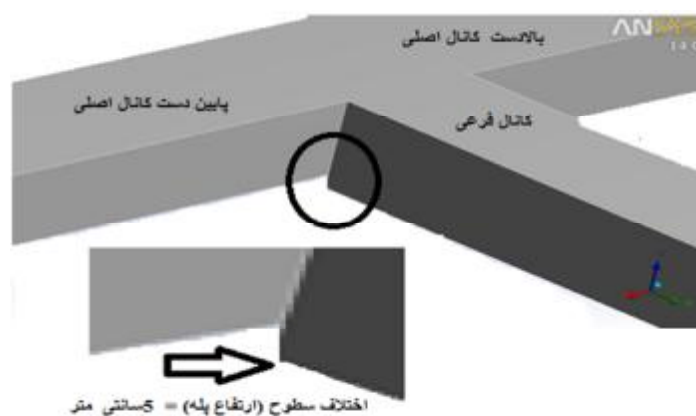
به ترتیب معرف سرعت در مدل آزمایشگاهی و مدل عددی ساخته شده هستند.

هیدرولیک جریان در آبگیرهای جانبی غیرهمکف
در این بخش به بررسی هیدرولیک جریان انحرافی در کانال‌های غیرهمکف پرداخته شده و نتایج به دست آمده با کانال‌های همکف مقایسه می‌شوند و فواید ایجاد ناهمواری در کف کانال مطالعه می‌شود. برای دستیابی به این هدف، سطح بستر کانال فرعی به میزان 0.05 متر نسبت به بستر کانال اصلی، پایین آورده شده است (شکل ۵). شرایط هیدرولیکی، در کانال‌های غیرهمکف و کانال‌های همکف مشابه مدل آزمایشگاهی است.

خلاف جهت جریان افزایش یافته است. در عمق 0.0 تا $z^* = 0.2$ به علت تراکم خطوط جریان، سرعت‌ها ماکزیمم v_{max} هستند و شدت تراکم خطوط جریان در این ناحیه بیشتر از سطح جریان است. بنابراین در شکل ۴، مطابقت خوب بین نتایج مدل CFX و نتایج مدل آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

جدول ۱- شاخص‌های آماری

	$y^* = -0.29$	$y^* = -1.0$	$y^* = -1.62$
RMSE	0.01	0.02	0.017
MAPE (%)	2.0	5.2	6.95



شکل ۵- هندسه‌ی طراحی شده برای بررسی هیدرولیک جریان انحرافی کانال‌های روباز غیرهمکف

لایه‌های جداشونده در محل انحراف جریان می‌گردد که این امر موجب می‌شود در سرعت‌های عرضی تفاوت چندانی به وجود نیاید.

اثر اختلاف رقوم بستر کانال‌ها در آبگیرهای جانبی

بر الگوی جریان‌های ثانویه

در شکل ۸ بردارهای سرعت عرضی (u^*) و عمقی (w^*) بعد از محل انحراف جریان، برای کانال‌های همکف و غیرهمکف در مقطع عرضی $y^* = -0.2$ رسم شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با پایین آوردن کف کانال فرعی نسبت به کانال اصلی، از شدت جریان ثانویه اصلی در مرکز مقطع کانال و در نواحی $z^* = 0.0$ تا $z^* = 0.2$ کاسته می‌شود، اما در سواحل ($x^* = 3.0$) تا ($x^* = 3.4$)، جریان‌های ثانویه دیگری باشد کمتر ایجاد می‌گردد. در کانال غیرهمکف، جریان‌های ثانویه از بستر کانال فاصله می‌گیرند و به میانه‌ی کانال فرعی نواحی 0.2

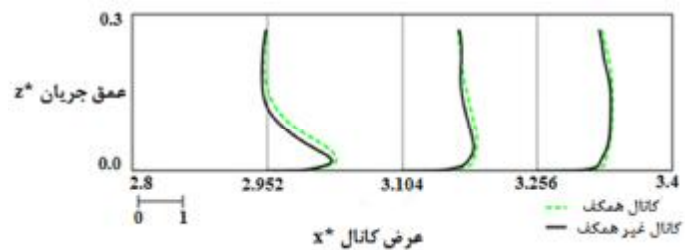
اثر اختلاف رقوم بستر کانال‌ها در آبگیرهای جانبی،

بر توزیع سرعت جریان

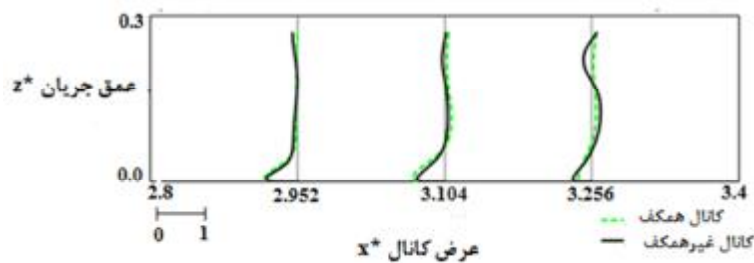
شکل ۶ سرعت‌های طولی جریان v^* ، برای کانال‌های همکف و غیرهمکف در مقطع $y^* = -0.2$ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در عمق 0.0 تا $z^* = 0.2$ به علت تراکم خطوط جریان، سرعت‌ها ماکزیمم v_{max} هستند و شدت تراکم خطوط جریان در این ناحیه بیشتر از سطح جریان است. وجود پایین‌افتادگی در سطح بستر کانال فرعی نسبت به کانال اصلی، باعث کاهش سرعت‌های طولی، به ویژه در نزدیکی کف و در نواحی $z^* = 0.0$ تا $z^* = 0.2$ در کانال فرعی می‌شود؛ بنابراین از شدت فرسایش در کف کانال کاسته خواهد شد. شکل ۷ تغییرات سرعت عرضی در اثر ایجاد پله در کانال فرعی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده شد، وجود پله در کانال فرعی سبب کاهش سرعت‌های طولی می‌شود، اما با توجه به شکل ۷، پله باعث اغتشاش بیشتر و تغییر در

منتقل می‌شوند. دلیل این پدیده، بالاروندگی جریان از پای پله به طرف ساحل داخلی کانال فرعی است که جریان‌های ثانویه بیشتر با قدرت اندک را تولید می‌کند.

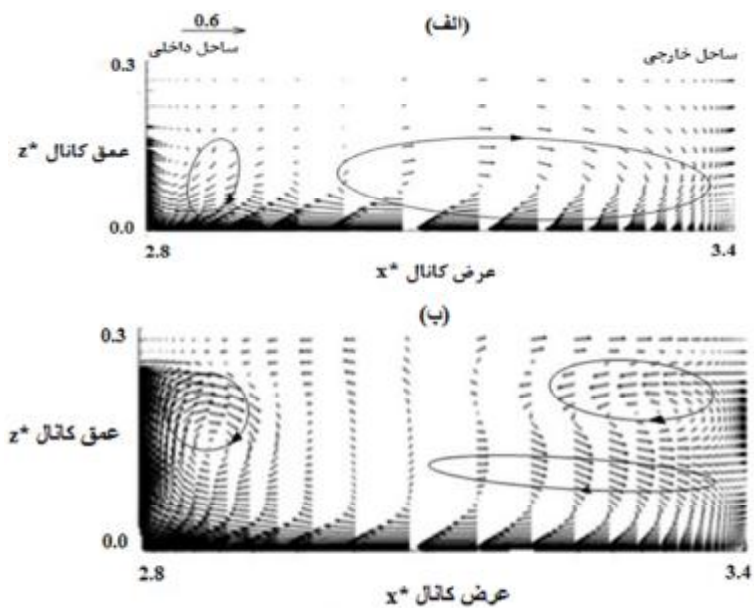
$z^* = 0/3$ تا $z^* = 0$ منتقل می‌شوند. این امر باعث کاهش شدت فرسایش در کف کانال می‌شود. در ساحل داخلی ($x^* = 2/8$ تا $x^* = 3/0$)، شدت گردابه نسبت به کانال همکف افزایش می‌یابد و سرعت‌های بزرگ‌تر به سطح آب



شکل ۶- تغییرات سرعت طولی جریان در اثر اختلاف رقوم بستر در کانال فرعی در مقطع $y^* = -0/2$



شکل ۷- تغییرات سرعت عرضی جریان در اثر اختلاف رقوم بستر در کانال فرعی در مقطع $y^* = -0/2$



شکل ۸- بردارهای سرعت در مقطع $y^* = -0/2$ برای: (الف) تلاقی کانال‌های همکف، (ب) تلاقی کانال‌های غیر همکف

است که با ایجاد پله به ارتفاع $0/05$ متر در کانال فرعی، طول ناحیه‌ی جدایی جریان، نسبت به کانال‌های همکف از $2/4$ متر به $1/13$ متر کاهش یافته است، زیرا در کانال‌های غیر همکف، جریان کانال اصلی با زاویه‌ی کوچک‌تری وارد

اثر اختلاف رقوم بستر کانال‌ها در آبگیرهای جانبی، بر ابعاد ناحیه جدایی جریان

شکل ۹ خطوط جریان در نزدیک سطح آب ($z^* = 0/3$) را برای کانال‌های همکف و غیر همکف نشان می‌دهد. واضح

سرعت جریان به محض ورود به کانال فرعی افزایش می‌یابد، ایجادپله، تأثیر بسزایی در کاهش آثار مومنتوم کانال اصلی در ناحیه‌ی انحراف داشته است که عملکرد مناسب پله در کاهش اثرهای آشفتگی و در نتیجه جدایی جریان در کف کانال فرعی را نشان می‌دهد.



شکل ۹- طول ناحیه جدایی جریان در نزدیکی سطح آب ($z^* = 0.3$ برای الف) کانال‌های غیرهمکف، (ب) کانال‌های همکف

- intakes using submerged vanes. Proc. of Water Power conference. 368-377.
- Biron P. J. L. and Roy A. G. 1996. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel Confluences. Journal of Hydraulic Engineering. 122(12): 676-682.
 - Bonakdari H. Baghalian S. Nazari F. and Fazli M. 2011. Numerical analysis and prediction of velocity field in curved open channel using artificial neural network and genetic algorithm. Engineering application of computational fluid mechanics. 5(3):384-396.
 - Brakdoll B. D. Hagen B. L. and Odgaard A. J. 1998. Experimental Comparison of dividing open channel with duct flow in T-junction. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 124(1): 92-95.
 - Hager W. H. 1987. Discussion of Separation Zone at Open-Channel Junctions by James L. Best and Ian Reid (November, 1984). Journal of Hydraulic Engineering. 113(4): 539-543.
 - Issa R. I. and Oliveira P. J. 1994. Numerical prediction of phase separation in two-phase flow through T-junction, Comp. and Fluids. 23(2): 347-356.
 - Kasthuri B. and Pundarikanthan N. V. 1987. Discussion on separation zone at open channel junctions. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 113(4): 543-544.
 - Lakshmana R. N. S. Sridharan K. and Baig M. Y. A. 1968. Experimental study of the division of flow in an open channel. Australasian Conf. on Hydraul and Fluid Mech, Sydney, Australia. 139-142.
 - Law S. W. and Reynolds A. J. 1966. Dividing flow in open channel. Journal of

کانال فرعی شده و انحراف خطوط جریان در ورودی کانال فرعی نیز کمتر شده است. این امر باعث کاهش شدت آشفتگی و ابعاد ناحیه جدایی جریان می‌شود؛ بنابراین میزان رسوب‌گذاری کاهش و نسبت آبیگری در کانال فرعی افزایش می‌یابد. با ایجاد پله، ناحیه جدایی جریان در نزدیکی بستر کانال فرعی، از بین می‌رود. با وجود اینکه

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج صحت‌سنجی مدل عددی ساخته شده، با میانگین خطای ۵ درصد، مطابقت نسبی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد؛ بنابراین می‌توان از نتایج مدل CFX برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر هیدرولیک جریان در آبیگرهای جانبی استفاده کرد. با توجه به نتایج مدل CFX، با افزایش ارتفاع کف کانال اصلی نسبت به کانال فرعی به میزان ۰/۵ متر، نتایج زیر در کانال غیرهمکف به دست آمد:

(۱) کاهش انحراف خطوط جریان و آثار آشفتگی در ورودی کانال فرعی و بالا رفتن خطوط پرسرعت جریان از کف به سمت سطح آب ($z^* = 0.2$ تا $z^* = 0.3$)، (۲) کاهش ابعاد ناحیه جدا شدگی جریان در ورودی کانال فرعی از ۲/۴ متر به ۱/۱۳ متر و کاهش میزان رسوب‌گذاری در بستر کانال فرعی؛ (۳) افزایش نسبت آبیگری در کانال فرعی، و (۴) انتقال جریان‌های ثانویه از بستر کانال، به میانه‌ی کانال فرعی و به دنبال آن کاهش شدت فرسایش در بستر و دیواره‌های کانال فرعی.

منابع

- Barkdoll B. D. Ettema K. and Odgaard A. J. 1999. Sediment control at lateral diversion. Limits and enhancements to vanes use, Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 125(8): 862-870.
- Barkdoll B. D. Hagen B. and Odgaard J. 1995. Sediment exclusion at hydropower

- Hydraulic Engineering, ASCE, February. 92(2): 207-231.
11. Neary V. and Sotiropoulos F. 1996. Numerical investigation of laminar flows through 90-degree diversions of rectangular cross-section. *Computers & fluids*. 25(2): 95-118.
 12. Neary V. S. and Odgaard A. J. 1993. Three-dimensional flow structure at open channel diversions. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 119(11): 1223-1230.
 13. Neary V. S. Sotiropoulos F. and Odgaard A. J. 1999. Three-Dimensional numerical model of lateral intake inflows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125(2): 126-140.
 14. Ramamurthy A. S. Junying Qu. and Diep V. O. 2007. Numerical and Experimental study of Dividing Open-Channel Flows. ASCE, *Journal of Hydraulic Engineering*. Research. 133(10): 1135-1144.
 15. Shabayek S. Steffer P. and Hicks F. 2002. Dynamic model for subcritical dividing flows in open channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE. 128(9): 821-828.
 16. Taylor E. 1944. Flow characteristics at rectangular open channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*. 10(6):893-902.

