

شبیه‌سازی توزیع جریان زیربحرانی و نوسانات سطح آب در تقاطع چهار شاخه کانال روباز با FLOW 3D

زینب طالبی^۱، خلیل اژدری^{۲*}، سید حسین حسینی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

چکیده

در این تحقیق مشخصات جریان در تقاطع کانال چهار شاخه با زاویه ۹۰ درجه با دو ورودی و خروجی با استفاده از نرم‌افزار FLOW 3D شبیه‌سازی شده است. تأثیر پارامترهای نسبت دبی ورودی فرعی به ورودی اصلی، عدد فرود کانال ورودی اصلی، ارتفاع سرریزها بر روی نسبت دبی خروجی کانال اصلی به ورودی اصلی و پروفیل طولی سطح آب در محل تقاطع مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. مقایسه‌ی نتایج نشان داد مدل عددی قابلیت خوبی در شبیه‌سازی دبی جریان در کانال خروجی اصلی و فرعی دارد، به طوری که RMSE و NRMSE در کانال اصلی خروجی به ترتیب ۰/۰۰۰۴۷ و ۰/۰۰۰۴۸۳ متر مکعب بر ثانیه و در کانال فرعی خروجی ۰/۰۰۰۴۸۳ متر مکعب بر ثانیه و ۰/۰۰۰۴۸۳ بود. در یک نسبت دبی ثابت، هرچه ارتفاع سرریز خروجی کمتر باشد عدد فرود در کانال ورودی بیشتر است. همچنین مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی برای پروفیل‌های سطح آب تطابق خوبی باهم نشان داد. برای یک ارتفاع سرریز ثابت با رسیدن جریان به محل تقاطع، پروفیل سطح آب در این محل کاهش یافته و با گذر از محل تقاطع و ورود جریان به داخل کانال خروجی اصلی، پروفیل جریان روند افزایشی داشت، به طوری که RMSE و NRMSE برای پروفیل سطح آب در کانال اصلی به ترتیب ۰/۰۳۶۸۸۴ متر و ۰/۱۵/۷۵٪ و در کانال فرعی به ترتیب ۰/۰۴۸۹۱ متر و ۰/۱/۹۹۶٪ بود. همچنین با افزایش نسبت دبی ورودی، نوسانات سطح آب در محل تقاطع افزایش یافت، درحالی که با افزایش ارتفاع سرریزها، نوسانات سطح آب در محل تقاطع کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هندسی و هیدرولیکی، تقاطع چهار شاخه ۹۰ درجه، توزیع جریان، نوسانات سطح آب، نرم‌افزار FLOW 3D

مقدمه

حاصل از تحقیق خود را با نتایج آزمایشگاهی شومت (۱۹۹۸) مربوط به تقاطع ۹۰ درجه مقایسه کردند و از مدل خود به منظور بررسی تأثیر تغییر زاویه بر روی خصوصیات جریان در محل تقاطع استفاده کردند. مقایسه‌ی نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ارائه‌شده در پیش‌بینی خصوصیات هیدرودینامیکی جریان در محل تقاطع از دقت خوبی برخوردار بوده و تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد (Huang et al, 2002 and Shumate, 1998). رامامورتی و همکاران (۲۰۰۶)، به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان‌های ترکیبی در تقاطع ۹۰ درجه پرداختند. آن‌ها از معادلات ناویر استوکس و مدل $k-\omega$ بعدی استفاده کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها نتایج مربوط به ضرایب افت انرژی و الگوی جریان از دقت بالایی برخوردار بود. همچنین نتایج شبیه‌سازی عددی مربوط به فشار و سرعت مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشت (Ramamurthy et al., 2006). فریزل و همکاران (۲۰۰۸)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در تقاطع سه‌شاخه ۹۰ درجه پرداختند که در آن دو جریان ورودی در خلاف جهت یکدیگر باهم برخورد می‌کنند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود از

یکی از بخش‌های مهم شبکه‌های آبیاری زهکشی تقاطع کانال‌ها است. در طراحی صحیح کانال‌ها به منظور جلوگیری از سرریز شدن آب و توزیع صحیح جریان، تحلیل شرایط جریان در تقاطع کانال‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به مزیت‌های مدل‌های عددی نظیر کم‌هزینه‌تر بودن، صرفه‌جویی در زمان، امکان بررسی شرایط هندسی و فیزیکی مختلف و دقت قابل قبول آن‌ها در شبیه‌سازی، امروزه استفاده و کاربرد آن‌ها گسترش یافته است. محققین مختلفی به بررسی جریان در تقاطع کانال‌ها پرداختند که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره شده است. یانگ و همکاران (۲۰۰۲)، به بررسی عددی جریان سه‌بعدی در محل تقاطع کانال‌های روباز پرداختند. آن‌ها نتایج

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه آب و خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- دانشیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۳- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
(* نویسنده مسئول: Email: azhdary2015@yahoo.com)

دارد که با کاهش نسبت دبی، افزایش می‌یابد. یک ناحیه‌ی رکود تراز سطح آب در نزدیکی تقاطع در تمام کانال‌های مرکب مشاهده شد که در تقاطع‌های معمولی اتفاق نمی‌افتد (Biswal et al., 2016). لاثو و همکاران (۲۰۱۵)، به مقایسه‌ی یک‌بعدی و سه‌بعدی جریان و افت انرژی در تقاطع کانال روباز پرداختند. آن‌ها ابتدا نتایج مدل سه‌بعدی را با مدل آزمایشگاهی مقایسه کردند و سپس به ارزیابی مدل یک‌بعدی پرداختند. بررسی نتایج نشان داد که مدل یک‌بعدی مدلی اقتصادی و قابل اعتماد به منظور پیمایش و پیش‌بینی است (Luo et al., 2018). کریل و همکاران (۲۰۱۸)، به بررسی آزمایشگاهی تغییرات سطح آزاد آب در یک کانال روباز با تقاطع ۹۰ درجه‌ی متقارن و شبیه‌سازی جریان با نرم‌افزار OPEN FOAM پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تراز سطح آب در بالادست همواره بیشتر از پایین‌دست است. همچنین سطح آب در بالادست همواره متأثر از جریان در تقاطع است. مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی نیز مطابقت خوبی را نشان داد به طوری که فقط مقداری تفاوت در نتایج مربوط به ناحیه‌ی جدایی جریان مشاهده شد (Creele et al., 2018). تاکنون مطالعه‌ی در زمینه شبیه‌سازی جریان زیربحرانی انجام نشده است. در این تحقیق هدف، شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان زیربحرانی در محل تقاطع چهار شاخه ۹۰ درجه با نرم‌افزار FLOW 3D و بررسی قابلیت‌های این نرم‌افزار در شبیه‌سازی جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه ۹۰ درجه کانال‌ها با دو ورودی و خروجی، انتخاب مدل بهینه آشفتگی و در نهایت استفاده از قابلیت‌های این نرم‌افزار در مدل‌سازی توزیع جریان و نوسانات سطح آب در محل تقاطع است.

مواد و روش‌ها

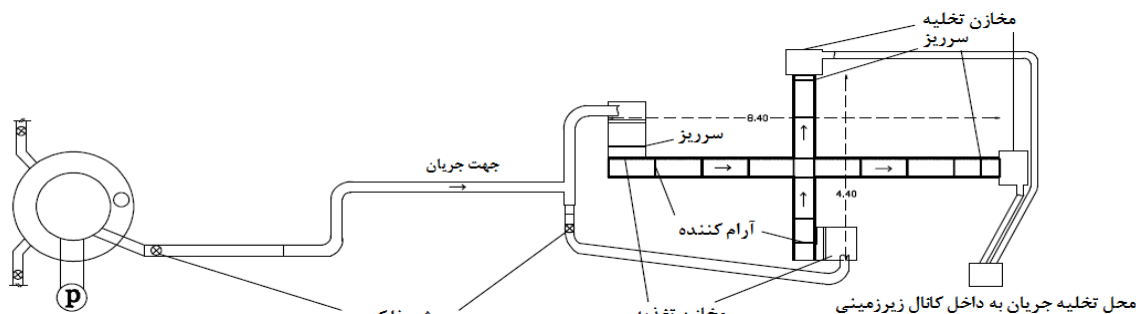
مدل آزمایشگاهی

به منظور شبیه‌سازی از مدل آزمایشگاهی حسینی (۱۳۹۳) استفاده شد. این مدل از دو کانال فلزی-شیشه‌ای تشکیل شده که طول کانال اصلی و فرعی به ترتیب ۸/۴ و ۴/۴ متر و ارتفاع و عرض کانال‌ها به ترتیب ۰/۵ و ۰/۴ متر بود. زاویه‌ی بین کانال‌ها ۹۰ درجه و شیب کف کانال‌ها ثابت و نزدیک به صفر در نظر گرفته شد. در ابتدا و انتهای کانال اصلی و فرعی مخازن تخلیه و تغذیه قرار داشت. آب موردنیاز آزمایش‌ها توسط یک پمپ با ظرفیت ۱۰۰ لیتر بر ثانیه تامین می‌شود. آبیگری توسط شیرفلکه نصب شده در ابتدای لوله‌ی اصلی منشعب شده از برج، انجام گردید. لوله اصلی به مخزن اصلی ورودی متصل شد که جنس آن از نوع پلی‌اتیلن و با قطر ۱۰ اینچ بود. به منظور تامین آب کانال فرعی ورودی یک انشعاب از لوله‌ی اصلی قبل از مخزن اصلی ورودی گرفته شد و در ابتدای آن یک شیر ۸ اینچی نصب شد. پس از تنظیم دبی جریان کل، با توجه به اینکه مقدار جریان ورودی کانال اصلی در تمام آزمایش‌ها ثابت بود (۱۵ لیتر بر

مدل تلاطم دو بعدی k-ε استفاده کردند. با وجود مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی مورد استفاده توسط آن‌ها در پیش‌بینی مشخصات اصلی جریان از دقت قابل قبولی برخوردار بود (Frizzell et al., 2008). گوهری (۱۳۹۱) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در تقاطع سه شاخه‌ی ۹۰ درجه کانال مستطیلی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت^۱ پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نرم‌افزار دارای قابلیت شبیه‌سازی دینامیک جریان در تقاطع کانال‌ها است. تشکیل نقاط چرخشی جریان و گرداب‌ها به خوبی در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شده‌اند. روییره و همکاران (۲۰۱۱)، به بررسی آزمایشگاهی جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه (دو کانال ورودی و دو کانال خروجی) پرداختند. آن‌ها با استفاده از ۶ معادله، یک مدل تحلیلی هیدرولیکی برای توزیع جریان ارائه دادند و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند که مطابقت خوبی داشت به طوری که در محدوده شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی دارای خطای ۵٪± بود (Riviere et al., 2011). میگنوت و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوهای جریان در تقاطع کانال‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی موقعیت دبی سنج‌ها پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که تطابق خوبی بین الگوهای جریان در آزمایش‌ها و مطالب ارائه شده در مورد جریان در تقاطع‌ها توسط سایر محققین وجود دارد. در مطالعه‌ی آن‌ها ارزیابی نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی سرعت نیز انجام شد (Mignot et al., 2012). پیرزاده و شاملو (۲۰۰۷)، مطالعه‌ی عددی بر روی نتایج آزمایشگاهی شتار و مورتی (۱۹۹۶) انجام دادند. آن‌ها مؤلفه سرعت در تقاطع را به صورت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و مدل k-ε برای جریان عرضی ورودی بررسی نموده و با انجام مقایسات پروفیل سرعت به این نتیجه رسیدند که تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارد. همچنین نتایج مدل سه بعدی تطابق بیشتری در مشخص نمودن اثر آشفتگی نسبت به مدل دو بعدی دارد (Pirzadeh and Shamloo, 2007 and Shettar and Murthy, 1996). از طریق مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی خصوصیات جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه‌ی ۹۰ درجه هم‌عرض پرداختند. در مطالعات آن‌ها تقاطع دارای دو ورودی و دو خروجی بود. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد، برای نسبت جریان‌های ورودی ۰/۸ یا بزرگ‌تر، عمق جریان خروجی در کانال‌های خروجی کم بود. در این شرایط در کانال‌های ورودی موج تشکیل شد و تا محل تقاطع و داخل هر دو کانال خروجی توسعه پیدا کرد (Nania et al., 2014). بیسوال و همکاران (۲۰۱۶)، هیدرولیک جریان ترکیبی در یک تقاطع کانال روباز مرکب راست گوشه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد مشخصات جریان در محل تقاطع بستگی به قدرت جریان‌های ثانویه

اندازه‌گیری دبی در کانال‌های خروجی از سرریزهای چوبی نصب‌شده در انتهای این کانال‌ها استفاده شد که قبل از شروع آزمایش‌ها این سرریزها کالیبره شدند.

ثانیه)، شیر مربوط به کانال فرعی ورودی آن قدر باز می‌شد تا دبی جریان کانال اصلی برابر با ۱۵ لیتر بر ثانیه شود، در این شرایط بقیه‌ی جریان از داخل کانال فرعی ورودی عبور می‌کرد. دبی ورودی از کانال فرعی در حالت‌های مختلف ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ lit/s بود. به‌منظور



شکل ۱- شماتیک فلوم آزمایشگاهی

توسط Flow Science, Inc صورت گرفته و کاربرد زیادی در مدل‌سازی شرایط پیچیده سه‌بعدی دائمی و غیردائمی با شکل و هندسه نامنظم دارد. این نرم‌افزار از روش حجم محدود برای حل معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده می‌کند.

معادلات حاکم

معادله پیوستگی

$$\frac{V_f}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \varepsilon \frac{u A_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (3)$$

در معادله ۳، V_f نسبت کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ دانسیته سیال و R_{SOR} مرجع جرم است. V و U بردارهای سرعت در جهات x ، y و z هستند. A_x ، A_y و A_z برابر مساحت کسری محیط به جریان در جهات x ، y و z می‌باشند. ضریب R بسته به انتخاب سیستم مختصات، در مختصات کارتزین برابر ۱ و ε برابر صفر است. c^2 توان دوم سرعت موج و p فشار است.

معادله مومنتم

در معادلات ۴، ۵ و ۶ G_x ، G_y و G_z شتاب‌های بدنه، f_x ، f_y و f_z شتاب‌های ناشی از لزجت، b_x ، b_y و b_z افت جریان در محیط‌های دارای خلل و فرج و عبارت $(R_{SOR}/\rho V_f) * (w - w_w - \partial w_s)$ مربوط به تزیق جرم در سرعت صفر است (سعادت و زین‌العابدینی، ۱۳۹۴).

مشخصات مدل عددی

با توجه به مدل آزمایشگاهی، مدل عددی به پنج بلوک مش تقسیم شد که عبارت است از ورودی کانال اصلی تا تقاطع کانال‌ها، تقاطع کانال‌ها، تقاطع تا خروجی کانال اصلی، ورودی کانال فرعی تا

آنالیز ابعادی

پارامترهای مؤثر بر روی توزیع جریان در تقاطع چهار شاخه با دو ورودی و خروجی عبارت‌اند از: دبی جریان کانال‌های ورودی Q_{xi} و Q_{yi} ، دبی جریان کانال‌های خروجی Q_{xo} و Q_{yo} ، عمق آب در کانال‌های ورودی Y_{xi} و Y_{xo} ، عرض کانال‌های ورودی b_{xi} و b_{yi} ، عمق آب در کانال‌های خروجی Y_{yo} و Y_{xo} ، عرض کانال‌های خروجی b_{xo} و b_{yo} ، شتاب ثقل g ، جرم مخصوص سیال ρ ، لزجت دینامیکی μ ، ارتفاع سرریزهای انتهای کانال‌های خروجی c_x و c_y با توجه به برابر بودن عرض کانال‌ها، در معادله‌ی نهایی عرض کانال‌ها با پارامتر b نمایش داده شده است. با مشخص شدن پارامتر Q_{xo} و با توجه به معلوم بودن Q_{xi} و Q_{yi} ، $(Q_{yo} = (Q_{xi} + Q_{yi}) - Q_{xo})$ در معادله نهایی Q_{yo} حذف می‌شود. پارامترهای مؤثر را می‌توان به‌صورت معادله ۱ مرتب کرد.

$$(Q_{xi}, Q_{yi}, Q_{xo}, Y_{xi}, Y_{yi}, Y_{xo}, c_x, c_y, b, \rho, g) = 0 \quad (1)$$

با تحلیل ابعادی به روش π باکینگهام، حذف عدد رینولدز ($Re \approx 11000$) به دلیل تأثیر ناچیز لزجت و پارامترهای وابسته نظیر نسبت عمق‌های آب، در نهایت پارامترهای بدون بعد را می‌توان به‌صورت معادله ۲ مرتب کرد.

$$\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}} = F \left(\frac{Q_{yi}}{Q_{xi}}, \frac{c}{b}, Fr_{xi} \right) \quad (2)$$

مدل عددی نرم‌افزار

FLOW 3D نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۱) می‌باشد که تولید، توسعه و پشتیبانی آن

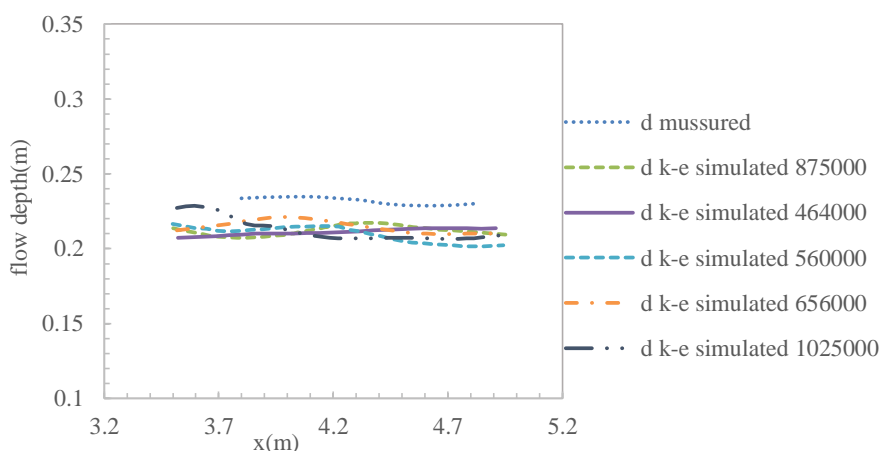
را با نتایج آزمایشگاهی دارند. با توجه به اینکه تعداد مش کمتر سبب کاهش زمان شبیه سازی خواهد شد، تعداد مش ۵۶۰۰۰۰ برای شبیه سازی در نظر گرفته شد.

تقاطع و تقاطع تا خروجی کانال فرعی. بعد از مشخص شدن نوع مش بندی مدل عددی، برای تعیین تعداد سلول های مش بهینه، مدل هایی با تعداد سلول مش ۴۶۴۰۰۰، ۵۶۰۰۰۰، ۶۵۶۰۰۰ و ۸۷۵۰۰۰ و ۱۰۲۵۰۰۰ شبیه سازی و مورد ارزیابی قرار گرفتند. مطابق شکل ۲، نتایج شبیه سازی با تعداد سلول ۵۶۰۰۰۰ و ۶۵۶۰۰۰ بیشترین مطابقت

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_X \frac{\partial u}{\partial x} + v A_Y R \frac{\partial u}{\partial y} + \omega A_Z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \varepsilon \frac{A_y v^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_x - \partial u_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_X \frac{\partial v}{\partial x} + v A_Y R \frac{\partial v}{\partial y} + \omega A_Z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \varepsilon \frac{A_y u v}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial P}{\partial x} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - \partial v_s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_X \frac{\partial w}{\partial x} + v A_Y R \frac{\partial w}{\partial y} + \omega A_Z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - \partial w_s) \quad (6)$$



شکل ۲- مقایسه ی نتایج عددی و آزمایشگاهی پروفیل سطح آب با تعداد سلول های مختلف در کانال اصلی و برای $y=2/2m$

دبی ورودی^۱، دیواره های کانال و کف کانال را دیوار^۲، بالاترین ارتفاع کانال (Z_{max}) را شرایط مرزی تقارن^۳، همچنین در قسمت هایی که بلوک های مش به هم متصل شده اند شرایط مرزی تقارن و در نهایت خروجی های کانال های اصلی و فرعی نیز با شرط مرزی فشار^۴ و وارد کردن ارتفاع خروجی مشخص شد (شکل ۳).

نتایج و بحث

ارزیابی دبی کانال های خروجی در مدل عددی و مقایسه با داده های آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی کمی دقت مدل عددی، مقادیر دو پارامتر آماری RMSE و NRMSE محاسبه گردید (روابط ۷ و ۸). در این روابط، $x_{m,i}$ مقدار x از داده های آزمایشگاهی در نقطه ی i ، $x_{s,i}$ مقدار x از

به منظور ارزیابی مدل های مختلف آشفتگی، قابلیت آن ها در شبیه سازی عمق جریان در کانال اصلی و فرعی مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱، مقادیر RMSE و NRMSE را برای مدل های مختلف آشفتگی نشان می دهد. مطابق جدول، خطاهای RMSE و NRMSE در مدل های $k-\varepsilon$ و $k-\omega$ با هم برابر بوده و کمتر از مدل RNG می باشند. با توجه به اینکه در مدل $k-\varepsilon$ آشفتگی به صورت دقیق نشان داده نمی شود و این مدل شروع جدایش را دیر و مقدار آن را کم تخمین میزند. از مزایای مدل $k-\omega$ بهبود محاسبات در نزدیکی دیواره برای اعداد رینولدز پایین بدون نیاز به اعمال تابع دیواره است. همچنین عملکرد این مدل در لایه ی مرزی جریان های محصور به دیواره، جریان برشی آزاد، وجود گرادیان فشار معکوس و جریان های با عدد رینولدز پایین بهتر از مدل های دیگر است (سعادتی و زین العابدینی، ۱۳۹۴). در نتیجه در این شبیه سازی، از مدل $k-\omega$ استفاده شده است.

شرایط مرزی نیز با توجه به بلوک های مش مشخص شد. در قسمت ورودی کانال اصلی (x_{min}) و ورودی کانال فرعی (y_{min})

- 1- Flow rate
- 2- Wall
- 3- Symmetry
- 4- Specified Pressure

al., 2009

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{m,i} - x_{s,i})^2}{n}} \quad (7)$$

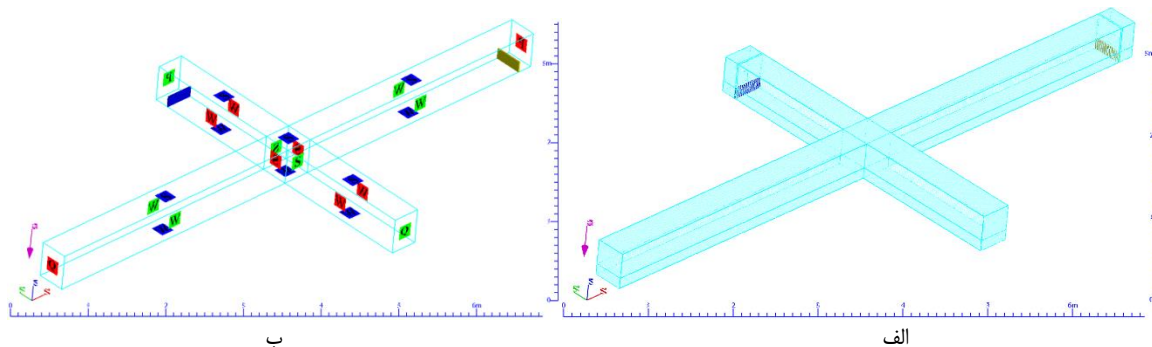
$$\%NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} * 100 \quad (8)$$

در شکل ۴، مقادیر عددی و آزمایشگاهی دبی کانال‌های خروجی مقایسه شده است. با توجه به توزیع نقاط درروی خط $x=y$ و اطراف آن مدل عددی از قابلیت خوبی در شبیه‌سازی دبی جریان در کانال خروجی اصلی و خروجی فرعی برخوردار است.

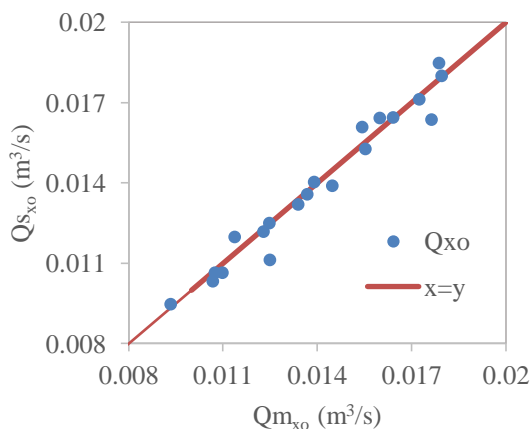
داده‌های عددی در نقطه‌ی i و n آخرین مقدار i و \bar{x} میانگین مقادیر $(x_{m,i})$ است. هرچه مقدار $RMSE$ به صفر نزدیک‌تر باشد دقت شبیه‌سازی بیشتر است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به بررسی‌های جامیسون و همکاران (۱۹۹۱) و بنایا و همکاران (۲۰۰۹)، خطای $NRMSE$ اگر در بازه‌ی صفر تا ۱۰ درصد باشد کارایی مدل عالی، بازه‌ی ۱۰ تا ۲۰ درصد کارایی مدل خوب، بازه‌ی ۲۰ تا ۳۰ درصد کارایی مدل متوسط و بیشتر از ۳۰ درصد مدل کارایی ضعیف و غیرقابل قبولی دارد (Jamieson et al., 1991 and (Bannaya et

جدول ۱- محاسبه خطای $RMSE$ و $NRMSE$ عمق در کانال اصلی و فرعی برای مدل‌های آشفته‌گی مختلف

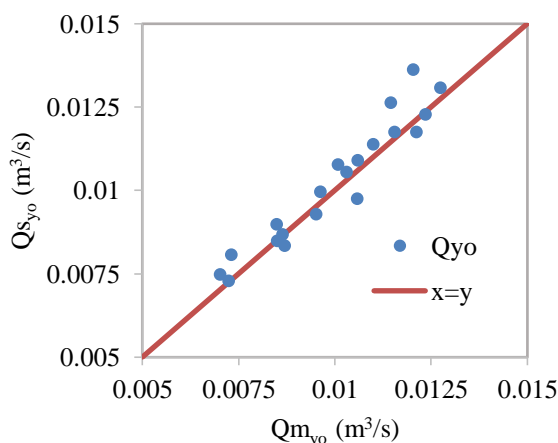
	RMSE (RNG) (m)	RMSE (k-ε) (m)	RMSE (k-ω) (m)	%NRMSE (RNG)	%NRMSE (k-ε)	%NRMSE (k-ω)
کانال اصلی ($y=2/2m$)	۰/۰۱۶۳۳	۰/۰۱۶۲۲۵	۰/۰۱۶۲۲۵	۷/۰۴۶۶	۶/۹۹۸	۶/۹۹۸
کانال فرعی ($x=4/2m$)	۰/۰۳۰۱	۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۹	۱۲/۳۸	۱۱/۹۷	۱۱/۹۷



شکل ۳- مدل عددی، الف: مدل مش بندی شده، ب: شرایط مرزی مورداستفاده در مدل



ب



الف

شکل ۴- تغییرات دبی خروجی مدل عددی در برابر دبی خروجی مدل آزمایشگاهی الف: کانال اصلی، ب: کانال فرعی

کانال اصلی حداکثر مقدار $RMSE$ ، $0/000471$ متر مکعب بر ثانیه و $NRMSE$ ، $3/357\%$ است. این مقادیر برای دبی خروجی کانال

در جدول ۲، مقادیر $RMSE$ و $NRMSE$ مربوط به شبیه‌سازی دبی‌های خروجی مدل‌های مختلف ارائه شده است. برای دبی خروجی

فرعی به ترتیب ۰/۰۰۰۴۸۳ متر مکعب بر ثانیه و ۴/۸۳۴٪ است؛ اصلی و فرعی کارایی عالی دارد. بنابراین نرم افزار FLOW 3D در شبیه سازی دبی خروجی کانال

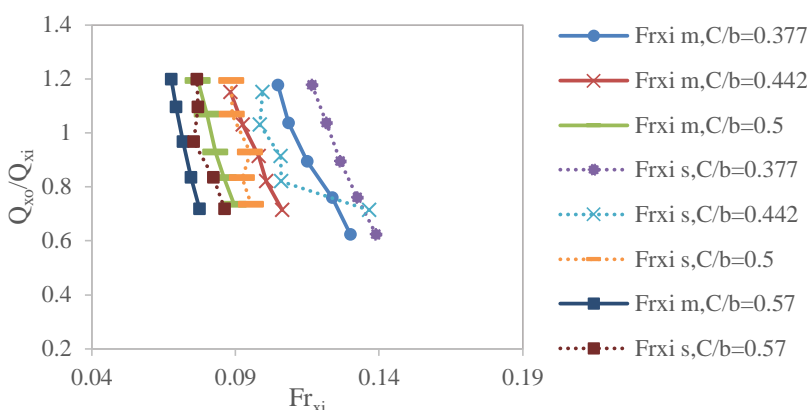
جدول ۲- مقادیر خطاهای RMSE و NRMSE برای دبی های خروجی داده های مدل عددی

دبی های خروجی	RMSE(m ³ /s)	NRMSE%
Q _{xo}	۰/۰۰۰۴۷	۳/۳۵۷
Q _{yo}	۰/۰۰۰۴۸۳	۴/۸۳۴

دبی خروجی است. در یک نسبت دبی ثابت نیز هرچه ارتفاع سرریز خروجی کمتر باشد عدد فرود نیز بیشتر خواهد بود، زیرا کاهش ارتفاع سرریز با توجه به ثابت بودن دبی کانال ورودی اصلی منجر به افزایش سرعت جریان ورودی خواهد شد (شکل ۵).

تغییرات نسبت دبی خروجی به عدد فرود کانال ورودی اصلی

برای یک ارتفاع سرریز ثابت، افزایش عدد فرود کانال ورودی اصلی، نسبت دبی خروجی از کانال اصلی را کاهش داد، زیرا افزایش عدد فرود با کاهش نسبت دبی ورودی ممکن است و نتیجه ی آن کاهش جریان انحرفی به داخل کانال خروجی اصلی و کاهش نسبت



شکل ۵- تغییرات نسبت دبی خروجی به ورودی در کانال اصلی در برابر عدد فرود کانال اصلی

مکعب بر ثانیه و NRMSE ۱۵/۷۲٪ است. با توجه به درصد خطای NRMSE نرم افزار FLOW 3D کارایی خوبی در شبیه سازی عدد فرود دارد.

با توجه به جدول ۳، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی برای چهار نسبت ارتفاع سرریز ۰/۳۷۷، ۰/۴۴۲، ۰/۵ و ۰/۵۷ مطابقت خوبی را نشان می دهد، به طوری که حداکثر خطای RMSE، ۰/۱۵۲ متر

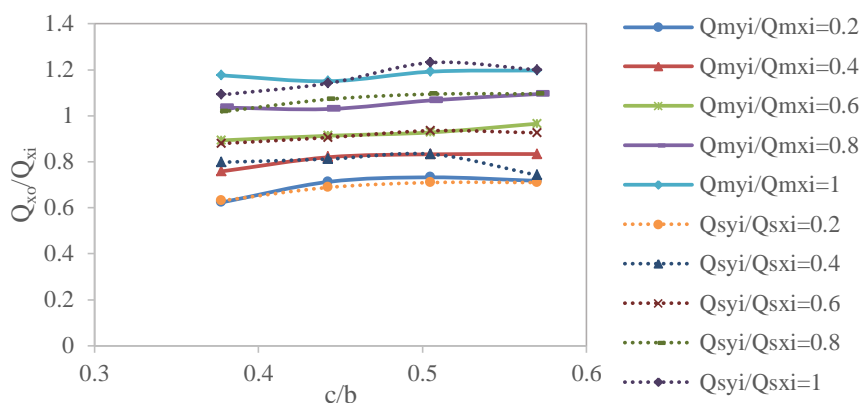
جدول ۳- خطاهای RMSE و NRMSE دبی خروجی مدل عددی برای سرریزهای با ارتفاع مختلف

$\frac{c}{b}$	۰/۳۷۷	۰/۴۴۲	۰/۵	۰/۵۷
RMSE(m ³ /s)	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵۲	۰/۰۰۹۳	۰/۰۰۷۵
%NRMSE	۹/۴۷	۱۵/۷۲	۱۱/۲۱	۱۰/۴

افزایش نسبت دبی خروجی کانال اصلی است. برای یک نسبت دبی ثابت با افزایش ارتفاع سرریزهای خروجی نسبت دبی خروجی از کانال اصلی افزایش ناچیزی یافت. همچنین با افزایش ارتفاع سرریزهای خروجی شیب تغییرات Q_{xo}/Q_{xi} در برابر c/b کندتر شد. به عبارتی تغییر ارتفاع سرریزها تأثیر زیادی بر روی نسبت دبی خروجی نداشت.

بررسی تأثیر ارتفاع سرریزهای خروجی بر روی نسبت دبی خروجی

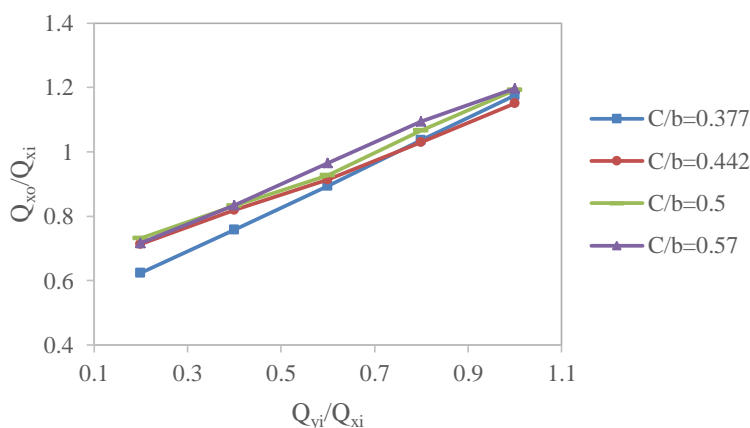
در شکل ۶، برای یک ارتفاع سرریز خروجی ثابت با افزایش نسبت دبی ورودی، نسبت دبی خروجی از کانال اصلی افزایش یافت. در واقع با افزایش نسبت دبی ورودی میزان جریان انحرف یافته از کانال فرعی ورودی به داخل کانال اصلی افزایش یافته که نتیجه ی آن



شکل ۶- تغییرات نسبت دبی خروجی در برابر نسبت ارتفاع سرریزها

آن افزایش نسبت دبی خروجی از کانال اصلی است که تغییرات آن برای ارتفاع سرریزهای مختلف خطی و تقریباً نزدیک به هم است. در این حالت نیز نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع سرریز مخصوصاً در نسبت دبی‌های ورودی بالا تأثیر زیادی بر روی نسبت دبی خروجی از کانال اصلی ندارد.

بررسی تأثیر نسبت دبی ورودی بر روی نسبت دبی خروجی
در شکل ۷، با افزایش نسبت دبی ورودی، نسبت دبی خروجی از کانال اصلی افزایش یافت. دبی خروجی از کانال اصلی تابعی از دبی ورودی از کانال فرعی است. با افزایش دبی کانال فرعی ورودی انحراف جریان به داخل کانال اصلی خروجی افزایش یافته، نتیجه‌ی



شکل ۷- تغییرات نسبت دبی خروجی ورودی در برابر نسبت دبی ورودی

دارد و با توجه به قدرت جریان‌های ورودی و برخورد آن‌ها با یکدیگر در محل تقاطع میزان نوسانات افزایش می‌یابد. افزایش نسبت دبی ورودی به ازای یک ارتفاع سرریز ثابت، سبب افزایش سرعت جریان در کانال فرعی ورودی و شدت برخورد جریان-های ورودی در محل تقاطع می‌شود. در نسبت دبی‌های پایین با توجه به ضعیف بودن شدت برخورد و به دلیل انحراف جریان به داخل کانال اصلی خروجی، سطح آب در محل تقاطع پایین می‌افتد، اما در نسبت-های دبی‌های بالا به دلیل افزایش شدت برخورد دو جریان، سطح آب علی‌رغم انحراف بخشی از جریان پایین نمی‌افتد. با افزایش ارتفاع

تغییرات پروفیل طولی سطح آب در کانال اصلی و فرعی برای نسبت دبی‌های ورودی مختلف

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، برای یک ارتفاع سرریز ثابت با رسیدن جریان به محل تقاطع با توجه به توزیع جریان در دوشاخه پروفیل سطح آب در این محل کاهش یافته و با گذر از محل تقاطع و ورود جریان به داخل کانال خروجی اصلی با توجه به سرریزهای انتهایی پروفیل جریان روند افزایشی در پی خواهد داشت. برای نسبت دبی‌های ورودی مختلف این روند تقریباً مشابه است، با این تفاوت که در نسبت دبی‌های بالاتر عمق جریان مقدار بیشتری

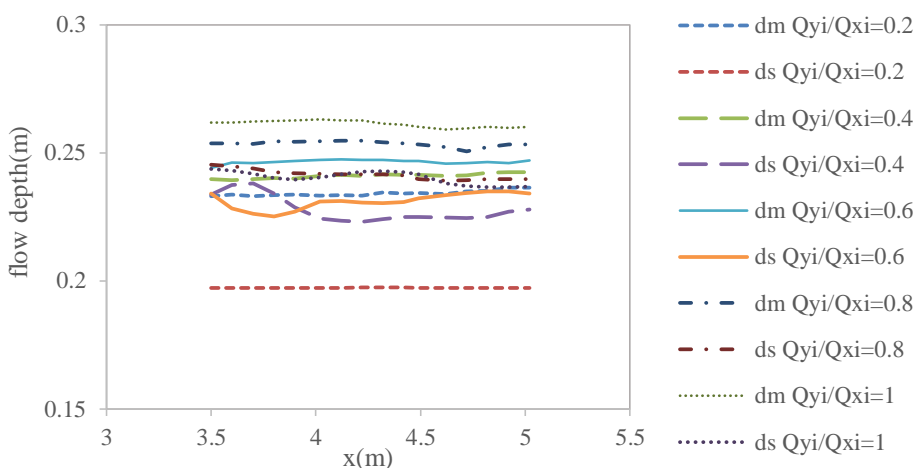
افزایش دبی، افزایش سرعت را به دنبال خواهد داشت که نتیجه آن افزایش شدت برخورد جریان‌های ورودی و تلاطم بیشتر است.

مقایسه‌ی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد، به طوری که حداکثر مقدار خطای RMSE و NRMSE برای پروفیل طولی کانال اصلی به ترتیب برابر با ۰/۰۳۶۸۸۴ متر و ۱۵/۷۵٪ بود. با توجه به مقدار خطای NRMSE، نرم‌افزار FLOW 3D کارایی خوبی در شبهه‌سازی پروفیل طولی دارد. همچنین مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل طولی کانال فرعی نشان می‌دهد که حداکثر مقدار خطای RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۰۴۸۹۱ متر و ۱۹/۹۶٪ بود. با توجه به مقدار خطای NRMSE، نرم‌افزار FLOW 3D کارایی خوبی در شبهه‌سازی پروفیل سطح آب در کانال فرعی دارد. کمترین خطای RMSE و NRMSE در کانال اصلی به ترتیب ۰/۰۰۳ و ۱/۲۶٪ است که مربوط به مدل با نسبت دبی ورودی ۰/۸ و نسبت سرریز ۰/۴۴۲ است.

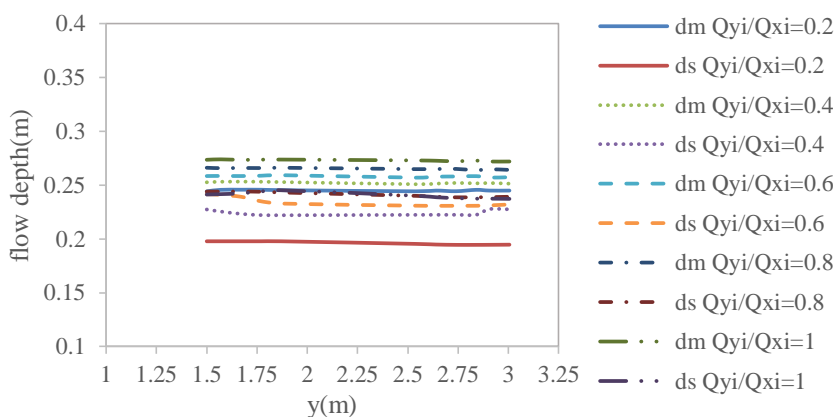
سرریزهای خروجی عملاً پایین‌افتادگی ناشی از انحراف جریان به دلیل ثابت ماندن نسبت انحراف جریان، کمتر می‌شود (شکل ۹).

بررسی تغییرات پروفیل طولی سطح آب در کانال اصلی برای ارتفاع سرریزهای مختلف

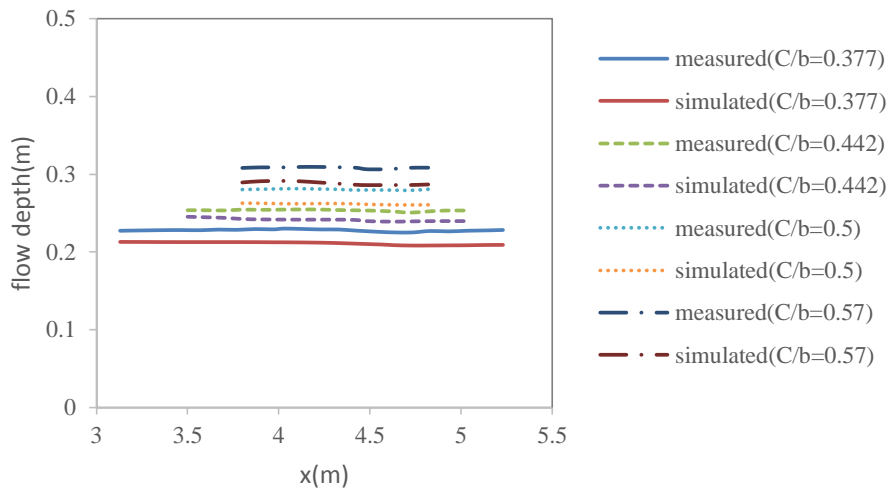
همان‌طور که در شکل ۱۰ و ۱۱ مشخص است، با کاهش ارتفاع سرریز، عمق جریان کاهش می‌یابد. برای یک نسبت دبی ثابت کاهش عمق در کانال ورودی اصلی و محل تقاطع، سبب افزایش عدد فرود و افزایش تلاطم و نوسانات سطح آب در محل تقاطع خواهد شد. این نوسانات سطح آب سبب تغییرات بیشتر پروفیل طولی خواهد شد. با افزایش ارتفاع سرریز خروجی با توجه به اینکه عمق جریان افزایش پیدا می‌کند، عدد فرود کاهش خواهد یافت که نتیجه‌ی آن کاهش تلاطم‌ها و نوسانات سطح آب در محل تقاطع بوده و یکنواخت‌تر شدن پروفیل سطح آب را به دنبال دارد. برای یک ارتفاع سرریز ثابت نیز با افزایش دبی، نوسانات سطح آب در محل تقاطع افزایش می‌یابد، زیرا



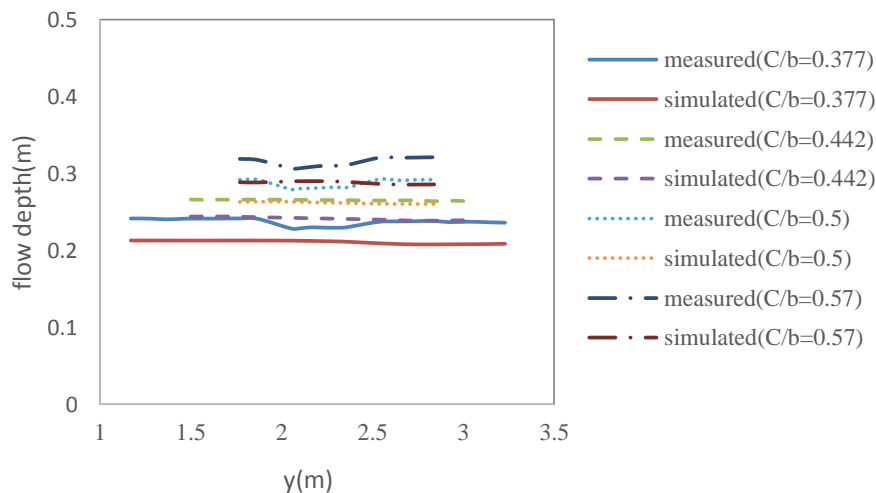
شکل ۸- پروفیل سطح آب در کانال اصلی با نسبت $c/b=0/442$



شکل ۹- پروفیل سطح آب در کانال فرعی با نسبت $c/b=0/442$



شکل ۱۰- پروفیل سطح آب در راستای کانال اصلی برای نسبت دبی ورودی $\frac{Q_{yi}}{Q_{xi}} = 0.8$



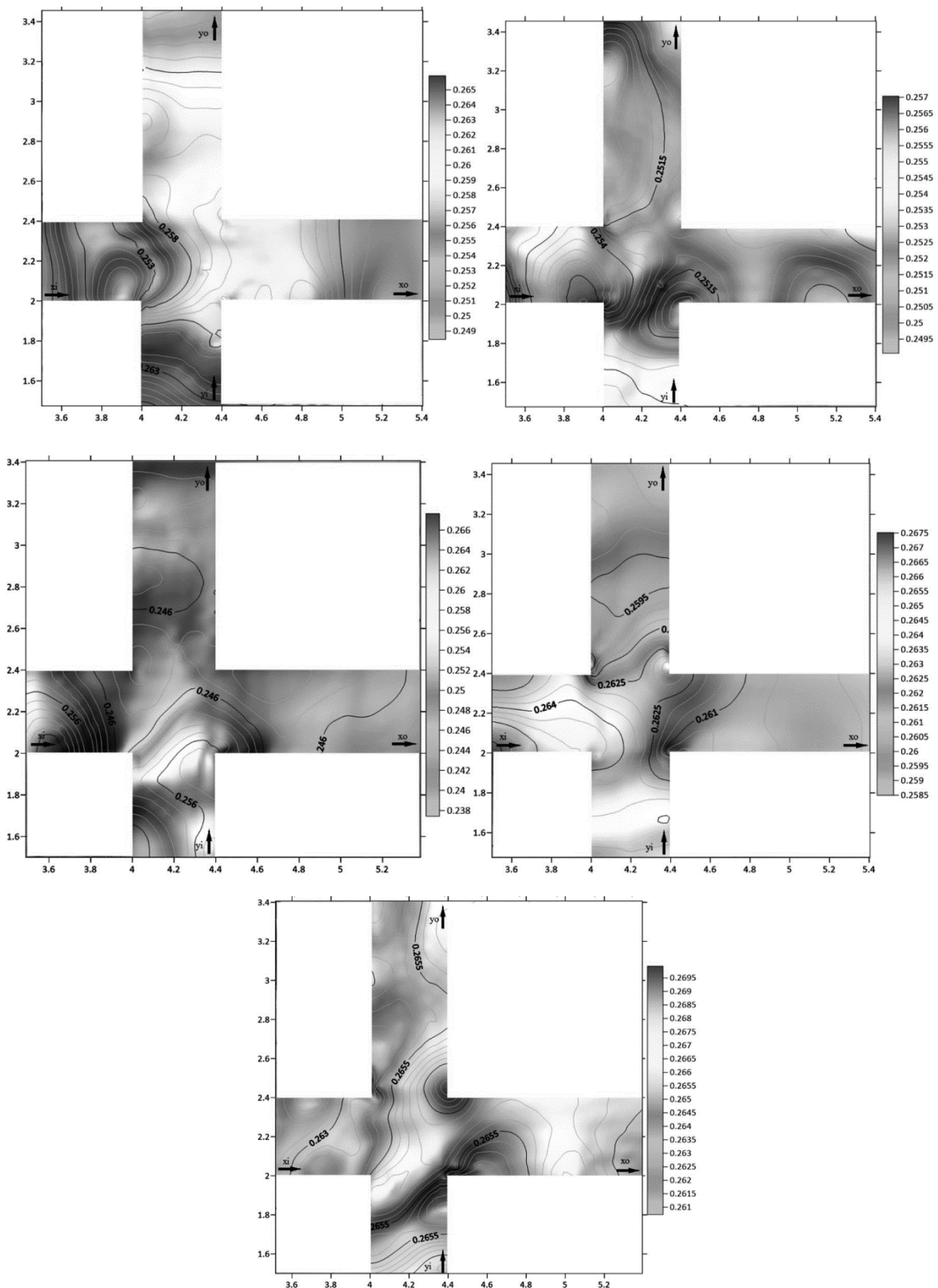
شکل ۱۱- پروفیل سطح آب در راستای کانال فرعی برای نسبت دبی ورودی $\frac{Q_{yi}}{Q_{xi}} = 0.8$

تأثیر ارتفاع سرریز خروجی بر روی نوسانات سطح آب

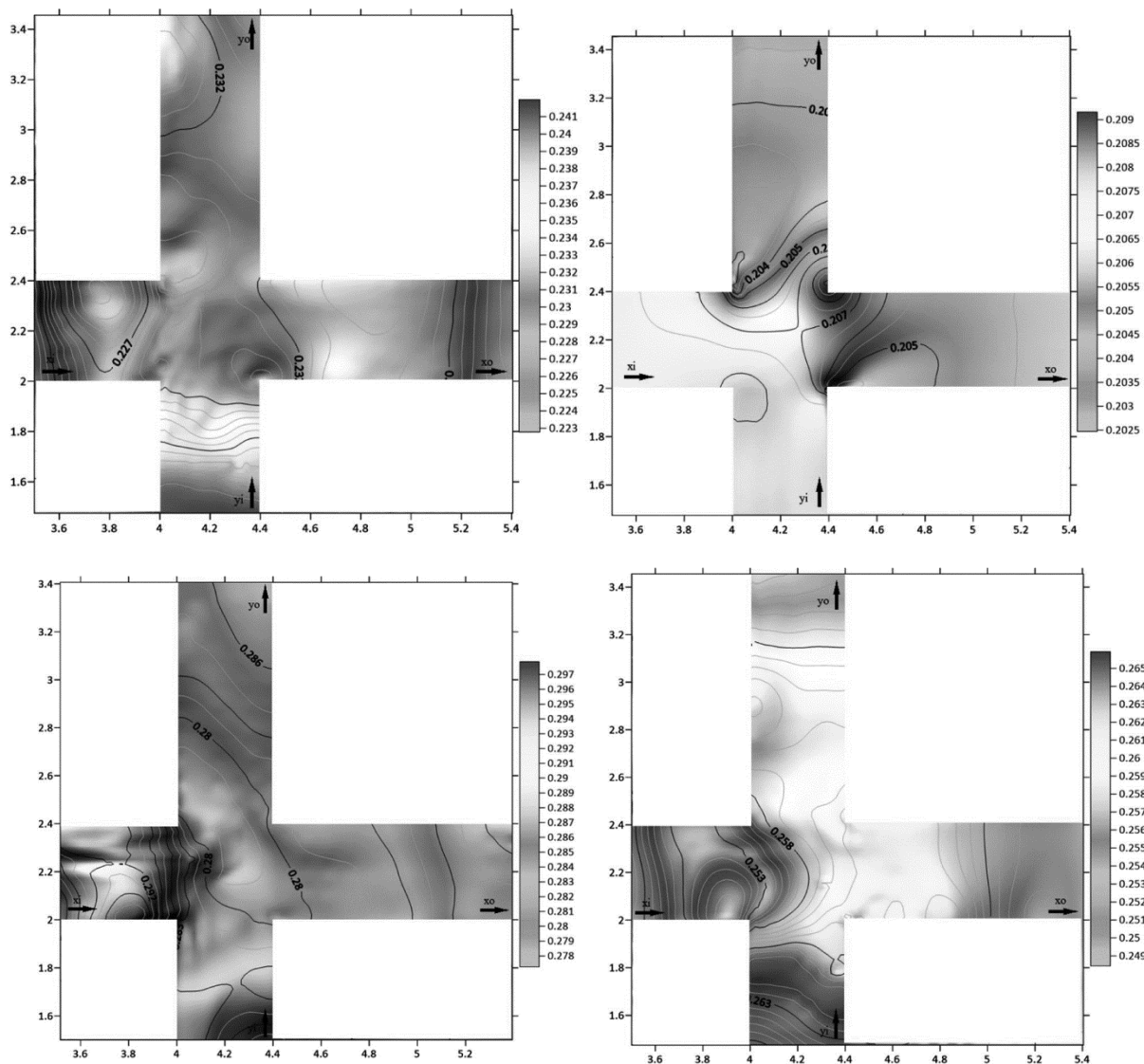
همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، برای یک نسبت دبی ثابت با افزایش ارتفاع سرریزهای خروجی، عمق جریان در داخل کانال‌ها و محل تقاطع افزایش می‌یابد. همچنین از شدت تلاطم در محل تقاطع کاسته شده و چرخش جریان و گرداب‌های تشکیل شده ضعیف‌تر بود به طوری که برای سرریزهای بلندتر، ناحیه‌ی جداشدگی در کانال‌های خروجی مشخص نبود در حالی که در ارتفاع سرریز کمتر چرخش جریان و ناحیه جداشدگی در این ناحیه واضح‌تر بود. علاوه بر این افزایش ارتفاع سرریزها سبب آرام‌تر شدن و توزیع یکنواخت‌تر جریان در کانال‌های خروجی شد که این مطلب را می‌توان با توجه به خطوط کنتور رسم شده در شکل‌ها استنباط کرد.

تأثیر نسبت دبی ورودی بر روی نوسانات سطح آب

بررسی نتایج نشان داد در یک ارتفاع سرریز ثابت با افزایش نسبت دبی ورودی، شدت برخورد جریان‌های ورودی سبب افزایش نوسانات در محل تقاطع شد. همچنین افزایش دبی کانال فرعی ورودی و چرخش این جریان به داخل کانال اصلی خروجی سبب تشکیل ناحیه‌ی جداشدگی در داخل کانال اصلی خروجی شده که در این ناحیه، گرداب و کاهش سطح آب مشاهده گردید. در نسبت دبی‌های بالاتر ابعاد این ناحیه و موقعیت آن بهتر قابل رؤیت هستند. همچنین در تمام مدل‌ها یک ناحیه‌ای با ماکسیمم سطح آب در گوشه‌ی بیرونی تقاطع قابل مشاهده بود که اصطلاحاً به‌عنوان ناحیه رکود شناخته می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- خطوط کنتور پروفیل سطح آب برای نسبت سرریز (۵/۰). الف: نسبت دبی ورودی $Q_{yi}/Q_{xi} = 0.2$ ، ب: نسبت دبی ورودی $Q_{yi}/Q_{xi} = 0.4$ ، ج: نسبت دبی ورودی $Q_{yi}/Q_{xi} = 0.6$ ، د: نسبت دبی ورودی $Q_{yi}/Q_{xi} = 0.8$ ، ه: نسبت دبی ورودی $Q_{yi}/Q_{xi} = 1.0$.



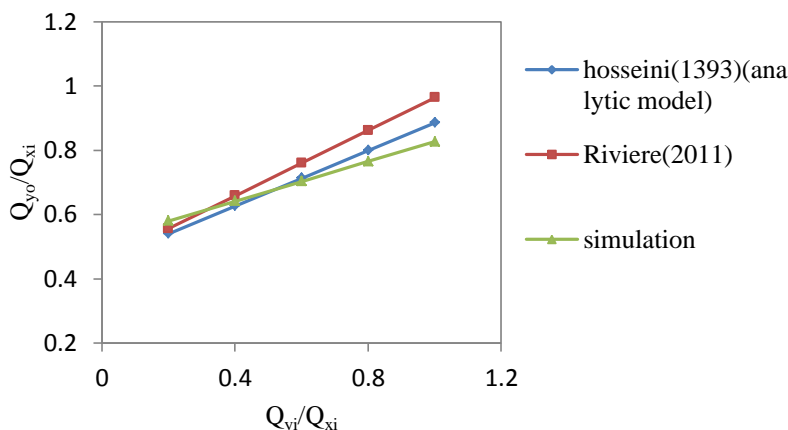
شکل ۱۳ - خطوط کنتور پروفیل سطح آب نسبت دبی ($Q_{y_i}/Q_{x_i}=0/6$) و نسبت‌های مختلف ارتفاع سرریز. الف: $(c/b=0/377)$ ، ب: $(c/b=0/57)$ ، ج: $(c/b=0/5)$ ، د: $(c/b=0/442)$.

نتیجه گیری

با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D مشخصات جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه به صورت عددی بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار خطای RMSE و NRMSE مربوط به شبیه‌سازی دبی‌های خروجی کانال اصلی به ترتیب، $0/000471$ متر مکعب بر ثانیه و $3/357\%$ و این مقادیر برای دبی‌های خروجی کانال فرعی به ترتیب، $0/000483$ متر مکعب ثانیه و $4/834\%$ است. با توجه به مقدار خطای NRMSE، نرم‌افزار FLOW 3D کارایی عالی در شبیه‌سازی دبی خروجی دارد. همچنین نتایج نشان داد دبی خروجی از کانال اصلی تابعی از دبی ورودی از کانال فرعی است.

مقایسه نتایج با نتایج سایر محققین

نتایج مربوط به تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال فرعی در برابر نسبت دبی ورودی در تحقیق حاضر با نتایج روییره و همکاران (۲۰۱۱) و نتایج مدل تحلیلی ارائه‌شده توسط حسینی و همکاران (۱۳۹۴) مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، روند تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال فرعی در این تحقیق نیز مشابه سایر تحقیقات خطی است و مطابقت خوبی بین نتایج این تحقیق و نتایج سایر محققین وجود دارد.



شکل ۱۴- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با سایر محققین

حسینی، س.ج.، فرسادیزاده، د.، حسین‌زاده دلیر، ع. و سلماسی، ف. ۱۳۹۴. مدل تحلیلی یک‌بعدی توزیع جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه کانال‌های روباز. نشریه دانش آب و خاک، ۲۵، ۱: ۲۳۵-۲۴۶.

سعادت، ا. و زین‌العابدینی، م. ۱۳۹۴. اصول شبهه‌سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزارهای FLUENT و CFX. به سفارش شرکت مهندسی پرداز پترو دانش، تهران.

گوهری، س. ۱۳۹۱. بررسی عددی و آزمایشگاهی الگوی جریان در تقاطع ۹۰ درجه کانال‌های مستطیلی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۹، ۴: ۱۲۱-۱۳۸.

Bannaya, M. and Hoogenboom, G. 2009. Using pattern recognition for estimation cultivar coefficients of a crop simulation model, *Journal of Field Crops Research*. 111.3: 290-302.

Biswal, S.K., Mohapatra, P. and Muralidhar, K. 2016. Hydraulics of combining flow in a right-angled compound open channel junction, *Journal of Sadhana*, 41.1: 97-110.

Creëlle, S., Engelen, L., Schindfessel, L., Ramos, P., X. and Mulder, T. D. 2018. Experimental investigation of free surface gradients in a 90° angled asymmetrical open channel confluence, *Journal of Advances in Hydro informatics*, Springer Water. Springer, Singapore.

Frizzell, C.S., Khan, A.A. and Werth, D.E. 2008. Numerical simulation of equal and opposing subcritical flow junctions, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. 134.2: 267-273.

با افزایش نسبت دبی ورودی میزان جریان انحراف یافته از کانال فرعی ورودی به داخل کانال اصلی افزایش یافته که نتیجه‌ی آن افزایش نسبت دبی خروجی کانال اصلی است. ارتفاع سرریز نیز تأثیر زیادی بر روی دبی خروجی ندارد. افزایش عدد فرود نیز سبب افزایش تلاطم و نوسانات سطح آب در محل تقاطع و تغییرات بیشتر پروفیل طولی خواهد شد. با افزایش ارتفاع سرریز خروجی عمق جریان افزایش و عدد فرود کاهش می‌یابد، نتیجه‌ی آن کاهش تلاطم‌ها و نوسانات سطح آب در محل تقاطع بوده که یکنواخت‌تر شدن پروفیل سطح آب را به دنبال دارد. مقایسه‌ی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد به طوری که حداکثر مقدار RMSE و NRMSE برای پروفیل طولی کانال اصلی به ترتیب برابر با ۰/۰۳۶۸۸۴ متر و ۱۵/۷۵٪ بود. همچنین مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی پروفیل طولی کانال فرعی نشان می‌دهد که حداکثر مقادیر RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۰۴۸۹۱ متر و ۱۹/۹۶٪ است. بنابراین نرم‌افزار FLOW 3D در شبهه‌سازی پروفیل سطح آب کارایی خوبی دارد. مقایسه نتایج این تحقیق با سایر محققین نیز مطابقت خوبی را نشان داد.

منابع

جوادی، ع.، مصطفی‌زاده فرد، ب.، شایان نژاد، م. و صدقی، م.ر. ۱۳۹۶. ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۱، ۳: ۴۶۹-۴۸۲.

حسینی، س.ج. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی مشخصات جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه‌ی کانال‌های روباز. رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

- International Conference on Applied Mathematics, Cairo, Egypt, pp: 194-198.
- Ramamurthy, A.S., Juying, Qu. and Chao, Zh. 2006. 3D simulation of combining flows in 90° rectangular closed conduits, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. 132.2: 214-216.
- Riviere, N., Travin, Gand Perkins, R. J. 2011. Subcritical open channel flows in four branch intersections, *Journal of Water Resources Research*. 47.10: 1-10.
- Shettar, A.S. and Murthy, K. K. 1996. A numerical study of division flow in open channels, *Journal of Water Resources Research*. 34.5: 651-675.
- Shumate, E.D. 1998. Experimental description of flow at an open channel junction, Master thesis, University of Iowa, Iowa.
- Huang, J., Weber, L. and Lia, Y. 2002. Three-dimensional numerical study of flows in open-Channel junctions, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. 128.3: 268-280.
- Jamieson, P.D., Porter, D.R. and Wilson, D.R. 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEATI on wheat crops grown in New Zealand, *Journal of Field Crops Research*. 27.4: 337-350.
- Luo, H., Fytanidis, K.D., Schmidt, A.R. and Garcia, M. H. 2018. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flow sand energy losses, *Advances in Water Resources*, 117.7: 120-139.
- Mignot, E., Rivière, N., Paquier, A. and Perkins, R.J. 2012. Hydraulic Models of the Flow Distribution in a Four Branch Open Channel Junction with Supercritical Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*. 137.3: 289-299.
- Nania, L.S., Gonzalo, R. and Gomez, M. 2014. Influence of channel width on flow distribution in four-branch junctions with supercritical flow: experimental approach. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE. 140.1: 77-88.
- Pirzadeh, B. and Shamloo, H. 2007. Numerical investigation of Velocity Field in Dividing Open-Channel Flow, *Proceedings of the 12th WSEAS*

Simulation of Subcritical Flow Distribution and Water Surface Fluctuations in Four-branch Open Channel Junction with FLOW 3D

Z. Talebi¹, Kh. Azhdary^{2*}, S.H. Hosseini³

Received: Dec.31, 2020

Accepted: Mar.15, 2020

Abstract

In this study, flow characteristics in 90 degree four-branch open channel junction with two inlets and two outlets simulated using FLOW 3D. Effect of parameters such as ratio of lateral to main inlet discharge, height of weirs on ratio of main outlet discharge to inlet discharge and water surface profile in junction were investigated and were compared with experimental results. Comparison of experimental and numerical results showed good agreement, in simulation outlet discharge, so that RMSE and NRMSE in main outlet channel obtained 0.00047 m³/s and %3.357, in lateral outlet channel obtained 0.00488 m³/s and %4.834, respectively. For a constant discharge ratio, a decrease in height of outlet weirs, led to higher Froude number. Also comparison of experimental and numerical results for water surface profile showed good agreement, Too. In a constant height of weirs, when flow approaching the junction water surface profile decreased, and as crossing the junction, water surface profile showed increasing tendency, so that RMSE and NRMSE for water surface profile in main channel were obtained 0.036884 m and %15.75 and in lateral channel obtained 0.04891 m and 1.996%, respectively. An increase in inlet discharge ratio led to more water surface fluctuation in junction whereas height of weir decreased water surface fluctuations.

Keywords: 90 degree Four-branch junction, FLOW 3D software, Flow distribution, Geometric and hydraulic parameters, Water surface fluctuations

1- M.Sc. Student of Water Structures, Department of Water & Soil, Faculty of Agricultural Engineering, Shahrood University of Technology

2- Associate Professor, Department of Water & Soil, Faculty of Agricultural Engineering, Shahrood University of Technology

3- Assistant Professor, Department of Water & Soil, Faculty of Agricultural Engineering, Shahrood University of Technology

(* - Corresponding Author Email: azhdary2015@yahoo.com)