

شبیه‌سازی عددی اثر زاویه‌ی برخورد و نسبت بده بر ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در تقاطع

نهرهای روباز

سعید گوهری^{۱*}

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۵

چکیده

برخورد دو جریان با یکدیگر می‌تواند باعث ایجاد جریان پیچیده ترکیبی شده که با شتاب به سمت پایین دست حرکت می‌کند. با برخورد دو جریان، ناحیه‌ی جدایی جریان در محل تقاطع در نهر اصلی به وجود می‌آید. ناحیه‌ی جدایی به دلیل کاهش سرعت طولی جریان و افزایش توان رسوب گذاری از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق با بهره‌گیری از نرم-افزار فلوئنت با شبیه‌آشفته‌گی RSM و روش VOF، جریان متقاطع در نهرهای مستطیلی شبیه‌سازی شده و تأثیر زاویه‌ی اتصال نهر فرعی به نهر اصلی در زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه بر ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر نسبت بده‌ی جریان بر ابعاد ناحیه‌ی جدایی مطالعه شده است. مقایسه‌ی مقادیر سرعت عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شبیه‌بطور متوسط با دقت ۴ درصد مقادیر آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کرده است. با کاهش زاویه‌ی تقاطع، ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان کاهش یافته، و با افزایش ناحیه‌ی تقاطع نیز ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان افزایش می‌یابد. بیشترین ابعاد ناحیه‌ی جدایی حدود ۵۰ درصد عرض نهر اصلی بوده که در زاویه‌ی تقاطع ۹۰ درجه رخ می‌دهد، و کمترین ابعاد ناحیه‌ی جدایی نزدیک به صفر بوده و در زاویه‌ی تقاطع ۳۰ درجه رخ می‌دهد. تغییرات نسبت بده‌ی تأثیر زیادی بر شکل‌گیری و ابعاد ناحیه‌ی جدایی دارند و با کاهش نسبت بده، ناحیه‌ی جدایی جریان نیز به تدریج ناپدید می‌شود. با کاهش همزمان زاویه‌ی برخورد دو جریان و نسبت بده، ابعاد ناحیه‌ی جدایی کاهش یافته، و می‌توان مشکلات ناشی از برخورد دو جریان را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: ناحیه‌ی جدایی جریان، زاویه‌ی تقاطع، نسبت بده، شبیه‌حجم سیال، شبیه‌فلوئنت

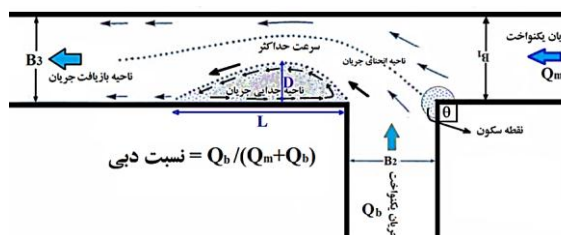
^۱ - استادیار گروه مهندسی آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*- نویسنده مسوول مقاله: s.gohari@basu.ac.ir

مقدمه

نسبت دبی و عدد فرود ذره مقدار عمق نسبی فرسایش موضعی افزایش می‌یابد. بغلانی، (۱۳۹۰) با استفاده از شبیه ریاضی و مطالعه‌ی آزمایشگاهی تغییرات جریان را در محل تقاطع نهرها در بستر آبرفتی مورد مطالعه قرار داد. بست (۱۹۸۴) نشان دادند که طول و عرض ناحیه‌ی جدایی جریان، با افزایش زاویه‌ی تقاطع نهرها افزایش می‌یابد. همچنین، سرعت جریان در نزدیک بستر محل تقاطع می‌تواند با افزایش زاویه‌ی تقاطع افزایش پیدا کند. هسو و همکاران (۱۹۹۸) معادله‌ای را برای به دست آوردن نسبت عمق جریان با حل همزمان معادلات کارمایه و اندازه‌ی حرکت ارائه کرده‌اند. ایشان، همچنین، نهرهای متقاطع را با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ مورد بررسی قرار دادند. هوانگ و همکاران (۲۰۰۲) از یک شبیه عددی سه بعدی برای بررسی جریان در تقاطع نهرها با زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ و ۹۰ استفاده کردند. نتایج آنها نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی تقاطع، ارتفاع آب بالادست تقاطع، ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان، پایین افتادگی سطح آب در ناحیه‌ی جدایی جریان، و تلفات کارمایه در تقاطع نهر افزایش می‌یابد. زیکانگ و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیق خود آزمایشگاهی را در یک نهر پایه دار ترکیبی با زاویه تقاطع ۳۰ درجه آن جام دادند. نتایج نشان دادند که یک ناحیه برگشتی جریان با سرعت بالا در پایین دست تقاطع و نزدیک آن اتفاق، و در مقابل آن یک ناحیه با سرعت بالا مشاهده می‌شود. لی و زنگ (۲۰۰۸) در مطالعه‌ی شبیه RANS^۱ را که شامل معادله‌ی ناویر-استوکس متوسط گیری شده رینولدز است برای بررسی پدیده جریان متقاطع نهرهایی با و بدون پوشش گیاهی به کار گرفتند. نتایج آنها نشان دادند که با افزایش پهنای نهر فرعی، یا کاهش پوشش گیاهی، جریان در نهر فرعی افزایش یافته و در کل نیز ضریب تلفات کارمایه در سیستم با مقدار جریان نهر فرعی کاهش می‌یابد. رامامورتی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعه‌ی را در مورد ویژگیهای جریان در تقاطع نهرهای روباز مستطیلی با زاویه‌ی تقاطع ۹۰ درجه و با پهنای مساوی آن جام داده و با استفاده از یک شبیه آشفته‌گی سه بعدی رفتار جریان در تقاطع نهرها بررسی و نتایج با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واسنجی

برخورد دو جریان با یکدیگر در بسیاری از مجاری طبیعی و مصنوعی مشاهده می‌شود. از جمله برخوردهای جریان می‌توان شبکه‌های آبیاری و زهکشی، شبکه‌های رودهای، تجهیزات تصفیه‌ی آب و فاضلاب را نام برد. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک نهر متقاطع با ویژگیهای آن نشان داده شده است.



شکل ۱- مشخصات جریان در نهر متقاطع (بست، ۱۹۸۴)

هیدرولیک جریان در محل تقاطع سه بعدی و پیچیده بوده و رفتار جریان تحت تأثیر فراسنجهای زیادی قرار می‌گیرد. متغیرهایی چون نسبت بده (نسبت بده در شاخه فرعی به کل بده جریان بعد از اختلاط)، زاویه تقاطع، هندسه‌ی نهر، شیب طولی، مقاومت بستر و جدار نهر و عدد فرود می‌توانند الگوی جریان را تحت تأثیر قرار دهند. انتقال رسوب و تغییر پذیری بستر در تقاطع نهرها بر پیچیدگی رفتار و الگوی جریان در این مقاطع می‌افزاید، بطوری که بیشتر مواقع در رودخانه‌ها محل تقاطع با تغییرات شدید بستر و مقطع همراه است. شناختن پویایی جریان، انتقال رسوب و ریخت شناسی بستر می‌تواند در مهار کردن فرسایش بستر و دیواره‌ها، پیش‌بینی تراز سطح آب، و مدیریت رود موثر باشد. در محل تلاقی نهرها تغییر در مقدار و جهت سرعت جریان باعث ایجاد پدیده‌هایی چون فرسایش بستر، فرسایش سواحل و رسوب‌گذاری در پایین دست محل تلاقی می‌شود، که این امر می‌تواند باعث ایجاد خسارت به ابنیه مجاور و تغییر در ریخت‌شناسی رود گردد. عمده‌ی مطالعات آن جام شده در مورد جریانهای متقاطع در یک زاویه‌ی تقاطع ثابت بوده است.

قبادیان و همکاران (۱۳۸۷)، به منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی تلاقی بر الگوی فرسایش و رسوب، سه زاویه‌ی تلاقی ۷۵، ۶۰ و ۹۰ درجه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان دادند که با افزایش زاویه‌ی تلاقی، بدون توجه به

¹ Reynolds Average Navier-Stokes Equations

شبیه‌فلوئنت و معادلات حاکم

فلوئنت یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه پویایی سیالات محاسباتی است. معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم‌ناپذیر گرانی در حالت آشفته، به وسیله‌ی معادلات ناور-استوکس متوسط‌گیری شده بیان می‌شوند. معادلات پیوستگی (بقای جرم) و اندازه‌ی حرکت (بقای اندازه‌ی حرکت) به صورت زیر می‌باشند (راهنمای فلوئنت، ۲۰۰۶):

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله اندازه‌ی حرکت:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (2)$$

که در معادلات فوق:

u_i مؤلفه‌ی سرعت در جهت X_i ، فشار کل، ρ چگالی سیال، g_i شتاب گرانش در جهت X_i و τ_{ij} تانسور تنش بوده، که در حالت جریان آشفته به صورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = \left[\rho(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho(k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

در جریانهای آشفته، تنش برشی شامل دو جمله بوده و علاوه بر تنش برشی ناشی از مؤلفه‌ی متوسط جریان، تنش برشی دیگری ناشی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت ایجاد می‌شود، که به تنشهای رینولدز معروف بوده و به صورت معادله‌ی (۴) نشان داده می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

در معادلات فوق v_t گرانیروی گردابه‌ای یا گرانیروی آشفته‌گی است، که بر خلاف گرانیروت مولکولی از نوع خاصیت سیال نیست، بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفته‌گی آن بوده، و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. کارمایه جنبشی آشفته‌گی بر واحد جرم (k) و δ_{ij} به صورت زیر بیان می‌شود:

کردند. داده‌های آزمایشگاهی صحت نتایج شبیه‌آشفته‌گی سه‌بعدی را تأیید نمودند. گودرزی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی الگوی سه‌بعدی جریان در نهرهای متقاطع مستطیلی با زاویه‌ی تقاطع ۹۰ پرداخته و از روابط ناور-استوکس مبتنی بر شبیه‌آشفته‌گی تنش رینولدز، که به روش حجم محدود حل می‌شوند، استفاده کردند. برای اعتبارسنجی نتایج خود نیز یافته‌های آزمایش شومیت (۱۹۹۸) را به کار بردند. مقایسه بین نتایج شبیه و یافته‌های آزمایشگاهی همبستگی نزدیکی را بین الگوی جریان در هر دو نمونه نشان داد، و همچنین بیان کردند که نسبت دبی و ابعاد ناحیه‌ی جدایی یک رابطه‌ی معکوس باهم دارند. بوناک دری و همکاران (۲۰۱۱) با مطالعه‌ی جریان متقاطع با یک شبیه‌مبتنی بر تنش رینولدز و اثرات نسبت بده، یک جریان فرعی سه‌بعدی را به سمت جریان نهر اصلی شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که الگوی جریان در این نقاط تقاطع تأثیر زیادی بر نتایج اندازه‌گیریها (فرسایش، انتقال رسوب و پخش آلودگی) دارد. از آن جا که عمده کارهای آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته در نهرهای متقاطع در زاویه‌ی ۹۰ درجه بوده، و کمتر خصوصیات سایر زوایا مورد بررسی قرار گرفته است، در این تحقیق با جزئیات اثر زاویه‌ی تقاطع و نسبت بده، که دو عامل مهم در رفتار جریان متقاطعند در مورد ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان مطالعه خواهد.

مواد و روشها

در این تحقیق، به منظور اعتبارسنجی و مقایسه‌ی دقت شبیه در شبیه‌سازی جریان متقاطع از داده‌های آزمایشگاهی وبر و همکاران (۲۰۰۱) و هسو و همکاران (۱۹۹۸) استفاده شده است. آزمایشهای وبر و همکاران در یک نهر پایه دار مستطیلی با زاویه‌ی تقاطع ۹۰ درجه آن جام شده است. همچنین، آزمایشهای هسو و همکاران در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در نهر با مقطع مستطیل بوده است. به منظور، مقایسه‌ی بهتر نتایج ابعاد نهر با تقسیم بر عرض نهر (W) به صورت بودن بعد ارائه شده است.

محدود^۲ برای حل معادلات استفاده می‌شود، که از معادلات دیفرانسیلی که به شکل عددی منفصل شده‌اند بر روی حجم شاهد انتگرال‌گیری می‌شود. برای انفصال معادلات از روش آپونید مرتبه‌ی دوم^۳ بوده، و همچنین برای ارتباط بین جمله‌های فشار و سرعت از الگوریتم PISO^۴ استفاده شده است، که این روشها همگرایی بهتری در حل معادلات داشته‌اند. از الگوریتم سیمپل^۵ برای ارتباط سرعت و فشار، از روش پیشرفته‌ی مرتبه‌ی اول^۶ به عنوان روش گسسته سازی معادلات اندازه‌ی حرکت، افت کارمایه جنبشی آشفتگی و تنشهای رینولدز و همچنین از روش معیار به منظور گسسته سازی معادله‌ی فشار، استفاده شده است. همچنین، به منظور شبیه‌سازی تغییرات سطح آب از روش حجم سیال^۷ استفاده گردیده و میدان جریان به صورت دو حالتی در نظر گرفته می‌شود. برای تولید هندسه‌ی مناسب، گره‌بندی هندسه‌ی تولید شده با رعایت معیارها و تعریف شرایط مرزی از پیش پردازنده گمبیت^۸ استفاده شده است. در شبیه آشفتگی تنش رینولدز، به علت استفاده از تابع دیواره برای برقراری ارتباط بین ناحیه‌ی زیر لایه گرانبور و ناحیه‌ی آشفته باید از شبکه‌بندی مناسبی استفاده شود. بدین منظور، فاصله‌ی اولین گره از دیواره ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و به تدریج با دور شدن از دیواره فاصله‌ی گره‌ها افزایش می‌یابد. بعد از تحلیل حساسیت شبیه نسبت به تعداد گره‌ها، شبکه‌ای با ۱۴۵۱۱۱ گره برای کلیه زوایای تقاطع تولید گردید.

شرایط مرزی

در شکل ۲ هندسه‌ی کامل میدان شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. با توجه به این که از روش حجم سیال جهت شبیه‌سازی جریان دو حالتی استفاده می‌شود، حالت آب به صورت یک ستون آب ساکن با عمق ثابت و در ورودیهای شبیه اعمال شد. بقیه‌ی حجم داخلی میدان (۱۰ سانتی‌متر بالای تراز اولیه سطح آب) از هوا در نظر گرفته

$$k = \frac{1}{\rho} (\bar{u}_i'^2 + \bar{u}_j'^2 + \bar{u}_k'^2) \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

به منظور حل میدان جریان آشفته بر اساس معادلات پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنشهای رینولدز در معادلات به روش خاصی شبیه شوند. در این صورت در حالت جریان سه بعدی با وجود چهار معادله شامل معادله پیوستگی و معادله اندازه‌ی حرکت در سه بعد و چهار مجهول میدان جریان شامل فشار و سرعت در سه بعد معین می‌شوند. جهت بیان تنشهای رینولدز و یا به عبارت بهتر، بستن سامانه معادلات فوق از شبیه‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در شبیه‌های مزبور، جمله گرانبور گردابه‌ای با استفاده از انگاره‌های مختلف (نظیر انگاره اختلاط) بیان شده و ارتباط بین تنشهای رینولدز و مؤلفه‌های متوسط سرعت برقرار می‌شود. در این مورد چنانچه معادله‌ی انتقالی برای جمله‌ی $\overline{u_i' u_j'}$ حل گردد، مستقیماً تنشهای رینولدز به دست می‌آیند. برای تعیین معادله‌ی انتقال برای هر دو مؤلفه \bar{u} و \bar{v} معادله‌ی اندازه‌ی حرکت از معادله ناور-استوکس کم شده، سپس معادله‌ی حاصل برای مؤلفه \bar{u} در سرعت نوسانی u_i' معادله‌ی حاصل برای مؤلفه \bar{v} در سرعت نوسانی u_j' ضرب می‌شوند. با جمع معادلات حاصل و متوسط‌گیری زمانی از آن معادله انتقال مطلوب برای $\overline{u_i' u_j'}$ حاصل می‌گردد که شکل تانسوری این معادله انتقال به صورت زیر است.

$$U_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (7)$$

در معادله فوق P_{ij} تانسور تولید و Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش و D_{ij} تانسور پخشیدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف می‌باشند. این شبیه به دلیل پیچیدگی معادلات، بسیار پرهزینه است، ولی دقت بسیار بالایی را در حل مسائل پیچیده‌ی سیالی از خود نشان می‌دهد. در شبیه هیدروپویایی فلوننت چند شبیه آشفتگی وجود دارد که در این تحقیق از شبیه آشفتگی تنش رینولدز^۱ استفاده شده است. این شبیه آشفتگی دقت بالایی را در شبیه‌سازی جریانهای ثانویه و توزیع تنش برشی در بستر دارد. در شبیه فلوننت از روش حجم

² Finite Volume

³ Second Order Upwind

⁴ Pressure-implicit with splitting of operators

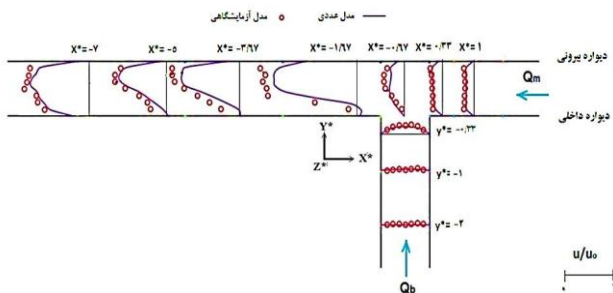
⁵ SIMPLE

⁶ First Order Upwind

⁷ VOF

⁸ Gambit

¹ Reynolds Stress Models

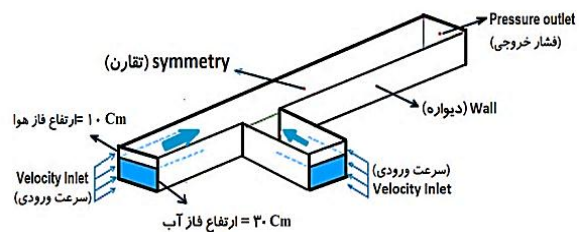


شکل ۳- مقایسه مقادیر سرعت طولی در شبیه با نتایج آزمایشگاهی (وبر و همکاران، ۲۰۰۱) در نزدیک سطح جریان

با نزدیک شدن به انتهای نهر، و با از بین رفتن اثر تقاطع و محو شدن گردابه‌های تشکیل شده، جریان یک-بعدی در نهر برقرار شده و انطباق بین مقادیر سرعت عددی و آزمایشگاهی بهتر می‌گردد. برای نواحی داخل نهر فرعی هم انطباق کاملی بین مقادیر پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. بطور متوسط، مقادیر آزمایشگاهی و شبیه عددی ۴ درصد اختلاف دارند.

همچنین، نتایج پیش‌بینی نیم‌رخ سطح آب در تقاطع ۹۰ درجه، به وسیله‌ی شبیه عددی و آزمایشگاهی در امتداد نهر اصلی و در دو مقطع $Y^* = 0.917$ و $Y^* = 0.083$ در شکل ۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از شبیه و مقادیر آزمایشگاهی همبستگی خوبی نشان می‌دهند، و شبیه عددی به خوبی روند تغییرات تراز سطح آب را در نهر پیش‌بینی می‌نماید. در هر دو شبیه عددی و آزمایشگاهی، سطح آب با ورود به دهانه‌ی تقاطع (مقطع $Y^* = 0.083$)، به پایین می‌افتد. بعد از آن سطح آب به تدریج افزایش یافته و به تراز قبلی خود بر می‌گردد. عمق آب بعد از مقطع $X^* = 6$ به یک تراز ثابت می‌رسد.

شد. در ورودی میدان، برای حالت آب شرط مرزی سرعت ورودی با شرایط شبیه آزمایشگاهی و برای حالت هوا نیز شرط مرزی مشابه سرعت بسیار کم (0.0001 متر بر ثانیه) لحاظ شده است. برای مرز خروجی میدان، از شرط مرزی فشار خروجی^۱، برای جداره‌های نهر از شرط مرزی دیواره‌ی صلب^۲ و بدون شیب، و نهایتاً شرایط مرزی سطح جریان در نهر نیز متقارن^۳ در نظر گرفته شد. در کلیه حالت‌های شبیه‌سازی شده در این پژوهش، تحلیل جریان در حالت غیر ماندگار با گام زمانی 0.1 ثانیه جهت حل میدان استفاده شد، و معیار همگرایی برابر با 10^{-6} تعریف شده است.



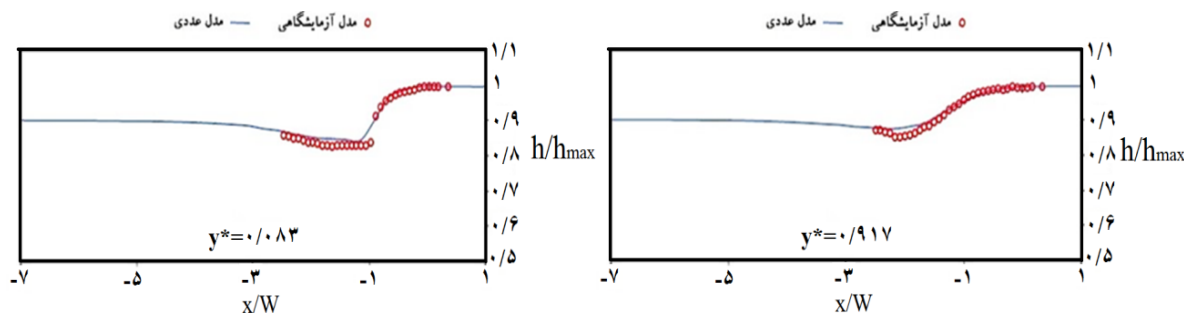
شکل ۲- طرح میدان جریان و شرایط مرزی

در شکل ۳ نحوه‌ی تغییرات طولی سرعت (u^*) در صفحه افقی نزدیک سطح آب ($Z^* = 0.95$) در امتداد نهر-های اصلی و فرعی نشان داده شده و با نتایج آزمایشگاهی وبر و همکاران (۲۰۰۱) مقایسه گردیده است. مقایسه‌ی سرعت‌ها نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده شبیه عددی با نتایج آزمایشگاهی در داخل نهر اصلی و فرعی وجود دارد، هر چند در نواحی دارای آشفتگی بالای جریان، مقادیر شبیه عددی و آزمایشگاهی اختلاف کمی وجود دارد. در بالادست نهر اصلی، به دلیل یکنواخت بودن و عدم اغتشاش در جریان، بین نتایج شبیه عددی و آزمایشگاهی انطباق خوبی برقرار بوده است. از مقطع $X^* = 0$ به بعد، به دلیل ورود جریان فرعی با اندازه‌ی حرکت بالا به نهر اصلی و ایجاد آشفتگی در جریان و تشکیل جریان ثانویه در پایین‌دست محل تقاطع، انطباق بین سرعت طولی در شبیه عددی و آزمایشگاهی کمتر شده است.

¹ Pressure Outlet

² Wall Boundary Condition

³ Symmetry

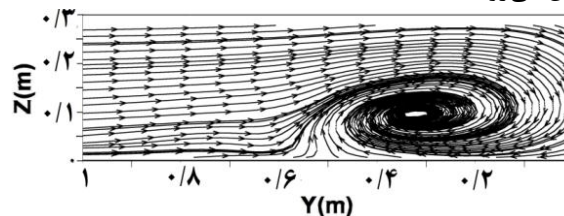


شکل ۴- مقایسه تغییرات سطح آب در شبیه با نتایج آزمایشگاهی (و بر و همکاران، ۲۰۰۱) در خط مرکزی نهر اصلی ($\theta=90^\circ$ و $Q^*=0.75$)

نتایج و بحث

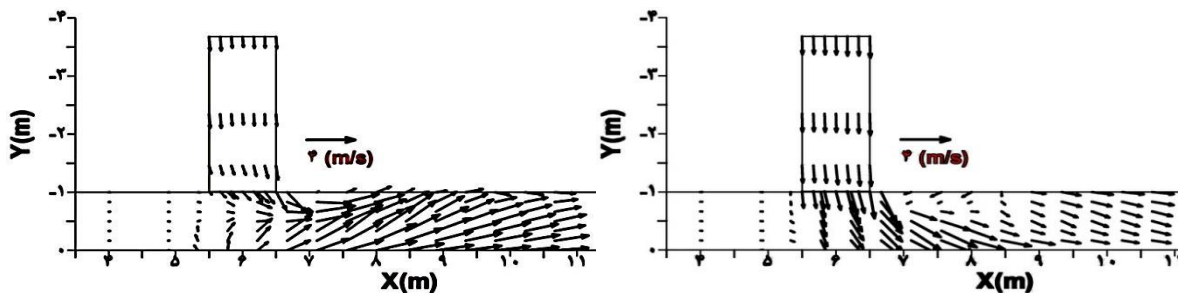
می‌شود، که می‌تواند بستر مناسبی برای تشکیل پشته‌های رسوبی در این مکان گردد. تغییرات طول ناحیه‌ی جدایی جریان با نسبت بده برای زوایای مختلف از تقاطع در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مقایسه‌ی نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول ناحیه‌ی جدایی جریان به خوبی به وسیله‌ی شبیه‌سازی شده است. با افزایش مقدار نسبت بده‌ی ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان نیز افزایش یافته است. با برخورد دو جریان با یکدیگر در محل تقاطع، جریان ترکیبی شتاب پیدا کرده و با سرعت بیشتری به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. هر اندازه زاویه‌ی تقاطع بیشتر باشد، شعاع چرخش جریان نهر فرعی در داخل نهر اصلی پس از برخورد با جریان کاهش می‌یابد. از سویی، هر قدر شعاع چرخش جریان کم باشد، شتاب گریز از مرکز جریان افزایش یافته و سرعت جریان افزایش می‌یابد. از سویی، جریان نهر فرعی با برخورد به دیواره‌ی مقابل به طرف لایه‌های پایینی حرکت می‌کند و می‌تواند سرعت پایین جریان را در لایه‌های نزدیک بستر تقویت کرده، و باعث افزایش مقدار کل سرعت طولی جریان شود. افزایش مقدار نسبت جریان می‌تواند به صورت مانعی در مقابل حرکت جریان بالادست نهر اصلی به سمت پایین‌دست بوده، و با ناحیه‌ی کم سرعت در بالادست تقاطع را ایجاد نماید. ایجاد این ناحیه‌ی کم سرعت در بالادست محل تقاطع می‌تواند باعث تجمع ته نشینها، و کاهش عرض مفید عبور جریان در بالادست گردد. مقایسه‌ی نتایج برای زوایای مختلف نشان می‌دهد که در شبیه‌سازی عددی، با کاهش زاویه‌ی تلاقی دو جریان، رفتار تابع (طول ناحیه‌ی جدایی جریان) تغییر کرده و با افزایش نسبت بده طول ناحیه‌ی جدایی نیز به شدت تغییر می‌کند.

بعد از ترکیب دو جریان از نهر فرعی و نهر اصلی جریان چرخشی به وجود می‌آید که با چرخش ساعت گرد (شکل ۵) به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. این جریان چرخشی با حرکت روبه پایین جریان‌ی شاخه فرعی، و حرکت رو به بالای جریان در نهر اصلی، ایجاد می‌شود که با ترکیب این دو جریان ترکیبی با شتاب به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. گردابه حاصل از برخورد دو جریان به تدریج با حرکت به سمت پایین‌دست مستهلک شده و از بین می‌رود.



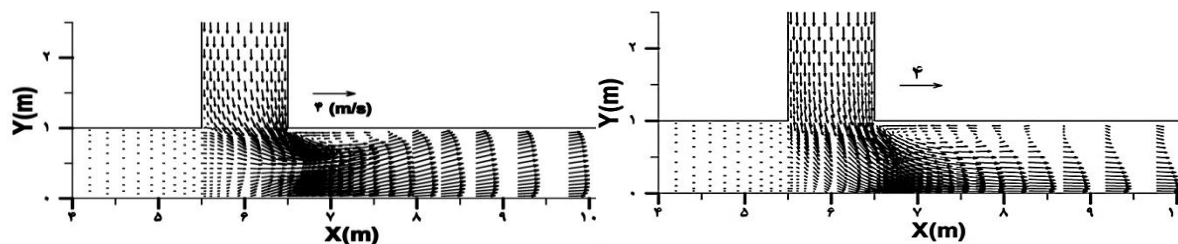
شکل ۵- جریان چرخش در محل تقاطع نهرها

همچنین در شکل‌های ۶ و ۷ نحوه‌ی تغییرات خطوط جریان برای دو جریان سطحی و عمقی در زاویه‌ی تقاطع 90° درجه آورده شده است. ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در نواحی نزدیک بستر به دلیل الگوی جریان کاهش یافته و در سطح آب ابعاد آن افزایش پیدا می‌کند. در زاویه‌ی 90° درجه، به دلیل چرخش زیاد جریان نهر فرعی در نهر اصلی، ابعاد ناحیه‌ی جدایی نیز گسترده می‌شود. با کاهش زاویه‌ی برخورد دو جریان، بردارهای سرعت هم راستا شده و ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان نیز کاهش می‌یابد. در ناحیه‌ی جدایی جریان، به دلیل کاهش سرعت جریان و مؤلفه‌ی منفی سرعت طولی، جریان گردابی ایجاد

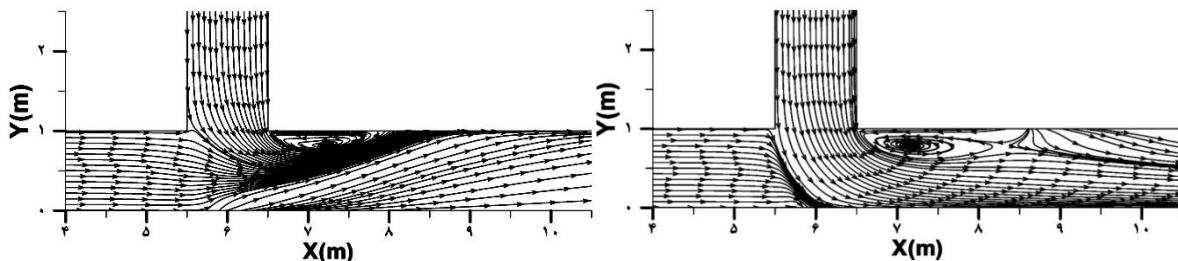


الف) نزدیک سطح ($Z^*=0.95$) ب) نزدیک کف ($Z^*=0.05$)

شکل ۶- بردارهای سرعت در نتایج آزمایشگاهی (Weber et al., 2001) نهر متقاطع

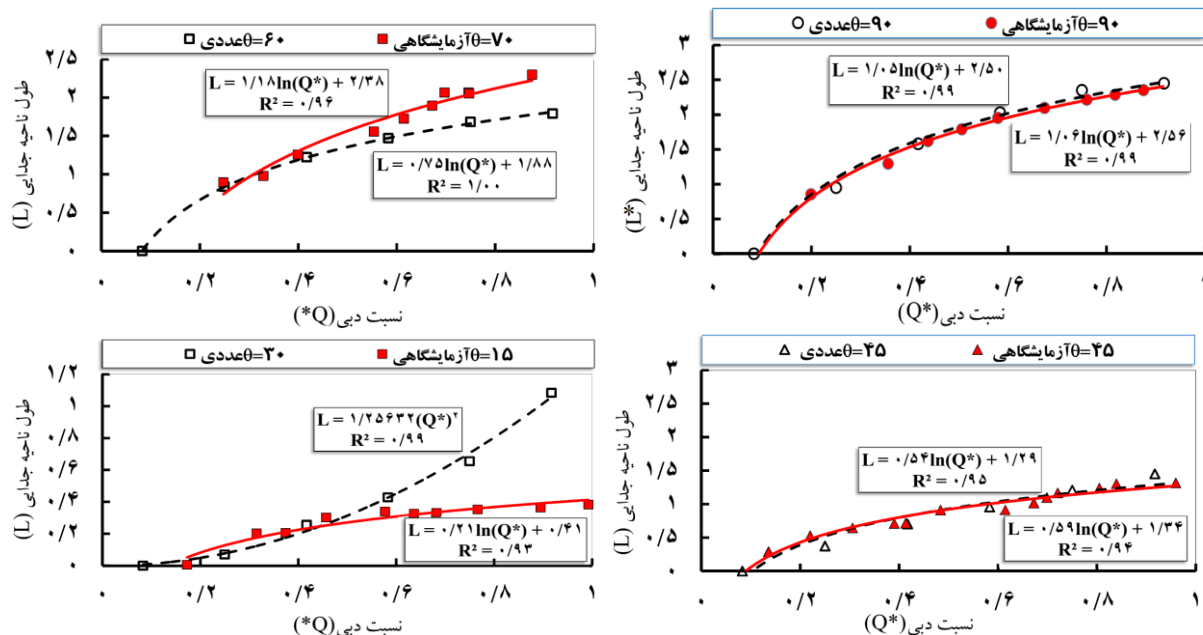


الف) نزدیک سطح ($Z^*=0.95$) ب) نزدیک کف ($Z^*=0.05$)



ج) نزدیک سطح ($Z^*=0.95$) د) نزدیک کف ($Z^*=0.05$)

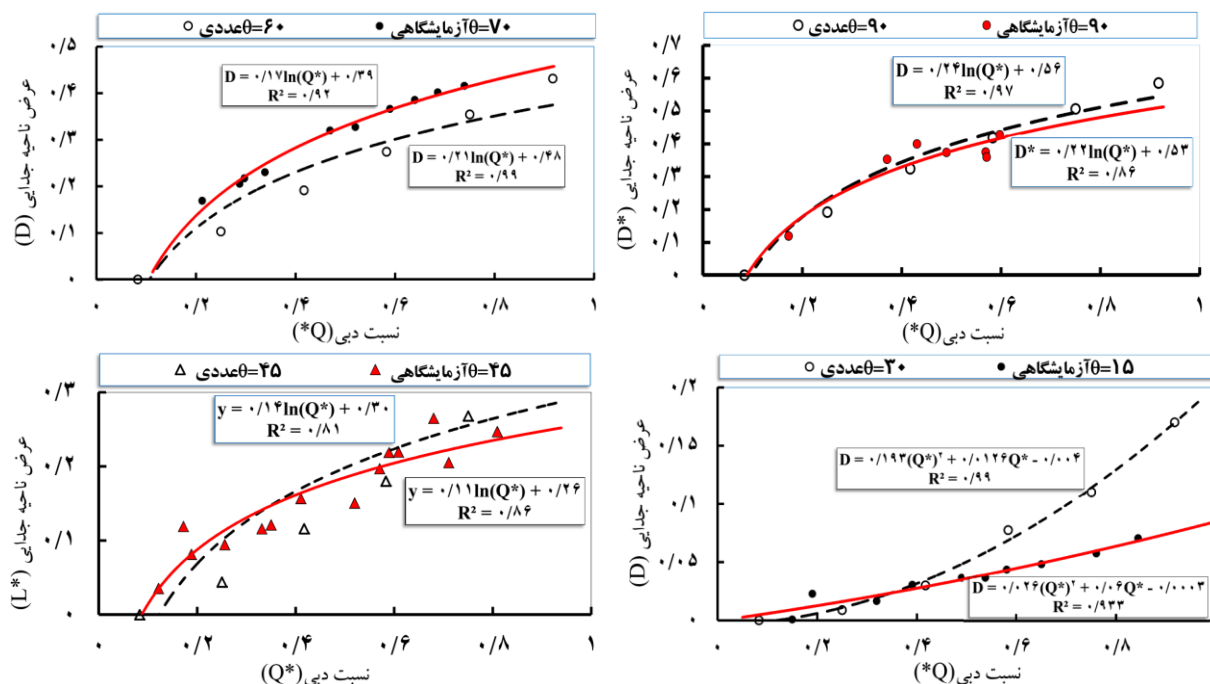
شکل ۷- بردارهای سرعت و خطوط جریان در نتایج عددی در نهر متقاطع (تحقق حاضر)



شکل ۸- تغییرات طول ناحیه‌ی جدایی جریان تحت تأثیر نسبت بده در سطح آب

۹۰ درجه تلاقی جریان، و همچنین نسبت بده نزدیک به یک مقدار عرض ناحیه‌ی جدایی به حدود ۵۰٪ عرض نهر می‌رسد، که می‌تواند در انتقال جریان به پایین دست اختلال ایجاد نماید. همچنین، در مجاری آبرفتی با ایجاد پشته‌های رسوبی، کاهش عرض مفید جریان عبوری می‌تواند باعث ایجاد تغییرات در شکل رود گردد.

همچنین، تغییرات عرض ناحیه‌ی جدایی برای نسبت‌های مختلف بده در زوایای مختلف از تقاطع در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. مقایسه‌ی نمودارها نشان می‌دهد که تغییرات عرض ناحیه‌ی جدایی جریان نیز روندی مشابه طول ناحیه‌ی جدایی داشته، و همچنین بیشترین عرض ناحیه‌ی جدایی جریان، که بیشترین تنگ شدگی مقطع را به همراه دارد، در زاویه‌ی تقاطع ۹۰ درجه روی می‌دهد. در زاویه‌ی



شکل ۹- تغییرات عرض ناحیه‌ی جدایی جریان تحت تأثیر نسبت بده در سطح آب

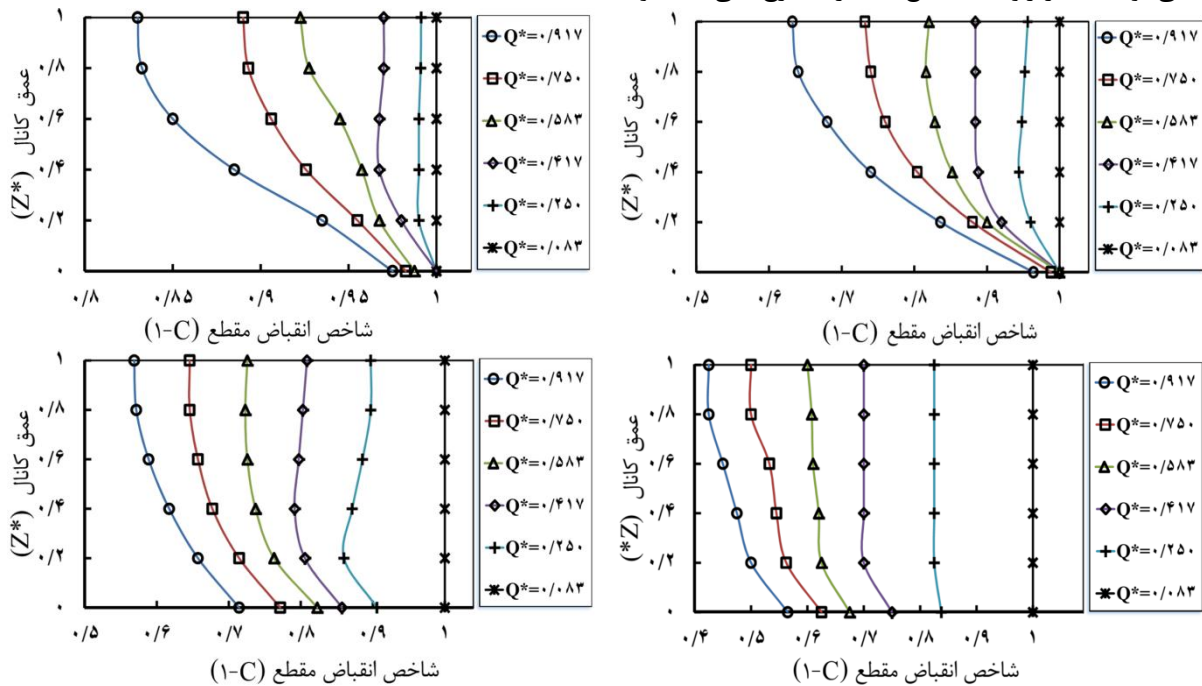
نتیجه‌گیری

نتایج بررسیها نشان می‌دهند که شبیه به خوبی می‌تواند تغییرات خط جدایی جریان را در محل تقاطع نهرها را شبیه‌سازی نماید. ناحیه‌ی جدایی جریان می‌تواند بخشی با توان بالا در انباشتن رسوبات در بسترهای آبرفتی باشد. با کاهش زاویه‌ی تقاطع جریان ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان نیز کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش نسبت بده ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان نیز افزایش پیدا کرده و می‌تواند بخش عمده‌ای از عرض نهر را تحت تأثیر قرار دهد. افزایش ابعاد ناحیه‌ی جدایی در محل برخورد دو جریان در بسترهای آبرفتی می‌تواند باعث اختلال در عبور جریان به پایین دست گردد. در محل تقاطع جریان با برخورد دو جریان مقدار تنش برشی بستر افزایش می‌یابد، که می‌تواند

همچنین، تغییرات شاخص انقباض ($C=D/B_0$) مقطع، که نشان دهنده‌ی بخشی از جریان می‌باشد که به وسیله‌ی ناحیه‌ی جدایی جریان اشغال شده است، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل تغییرات ناحیه‌ی جدایی جریان در عمق نشان داده شده است. با توجه به این شکل ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در نزدیک بستر ($Z^*=0/0.1$)، نهر دارای کمترین ابعاد و در سطح آب ($Z^*=0/0.1$) دارای بیشترین ابعاد است. همچنین، در نسبت بده‌ی بالا ($Q^*=0/917$) تغییرات خط جدایی جریان تابعی از عمق نبوده، و ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در سطح و کف صفر است.

کمترین ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان نزدیک به صفر بوده و در زاویه‌ی تقاطع ۳۰ درجه رخ می‌دهد. همچنین، ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان در سطح آب نسبت به کف نهر توسعه‌ی بیشتری دارد.

باعث ایجاد فرسایش بستر در تقاطع جریان گردد. نتایج نشان می‌دهند که شبیه بطور متوسط با دقت ۴ درصد مقادیر آزمایشگاهی را شبیه سازی کرده است. بیشترین ابعاد ناحیه‌ی جدایی جریان حدود ۵۰ درصد عرض نهر اصلی بوده که در زاویه‌ی تقاطع ۹۰ درجه رخ می‌دهد، و



شکل ۱۰- تغییرات شاخص انقباض تحت تأثیر نسبت بده جریان در عمق نهر

2183. World Environ and Water Resour. Congress, ASCE, California, United States.
5. FLUENT 6.3 User's Guide. 2006. Fluent Incorporated, Lebanon, N.H.
6. Goudarzizadeh, R., S. H., Mousavi Jahromi, and N. Hedayat., 2010. Simulation of 3D flow using numerical model at open-channel confluences, World Acad Sci, Engin. Technol. 47: 650-655.
7. Hsu, C.C., F.S., Wu, and W.J. Lee, 1998. Flow at 90° equal-width open channel junction, J. Hydr. Eng. ASCE 124:186-191.
8. Huang, J., Y. G., Lai, and J. L. Weber, 2002. Three-dimensional numerical study of flows in open channel Junctions, J. Hydraul. Eng, ASCE, 128: 268-280.
9. Li, C.W., and C., Zeng, 2008. 3D

منابع

۱. قبادیان، ر. م. شفافی بجستان و آ، آذری. ۱۳۸۷.
- بررسی تاثیر زاویه اتصال بر الگوی فرسایش و رسوب گذاری در محل تلاقی رود با استفاده از شبیه فیزیکی. مجله پژوهش کشاورزی (آب خاک و گیاه در کشاورزی)، (۵): ۸-۱۰۷-۱۲۲.
۲. بغلانی، ع. ۱۳۹۰. شبیه سازی فرسایش و انتقال رسوب در محل تلاقی آبراهه ها با استفاده از روش حجم‌های محدود. فصلنامه مهندسی منابع آب ایران. ۴(۱۰): ۱-۱۲.
3. Best, J.L., and I. Reid. 1984. Separation zone at open-channel Junctions. J Hydraul. Eng, ASCE 110: 1588-1594.
4. Bonakdari, H., K.G., Lipeme. and X. Wang, 2011. Experimental validation of CFD modeling of multiphase flow through open channel confluence, 2176-

- 90° open-channel junction. *J. Hydr. Eng.* 127: 340-350.
12. Xiekang, W., W., Xianye, L.U., Weizhen, and LI.U. Tonghuan, 2007. Experimental study on flow behavior at open channel confluences, *front. Archit. Civ. Eng. China* 12: 211–216.
10. Ramamurthy, A. S., Q., Junying, and V., Diep, 2009. Closure to numerical and experimental study of dividing open-channel flows, *J. Hydraul. Eng. ASCE* 135:12. 1112-1113
11. Weber, L.J., E.D., Shumate, and N. Mawer, 2001. Experiments on flow at a Numerical modelling of flow divisions at open channel junctions with or without vegetation. *Adv. Water Resour.* 32:49–60.