مجله علمی- پژوهشی
دوره 10، شماره 1، بهار 1394

«یادداشت تحقیقاتی»

ارزیابی کاربرد مدل عددی FLOW-3D در پیش‌بینی تغییرات ریخت‌شناسی در محل تلاقی رودخانه‌ها

مرضیه سروری[1]، ابراهیم امیری تکلدانی[2*]، محمد رستمی[3]

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی و فن آوری کشاورزی، دانشگاه تهران
2- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی کشاورزی و فناوری دانشگاه تهران
3- استادیار گروه مهندسی رودخانه و سواحل، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی، تهران

[*] amiri@ut.ac.ir

چکیده- به دلیل پیچیدگی‌های هیدرولیکی محل تلاقی شاخه‌های فرعی با رودخانه اصلی و تغییرات ریخت شناسی حاصله در آن، مطالعه ویژگی‌های این محل از جنبه‌های مختلف از جمله رسوب‌گذاری، فرسایش، و ملاحظات زیست محیطی مورد علاقه محققان مربوط می‌باشد. با اینکه مطالعات آزمایشگاهی متعددی در خصوص فرسایش و رسوب در محل تلاقی رودخانه‌ها صورت گرفته است، اما به دلیل وجود محدودیت‌های آزمایشگاهی و نیز عدم کاربرد مدل‌های عددی سه بعدی در سطح گسترده، امکان بررسی جامع این دو پدیده تاکنون میسر نشده است. به همین دلیل در این تحقیق ویژگی‌ها و کارآیی مدل عددی FLOW-3D به عنوان یک مدل سه بعدی، برای شبیه‌سازی الگوی جریان، فرسایش و رسوب‌گذاری در محل تلاقی شاخه‌های فرعی با رودخانه اصلی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی داده های حاصل از یک مدل فیزیکی به منظور کالیبراسیون و همچنین ارزیابی درستی مدل FLOW-3D مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل مذکور با متوسط خطایی حدود 6/3 درصد قادر به شبیه‌سازی حداکثر ارتفاع رسوبگذاری در محل تقاطع در کانال فرعی و با متوسط خطایی حدود 26 درصد قادر به شبیه‌سازی عمق فرسایش در ساحل راست کانال اصلی در گزینه‌های مختلف دبی جریان می‌باشد. همچنین مدل عددی با خطایی در حدود متوسط یک درصد نسبت به مدل آزمایشگاهی قادر به پیش‌بینی نیم‌رخ سطح آب در محل تلاقی در شرایط مدل‌سازی بدون تزریق رسوب می‌باشد.

کلیدواژگان: تلاقی رودخانه، الگوی جریان و رسوب، رسوبگذاری، فرسایش، مدل FLOW-3D.

1- مقدمه

در محل تلاقی دو رودخانه به یکدیگر، به‌دلیل تشکیل ناحیه‌ای با اغتشاش بالا و نیز سرعت‌های سه‌بعدی جریان در این محل، ریخت‌شناسی ویژه‌ای توسعه می‌یابد. به دلیل تغییر در مقدار و جهت سرعت، مقدار دبی جریان و همچنین دبی رسوب، پدیده هایی چون فرسایش عمیق در بستر، فرسایش سواحل و بالاخره رسوب‌گذاری در پایین‌دست محل تلاقی صورت می‌گیرد. این امر موجب تغییر ریخت‌شناسی رودخانه شده و در برخی موارد احتمال ایجاد فرسایش و یا بروز خسارت به ابنیهٔ مجاور را افزایش می‌دهد. از این رو شناخت سازوکار فرسایش و رسوب‌گذاری در این مکان ضروری است.

در طی یک قرن گذشته، انجام هم‌زمان مطالعات آزمایشگاهی، اندازه‌گیری‌های صحرایی و مدل‌های

محاسباتی دینامیکی، منجر به ارائه اطلاعات ارزشمندی درخصوص فرایندهای پیچیدهٔ هیدرولیک، مورفولوژی و رسوب در محل تلاقی رودخانه‌ها شده‌اند برای مثال: Taylor (1944)، Webber and Greated (1966)، Mosley (1976)، Fujita and Komura (1989)، Hsu et al. (1998)، De Serres et al. (1999)، Khan et al. (2000)، Weber et al. (2001)، Weiming (2001)، Shabayek et al. (2002)، Huang et al. (2002)، قبادیان و همکاران (1385)، شکیبانیا و همکاران (2010)، Riberio (2011)، بگلانی و طالب بیدختی (2013).

بر اساس سوابق مطالعاتی، اولین مطالعه درخصوص تلاقی آبراهه‌ها توسط Taylor (1944) انجام شده که در آن ایشان زوایای 45 و 135 درجه بین دو کانال اصلی و فرعی در محل تلاقی را مورد بررسی قرار داده است. ایشان با صرف‌نظر از اثرات اصطکاکی مرزها و با فرض یکسان‌بودن عمق جریان در کانال‌های بالادست محل تلاقی، یک مدل یک بعدی براساس معادله‌های بقاء جرم و مومنتوم برای محاسبهٔ نسبت بین عمق‌های جریان بالادست و پائین‌دست محل تلاقی ارائه نمود. با در نظرگرفتن فرضیات فوق، Webber and Greated (1966) نسبت به انجام آزمایش برای زوایای برخورد 30، 60، و 90 درجه اقدام نموده و نتایج آن را به‌عنوان تصحیح تجربی مدل Taylor (1944) گزارش نمودند.

به دنبال نتایج Taylo r (1944) و Webber and Greated (1966)، مدل‌های یک‌بعدی متعددی برای تخمین عمق جریان بالادست محل تلاقی، در صورت تغییر زوایای برخورد، پهناهای مختلف عرض کانال، شیب و نیز رژیم‌های جریان توسط محققان مختلف مانند Hsu et al. (1988) و Shabayek et al. (2002) ارائه شد.

با وجود این، به دلیل رفتار هیدرودینامیکی سه‌بعدی جریان در محل تلاقی، به‌طور یقین استفاده از مدل‌های یک‌بعدی با محدودیت‌هایی در عمل مواجه خواهد شد (Taylor, 1944). Best (1988) یک مدل تصویری از تغییرات مورفولوژی در محل تلاقی ارائه نمود که بر اساس مطالعهٔ آزمایشگاهی در شرایط بسترهای متحرک و در تلاقی‌های نامتقارن (تلاقی با زاویه متفاوت با 90 درجه) با کانالی به عرض 0/15متر و شیب طولی یکسان بدست آمده بود. در این مطالعه، نسبت‌های مختلف دبی از حدود 0/5 تا 1/5 و زوایای تلاقی بین °15 تا °105 منظور و دانه‌بندی مناسبی نیز در بسترکانال انتخاب شده بود. از دیگر نتایج به‌دست آمده توسط این محقق می‌توان به تعیین بیشترین عمق آبشستگی بستر به عنوان تابعی از نسبت‌های دبی و زاویهٔ اتصال اشاره کرد.

جباری صاحباری و برقعی (1387) به بررسی آزمایشگاهی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در محل اتصال کانال‌ها پرداختند. در این تحقیق، تأثیر متغیرهای مختلف از قبیل نسبت دبی کانال فرعی به اصلی، نسبت سرعت جریان به سرعت آستانهٔ حرکت و نسبت عرض کانال فرعی به اصلی بر آستانهٔ حرکت و شکل و عمق چاله‌های فرسایشی در یک اتصال °50 بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت دبی کانال فرعی به اصلی، حرکت چالهٔ فرسایشی در نسبت سرعت‌جریان به سرعت‌بحرانی کوچک‌تر از 0/5 نیز می‌تواند رخ دهد. با کاهش عرض کانال فرعی، چالهٔ فرسایشی به سمت دیواره روبرویی محل اتصال در کانال اصلی حرکت می‌کند و در نسبت‌های بزرگتر، چالهٔ فرسایشی به سمت کانال فرعی کشیده شده و عمق فرسایش به عمق جریان نزدیک می شود. همچنین در آزمایش‌هایی که شدت گرداب‌ها و در نتیجه تنش برشی در کف بیشتر است، فقط یک گودال بزرگ در محل اتصال به‌وجود می‌آید و گودال‌های دیگر در پایین‌دست کانال اصلی، به علت حجم زیاد رسوب‌گذاری با گذشت زمان پر می‌شود. Riberio (2011) به بررسی آزمایشگاهی تغییرات مورفولوژی بستر کانال اصلی در نتیجهٔ تلاقی یک آبراههٔ فرعی با زاویهٔ 90 درجه پرداخت. در این تحقیق با افزایش دبی در کانال فرعی با سه سری نسبت دبی مختلف و تزریق دبی رسوبی از دهانهٔ شاخهٔ فرعی، به بررسی تغییرات مورفولوژیکی بستر در دهانهٔ کانال اصلی وکانال فرعی پرداخت و سپس با بازشدگی دردهانهٔ ورودی شاخهٔ فرعی در سه مرحله و با همان نسبت‌های دبی، به مقایسهٔ میزان فرسایش و رسوب پرداخته و نتایج حاصل را مقایسه نموده است.

در چند سال اخیر، استفاده از مدل عددی دوبعدی با فرض بستر ثابت برای تشریح الگوی جریان در تلاقی‌ها متداول شده است. Khan et al. (2000) با استفاده از مدل

CCHE2D به عنوان یک مدل دو بعدی متوسط‌گیری‌شده در عمق، خصوصیات جریان را در زاویهٔ تلاقی 90 درجه بررسی نمودند. Khan et al. (2000) در مطالعهٔ خود، نتایج مدل عددی شامل سرعت و پروفیل سطح آب درکانال اصلی و شاخهٔ فرعی را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و تطابق خوبی را گزارش نمودند. بگلانی و طالب بیدختی (2013) نیز کاربرد یک مدل دوبعدی را در تقاطع دو بعدی با زاویهٔ 90 درجه بررسی نموده و نتیجه گرفتند که مدل‌های دوبعدی هم قادر به پیش‌بینی ویژگی‌های جریان در تقاطع از جمله نواحی جدایی و سرعت بالا می‌باشند.

همان‌طور که ملاحظه شد، بیشتر تحقیقات انجام شده در محل تلاقی‌ها، مربوط به مطالعهٔ آزمایشگاهی و عددی تعیین الگوی جریان، پروفیل سطح آب و تغییرات سرعت در کانال‌های با بستر ثابت می‌باشد و در خصوص کانال با بستر متحرک و تغییرات مورفولوژیکی ناشی از تلاقی جریان‌ها، تنها می‌توان به دو مورد آزمایشگاهی اخیر اشاره نمود. بنابراین استفاده از مدل‌های عددی در بررسی جریان در محل تلاقی‌ها با لحاظ کردن تغییرات مورفولوژیکی بستر به‌منظور کاهش هزینه‌های آزمایش و تسریع در کسب نتایج ضروری می‌نماید.

به همین منظور در تحقیق حاضر، برای ارزیابی قابلیت‌های یک مدل سه‌بعدی شبیه‌ساز جریان آب و رسوب در پیش‌بینی تغییرات مورفولوژیکی حاصل از تلاقی جریان‌های آبراهه فرعی با آبراهه اصلی، از مدل FLOW-3D استفاده و نتایج حاصل از آن با نتایج مدل آزمایشگاهی موجود (Riberio, 2011)، مقایسه شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- مشخصات مدل عددی

نرم‌افزار FLOW-3D، یک مدل مناسب با بازهٔ کاربرد وسیع برای تحلیل مسائل پیچیدهٔ سیالات از جمله جریان‌های سه‌بعدی غیرماندگار که دارای سطح آزاد و هندسه پیچیده هستند، می‌باشد. در این نرم‌افزار از روش حجم محدود در شبکه‌بندی منظم مستطیلی استفاده می‌شود. به لحاظ استفاده از روش حجم محدود در یک شبکه منظم، شکل معادلات گسسته شده مورد استفاده، نظیر معادلات گسسته شده در روش تفاضل محدود می‌باشند. بر این اساس، FLOW-3D از روش‌های دقت مرتبهٔ اول و دوم در حل معادلات بهره می‌برد. همچنین، این نرم‌افزار از پنج مدل آشفتگی نظیر مدل‌های k-ε و RNG، استفاده می کند. در نرم‌افزار FLOW-3D، از دو روش عددی برای شبیه‌سازی هندسی به‌شرح زیر استفاده شده است:

- روش حجم سیال[1] (VOF)، که برای نشان‌دادن رفتار سیال در سطح آزاد مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- روش کسر مساحت- حجم مانع[2] (FAVOR)، که برای شبیه‌سازی سطوح و احجام صلب مثل مرزهای هندسی کاربرد دارد.

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله‌های پیوستگی و اندازهٔ حرکت می‌باشند. معادلهٔ پیوستگی جریان از قانون بقای جرم و با نوشتن معادلهٔ تعادل جرم برای یک المان سیال بدست می‌آید. بصورت کلی این معادله به شکل رابطه (1) نوشته می‌شود (Flow Science Inc., 2005):

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R\frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = 0 \qquad (1)$$

که در آن، V_F نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان و ρ دانسیته سیال است. پارامترهای u,v,w نیز مؤلفه‌های سرعت به ترتیب در جهت‌های (x,y,z) هستند. A_x نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت x، و A_z و A_y به طور مشابه نسبت سطوح جریان در جهات z و y هستند. R و ξ نیز مشخصه‌های مربوط به نوع سیستم مختصات بوده و در مختصات کارتزین $R = 1$ و $\xi = 0$ می‌باشند.

رسوبات در FLOW-3D به دو صورت هستند: رسوبات معلق و رسوبات بستر که در اثر تنش برشی در بستر شروع به حرکت می‌کنند. در این نرم‌افزار معادلهٔ انتقال گونه i ام از ذرات رسوبی به صورت (2) می‌باشد (Flow Science Inc., 2005):

1. Volume of Fluid
2. 2. Fractional Area-Volume Obstacle Representation

$$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} + \nabla \bar{u} c_{s,i} = 0 \qquad (2)$$

همچنین رابطهٔ تعادل مومنتم برای هر ذرهٔ سیال و رسوب به صورت (3) است (Flow Science Inc., 2005):

$$\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} + \bar{u} \nabla c_{s,i} = -\frac{1}{\rho_{s,i}} \nabla P + F - \frac{K_i}{f_{s,i} \rho_{s,i}} u_{r,i} \qquad (3)$$

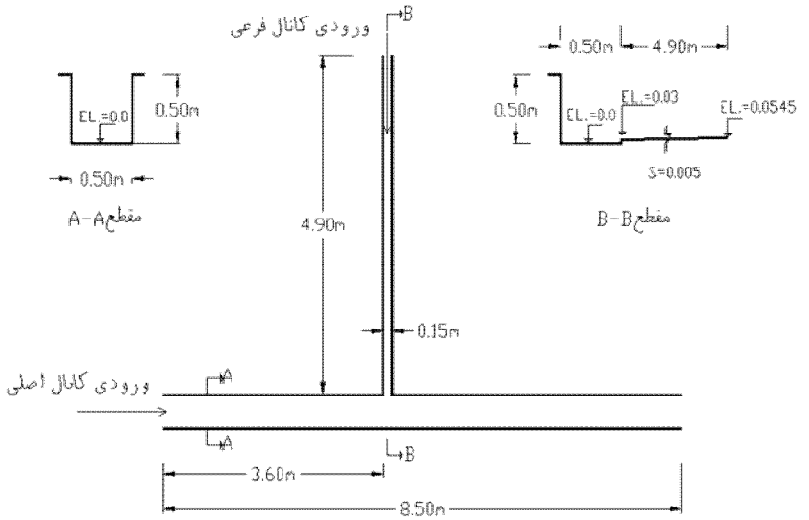
در روابط (2) و (3)، $c_{s,i}$ غلظت رسوبات معلق گونه i ام، $\bar{u}$ سرعت متوسط مخلوط آب و رسوب، ∇P گرادیان فشار، F مجموع نیروهای حجمی و لزوجت، K_i تابع دراگ، $f_{s,i}$ بخش حجمی گونهٔ i ام ذرات رسوبی، $\rho_{s,i}$ دانسیتهٔ گونهٔ i ام مواد رسوبی معلق، و $u_{r,i}$ سرعت نسبی گونهٔ i ام مواد رسوبی معلق می‌باشند.

2-2- مشخصات مدل آزمایشگاهی

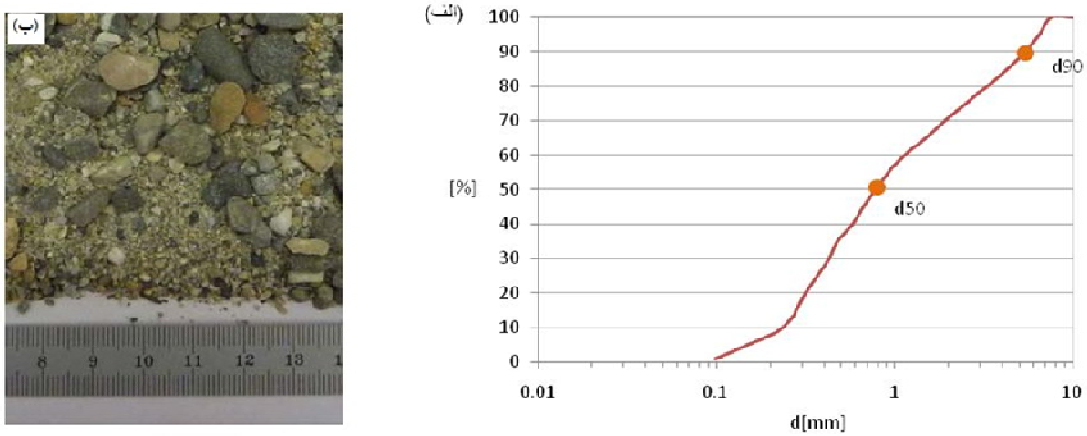
در این تحقیق از نتایج یک مدل آزمایشگاهی که توسط ریبیرو در سال 2011 برداشت شده، استفاده شده است. Riberio (2011) در مطالعات آزمایشگاهی خود به بررسی مقدار فرسایش و رسوب در محل تلاقی شاخهٔ فرعی و اصلی پرداخت. مدل ساخته شده در این آزمایش برگرفته از بخشی از رودخانه Rhone واقع در کوه‌های آلپ بود و شامل فلومی به طول 8/5 و عرض 0/5 متر با شیب صفر درجه به عنوان کانال اصلی بوده که در فاصلهٔ 3/6 متری پایین‌دست دهانهٔ ورودی آن، کانال فرعی با مقطع مستطیلی به طول 4/9 و عرض 0/15 متر و با زاویه °90 به کانال اصلی متصل شده بود. در محل تلاقی، اختلاف ارتفاعی برابر 0/03 متر بین رقوم بستر کانال فرعی با کانال اصلی وجود داشته و پس از آن بستر کانال فرعی با شیب 0/5 درصد تا دهانه ورودی امتداد داشته است. در این مدل بستر کانال فرعی و اصلی متحرک بود. با توجه به اینکه در نمونهٔ واقعی رودخانه Rhone و در زمان سیلابی، رسوب فراوان و قابل توجهی از شاخهٔ فرعی به شاخهٔ اصلی وارد می‌شد و هیچ‌گونه انتقال رسوب در بالادست کانال اصلی محل تلاقی وجود نداشت، لذا در مدل آزمایشگاهی نیز و بر اساس محاسبات، دبی رسوبی معادل 0/3 کیلوگرم بر دقیقه و منطبق بر دانه‌بندی مدل واقعی تنها به ابتدای کانال فرعی تزریق شده و با انجام آزمایش، مشخصاتی همچون تغییرات سطح آب و تغییرات بستر اندازه‌گیری شده است. همچنین در مدل آزمایشگاهی به منظور جلوگیری از فرسایش شدید بستر و برهم‌خوردن شکل اولیهٔ بستر آماده شده برای انجام آزمایش‌ها و تأثیر آن بر نتایج بعدی، ابتدا کانال اصلی و فرعی با دبی جریان بسیار کم و در شرایطی که انتهای کانال اصلی با استفاده از سرریز تنظیم مسدود شده بود، به صورت تدریجی تا ارتفاع 0/2 متر پر می‌شد. سپس با بازکردن تدریجی سرریز، عمق آب در خروجی کانال اصلی تا ارتفاع 0/07 متر کاهش و در همان عمق تثبیت می‌گردید. با انجام این عملیات، عمق آب در طول کانال اصلی و فرعی نیز کاهش یافته و در نهایت نیم‌رخ سطح آب ثابتی در کانال اصلی و فرعی برقرار می‌شد. پس از این مرحله رسوب به ابتدای کانال فرعی تزریق شده و اندازه‌گیری‌ها و بررسی نتایج آزمایشگاهی انجام می‌گرفت. در شکل 1 پلان کانال اصلی و شاخهٔ فرعی و مشخصات هندسی آنها نشان داده شده است. در شکل 2 منحنی توزیع دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده در آزمایش که دارای قطر متوسط 0/82 میلی‌متر هستند، نشان داده شده است. به‌منظور بررسی تأثیر تغییرات دبی جریان بر تغییرات ریخت‌شناسی بستر در محل تلاقی، سه سری نسبت‌های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی جریان مطابق جدول 1 برای انجام آزمایش در نظر گرفته شده است.

جدول 1 دبی‌های بررسی شده در مدل آزمایشگاهی (Riberio, 2011)

وضعیت دبی های مورد مطالعه درکانال	دبی کانال فرعی، (Lit/s) QT	دبی کانال اصلی، (Lit/s) QM	نسبت دبی کانال فرعی به کانال اصلی (QR=QT/QM)
دبی کم	2	18	0/11
دبی متوسط	2/6	17/4	0/15
دبی زیاد	3/7	16/4	0/23



شکل 1 موقعیت هندسی کانال اصلی و شاخه فرعی در فلوم آزمایشگاهی (Riberio, 2011)



شکل 2 الف) منحنی توزیع دانه بندی رسوبات استفاده شده در آزمایش ب) تصویری از اختلاط رسوب (Riberio, 2011)

3- شبیه‌سازی عددی جریان و رسوب

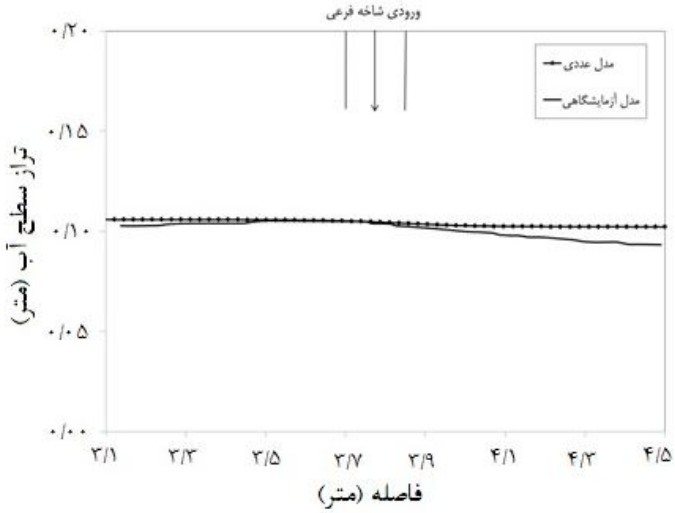
مدل عددی FLOW-3D یک شبکه ساختاری سه‌بعدی، متشکل از سلول‌های مکعب مستطیلی برای میدان موردنظر ایجاد می‌کند. به همین منظور و با استفاده از نرم‌افزار AutoCad، ابتدا یک مدل سه‌بعدی منطبق بر مشخصات مدل آزمایشگاهی تولید شد و سپس نتایج حاصل به نرم‌افزار FlOW-3D برای تولید شبکه با به‌کارگیری دو ابزار مناسب VOF و FAVOR، و تعیین مرزها و شبکه محاسباتی معرفی شد. پس از ورود داده‌های هندسی به محیط نرم‌افزار و تعیین مرزهای کانال اصلی و فرعی، محدودهٔ موردنظر با استفاده از روش‌های VOF و FAVOR شبکه‌بندی شد. ابعاد بهینهٔ شبکه بر مبنای دقت لازم و زمان اختصاص یافته برای انجام محاسبات، انتخاب شده و شبکهٔ میدان به‌گونه‌ای تنظیم شد که خطوط شبکه متعامد باشند. در این تحقیق برای انجام محاسبات، در مجموع 1800000 سلول هر کدام به ابعاد 0/02×0/02×0/02 (بر حسب متر) برای شبکه‌بندی مدل در نظر گرفته شد. پس از تولید شبکهٔ محاسباتی، شرط مرزی، و شرایط اولیه، شبیه‌سازی جریان آب و رسوب انجام شد. به همین منظور در ورودی کانال اصلی و فرعی از شرط مرزی دبی جریان و مقادیر مندرج در جدول 1 استفاده شد. در پایین‌دست کانال اصلی، از شرط مرزی سطح آب استفاده شده و مقدار 0/07 متر (مطابق مدل آزمایشگاهی) به آن معرفی شد. برای شبیه‌سازی رسوب،

اقدام به معرفی مشخصات رسوب در کانال اصلی و فرعی شد، اما به دلیل عدم تزریق رسوب در کانال اصلی، تنها به معرفی مشخصات رسوب بستر (قطر متوسط ذرات، دانسیته و ...) اکتفا شد. در کانال فرعی، علاوه بر مشخصات رسوب بستر، میزان تزریق رسوب نیز به مدل معرفی شده، در نتیجه پس از معرفی تراز سطح آب (مثلاً 0/2 متر به عنوان شرایط اولیه که منطبق با شرایط آزمایشگاهی می‌باشد)، امکان اجرای مدل فراهم شد. از طرف دیگر یکی از پارامترهای اصلی که لازم بود ابتدا برآورد شده و به مدل معرفی شود، ضریب مقاومت جریان یا ضریب مانینگ بود که می‌بایست قبل از به‌کارگیری مدل عددی برای شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف، این پارامتر با استفاده از نتایج آزمایشگاهی کالیبره می‌شد. لازم به توضیح است که در نرم‌افزار FLOW-3D، ارتفاع زبری ناشی از ضریب مانینگ درج می‌شود. بنابراین در این تحقیق، واسنجی مدل عددیFLOW-3D با تخمین صحیح از پارامتر ضریب مانینگ، و به دنبال آن محاسبه و برآورد ارتفاع ناشی از ضریب زبری، از طریق مقایسه عددی و آزمایشگاهی نیم‌رخ سطح آب انجام شد. برای این منظور، ابتدا بر اساس منحنی دانه‌بندی مورد استفاده در مدل آزمایشگاهی، قطر متوسط ذرات (D_{50}) استخراج شده و سپس با استفاده از یکی از روابط موجود نظیر رابطهٔ Subramanya (1982) مقدار ضریب مانینگ برابر 0/014 برآورد گردید.

در نهایت ارتفاع معادل زبری با استفاده از رابطهٔ Strickler (Chanson, 2004) برابر با 0/0025 برآورد و به مدل معرفی شد. قبل از شبیه‌سازی رسوب، لازم بود در خصوص مقدار ضریب مانینگ و ارتفاع زبری ناشی از آن صحت‌سنجی شود. صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان توسط نرم‌افزار FLOW-3D، با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی بکار برده شده در تحقیق به عمل آمده توسط Riberio (2011) برای نیم‌رخ سطح آب در نسبت دبی زیاد کانال فرعی به کانال اصلی (نسبت دبی 0/23)، انجام شده و نتایج حاصله از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده در مقطع میانی کانال اصلی مقایسه گردید. همانطور که در شکل 3 مشاهده می‌شود اختلاف موجود بین نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و عددی در حدود 1 درصد در حداکثر تراز سطح آب بوده که قابل توجه نمی‌باشد. در نتیجه، مقدار ضریب مانینگ 0/014 و ارتفاع زبری بستر 0/0025 متر، مبنای شبیه‌سازی عددی الگوی جریان و رسوب قرار گرفت.

4- نتایج و بحث

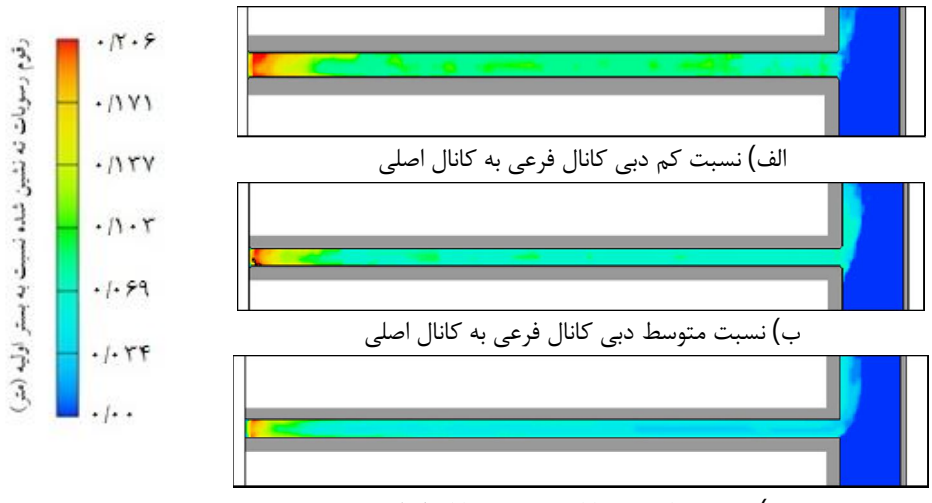
در مدل آزمایشگاهی و با شروع آزمایش، به دلیل تزریق رسوب در کانال فرعی و همچنین شرایط جریان در کانال اصلی، رسوب‌گذاری در طول مسیر کانال فرعی صورت گرفت که منجر به تغییر تراز بستر و شیب کانال فرعی در دبی‌های مختلف می‌شد؛



شکل 3 پروفیل سطح آب در مقطع میانی کانال اصلی در حالت نسبت زیاد دبی کانال فرعی به کانال اصلی

به‌طوری که تراز بستر کانال فرعی در محل تلاقی در دبی کم از 0/03 به 0/09، در دبی متوسط از 0/03 به 0/078 و در دبی زیاد از 0/03 به 0/072 متر تغییر یافته و شیب بستر کانال فرعی از 0/005 به 1/9، 1/5 و 1/2 در صد به ترتیب در دبی کم، دبی متوسط، و دبی زیاد تغییر یافت. پس از این تغییرات، کانال فرعی شرایط پایداری را تجربه نموده و آزمایش‌ها تا زمانی ادامه یافت که تغییرات مورفولوژیکی در کانال اصلی نیز از شرایط پایداری برخوردار باشد. شکل 4 تغییرات طولی تراز بستر شبیه-سازی شده کانال فرعی را پس از رسیدن به شرایط تعادل نشان می‌دهد. نتایج استخراج شده برای تهیه نیم‌رخ طولی بستر کانال، دربرگیرنده عرض 0/5 متری کانال اصلی از بخشی از کانال فرعی به طول 3 متر می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نیم‌رخ‌های بستر کانال فرعی در هر سه‌حالت نسبت‌های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی، برای رسیدن به شرایط تعادل اختلاف بسیاری با نیم‌رخ اولیه و قبل از شروع شبیه‌سازی دارند. به عبارتی پایین‌بودن پتانسیل اولیهٔ انتقال جریان آب و رسوب در شروع مدل‌سازی عددی و همچنین مدل آزمایشگاهی نسبت به کانال اصلی موجب شده تا قبل از اینکه پتانسیل جریان در کانال فرعی بر کانال اصلی غلبه نماید، رسوب-گذاری زیادی در طول بستر کانال فرعی صورت بگیرد. این پدیده موجب شده که شیب اولیهٔ بستر (0/5درصد) و در نتیجه تراز اولیهٔ بستر کانال فرعی با گذشت زمان افزایش یابد. با افزایش تراز بستر کانال فرعی، تراز سطح آب نیز افزایش یافته و در شرایط تعادل به بیش از تراز سطح آب در کانال اصلی رسیده است. به منظور بررسی درستی نتایج، اقدام به اندازه‌گیری عمق رسوب‌گذاری در کانال فرعی در مقطع اتصال به کانال اصلی شد. نتایج نشان می‌دهد که عمق رسوب‌گذاری (افزایش تراز نسبت به شرایط اولیه) در نسبت کم دبی کانال فرعی به کانال اصلی 0/073، در نسبت متوسط دبی 0/054، و در نسبت دبی زیاد 0/038 متر بوده است که در مقایسه با نتایج مدل آزمایشگاهی متناظر، درصد اختلاف به ترتیب 8/4، 5، 5/5 بوده و به طور متوسط 6/3 درصد اختلاف بین نتایج حاصل از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. نتایج مقایسه در جدول 2 ارائه شده‌است. در شکل 5 نیم‌رخ تراز رسوب‌گذاری در کانال فرعی نمایش داده شده-است.

تعیین بیشترین عمق فرسایش در کنار عمق رسوب‌گذاری در محل تلاقی رودخانه‌ها که در اثر ورود جریان از شاخه فرعی به اصلی ایجاد می‌شود، یکی از پدیده‌های بسیار مهم در علوم مهندسی هیدرولیک، رسوب و رودخانه می‌باشد که کمتر مورد توجه قرار گرفته است و نتایج مطالعات انجام شده در این خصوص به سختی قابل دسترس است.



الف) نسبت کم دبی کانال فرعی به کانال اصلی

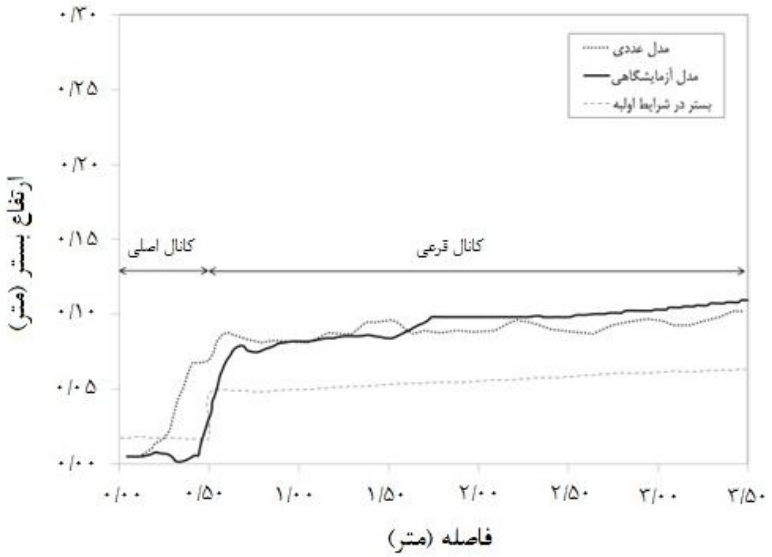
ب) نسبت متوسط دبی کانال فرعی به کانال اصلی

ج) نسبت زیاد دبی کانال فرعی به کانال اصلی

شکل4 تغییرات طولی تراز بستر کانال فرعی برای نسبت های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی

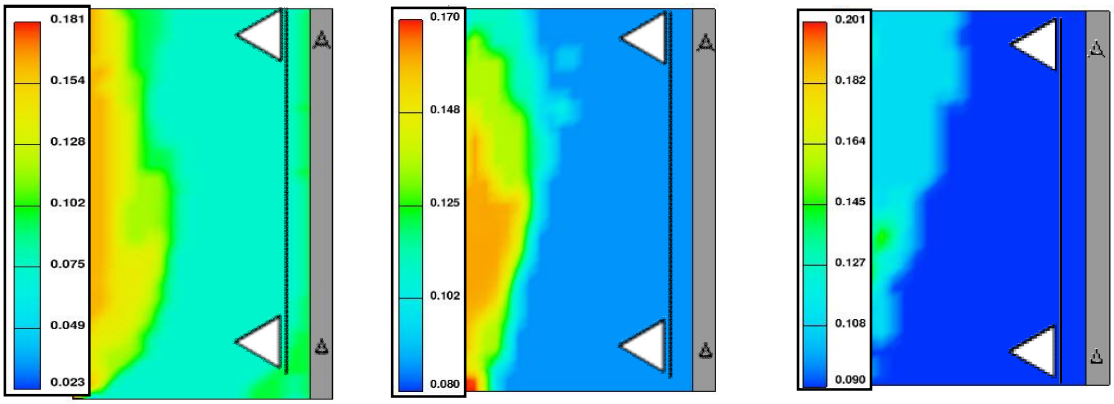
جدول 2 مقادیر عمق رسوب گذاری و درصد اختلاف عمق رسوب گذاری در کانال فرعی در مقطع اتصال به کانال اصلی در مدل عددی و آزمایشگاهی در نسبت‌های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی

نسبت دبی کانال فرعی به کانال اصلی	عمق رسوب گذاری در مدل عددی (متر)	عمق رسوب گذاری در مدل آزمایشگاهی (متر)	درصد اختلاف
پایین	0/103	0/095	8/4
متوسط	0/084	0/08	5
بالا	0/068	0/072	5/5
متوسط	-	-	6/3



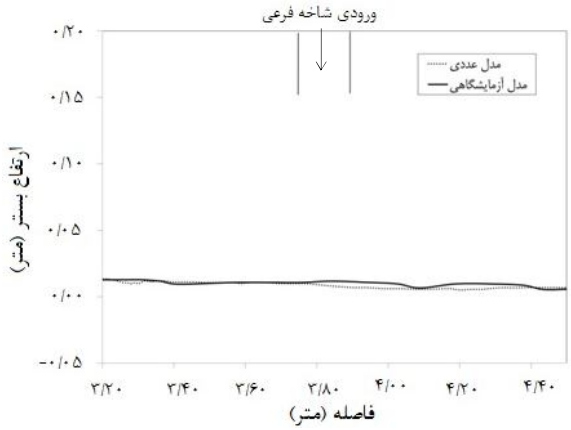
شکل 5 شرایط بستر در کانال فرعی برای نسبت زیاد دبی کانال فرعی به کانال اصلی

در مطالعه حاضر و همزمان با مدل‌سازی الگوی رسوب‌گذاری، وضعیت فرسایش بستر کانال اصلی در محل تلاقی با کانال فرعی شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده برای نسبت‌های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که عمدهٔ فرسایش ایجاد شده در کانال اصلی مربوط به محل تلاقی و پایین‌دست آن است که به سمت ساحل مقابل محل تلاقی تمایل دارد. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی بستر کانال اصلی در مقطع A-A در شکل 6 که در فاصله 0/05 متر از ساحل راست کانال اصلی قرار دارد، برای نسبت‌های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی در شکل های 7، 8 و 9 ارائه شده است. همچنین در جدول 3 نیز درصد اختلاف نتایج عددی و آزمایشگاهی درخصوص متوسط عمق فرسایش برای نسبت‌های مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی در مقطع A-A ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند در هر سه نسبت مختلف دبی کانال فرعی به کانال اصلی (کم، متوسط و زیاد)، مدل عددی، متوسط عمق فرسایش را بیش‌تر از مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده است. همان‌طور که در جدول 3 نشان داده شده است، بیشترین اختلاف بین عمق فرسایش پیش‌بینی شده توسط مدل و مشاهده شده از مدل آزمایشگاهی، در دبی متوسط به مقدار 40 درصد بوده و به طور متوسط برای کلیه دبی ها، 26 درصد می باشد.

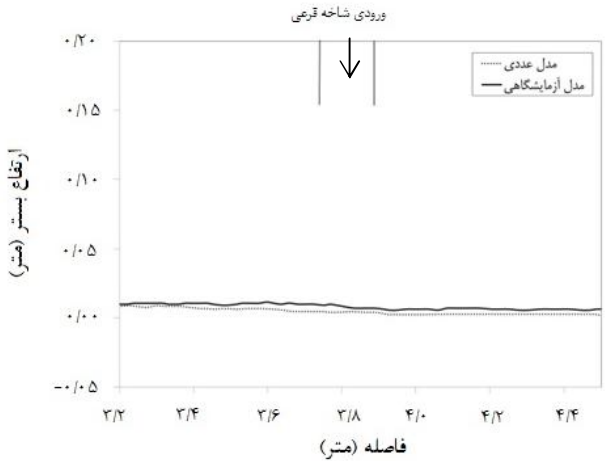


الف) نسبت دبی کم ب) نسبت دبی متوسط ج) نسبت دبی زیاد

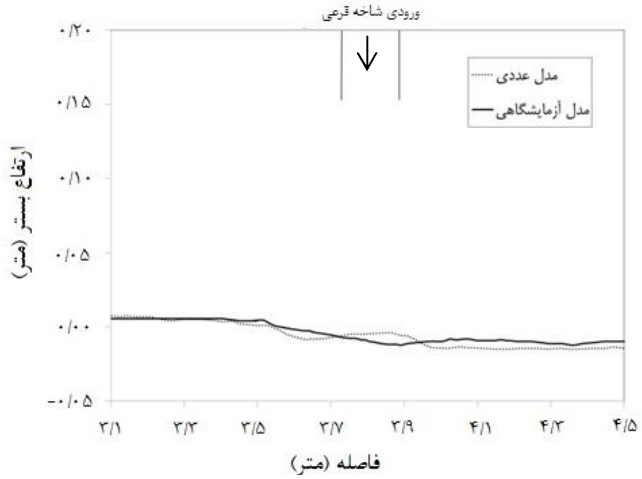
شکل 6 وضعیت فرسایش بستر کانال اصلی در محدودهٔ تلاقی کانال فرعی



شکل 7 مقایسهٔ نتایج عددی و آزمایشگاهی بستر کانال اصلی در مقطع A-A برای نسبت کم دبی کانال فرعی به کانال اصلی



شکل 8 مقایسهٔ نتایج عددی و آزمایشگاهی بستر کانال اصلی در مقطع A-A برای نسبت متوسط دبی کانال فرعی به کانال اصلی



شکل 9 مقایسهٔ نتایج عددی و آزمایشگاهی بستر کانال اصلی در مقطع A-A برای نسبت زیاد دبی کانال فرعی به کانال اصلی

جدول 3 میانگین اختلاف بین نتایج مدل عددی با مدل آزمایشگاهی در شبیه‌سازی متوسط عمق فرسایش بستر کانال اصلی

دبی های موردمطالعه درکانال	بیشترین مقدار فرسایش در مطالعات عددی (mm)	بیشترین مقدار فرسایش در مطالعات آزمایشگاهی (mm)	درصد اختلاف
کم	5	4	25
متوسط	7	5	40
زیاد	21	18/5	13
متوسط خطا	-	-	26

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از نتایج حاصل از یک مدل آزمایشگاهی از محل تلاقی یک کانال فرعی با یک کانال اصلی، اقدام به ارزیابی قابلیت و دقت مدل عددی FLOW-3D در پیش‌بینی الگوی جریان و رسوب در محل تلاقی شاخه‌های فرعی رودخانه به شاخه اصلی شد. مقایسهٔ نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی با خطایی در حدود متوسط یک درصد نسبت به مدل آزمایشگاهی قادر به پیش‌بینی نیم‌رخ سطح آب در محدودهٔ تلاقی شاخهٔ فرعی با شاخهٔ اصلی در شرایط مدل‌سازی بدون تزریق رسوب می‌باشد.

نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که با افزایش نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی، مقدار حداکثر عمق رسوب‌گذاری در کانال اصلی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش نسبت دبی شاخهٔ فرعی به شاخهٔ اصلی، پتانسیل انتقال رسوب افزایش یافته و در مقابل ارتفاع قلهٔ رسوبی ایجاد شده در محل تلاقی کاهش می‌یابد. مقایسهٔ نتایج عددی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل عددی با خطایی در حدود متوسط 6/3 درصد قادر به پیش‌بینی حداکثر ارتفاع رسوب‌گذاری در محل تلاقی می‌باشد. مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش نسبت دبی در شاخهٔ فرعی به دبی در شاخهٔ اصلی، مقدار حداکثر عمق چالهٔ فرسایشی در سمت مقابل محل تلاقی در بستر کانال اصلی افزایش می‌یابد. درصد اختلاف بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در خصوص میزان متوسط عمق فرسایش در حدود 26 درصد می‌باشد.

6- فهرست علایم

A_x	نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت x
A_y	نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت y
A_z	نسبت مساحت سیال عبوری از یک المان به مساحت کل المان در جهت z
$c_{s,i}$	غلظت رسوبات معلق گونهٔ i ام
F	مجموع نیروهای حجمی و لزوجت
$f_{s,i}$	بخش حجمی گونهٔ i ام ذرات رسوبی
i	اندیس نشان دهندهٔ گونهٔ ذرات رسوبی
K	تابع دراگ
R	مشخصهٔ مربوط به نوع سیستم مختصات
t	زمان
$\overline{u}$	سرعت متوسط مخلوط آب و رسوب
$u_{r,i}$	سرعت نسبی گونهٔ i ام مواد رسوبی معلق
u	مؤلفهٔ سرعت در جهت محور مختصات x
V_F	نسبت حجم سیال عبوری از یک المان به حجم کل المان
v	مؤلفهٔ سرعت در جهت محور مختصات y
w	مؤلفهٔ سرعت در جهت محور مختصات z
ξ	مشخصهٔ مربوط به نوع سیستم مختصات
ρ	دانسیتهٔ سیال
$\rho_{s,i}$	دانسیتهٔ گونهٔ i ام مواد رسوبی معلق
∇P	گرادیان فشار

7- منابع

صاحباری، ج. آ. و برقعی، س. م. (1387). "بررسی آزمایشگاهی الگوی فرسایش و رسوب گذاری در محل اتصال کانال ها". چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران،

دانشگاه تهران، ص.ص. 45-53.

قبادیان، ر.؛ شفاعی بجستان، م. و موسوی جهرمی، ح (1385). "بررسی آزمایشگاهی جدایی جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها برای شرایط جریان زیر بحرانی". تحقیقات منابع آب ایران، 2، ص.ص. 67-77.

Baghlani, A. and Talebbeydokhti N. (2013). "Hydrodynamics of right-angled channel confluences by a 2D numerical model", Transactions of Civil Engineering, 32(C2), pp. 271-283.

Best, J. L. (1988). "Sediment transport and bed morphology at river channel confluences", Sedimentology, 35, pp. *481-498*.

Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: An introducion*, Elsevier Butterworth-Heinemann.

De Serres, B., Roy, A.G., Biron, P.M. and Best, J.L. (1999). "Three-dimentional structure of flow at a confluence of river channel with discordant beds", Geomorphology, 26, pp. 313-335.

Flow Science Inc. (2005). “Flow-3D Help”, Version 9.0.

Fujita, I. and Komura, S. (1989). "Visualization of the flow at a confluence, in refined flow modelling and turbulence measurements", Edited by Universal Academy Press, International Association of Hydraulic Research, Tokyo, Japan.

Hsu, C.C., Wu, F.S. and Lee, W.J. (1998). "Flow at 90 equal-width open-channel junction", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124(2), pp. 186-191.

Huang, J., Weber, J.L., and Lai, G.Y. (2002). "Three dimensional numerical study of flows in open-channel junctions", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 128(3), pp. 268-280

Khan, A.A., Cadavid, A. and Wang, S.S.Y. (2000). "Simulation of channel confluence and bifurcation using the CCHE2D model", Proc. Instn. Civ. Engrs. Water & Mar. Engng, 142(2), pp. 97-102.

Mosley, M.P. (1976). "An experimental study of channel confluences", Journal of Geology, 84(5), pp. 535-562.

Ribeiro, M. L. (2011). "Influence of tributary widening on confluence morphodynamics", PhD Thesis, Lausanne, Swiss.

Shabayek, S., Steffler, P., and Hicks, F. (2002). "Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions", Journal of Hydraulic Engineering, 128(9), pp. 821-828.

Shakibainia, A., Tabatabai, M. R. M., and Zarrati, A. R. (2010). "Three-dimensional numerical study of flow structure in channel confluences", Canadian Journal of Civil Engineering, 37, pp. 772-781.

Subramanya, K. (1982). *Flow in open channels*, Tata McGraw-Hill Education, 360 pages.

Webber, N.B., and Greated, C.A. (1966). "An investigation of flow behavior at the junction of rectangular channel", Proceeding Institution of Civil Engineers, 34, pp. 321-334.

Weber, L.J., Schumate E.D., and Mawer, N. (2001). "Experiments on flow at a 90° open-channel junction", Journal of Hydraulic Engineering., 127(5), pp. 340-350.

Weiming, W. (2001). "CCHE2D: sediment transport model (Version 2, 1)", Tech. Report No. NCCHE-TR-2001-3, NCCHE, University of Mississippi.