

Numerical Investigation of the Effect of Main Canal Cross-Section Shape on Flow Dynamic at the Rivers' Junction

NAVID PARCHAMI¹, MOHAMMAD HEMMATI^{1*}, NEGIN MIRMORSALI¹

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

(Received: Feb. 7, 2021- Revised: May. 7, 2021- Accepted: May. 15, 2021)

ABSTRACT

Studying and recognizing the flow dynamics at the junction and downstream of the junction is essential in designing the stable geometry of prismatic canals and providing a suitable protection solution for river systems. According to field data, the existence of different junction angles and bed discordance between the main and tributary canals is one of the most common physical characteristics of the most natural junction. The present research aims to numerically investigate the effect of main canal cross-section shapes (rectangular and trapezoidal) and junction angles (45° and 90°) on flow dynamics at river junctions of the concordance and discordance bed level. The results showed at the concordance bed level and junction with a 90° angle, in both cross-section shapes, the flow separation zone is formed near the bed, with the difference that in a trapezoidal section, its dimension was bigger than the rectangular section. At the 45° angle of the concordance bed level, this zone did not appear in any sections; but for unequal bed level junction, the separation zone was formed only on the water surface and for the trapezoidal section. In addition, the flow separation zone was not formed at the 90° discordance junction near the bed, but at the water surface its dimension in trapezoidal shape was more than the rectangular. Besides, the backwater at the upstream of the junction in main canal decreased in trapezoidal shape and in 45° junction angle.

Keywords: Open Canals Junction, Flow 3D, Flow Pattern, Flow Separation Zone.

* Corresponding Author's Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

بررسی عددی تأثیر شکل مقطع کانال اصلی بر دینامیک جریان در تلاقی رودخانه‌ها

نوید پرچمی^۱، محمد همتی^{۱*}، نگین میرمرسلی^۱

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۲/۱۷ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۵)

چکیده

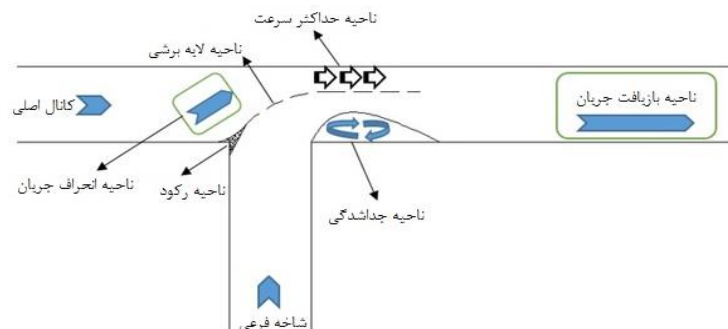
مطالعه و شناخت دینامیک جریان در محل و پایین دست تلاقی، از موارد ضروری در طراحی هندسه پایدار کانال‌های منشوری و ارائه راهکار مناسب حفاظتی برای سیستم‌های رودخانه‌ای به حساب می‌آید. به استناد داده‌های میدانی، وجود زوایای مختلف تلاقی و اختلاف رقوم کف کانال اصلی و شاخه فرعی از رایج‌ترین مشخصات فیزیکی اغلب تلاقی‌های طبیعی می‌باشد. تحقیق حاضر با هدف بررسی عددی تأثیر شکل مقطع کانال اصلی (مستطیلی و دوزنقه‌ای) و زاویه تلاقی دو کانال (۴۵ و ۹۰ درجه) بر دینامیک جریان در محل تلاقی‌های همکف و غیر همکف انجام گرفت. نتایج نشان داد که در تلاقی همکف با زاویه ۹۰ درجه، ناحیه جدایی جریان در نزدیکی بستر در هر دو شکل مقطع تشکیل می‌شود با این تفاوت که در مقطع دوزنقه‌ای ابعاد آن در سطح آب بیشتر از مقطع مستطیلی می‌باشد. در تلاقی همکف با زاویه ۴۵ درجه، این ناحیه در هیچکدام از مقاطع ظاهر نشد؛ اما برای تلاقی غیر همکف، ناحیه جداشدگی فقط در سطح آب و برای مقطع دوزنقه‌ای شکل گرفت. علاوه بر آن ناحیه جداشدگی جریان در تلاقی غیر همکف و تلاقی ۹۰ درجه در نزدیک بستر شکل نگرفت اما در سطح آب، ابعاد آن در مقطع دوزنقه‌ای بیشتر از مستطیلی بود. بعلاوه، برگشت آب در بالادست تلاقی کانال اصلی، در مقطع دوزنقه‌ای و در زاویه اتصال ۴۵ درجه کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: تلاقی کانال‌های روباز، Flow 3D، الگوی جریان، ناحیه جدایش جریان.

مقدمه

برخورد دو جریان مجزا می‌باشد، تحلیل این پدیده را مشکل می‌کند. دینامیک تلاقی رودخانه‌ها متأثر از نسبت مومنتوم میان جریان‌هایی که به هم می‌رسند و فیزیک تلاقی‌ها می‌باشد (Khosravinia et al., 2014). (Best (1987). با مطالعات آزمایشگاهی بر روی یک تلاقی نامتقارن کوچک، دینامیک جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها را به صورت شماتیک، مطابق شکل (۱) نشان داد که شامل ۶ ناحیه رکود، ناحیه جدایی جریان، ناحیه انحراف جریان، ناحیه سرعت حداکثر، لایه برشی و ناحیه باز یافت جریان می‌باشد.

تغییر دینامیک جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها، نقش تأثیرگذاری بر روی جابجایی محل تلاقی، تغییرات مورفولوژی، انتقال رسوب و همچنین پخش آلودگی و مسائل تغذیه‌گرایی ایفا می‌کند، از این رو مطالعات مربوط به این پدیده، با روش‌های مختلف آزمایشگاهی، میدانی و شبیه‌سازی‌های عددی مورد تحقیق قرار می‌گیرد (Rice et al., 2008; Konsoer and Rhoads, 2014; Yuan et al., 2017; Gualtieri et al., 2018; Lewis and Rhoads, 2018; Umar et al., 2018; Yuan et al., 2018). در تلاقی دو رودخانه، الگوهای پیچیده جریان که نتیجه‌ی



شکل ۱- الگوی جریان در محل تلاقی کانال‌های روباز (Best, 1987)

مطالعات گسترده‌ای در خصوص رفتارنگاری جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها و کانال‌های منشوری صورت گرفته که در

تحقیق حاضر، با تعریف ۸ سناریوی تلفیقی از شرایط مختلف و محتمل تلاقی‌های طبیعی، اقدام به بررسی سه بعدی شرایط هیدرودینامیکی شده که در راستای تکمیل دستاوردهای محققین قبلی، نتایج جامع‌تری را در اختیار قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

مدل عددی

نرم‌افزار Flow 3D یکی از مدل‌های بسیار قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که توسعه و پشتیبانی آن توسط Flow Science, Inc صورت گرفته است. اخیراً این مدل توانسته در تحقیقات و صنعت کاربرد زیادی پیدا کند. این مدل قابلیت تحلیل سه بعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی را در مسائل مربوط به سیالات دارد. معادلات حاکم در این مدل، معادلات ناویر استوکس و معادله بقای جرم است و برای حل آشفتگی نیز از پنج روش مختلف استفاده می‌شود. یکی از قابلیت‌های این برنامه در زمینه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش حجم سیال یا VOF در مدل کردن جریان‌هایی با سطح آزاد است که مسائل موجود در روش‌های قبلی (روش‌های مبتنی بر آزمون و خطا) را برطرف کرده است (Ghasemzadeh and Kouchakzadeh, 2018).

معادلات حاکم بر جریان در این نرم‌افزار شامل معادله پیوستگی، معادله مومنوم و معادله پروفیل سطح آزاد است.

معادله پیوستگی جریان:

معادله پیوستگی جریان به طور کلی به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\partial \rho u A_x}{\partial x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که V_F کسر حجمی فضای باز به جریان، ρ دانسیته سیال، w, v, u به ترتیب مربوط به سرعت جریان در راستای x, y, z ، A_z, A_y, A_x به ترتیب مقادیر نسبت مساحت در راستای x, y, z ، R و ξ مربوط به سیستم مختصات انتخابی، R_{SOR} یک ترم مربوط به دانسیته است که به عنوان مثال برای مدل‌سازی تریق جرم از خلل و فرج یک دیواره استفاده می‌شود و R_{DIF} تابع دیفیوژن می‌باشد. در سیستم مختصات کارتزین مقادیر R و ξ به ترتیب برابر با ۱ و ۰ در نظر گرفته می‌شود. ترم اول در طرف راست معادله پیوستگی جریان، مطابق معادله (۲) برابر با ترم پخش آشفتگی می‌باشد:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial x} \left(v_F A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_F A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \xi \frac{\partial \rho v_F A_x}{\partial x} \quad (\text{رابطه ۲})$$

ادامه به بخشی از آن‌ها پرداخته شده است. Best and Ried (1984) به بررسی یک تلاقی همکف با چهار زاویه اتصال متفاوت ۱۵، ۴۵، ۷۰ و ۹۰ درجه با پهنای یکسان ۱۵ سانتی‌متر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل، طول و پهنای ناحیه جداشدگی جریان افزایش می‌یابد، اما به ازای نسبت‌های مختلف دبی جریان، شکل ناحیه جداشدگی (نسبت پهنای به طول ناحیه جداشدگی)، حول مقدار ۰/۱۹ باقی می‌ماند. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش نسبت پهنای ناحیه جداشدگی به عرض کانال پایین دست از ۰/۱ تا ۰/۴ نسبت سرعت حداکثر در ناحیه جداشدگی نزدیک بستر به سرعت متوسط در بالادست تلاقی ۱/۳ برابر می‌شود. Shabayek et al. (2002) براساس قانون بقاء مومنوم در راستای جریان اصلی و بقاء جرم برای کل سیستم، مدل تحلیلی یک بعدی برای جریان زیر بحرانی در یک تلاقی سه شاخه‌ای ارائه دادند. آن‌ها در مدل خود نیروی برشی بین دو حجم کنترل، نیروی اصطکاک مرزی و نیروی برشی ناحیه جداشدگی پایین دست کانال شاخه فرعی را در نظر گرفتند و معادلاتی را ارائه دادند. Ramos et al. (2019) به بررسی الگوی جریان و افت سطح آب در تلاقی‌های غیرهمکف کانال‌های روباز پرداختند. در مطالعه آنها با استفاده از مدل عددی LES با در نظر گرفتن سه نسبت مختلف از اختلاف رقوم نسبی ۰/۱، ۰/۲۵ و ۰/۵ و با نسبت دبی شاخه اصلی به فرعی ۰/۵۸ نشان دادند که با افزایش اختلاف رقوم بستر، زاویه انحراف جریان شاخه فرعی در محل تلاقی کاهش پیدا می‌کند، همچنین با افزایش اختلاف رقوم، ابعاد ناحیه جدایی جریان، نسبت برگشت آب در بالادست تلاقی کانال اصلی و میزان عمق چاله آبی محل تلاقی همگی کاهش پیدا می‌کنند. Aghazadeh Sure and Hemmati (2018b) به بررسی عددی تأثیر زاویه تلاقی بر دینامیک جریان در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D پرداختند. نتایج آنها نشان داد با افزایش زاویه تلاقی، ابعاد ناحیه جدایی جریان افزایش می‌یابد، بطوریکه طول ناحیه جداشدگی در تلاقی‌های همکف با زاویه ۹۰ درجه ۲/۳ برابر زاویه تلاقی ۴۵ درجه می‌باشد. این مقدار در تلاقی‌های غیرهمکف با اختلاف رقوم‌های نسبی ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۴/۵، ۳ و ۲/۱ بود. گستردگی مطالعات صورت گرفته در این زمینه نشان از اهمیت فراوان آن در حوضه مهندسی آب داشته بگونه‌ای که بسیاری از طرح‌های پایدارسازی بستر و سواحل رودخانه‌ها در محل تلاقی بر پایه این مطالعات انجام می‌گیرد. با بررسی مطالعات قبلی و نتایج ارائه شده، به نظر می‌رسد مطالعات کافی در خصوص تحلیل شرایط هیدرودینامیکی در حالت‌های مختلف زاویه تلاقی، شکل مقطع و اختلاف رقوم کف تلاقی صورت نگرفته است. لذا در

یک تابع حجم سیال، $F(x, y, z, t)$ تعریف می‌شود. این تابع معرف حجم واحد سیال بر واحد حجم بوده و به صورت معادله (۶) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ uFA_x \frac{\partial}{\partial x} + vFA_y R \frac{\partial}{\partial y} + wFA_z \frac{\partial}{\partial z} \right\} = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن F وابسته به نوع مسئله‌ای است که مدل می‌شود. مسائل غیرقابل تراکم شامل یک سیال منفرد با سطح آزاد یا دو سیال با سطح مشترک است. برای یک سیال منفرد، F بیانگر جمع حجم اشغال شده توسط سیال است، بنابراین وقتی $F = 1$ است، بیانگر وجود سیال و زمانی که $F = 0$ است، بیانگر عدم وجود سیال می‌باشد.

مدل آزمایشگاهی

به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی، از داده‌های آزمایشگاهی Weber et al. (2001) استفاده شده است. و بر آزمایشات خود را بر روی تلاقی همکف با زاویه تلاقی ۹۰ درجه مطابق شکل (۲) انجام داده است.

پس از اعمال شرایط هیدرولیکی بر روی مدل آزمایشگاهی مطابق جدول (۱)، نسبت به واسنجی و صحت‌سنجی مدل اقدام گردید.

ضرایب پخش به صورت $v_F = \frac{\mu C_F}{\rho}$ بیان می‌شود که μ برابر ضریب پخش مومنوم و C_F ضریبی است که معکوس آن عدد آشفته‌گی اسمیت نامیده می‌شود که این نوع پخش جرم تنها برای فرآیندهای اختلاط آشفته‌گی در سیالاتی که دارای گرادیان غیریکنواخت چگالی هستند، کاربرد دارد.

معادله مومنوم

معادلات حرکت از حل معادلات ناویر-استوکس حاصل می‌شوند (معادله‌های ۳-۵):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\xi \frac{A_y v^2}{x v_F} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} + \quad (\text{رابطه ۴})$$

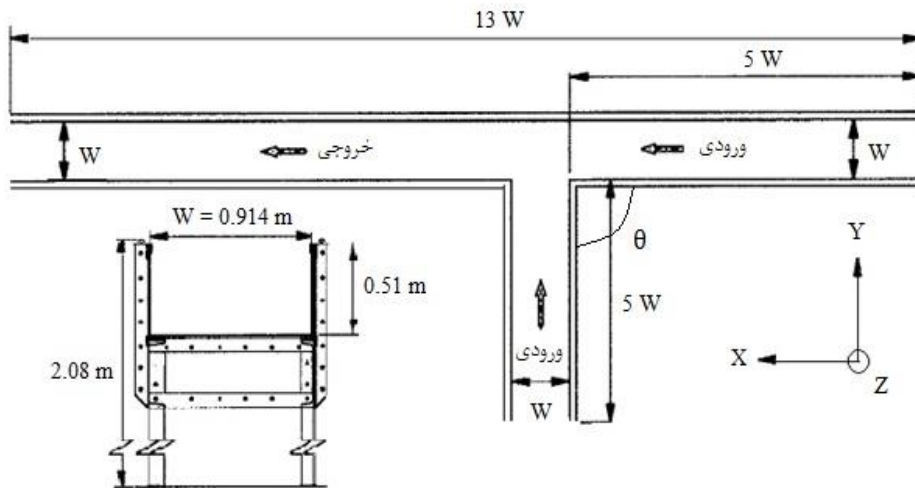
$$\xi \frac{A_y w v}{x v_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$-\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F}$$

در این معادلات G_x, G_y, G_z شتاب‌های بدنه، f_x, f_y, f_z شتاب‌های ناشی از لزجت، b_x, b_y, b_z افت جریان در محیط‌های متخلخل و عبارت $\frac{R_{SOR}}{\rho v_F}$ مربوط به تزریق جرم در سرعت صفر است.

معادله نیمرخ سطح آزاد: ترکیب سیال به صورت ترم‌های



شکل ۲- پلان و پروفیل مدل آزمایشگاهی (Weber et al., 2001)

جدول ۱- شرایط هیدرولیکی اعمالی بر مدل آزمایشگاهی

پارامتر	محدوده تغییرات
نسبت دبی کانال اصلی به شاخه فرعی ($q = \frac{Q_u}{Q_t}$)	۰/۵۸
عمق آب در پایین‌دست کانال اصلی (h_d)	۳۰۸ میلی‌متر (کانال مستطیلی)
عدد فرود در پایین‌دست کانال اصلی (F_r)	۲۷۷ میلی‌متر (کانال دوزنقه‌ای)
دبی در پایین‌دست کانال اصلی (Q_d)	۰/۳۲
نسبت اختلاف رقوم کف شاخه فرعی به اصلی در محل تلاقی (σ)	۱۷۰ لیتر بر ثانیه و ۰/۲۵

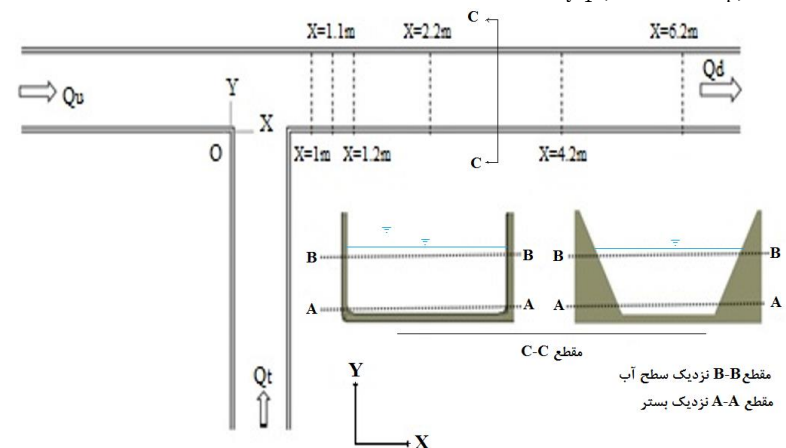
که در آن، n تعداد نمونه اندازه‌گیری، Φ_{exp} و Φ_{model} به ترتیب مقادیر به‌دست آمده از حل عددی و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط مدل آزمایشگاهی می‌باشند.

پس از انجام مراحل مربوط به واسنجی و صحت‌سنجی مدل و اطمینان از عملکرد مناسب، مدل‌سازی تحت ۸ سناریو به شرح جدول (۲) اجراء گردید:

جدول ۲- سناریوهای تعریف شده به مدل عددی

سناریو	زاویه تلاقی (θ)	نسبت اختلاف رقوم کف کانال فرعی به اصلی (σ)	شکل مقطع کانال اصلی
۱	۴۵	۰	مستطیلی
۲	۹۰	۰	
۳	۴۵	۰/۲۵	
۴	۹۰	۰/۲۵	
۵	۴۵	۰	دو زنگه‌ای $(Z=1)$
۶	۹۰	۰	
۷	۴۵	۰/۲۵	
۸	۹۰	۰/۲۵	

مطابق هر یک از سناریوهای تعریف شده، هندسه مدل ترسیم شده و شبکه‌بندی ۳۰ میلی‌متری اعمال گردید. به منظور ایجاد امکان مقایسه بهتر نتایج، لازم بود که مدل تحت شرایط ثابت هیدرولیکی در پایین‌دست کانال اصلی و در محدوده بازیافت جریان مطابق جدول (۱) اجرا شود. شکل (۳) پلان و پروفیل مقاطع داده‌برداری شده در مدل عددی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- پلان و پروفیل مقاطع ثبت داده در مدل عددی

آزمایشگاهی Weber et al. (2001) نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد مدل تلاطمی LES تطابق بهتری نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان می‌دهد. همچنین آنالیز خطای نتایج

پارامترهای مورد استفاده در واسنجی و صحت‌سنجی مدل شامل تغییرات عمق آب در کانال اصلی و تغییرات سرعت در مقاطع مختلف پایین‌دست کانال می‌باشد. برای این منظور، بعد از ساخت هندسه مدل در محیط اتوکد مطابق با مشخصات مدل آزمایشگاهی و انتقال آن به نرم‌افزار Flow 3D و تعریف شرایط مرزی و اولیه مطابق جدول (۱)، ۱۸ تکرار آزمون به منظور واسنجی و تایید مدل انجام پذیرفت. این آزمایشات در قالب آزمون استقلال از مش با حالت‌های مختلف اندازه شبکه ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متری و سه مدل تلاطمی $K-w$ ، $K-e(RNG)$ و LES^1 انجام گرفت که در نهایت اندازه شبکه ۳۰ میلی‌متری با ۹۳۹۷۰۵ شبکه مربعی و مدل LES به عنوان گزینه مطلوب برای ادامه کار انتخاب گردید. مدل LES، گردابه‌های با مقیاس بزرگ را در میدان جریان متلاطم حل می‌کند و تاثیر گردابه‌های کوچک مقیاس را که توسط شبکه از طریق یک مدل حل نشده‌اند، در بردارد. این رویکرد مدل LES در شبیه‌سازی انواع جریان‌های متلاطم موفق بوده است. آنالیز خطای واسنجی و صحت‌سنجی مدل بر اساس دو شاخص آماری RMSRE و I_d مطابق روابط (۷) و (۸) محاسبه گردید. مطابق با شاخص‌های آماری ارائه شده، همبستگی بالا زمانی رخ می‌دهد که مقدار کمی شاخص I_d به سمت یک و مقدار کمی شاخص RMSRE به سمت صفر میل کند.

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\Phi_{model} - \Phi_{exp}}{\Phi_{exp}} \right]_i^2} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

$$I_d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\Phi_{model} - \Phi_{exp}]_i^2}{\sum_{i=1}^n [(\Phi_{model} - \Phi_{exp}) + (\Phi_{exp} - \Phi_{exp})]_i^2} \quad \text{(رابطه ۸)}$$

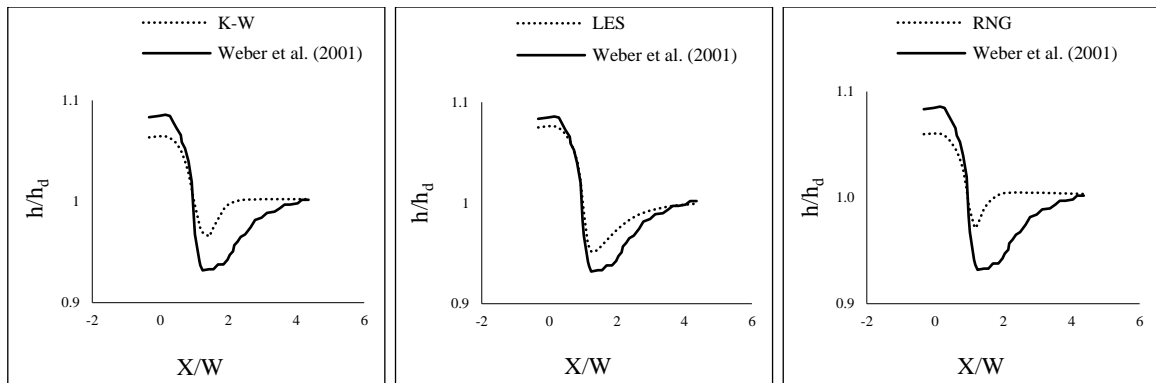
نتایج و بحث

شکل (۴) نتایج واسنجی مدل برای تغییرات عمق آب در طول کانال اصلی را بر اساس مدل‌های تلاطمی انتخابی و داده‌های

¹ Large Eddy Simulation

سرعت در ناحیه بازیافت جریان U_d به عنوان پارامتر صحت‌سنجی مدل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۵) و جدول (۴) آورده شده است. نتایج حاصله نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان در تلاقی کانال‌های روباز دارد.

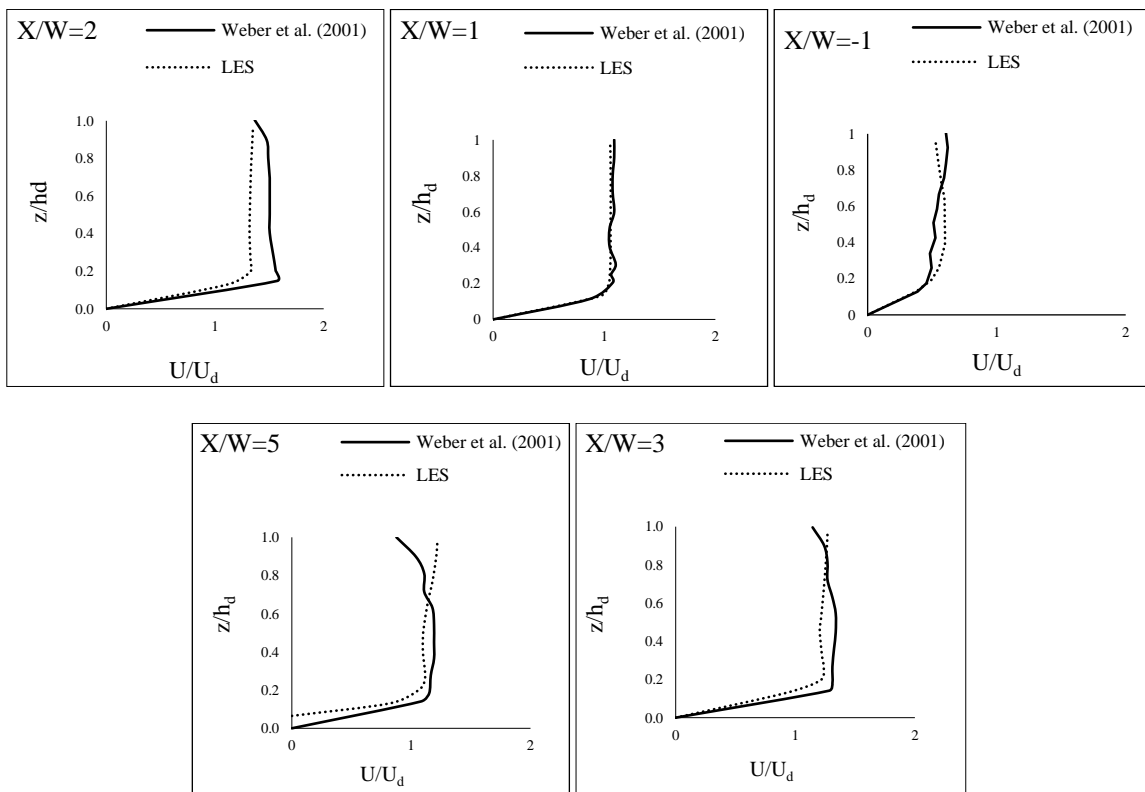
آزمایشگاهی و مدل عددی در جدول (۳) نشان می‌دهد که مدل تلاطمی LES نسبت به مدل‌های Eddy Viscosity که تحت معادلات RANS عمل می‌کنند، نتایج مطلوب‌تری را ارائه می‌دهد. نسبت سرعت جریان در مقاطع مختلف کانال اصلی U ، به



شکل ۴- واسنجی مدل عددی در مقطع عرضی $Y/W = 0.167$ براساس مدل‌های تلاطمی و داده‌های آزمایشگاهی

جدول ۳- آنالیز خطای واسنجی مدل در مقطع عرضی $Y/W = 0.167$ بر اساس مدل‌های تلاطمی و مدل آزمایشگاهی

مدل آزمایشگاهی	مدل تلاطمی	h/h_d	
		I_d	RMSRE
Weber et al., 2001	LES	۰/۹۷۳	۰/۰۱۶
	$K - \omega$	۰/۸۸۰	۰/۰۳۰
	$K - e$ (RNG)	۰/۸۲۱	۰/۰۳۵



شکل ۵- صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از پارامتر سرعت (U/U_d) توسط مدل LES و داده‌های آزمایشگاهی در مقاطع مختلف طولی در پایین‌دست تلاقی

جدول ۴- آنالیز خطای صحت‌سنجی مدل با استفاده از پارامتر سرعت (U/U_d) در کانال اصلی

مدل آزمایشگاهی	مدل عددی	$\frac{X}{W}$	I_d	RMSRE
		-۱	۰/۹۵۶	۰/۱۱۴
		۱	۰/۹۹۶	۰/۰۴۰
Weber <i>et al.</i> , (2001)	LES	۲	۰/۹۳۷	۰/۱۷۴
		۳	۰/۹۶۹	۰/۱۰۳
		۵	۰/۹۵۰	۰/۱۵۱

مستطیلی اندکی بیشتر از مقطع دوزنقه‌ای می‌باشد ولی این تفاوت معنی‌دار نمی‌باشد. همچنین ناحیه رکود جریان در نزدیک سطح آب و در مقطع دوزنقه‌ای کاملاً مشهود است.

با کاهش زاویه تلاقی از حالت متعامد به ۴۵ درجه و حفظ سایر شرایط، به دلیل همسویی جریان دو شاخه در محل تلاقی، نواحی شش‌گانه مطابق شکل (۱) تغییرات محسوس را نسبت به حالت ۹۰ درجه در هر دو حالت مستطیلی و دوزنقه‌ای از خود نشان داد شکل (۷). بدین‌گونه که علاوه بر حذف ناحیه رکود جریان، ناحیه جدایی جریان نیز در هیچکدام از مقاطع ظاهر نگردید. نسبت سرعت در ناحیه ماکزیمم جریان در حالت ۴۵ درجه به ۹۰ درجه ۰/۶۷ می‌باشد که بیانگر کاهش اندازه سرعت حداکثر در تلاقی ۴۵ درجه می‌باشد. زیرا با عدم شکل‌گیری ناحیه جداشدگی جریان در گوشه پایین‌دست تلاقی، سطح مقطع عبوری برای جریان بیشتر از حالتی خواهد بود که در آن ناحیه جداشدگی شکل گرفته است. در نتیجه سرعت جریان در آن ناحیه کاهش خواهد یافت. همچنین عدم شکل‌گیری ناحیه جداشدگی جریان نشان از عدم تشکیل ناحیه با مومنتم بالا در این قسمت بوده که منجر به کاهش تنش برشی خواهد شد.

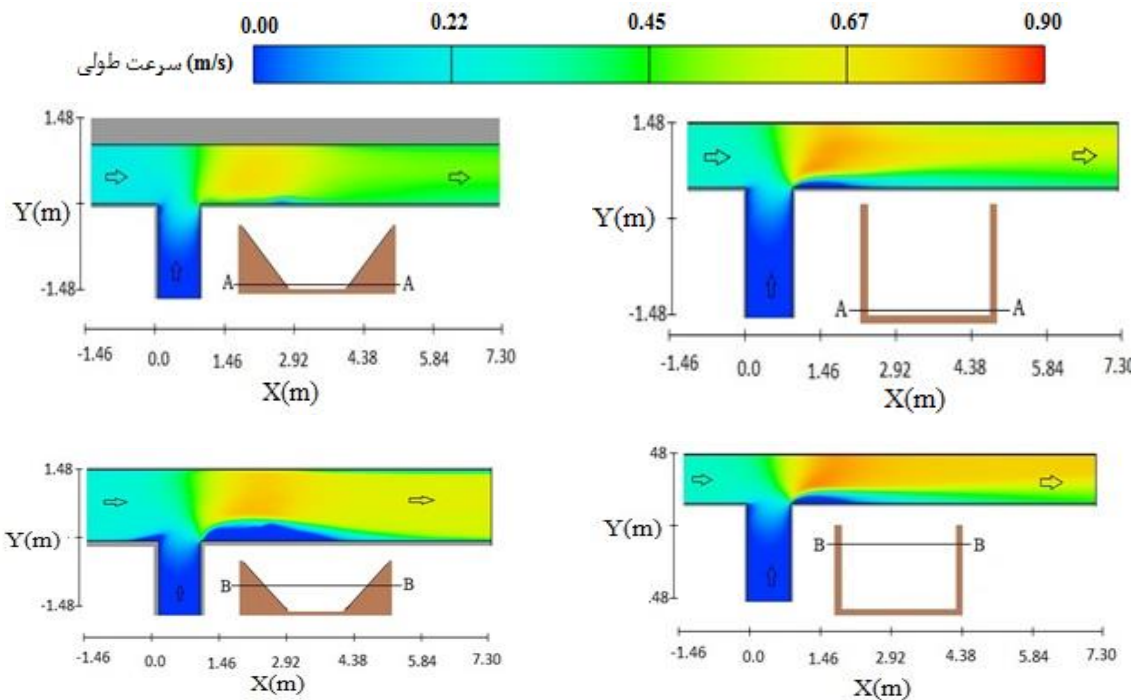
وجود اختلاف رقوم بین بستر کانال اصلی و شاخه فرعی از اتفاقات شایع در مجاری طبیعی می‌باشد، از این رو در مقاله حاضر با تعریف ۴ سناریو از حالت‌های مختلف، به تحلیل دینامیک جریان در این حالت پرداخته شد. نسبت اختلاف رقوم شاخه فرعی به شاخه اصلی برابر با ۲۵ درصد عمق آب در پایین‌دست کانال اصلی در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۸) نتایج ارزیابی نشان داد که در هیچ یک از مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای ناحیه جدایی جریان در بستر کانال شکل نگرفت ولی با ارتفاع گرفتن از بستر کانال این ناحیه به تدریج ظاهر شده و در سطح آب، این ناحیه در کانال دوزنقه‌ای طول و عرض گسترده‌تری نسبت به کانال مستطیلی به خود گرفت. زیرا مومنتم کم جریان در نزدیک بستر به وسیله وجود فشار کف به سمت کناره کشیده شده است؛ به بیان دیگر ناحیه جداشدگی در بستر محدود گردید. با رسیدن جریان به کناره (دیواره)، جریان به سمت بالا و به ناحیه جداشدگی جریان وارد می‌شود (Aghazadeh Sure and

تأثیر شکل مقطع بر تغییرات هیدرودینامیکی کانال اصلی

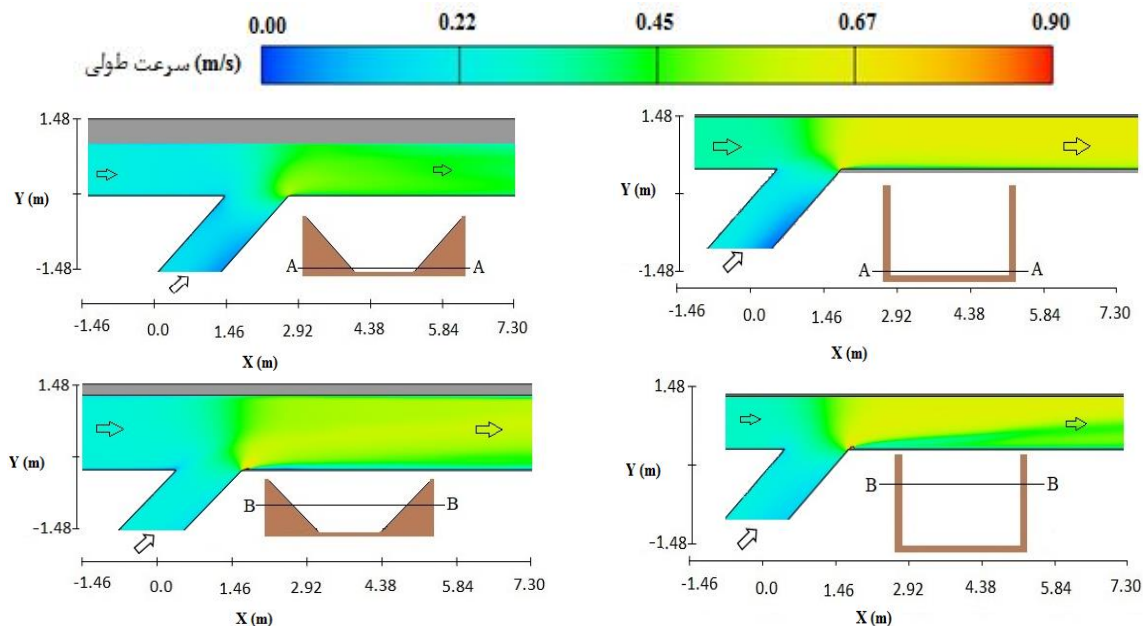
شکل (۶) دینامیک جریان در تلاقی همکف با زاویه ۹۰ درجه را برای مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای نشان می‌دهد. نتایج ارزیابی تاثیر شکل مقطع بر دینامیک جریان در محل تلاقی دو کانال نشان می‌دهد که در تلاقی همکف با زاویه ۹۰ درجه، ناحیه جداشدگی جریان در گوشه پایین‌دست تلاقی در کانال اصلی و در نزدیک بستر برای مقطع مستطیلی شکل گرفته که ابعاد آن بدون تغییر محسوس تا سطح آب ثابت باقی می‌ماند. در کانال مستطیلی بعلاوه یکسان بودن عرض عبوری جریان از بستر تا سطح جریان، سبب می‌گردد تا رفتار جریان در شکل‌گیری و توسعه ناحیه جدایی جریان از بستر تا سطح یکسان باشد، بعبارت دیگر عامل بر هم زنده این حالت از قبیل گردابه‌های عرضی و ... حادث نمی‌گردد. این ناحیه در مقطع دوزنقه‌ای در نزدیکی بستر مشاهده نگردید. زیرا جریان شاخه فرعی هنگام ورود به کانال اصلی از روی شیب دیواره کانال اصلی عبور می‌کند. علاوه بر آن در مقایسه با سطح آب، جریان ورودی از کانال فرعی در محل تلاقی در نزدیک بستر بیشتر به سمت پایین‌دست منحرف می‌شود. این امر بیانگر کاهش مومنتم جریان شاخه فرعی در نزدیک بستر در محل تلاقی بوده که نشان دهنده عدم وجود ناحیه جداشدگی جریان می‌باشد (Khosravinia *et al.*, 2014). شیب دیواره کانال اصلی مانع از ایجاد ناحیه با شتاب زیاد در پایین دست اتصال و نهایتاً منجر به کاهش تنش برشی در نزدیکی بستر می‌گردد. اما با فاصله گرفتن از بستر، ناحیه جداشدگی جریان به تدریج شکل گرفته و با نزدیک شدن به سطح آب، ابعاد گسترده‌تری را نسبت به شکل مقطع مستطیلی به خود می‌گیرد. این یافته با نتایج Khosravinia *et al.* (2014) همخوانی دارد. همچنین با توجه به گستردگی ناحیه ماکزیمم سرعت در پایین‌دست تلاقی، می‌توان گفت در مقطع مستطیلی این ناحیه تا پایین‌دست کانال اصلی امتداد داشته و ناحیه بازیافت جریان در فاصله طولانی‌تری از محل تلاقی شکل می‌گیرد. در صورتیکه در مقطع دوزنقه‌ای جریان بعد از گذر از محل تلاقی سریعاً وارد ناحیه بازیافت می‌شود. این امر به دلیل عریض بودن سطح آب در مقطع دوزنقه‌ای نسبت به حالت مستطیلی است. مقدار سرعت در ناحیه ماکزیمم در مقطع

ناحیه جدایی جریان در هر دو شکل مقطع به جزء مقطع دوزنقه-ای و آنهم در سطح آب تشکیل نگردید (شکل ۹). علاوه بر آن ناحیه رکود جریان در تلاقی ۹۰ درجه فقط در مقطع دوزنقه‌ای و در نزدیکی سطح آب شکل گرفت (شکل ۸) در حالی که در زاویه تلاقی ۴۵ درجه در هیچ یک از حالات ناحیه رکود شکل نگرفت (شکل ۹). همچنین نسبت سرعت ماکزیمم در زاویه ۴۵ درجه نسبت به ۹۰ درجه برابر ۰/۵ بوده که در مقایسه با حالت همکف کمتر می‌باشد.

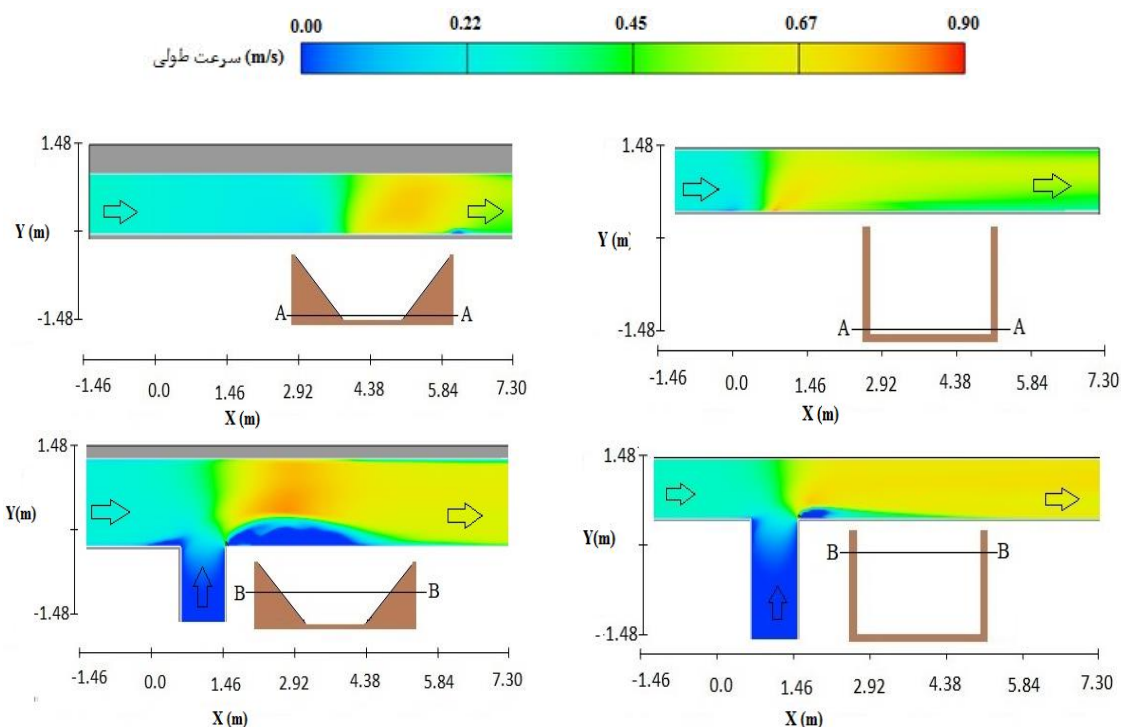
(Hemmati, 2018a). علاوه بر آن وجود اختلاف تراز بین دو شاخه تلاقی تا حد زیادی باعث افزایش شدت تلاطم در پایین دست تلاقی می‌شود (Aghazadeh Sure and Hemmati, 2018a; Wang et al., 2007; Biron et al., 1996). نتایج تحقیق حاضر همراستا با نتایج (Aghazadeh Sure and Hemmati (2018b) است که در آن برای تلاقی‌های غیر همکف ناحیه جدایی جریان در نزدیک بستر شکل نگرفت. در تلاقی ۴۵ درجه غیرهمکف،



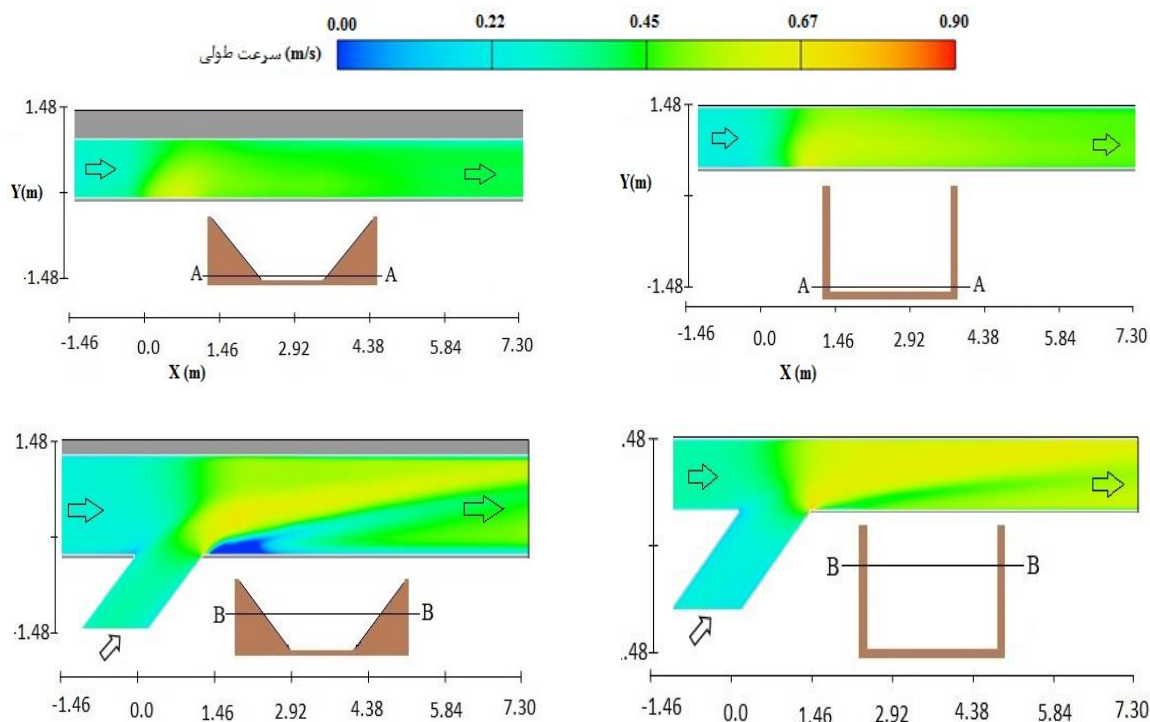
شکل ۶- تاثیر شکل مقطع بر دینامیک جریان (نزدیک بستر و سطح آب) در تلاقی‌های همکف با زاویه تلاقی ۹۰ درجه



شکل ۷- تاثیر شکل مقطع بر دینامیک جریان (نزدیک بستر و سطح آب) در تلاقی‌های همکف با زاویه تلاقی ۴۵ درجه



شکل ۸- تأثیر شکل مقطع بر دینامیک جریان (نزدیک بستر و سطح آب) در تلاقی‌های غیر همکف با زاویه تلاقی ۹۰ درجه



شکل ۹- تأثیر شکل مقطع بر دینامیک جریان (نزدیک بستر و سطح آب) در تلاقی‌های غیر همکف با زاویه تلاقی ۴۵ درجه

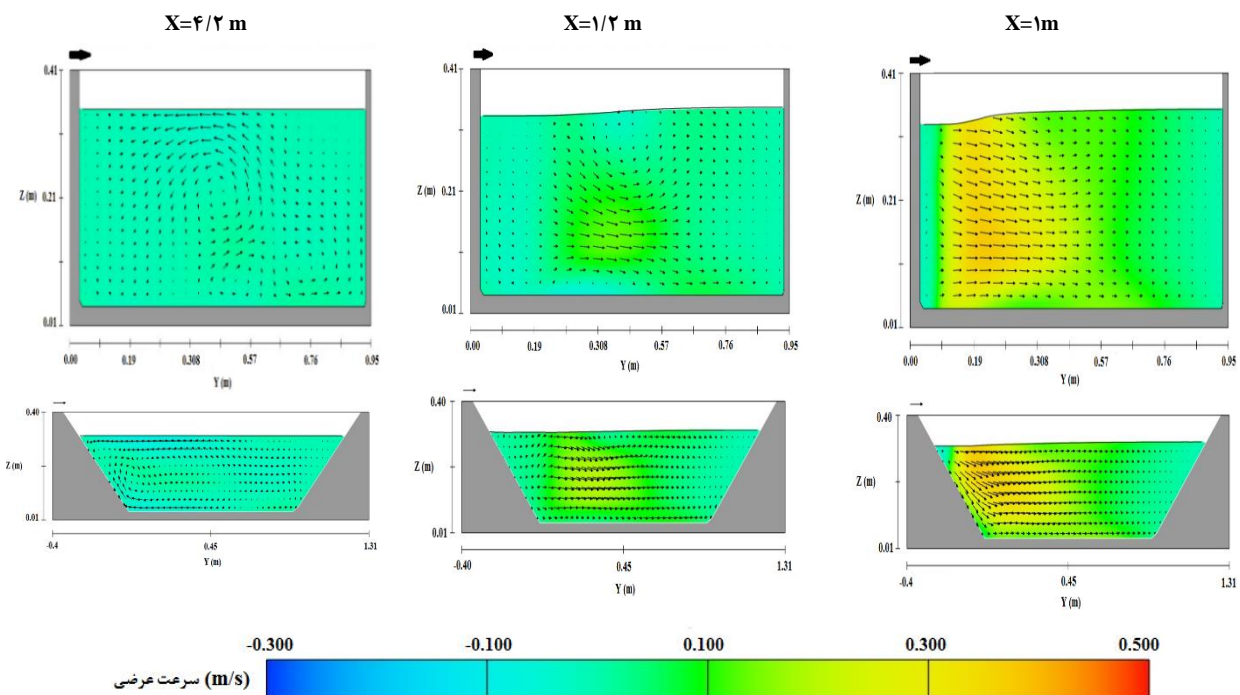
تحلیل جریان در پایین دست تلاقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در کانال‌های مستطیلی با ورود جریان از شاخه فرعی، جریان عرضی در کانال اصلی شکل می‌گیرد (شکل ۱۰). به علت وجود ناحیه جدایی جریان نزدیک ساحل راست کانال اصلی، جریانی در این محدوده به چشم نمی‌خورد، اما در محدوده مرکزی کانال اصلی،

تأثیر شکل مقطع بر الگوی جریان‌های ثانویه شکل‌گیری جریان‌های ثانویه یکی دیگر از مشخصات هیدرودینامیکی کانال‌های روباز می‌باشد که در صورت ورود جریان از شاخه فرعی، این مسئله در کانال اصلی تشدید می‌گردد. بنابراین این شاخصه به عنوان یکی از مهمترین مؤلفه‌های اصلی

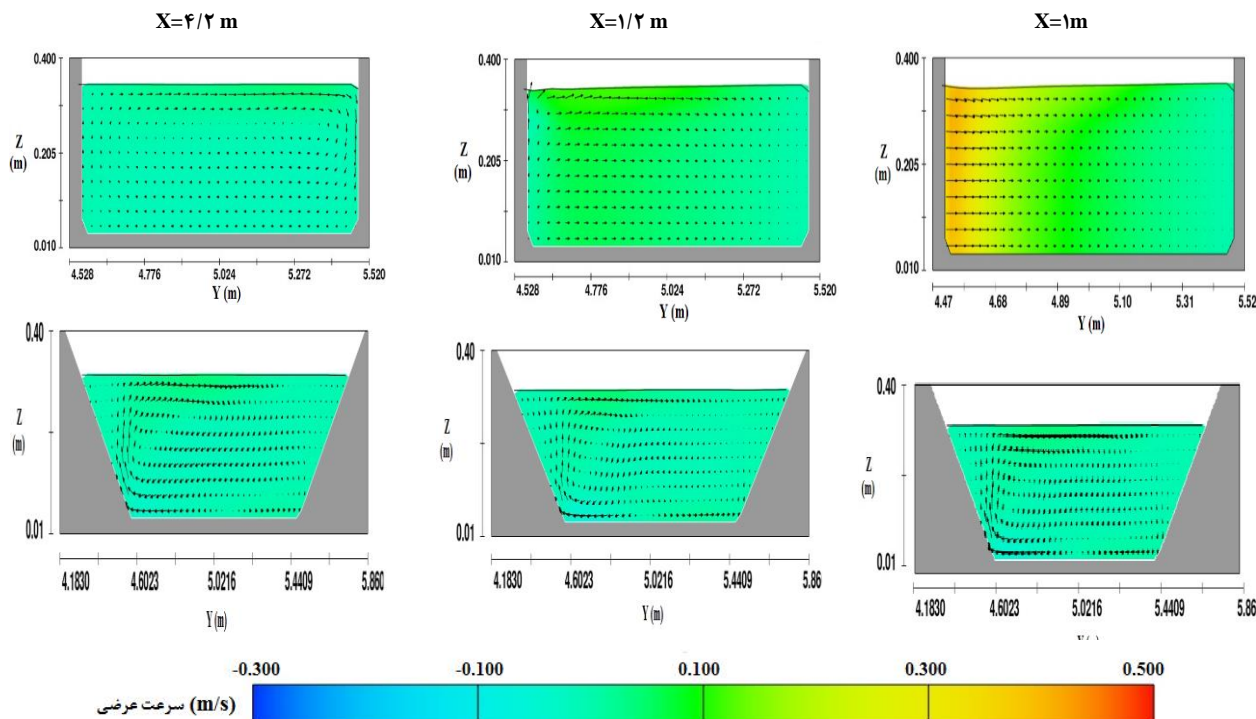
ناحیه جدشدگی در پایین دست و تشکیل گردان در سرعت یکنواخت در پهنای کانال اصلی، جریان ثانویه نیز رفتار منظم‌تری را به خود گرفته و با فاصله گرفتن از محل تلاقی به تدریج قدرت جریان ثانویه تحت تأثیر مومنتم جریان قرار گرفته و مستهلک می‌گردد.

به دنبال تغییر زاویه اتصال شاخه فرعی و ورود جریان با زاویه ۴۵ درجه به کانال اصلی، میزان شدت تداخل جریان آب دو کانال کمتر شده و جریان شاخه فرعی با جریان کانال اصلی سریع‌تر همسو گردید. به استناد شکل (۱۱) در نزدیکی دیواره راست کانال مستطیلی پس از تلاقی، جریان برخاستی ضعیف شکل می‌گیرد و به دلیل نبود ناحیه جدایی جریان تا سطح آب ادامه می‌یابد، همچنین در نزدیکی دیواره چپ کانال اصلی جریانی به سمت کف کانال شکل گرفته و این چرخه جریان تا فاصله ۵ متری از پایین دست کانال ادامه می‌یابد. در کانال ذوزنقه‌ای در مجاورت دیواره راست کانال، جریان برخاستی از کف کانال شروع شده و به موازات دیواره بالا می‌آید، سپس به دلیل شیب‌دار بودن دیواره کانال و تشکیل ناحیه جدایش جریان، جریان برخاستی از دیواره فاصله گرفته و بصورت عمودی تا سطح آب حرکت می‌کند. به دلیل افزایش ابعاد مقطع عبوری جریان در این کانال نسبت به کانال مستطیلی، جریان برخاستی رسیده به سطح آب، در راستای عرضی، توسط مومنتم جریان کانال اصلی مستهلک شده و به دیواره مقابل منتقل نمی‌گردد، از این رو در سمت دیواره چپ کانال جریان ثانویه‌ای به سمت بستر کانال شکل نمی‌گیرد.

جریان ثانویه عرضی شکل می‌گیرد که به تدریج با حرکت به سمت پایین دست کانال اصلی، در ناحیه بازیافت، جریان مستهلک شده و به گردابه‌های عرضی ضعیف تبدیل می‌شود. دیواره‌های کانال اصلی تحت تأثیر این جریان‌ها قرار نمی‌گیرند (شکل ۱۰). در کانال‌های ذوزنقه‌ای رفتار جریان اندکی متفاوت‌تر از کانال مستطیلی می‌باشد. بطوریکه که در محل تلاقی به محض ورود جریان شاخه فرعی، جریانی بر روی دیواره راست کانال اصلی به سمت پایین شکل می‌گیرد؛ زیرا جریان به محض ورود از شاخه فرعی ابتدا از قسمت بالای دیواره شیب‌دار وارد کانال اصلی شده و تا کف کانال اصلی ادامه می‌یابد. این حالت تا ۲۰ سانتی‌متری پایین دست تلاقی ادامه داشته و بعد از آن به علت تأثیر مومنتوم جریان در کانال اصلی، جریان ثانویه مستهلک شده و در نهایت در فاصله ۱۳۰ سانتی‌متری پایین دست تلاقی جریان وارد ناحیه بازیافت می‌شود. علاوه بر آن دلیل این رفتار را می‌توان در تغییرات سرعت طولی جریان در طول مسیر کانال اصلی جستجو کرد. بدین ترتیب که سرعت در جهت جریان در کانال اصلی و نزدیکی دیوار راست از بستر کانال تا سطح آب کاهش پیدا می‌کند تا جائیکه در سطح آب و در فاصله کوتاهی از محل تلاقی در کانال اصلی، ناحیه جدشدگی جریان سطح قابل توجهی به خود می‌گیرد، این موضوع رفتار جریان کانال فرعی را در بدو ورود به کانال اصلی تحت الشعاع قرار داده و در نزدیکی دیواره به علت روند افزایشی مومنتم جریان از سطح به کف کانال اصلی، جریان ثانویه نیز به سمت گوشه پایینی دیواره راست کشیده می‌شود. با گذر از



شکل ۱۰- بردارهای سرعت عرضی در تلاقی‌های همکف و زاویه تلاقی ۹۰ درجه



شکل ۱۱- بردارهای سرعت عرضی در تلاقی‌های همکف و زاویه تلاقی ۴۵ درجه

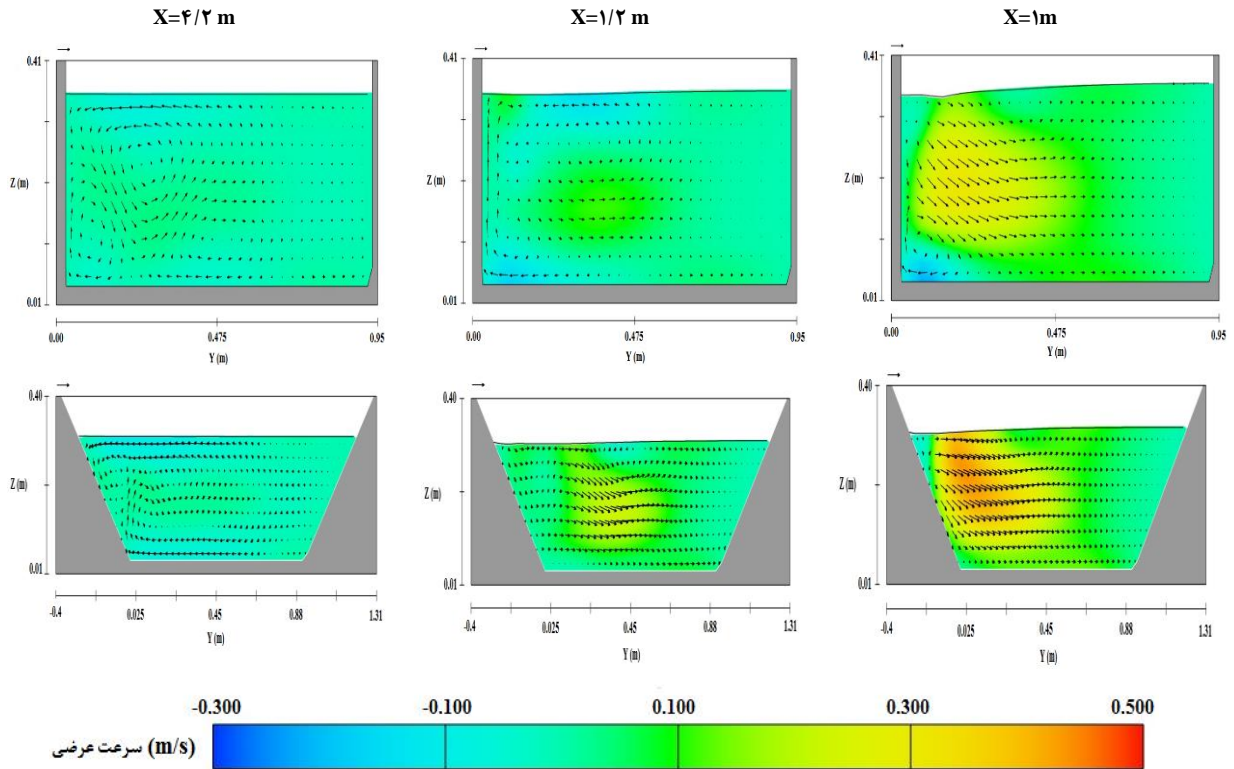
چرخشی را در میدان جریان تشکیل می‌دهد. رفتار جریان در کانال‌های دوزنقه‌ای اندکی متفاوت‌تر از تلاقی‌های ۹۰ درجه غیرهمکف بود. در این حالت، جریان در پایین دست تلاقی به موازات دیواره راست کانال اصلی به سمت بالا شکل گرفته و تا فاصله قابل توجهی در پایین دست تلاقی مشاهده گردید.

تأثیر زاویه تلاقی و شکل مقطع بر تغییرات عمق آب در کانال اصلی

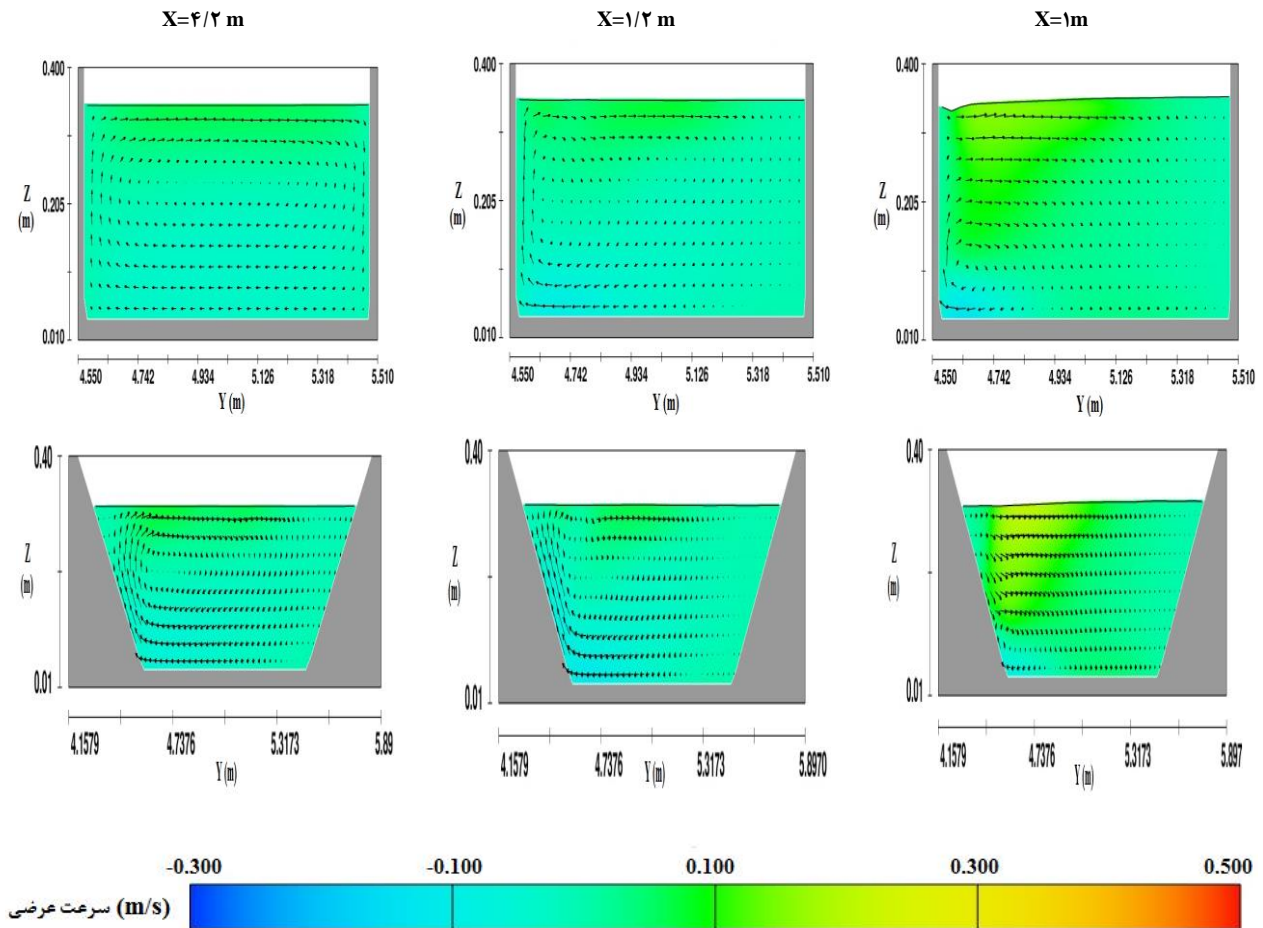
تغییرات عمق آب در راستای کانال اصلی یکی دیگر از پارامترهای هیدرولیکی بوده که در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. عمق جریان در مقطع عرضی $\frac{Y}{W} = 0.5$ اندازه‌گیری گردید. با توجه به نمودارهای شکل (۱۴)، روند برگشت آب در بالادست تلاقی و تشکیل ناحیه جدایی جریان در ناحیه تلاقی در تمام سناریوها مشترک می‌باشد. همچنین در تمامی حالات میزان برگشت آب در مقاطع مستطیلی بیشتر از مقاطع دوزنقه‌ای می‌باشد. علت این امر بازشدگی عمودی مقطع دوزنقه‌ای بوده که منجر به کاهش ناحیه انحراف جریان کانال اصلی شده و میزان تنگ‌شدگی کانال اصلی در اثر ورود جریان شاخه فرعی را کاهش می‌دهد. در تلاقی ۴۵ درجه وجود اختلاف رقوم تأثیر معنی داری بر پروفیل سطح آب نگذاشته است. در زاویه ۹۰ درجه در تلاقی همکف میزان برگشت آب در مقطع مستطیلی بیشتر از دوزنقه‌ای می‌باشد و در تلاقی غیر همکف تأثیر شکل مقطع بر پروفیل سطح آب در بالادست تلاقی معنی دار نیست.

وجود اختلاف رقوم کف کانال اصلی و شاخه فرعی در محل تلاقی منجر به تغییر رفتار هیدرودینامیکی جریان در پایین دست تلاقی می‌گردد. با ورود جریان از شاخه فرعی، جریان شاخه فرعی به دلیل زیاد بودن مومنتم و وجود اختلاف رقوم به سمت کف کانال شکل می‌گیرد که با حرکت در جهت پایین دست دو نوع سلول گردابه عرضی در کانال مستطیلی شکل می‌گیرد که گردابه ساعتگرد در سمت دیواره راست و گردابه پاد ساعتگرد در مرکز کانال و متمایل به ساحل راست کانال اصلی. با حرکت در پایین دست کانال اصلی قدرت آنها زیاد می‌شود. با تغییر شکل مقطع به حالت دوزنقه‌ای، رفتار تلاطمی مشاهده شده در حالت مستطیلی تعدیل گردیده و جریان همانند تلاقی‌های همکف در آستانه ورود آب از شاخه فرعی، جریان عرضی در کانال اصلی به سمت کف کانال شکل می‌گیرد و چون وارد ناحیه حداکثری جریان می‌شود، سریعاً توسط جریان کانال اصلی تضعیف شده و به تدریج در پایین دست تلاقی از بین می‌رود. شکل (۱۲) رفتار جریان را در حالت ۹۰ درجه غیرهمکف برای کانال‌های مستطیلی و دوزنقه‌ای نشان می‌دهد.

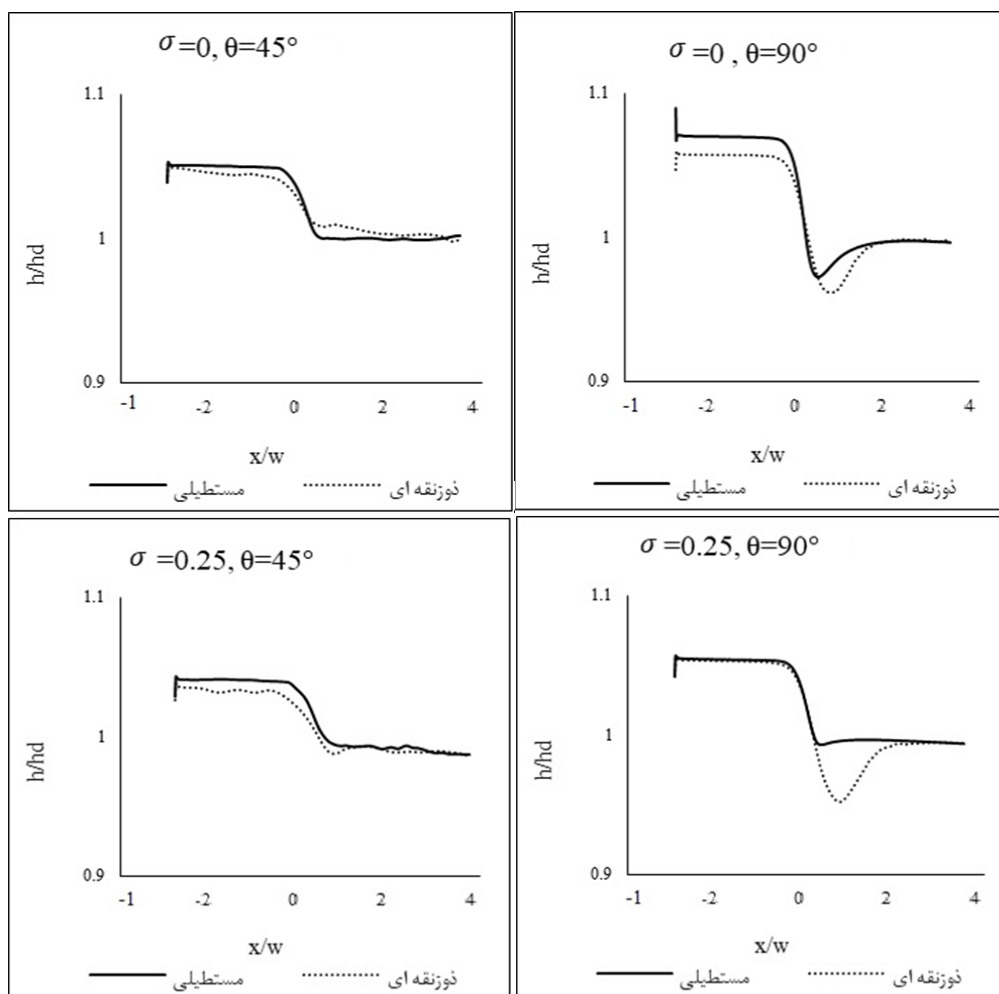
مطابق شکل (۱۳)، در تلاقی‌های ۴۵ درجه غیرهمکف با ورود آب به کانال اصلی، جریان برخاستی در مجاورت دیواره راست کانال اصلی شکل گرفته و این جریان در نزدیکی تلاقی و ناحیه حداکثر جریان مستهلک گردید. با عبور از ناحیه حداکثری سرعت، جریان برخاستی از مجاورت دیواره راست با تشکیل یک جریان چرخشی خود را به دیواره چپ رسانده و یک سیکل کامل



شکل ۱۲- بردارهای سرعت عرضی در تلاقی‌های غیرهمکف و زاویه تلاقی ۹۰ درجه



شکل ۱۳- بردارهای سرعت عرضی در تلاقی‌های غیرهمکف و زاویه تلاقی ۴۵ درجه



شکل ۱۴- تغییرات تراز آب در مقطع عرضی $\frac{y}{w} = 0.5$ کانال اصلی

نتیجه گیری

شکل گرفته و ابعاد آن متناسب با افزایش عمق و شکل مقطع عبوری جریان، افزایش می‌یابد بطوریکه در سطح آب ابعاد گسترده‌تری را به خود می‌گیرد. همچنین سرعت ماکزیمم در کانال مستطیلی به خاطر نسبت بالای تنگ‌شدگی موضعی شکل مقطع در محل تلاقی در مقایسه با کانال دوزنقه‌ای، بیشتر می‌باشد که این امر می‌تواند در الگوی فرسایش و رسوبگذاری پایین‌دست مؤثر باشد. با کاهش زاویه تلاقی از حالت متعامد به ۴۵ درجه، تداخل جریان دو کانال کمتر شده و از این رو همسویی نسبی بین دو جریان منجر به کاهش زاویه انحراف و حذف ناحیه جدایی جریان می‌گردد. بررسی میدان الگوهای جریان‌های ثانویه در مقاطع عرضی پایین‌دست کانال اصلی نشان داد که در کانال‌های مستطیلی همکف با زاویه تلاقی ۹۰ درجه، نفوذ آب شاخه فرعی موجب تشکیل جریان‌های عرضی در مرکز کانال می‌شود. این جریان در ادغام با جریان اصلی کانال به تدریج در پایین‌دست مستهلک می‌شود. در کانال‌های دوزنقه‌ای همکف با زاویه تلاقی ۹۰ درجه نیز شرایط مشابهی شکل گرفته با این

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر همزمان زاویه تلاقی و شکل مقطع در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف بر الگوی جریان پرداخته شد. زوایای تلاقی ۹۰ درجه و ۴۵ درجه با مقاطع مستطیلی و دوزنقه‌ای کانال اصلی، در ۸ سناریو با استفاده از نرم‌افزار Flow 3D مورد تحلیل قرار گرفت. الگوی جریان در راستای جهت اصلی جریان در دو مقطع A-A (۲۰ میلی‌متری بستر) و مقطع B-B (۲۰ میلی‌متر زیر سطح آب) در کانال اصلی، ناحیه جداشدگی جریان، ارزیابی رفتار تلاطمی جریان در پایین‌دست تلاقی و همچنین تغییرات عمق جریان در طول کانال اصلی از مهمترین پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق بود. نتایج نشان داد ناحیه جداشدگی برای هر دو مقطع در تلاقی‌های همکف با زاویه ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد، با این تفاوت که در حالت مستطیلی این ناحیه از نزدیکی بستر تا سطح آب با ابعاد یکسان شکل می‌گیرد در صورتیکه در کانال دوزنقه‌ای این ناحیه با فاصله از بستر کانال

کانال اصلی سریع تر وارد ناحیه بازیافت می شود. وجود اختلاف رقوم در محل تلاقی دو کانال تغییرات محسوسی بر روی دینامیک جریان از جمله ابعاد ناحیه جداسازی جریان و جریانهای عرضی در مقاطع پایین دست گذاشت.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

تفاوت که در این مقاطع در نزدیکی تلاقی، جریان مماس بر دیواره و به سمت پایین درون کانال اصلی نفوذ می کند، که این امر می تواند آبشستگی موضعی بر روی دیواره کانال ذوزنقه ای را به همراه داشته باشد. با تغییر زاویه تلاقی از حالت ۹۰ درجه به ۴۵ درجه، شدت تلاطمی در هر دو کانال تعدیل شده و جریان در

REFERENCES

- Aghazadeh Sure, T. and Hemmati, M. (2018a). Simulation of the Effect of Bed Discordance on Flow Pattern at the River Confluence by Flow-3D Model, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 11(5), 785-797. (In Farsi)
- Aghazadeh Sure, T. and Hemmati, M. (2018b). Numerical investigation of the effect of junction angle on flow dynamic at the canal junction of concordance and discordance bed level. *Journal of Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(70), 53-68. (In Farsi)
- Best, J. L. (1987). Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*, 39, 27-35.
- Best, J. L. and Reid, I. (1984). Separation zone at open-channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(11), 1588-1594.
- Biron, P., Best, J.L. and Roy, A.G. (1996). Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122(12), pp.676-682.
- Ghasemzadeh, F. and Kouchakzadeh, S. (2018). *Simulation of hydraulic problems in Flow 3D*. Tehran: Noavar. (In Farsi)
- Gualtieri, C., Filizola, N., Oliveira, M. D., Santos, A. M. and Ianniruberto, M. (2018). A field study of the confluence between Negro and Solimoes rivers. Part 1: Hydrodynamics and sediment transport. *Comptes Rendus Geoscience. Journal of Hydrology, Environment*, 350(1-2), 31-42.
- Khosravinia, P., Hosseinzadeh Dalir, A., Shafai Bajestan, M. and Farsadizadeh, D. (2014). Experimental and numerical investigations of the effect of main channel side slope on flow pattern in right angle confluence of channels. *Journal of Soil and Water Science*, 24(3), 105-119. (In Farsi)
- Konsoer, K. M. and Rhoads, B. L. (2014). Spatial-temporal structure of mixing interface turbulence at two large river confluences. *Journal of Environ Fluid Mech*, 14(5), 1043-1070.
- Lewis, Q. W. and Rhoads, B. L. (2018). LSPIV measurements of two-dimensional flow structure in streams using small unmanned aerial systems: 1. Accuracy assessment based on comparison with stationary camera platforms and in-stream velocity measurements. *Water Resources Research*, 54(10), 8000-8018.
- Ramos, P. X., Schindfessel, L., Pego, J. P. and De Mulder, T. (2019). Influence of bed elevation discordance on flow patterns and head losses in an open-channel confluence. *Journal of Water Science and Engineering*, 12(3), 235-243.
- Rice, S. P., Roy, A. G. and Rhoads, B. L. (2008) *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Shabayek, S., Steffler, P. and Hicks, F. E. (2002). Dynamic Model for Subcritical Combining Flows in Channel Junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(9), 821-828.
- Umar, M., Rhoads, B. L. and Greenberg, J. A. (2018). Use of multispectral satellite remote sensing to assess mixing of suspended sediment downstream of large river confluences. *Journal of Hydrology*, 556, 325-338.
- Wang, X.G., Yan, Z.M. and Guo, W.D. (2007). Three-dimensional simulation for effects of bed discordance on flow dynamics at y-shaped open channel confluences. *Journal of hydrodynamics*, 19(5), 587-593.
- 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), 340-350.
- Yuan, S., Tang, H., Xiao, Y., Chen, X., Xia, Y. and Jiang, Z. (2018). Spatial variability of phosphorus adsorption in surface sediment at channel confluences: Field and laboratory experimental evidence. *Journal of Hydro-Environment Research*, 18, 25-36.
- Yuan, S., Tang, H., Xiao, Y., Qiu, X. and Xia, Y. (2017). Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study. *Journal of Hydraulic Research*, 56(3), 333-350.