

## بررسی عددی تأثیر زاویه تلاقی بر دینامیک جریان در تلاقی کانال‌های همکف و غیر همکف

توحید آقازاده سوره<sup>۱</sup> و محمد همتی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲ به ترتیب: دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ و استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۴

### چکیده

دینامیک جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها با شش ناحیه اصلی قابل تشخیص است: ناحیه رکود جریان، انحراف جریان، جدایی جریان، حداکثر سرعت، بازیافت جریان و لایه‌های برشی. زاویه تلاقی، نسبت دبی بین دو شاخه، اختلاف رقوم و غیره از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر ابعاد این نواحی هستند. توجه بیشتر مطالعات قبلی بر تلاقی کانال‌های همکف معطوف بوده است؛ و در زمینه تلاقی‌های غیر همکف مطالعات اندک است. این تحقیق به ارزیابی اثر زاویه تلاقی دو کانال بر دینامیک جریان (ناحیه جدانشدگی، الگوی جریان و تراز آب)، با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی Flow-3D در تلاقی‌های همکف و غیر همکف می‌پردازد. فاکتورهای مهم بررسی شده در این تحقیق، چهار نسبت دبی (نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل برابر با ۲/۳، ۳/۳، ۴/۳ و ۵/۳)، سه زاویه (۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه) و اختلاف رقوم‌های متغیر هستند. پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که بین دینامیک جریان در تلاقی‌های همکف و غیر همکف تفاوت زیاد است و زاویه اتصال نقشی مهم در تلاقی رودخانه‌ها، به‌ویژه در تلاقی‌های همکف بازی می‌کند. با افزایش زاویه، ابعاد ناحیه جدانشدگی جریان افزایش می‌یابد به طوری که طول ناحیه جدانشدگی در زاویه ۹۰ درجه ۲/۳ برابر طول ناحیه جدانشدگی در زاویه ۴۵ درجه برای تلاقی‌های همکف است. این مقدار در تلاقی‌های غیر همکف با اختلاف رقوم‌های نسبی برابر با ۱/۳، ۲/۳ و ۳/۳ به ترتیب برابر با ۴/۵، ۳ و ۲/۱ است.

### واژه‌های کلیدی

الگوی جریان، تلاقی‌های غیر همکف، جدانشدگی جریان، زاویه تلاقی، شبیه‌سازی عددی

### مقدمه

ناشی از چرخش جریان است، ناحیه جدایی جریان در پایین‌دست گوشه تلاقی به وجود می‌آید. مشابه این حالت نیز در جریان انحرافی در داخل کانال‌های آبیگری رخ می‌دهد. همچنین، به دلیل برخورد جریان با دیواره، نقطه سکون در بالادست کانال فرعی نیز به وجود می‌آید که مشابه چنین حالتی در پایین‌دست کانال‌های فرعی در آبگیرها اتفاق می‌افتد (Borghae et al., 2003).

در زمینه تلاقی رودخانه‌های همکف و غیر همکف، مطالعات زیادی به صورت آزمایشگاهی، صحرایی و عددی

در الگوی جریان در کانال‌های متقاطع، پارامترهای زیادی مؤثر هستند که بررسی تئوری جریان را در این کانال‌ها پیچیده می‌کند. از جمله می‌توان به پارامترهای هندسی (شکل کانال، ابعاد کانال و زاویه بین دو کانال اصلی و فرعی) و پارامترهای هیدرولیکی (عدد فرود جریان و دبی در کانال اصلی و کانال فرعی) اشاره کرد. جریان ورودی از کانال فرعی به کانال، ناحیه تنگ‌شدگی جریان را در کانال اصلی ایجاد می‌کند. با ایجاد این ناحیه که

تا ۰/۴، نسبت سرعت حداکثر در ناحیه جداولدگی و نزدیک به بستر به سرعت متوسط در بالادست اتصال ۱/۳ برابر می‌شود. قبادیان (Ghobadian, 2008) تأثیر تغییرات تراز سطح آب پایاب را بر الگوی جریان‌های ثانویه در محل تلاقی کانال‌های روباز مستطیلی با مدل ریاضی SSIIM2 بررسی کرد و نشان داد که مدل مذکور قابلیت شبیه‌سازی جریان متقاطع را دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جریان‌های ثانویه، که درست از محل گوشه پایینی اتصال شروع به تشکیل شدن می‌کنند، با کاهش رقوم سطح آب پایاب و همچنین حرکت به طرف پایین دست اتصال ضعیف‌تر می‌شوند. دوردوویچ (Đorđević, 2012) با استفاده از نرم‌افزار SSIM2 و با مدل آشفتگی K-ε، جریان در تلاقی کانال‌ها را شبیه‌سازی کرد و گزارش داد که مومنتم انتقالی از شاخه فرعی به کانال اصلی، تغییرات منطقه جداولدگی جریان و همچنین شکل و پروفیل سرعت به شکلی رضایت بخش با استفاده از مدل مذکور شبیه‌سازی می‌شود. با این همه، مقادیر سرعت به‌ویژه سرعت‌های عمودی کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شد. رایلی و رودز (Riley & Rhoads, 2011)، با بررسی جریان در تلاقی کانال‌های قوسی نشان دادند که جریان در کانال اصلی با ترکیب جریان فرعی شتاب می‌گیرد و حداکثر شتاب جریان هنگامی رخ می‌دهد که کانال فرعی در رأس قوس خارجی باشد.

موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده (Musavi-Jahromi & Goodarzizade, 2011)، الگوی جریان در تلاقی ۹۰ درجه دو کانال مستطیلی همکف را با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت بررسی کردند. به‌منظور شبیه‌سازی جریان آشفته، از مدل آشفتگی تنش رینولدز استفاده و جریان به‌صورت ماندگار تحلیل شده است. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که مدل آشفتگی تنش رینولدز در شبیه‌سازی جریان آشفته و پیش‌بینی ناحیه جدایی جریان توانایی نسبتاً بالایی دارد. نتایج بررسی‌ها همچنین نشان

انجام گرفته است مانند: بست (Best, 1988)، بست و روی (Best & Roy, 1991)، کریستودولو (Christodoulou, 1993)، بایرون و همکاران (Biron *et al.*, 1996a)، وبر و همکاران (Weber *et al.*, 2001)، برایان و کوهن (Bryan & Kuhn, 2002)، برقی و نظری (Borghae & Nazari, 2003)، روی و همکاران (Roy *et al.*, 1988)، لین و همکاران (Lane *et al.*, 2000)، رودز و سوخودولو (Rhoads & Sukhodolov, 2004)، قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006)، موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده (Mousavi-Jahromi & Goodarzizade, 2011)، رایلی و رودز (Riley & Rhoads, 2011)، دوردوویچ (Đorđević, 2012)، حبیبی و همکاران (Habibi *et al.*, 2014) و نظری گیگلو و همکاران (Nazari-Giglou *et al.*, 2016). در زمینه رودخانه‌های غیرهمکف می‌توان به مطالعات بایرون و همکاران (Biron *et al.*, 1993, 1996b, 2002)، بویر و همکاران (Boyer *et al.*, 2006)، وانگ و یان (Wang & Yan, 2007)، شفافی بجهستان و همتی (Shafai-Bejestan & Hemmati, 2008)، همتی (Hemmati, 2008)، شفافی بجهستان (Hemmati & Shafai-Bejestan, 2009)، گوین لادنا و همکاران (Guillén-Ludeña *et al.*, 2016) اشاره کرد.

مطالعات آزمایشگاهی بست و رید (Best & Ried, 1984) روی یک تلاقی همکف با چهار زاویه اتصال متفاوت ۱۵، ۴۵، ۷۰ و ۹۰ درجه با پهنای یکسان ۱۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد که با افزایش نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل، طول و پهنای ناحیه جداولدگی جریان افزایش می‌یابد. ولی به‌ازای نسبت‌های دبی مختلف اندیس شکل ناحیه جداولدگی (نسبت پهنای به طول ناحیه جداولدگی)، حول مقدار میانگین ۰/۱۹ باقی می‌ماند. نتایج تحقیق همچنین نشان می‌دهد که با افزایش نسبت پهنای ناحیه جداولدگی به عرض کانال پایین دست از ۰/۱

وانگ و یان (Wang & Yan, 2007) با بررسی دینامیک جریان در تلاقی‌های Y شکل غیرهمکف با استفاده از مدل تلاطمی (RNG)  $k-\epsilon$ ، می‌گویند نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل، فاکتور کنترلی مهمی است که بر ابعاد ناحیه جداسازی جریان تأثیر می‌گذارد و ناحیه جداسازی در نزدیک کف برای تلاقی‌های غیر همکف مشاهده نمی‌شود. شفاعی‌بجستان و همی (Shafai-Bejestan & Hemmati, 2008) با بررسی عمق آبشستگی در محل تلاقی رودخانه‌های غیرهمکف نشان دادند که وقتی دبی کانال فرعی کمتر از ۷۵ درصد دبی کانال اصلی در بالادست تلاقی باشد، افزایش اختلاف رقوم دو کانال باعث کاهش عمق آبشستگی است و وقتی دبی‌ها بیشتر از آن باشد، با افزایش اختلاف رقوم، میزان آبشستگی زیاد می‌شود. این محققان همچنین معادله‌ای برای پیش‌بینی حداکثر عمق آبشستگی در محل تلاقی ارائه دادند. همی و شفاعی‌بجستان (Hemmati & Shafai-Bejestan, 2009) با مقایسه الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در تلاقی رودخانه‌های همکف و غیرهمکف اعلام کردند که وجود اختلاف رقوم بستر در محل تلاقی باعث کاهش حداکثر عمق آبشستگی و افزایش ابعاد چاله فرسایشی در محل تلاقی می‌شود.

در زمینه تلاقی رودخانه‌ها، به‌ویژه رودخانه‌های غیرهمکف، مطالعات اندک است و هنوز شناخت کافی از دینامیک جریان در این نوع تلاقی‌ها وجود ندارد. این تحقیق در نظر دارد به بررسی اثر زاویه تلاقی دو رودخانه بر الگوی جریان در محل تلاقی‌های همکف و غیرهمکف در شرایط مختلف هیدرولیکی بپردازد.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی مدل FLOW-3D

FLOW-3D نرم‌افزاری قوی در زمینه دینامیک

می‌دهد که با افزایش نسبت دبی، طول و عرض ناحیه جداسازی جریان کاهش می‌یابد.

خسروی‌نیا و همکاران (Khosravinia *et al.*, 2014) به بررسی آزمایشگاهی و عددی تأثیر شیب جانبی کانال اصلی بر الگوی جریان در تلاقی‌های همکف با زاویه اتصال ۹۰ درجه پرداختند. در این تحقیقات، که از مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  از نوع RNG استفاده شد، تأثیر شیب جانبی ۴۵ درجه کانال اصلی بر توزیع سرعت، تراز آب و ابعاد ناحیه جداسازی جریان در یک تلاقی با زاویه اتصال ۹۰ درجه بررسی و با نتایج به‌دست آمده از تأثیر شیب جانبی ۹۰ درجه مقایسه شد. بررسی نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که طول و پهناى ناحیه جداسازی در شیب ۴۵ درجه، نسبت به شیب ۹۰ درجه، در کف بستر کوچک‌تر و در سطح آب بزرگ‌تر است. همچنین تغییرات عمق آب در ابتدا و انتهای کانال اصلی در شیب ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به عمق آب ابتدای کانال اصلی به ترتیب ۲/۱ و ۳/۳ درصد است.

بایرون و همکاران (Biron *et al.*, 2002) الگوهای مکانی توپوگرافی سطح آب را در محل تلاقی رودخانه‌های غیرهمکف بایونه<sup>۱</sup> (آبراهه اصلی) و بردیر<sup>۲</sup> (شاخه فرعی) در مونترال کانادا بررسی کردند و نشان دادند که بالآمدگی سطح آب در ناحیه رکود جریان نزدیک رأس اتصال مشاهده می‌شود و ناحیه اختلاط بین منطقه بالآمدگی سطح آب و منطقه فرو افتادگی آن قرار می‌گیرد. مطالعات صحرائی بویر و همکاران (Boyer *et al.*, 2006) در زمینه دینامیک اتصال رودخانه‌های بایونه (آبراهه اصلی) و بردیر (شاخه فرعی) نشان می‌دهد که افزایش نسبت مومنتم شاخه فرعی به شاخه اصلی باعث نفوذ و پیشرفت تپه دهانه فرعی به سمت اتصال، جابه‌جایی لایه برشی از شاخه فرعی به سمت شاخه اصلی و توسعه ناحیه عمق آبشستگی در ورودی رودخانه اصلی می‌گردد.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x v_F} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x v_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F} \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} + \xi \frac{A_y u v}{x v_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F} \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \left( R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F} \end{aligned}$$

که در آنها،

$\rho$  = دانسیته سیال؛  $w, v, u$  = سرعت جریان، به ترتیب در راستای  $x, y, z$ ؛  $A_x, A_y, A_z$  مقادیر نسبت مساحت به ترتیب در راستای  $x, y, z$ ؛  $R$  و  $\xi$  مربوط به سیستم مختصات انتخابی؛  $R_{SOR}$  یک ترم مربوط به دانسیته است که به عنوان مثال برای مدل سازی تزریق جرم از خلل و فرج دیواره استفاده می شود. در سیستم مختصاتی کارترین مقادیر  $R$  و  $\xi$  به ترتیب برابر با ۱ و ۰ در نظر گرفته می شود. معادلات مومنتم: معادلات حرکت از حل معادلات ناویر-استوکس حاصل خواهند شد و به صورت روابط ۲ تا ۴ نوشته می شوند:

با توجه به غیرقابل تراکم بودن سیال، غیر متخلخل بودن محیط سیال، ثابت بودن مرزهای جامد، انتخاب راستای  $z$  به عنوان راستای ثقل (در این صورت تنها شتاب وارد بر جریان  $G_z$  بوده و در جهات دیگر مقادیر آنها برابر با صفر می باشد  $(G_x, G_y = 0)$  و استفاده از سیستم کارترین، معادلات ناویر-استوکس خلاصه می شوند که برای نمونه در راستای محور طولی ( $x$ ) رابطه خلاصه شده به صورت رابطه ۵ نوشته می شود:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (۵)$$

سیالات است که معادلات حاکم بر سیال را با تقریب های حجم محدود حل می کند. در این نرم افزار، تولید شبکه به دو روش است: کارترین و استوانه ای. FLOW-3D از یک شبکه متشکل از سلول های مستطیلی استفاده می کند و دارای مزایایی برای تولید آسان و نظم مناسب برای بهبود بخشیدن به شبیه سازی عددی است که به کمترین ذخیره حافظه احتیاج دارد.

معادلات حاکم: معادلات حاکم بر جریان در این نرم افزار شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتم و معادله پروفیل سطح آزاد است.

معادله پیوستگی جریان: معادله پیوستگی برای جریان غیر قابل تراکم به صورت رابطه ۱ نوشته می شود:

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

که در آن،

$\rho$  = دانسیته سیال؛  $w, v, u$  = سرعت جریان، به ترتیب در راستای  $x, y, z$ ؛  $A_x, A_y, A_z$  مقادیر نسبت مساحت به ترتیب در راستای  $x, y, z$ ؛  $R$  و  $\xi$  مربوط به سیستم مختصات انتخابی؛  $R_{SOR}$  یک ترم مربوط به دانسیته است که به عنوان مثال برای مدل سازی تزریق جرم از خلل و فرج دیواره استفاده می شود. در سیستم مختصاتی کارترین مقادیر  $R$  و  $\xi$  به ترتیب برابر با ۱ و ۰ در نظر گرفته می شود. معادلات مومنتم: معادلات حرکت از حل معادلات ناویر-استوکس حاصل خواهند شد و به صورت روابط ۲ تا ۴ نوشته می شوند:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y v^2}{x v_F} \\ = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho v_F} \end{aligned} \quad (۲)$$

بررسی عددی تأثیر زاویه تلاقی بر دینامیک جریان در...

آزاد برابر صفر ( $F = 0$ ) است.

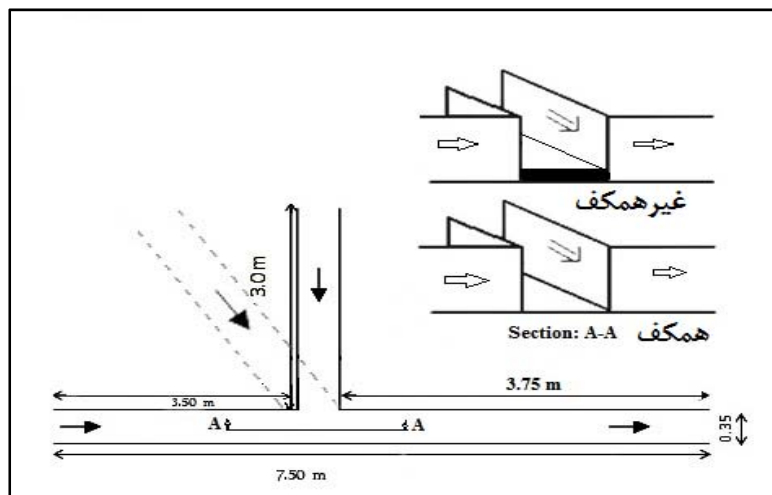
### واسنجی و صحت‌سنجی نرم‌افزار Flow 3D

برای واسنجی و صحت‌سنجی نرم‌افزار از نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) استفاده شد که برای تلاقی‌های همکف انجام گرفته بود (شکل ۱). تراز آب در بالادست تلاقی در هر دو شاخه و ابعاد ناحیه جداسدگی جریان از جمله پارامترهایی است که برای صحت‌سنجی و واسنجی نرم‌افزار به کار گرفته شدند. عرض کانال اصلی ۳۵ سانتی‌متر، عرض کانال فرعی ۲۵ سانتی‌متر و زاویه اتصال دو کانال ۹۰ درجه بود (شکل ۱).

معادلهٔ پروفیل سطح آزاد: ترکیب سیال به صورت ترم‌های یک تابع حجم سیال،  $F(X,y,z,t)$  تعریف می‌شود. این تابع معرف حجم واحد سیال بر واحد حجم است و به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{v_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(FA_x u) + R \frac{\partial}{\partial y}(FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z}(FA_z w) \right] = 0 \quad (6)$$

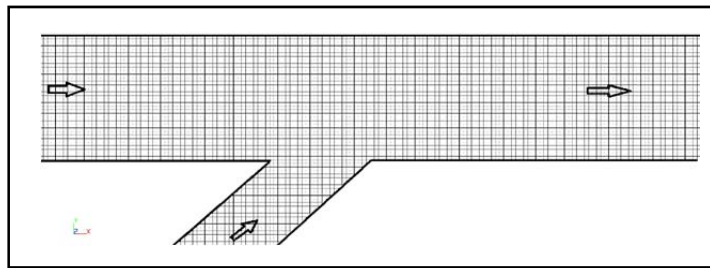
در این رابطه  $F$  وابسته به نوع مسئله‌ای است که مدل می‌شود. مسائل غیرقابل تراکم شامل یک سیال منفرد با سطح آزاد یا دو سیال با سطح مشترک است. برای یک سیال منفرد،  $F$  بیانگر جمع حجم اشغال شده با سیال است، بنابراین برای سیال برابر یک ( $F = 1$ ) و برای سطح



شکل ۱- موقعیت هندسی کانال‌های اصلی و فرعی در فلوم آزمایشگاهی و حالت‌های همکف و غیرهمکف تلاقی

و انتقال آن به نرم‌افزار شبیه‌سازی، شبکهٔ محاسباتی تولید شد. شبکه‌بندی بعد از حصول اطمینان از صحت نتایج و آزمون استقلال حل عددی از شبکهٔ محاسباتی صورت گرفت که در نهایت دارای ۴۱۰۰۰۰۰ سلول محاسباتی است. شکل ۲، نمونه‌ای از شبکهٔ محاسباتی ایجاد شده و تلاقی دو کانال با زاویهٔ ۴۵ درجه را نشان می‌دهد.

شرایط مرزی در ورودی شاخه‌های اصلی و فرعی به صورت دبی حجمی و در پایین‌دست تلاقی در کانال اصلی تراز سطح آب (عمق پایاب) به عنوان مرز خروجی در نظر گرفته شد. سطح آب سیمتریک و برای دیواره‌ها از شرط مرزی دیواره استفاده گردید. بعد از ساخت سه‌بعدی هندسه مدل در نرم‌افزار اتوکد



شکل ۲- نمایی از شبکه محاسباتی

۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه، چهار نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل ( $Q_r$ ) برابر با ۰/۲، ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷، چهار نسبت اختلاف رقوم بین شاخه فرعی و اصلی به عمق پایاب در کانال اصلی ( $R_z$ ) برابر با ۰، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ استفاده گردید.

### نتایج و بحث

#### تأثیر تغییر زاویه اتصال دو کانال بر الگوی جریان

در بررسی تأثیر تغییر زاویه اتصال دو کانال در محل تلاقی بر الگوی جریان، به این موارد پرداخته شده است: الگوی خطوط جریان در نزدیک بستر و نزدیک سطح آب، ابعاد ناحیه جداشدگی جریان، و تغییرات تراز آب در بالادست کانال‌های فرعی و اصلی.

#### تأثیر زاویه تلاقی دو کانال بر الگوی خطوط جریان

الگوی جریان (توزیع خطوط جریان) در محل تلاقی برای زاویه‌های مختلف در دو تراز نزدیک بستر (۲ سانتی‌متری بالای بستر) و نزدیک سطح آب (۲ سانتی‌متری زیر سطح آب) برای تلاقی‌های همکف و غیرهمکف بررسی گردید. شکل ۳، نتایج تأثیر زاویه تلاقی بر خطوط جریان را در نزدیک بستر و در نزدیک سطح آب برای تلاقی‌های همکف نشان می‌دهد. در اینجا ناحیه جداشدگی جریان در نزدیک بستر برای زاویه ۴۵ درجه مشاهده نمی‌شود (شکل ۳- الف) اما با افزایش زاویه تلاقی، علاوه بر شکل‌گیری این ناحیه، ابعاد آن نیز افزایش می‌یابد (شکل ۳- الف). در شکل ۳ می‌بینیم که

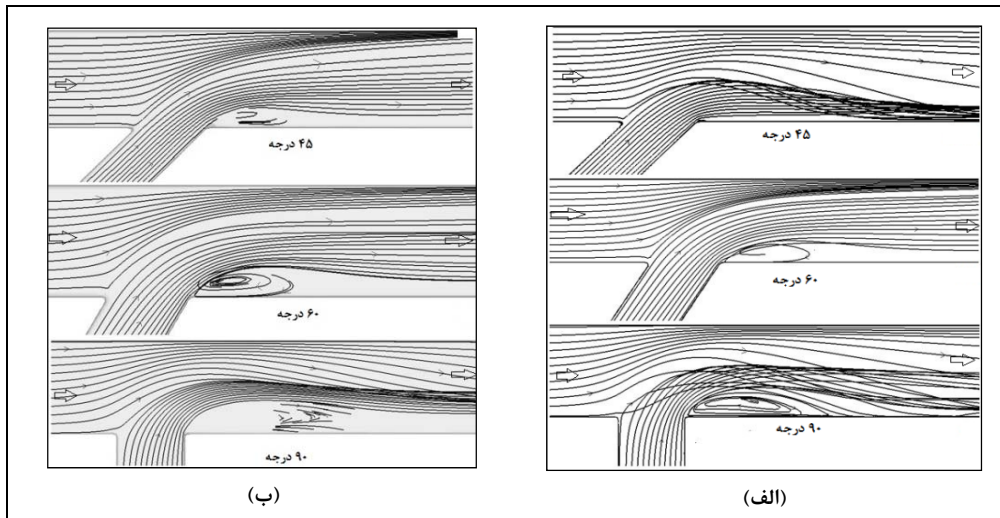
در این تحقیق، برای واسنجی مدل عددی از سه اندازه شبکه ۱، ۱/۱ و ۱/۲ سانتی‌متر، از سه زبری ۰/۰۰۷۵، ۰/۰۰۸۵ و ۰/۰۰۹۵ و از دو مدل تلاطمی  $K - \epsilon$  و RNG استاندارد استفاده شد که در مجموع ۱۸ آزمایش مختلف است. در مرحله واسنجی، خطای پیش‌بینی طول ناحیه جداشدگی جریان با مدل ریاضی در مش‌های ۱، ۱/۱ و ۱/۲ سانتی‌متری به ترتیب برابر با ۲/۳، ۳۳/۲ و ۳۶/۹۳ درصد، در ضریب زبری‌های ۰/۰۰۷۵، ۰/۰۰۸۵ و ۰/۰۰۹۵ به ترتیب برابر با ۱۴/۶۸، ۲/۲۹ و ۸/۲۳ درصد و برای دو مدل RNG و استاندارد میزان خطا به ترتیب برابر با ۲/۲۸ و ۷/۲۳ درصد است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شبکه ۱ سانتی‌متری، زبری ۰/۰۰۸۵ و مدل تلاطمی RNG با تعداد شبکه ۴۱۰۰۰۰۰ مناسب‌ترین حالتی بود که نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی همخوانی بیشتری دارد. بنابراین، برای صحت‌سنجی از مقادیر مذکور این پارامترها استفاده شد.

نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که اندازه شبکه مدل، زبری و نوع مدل تلاطمی به درستی انتخاب شده‌اند، به طوری که میزان خطای مدل در پیش‌بینی طول ناحیه جداشدگی جریان در نسبت دبی ۰/۲ برابر با ۱۲ درصد و در نسبت دبی‌های ۰/۳۳ و ۰/۵۰ برابر با ۴/۷ و ۱/۴ درصد است. میزان خطای مدل در پیش‌بینی تراز آب در بالادست کانال‌های اصلی و فرعی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی کمتر از ۴ درصد است. یادآوری می‌شود که واسنجی و صحت‌سنجی برای زاویه تلاقی ۹۰ درجه و عدد فرود ۰/۲۶ بوده است. در تحقیق حاضر از سه زاویه تلاقی

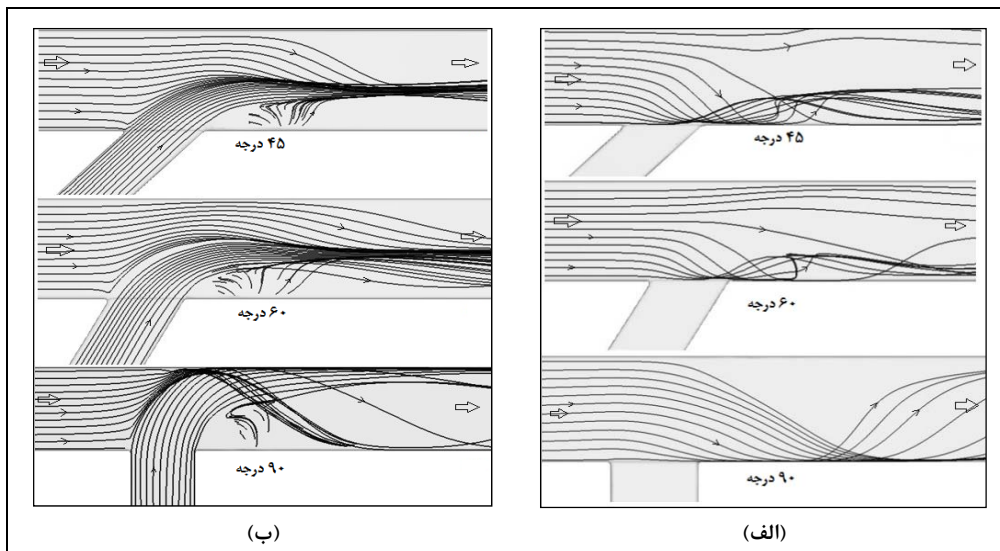
اصلی در نزدیک بستر به سمت گوشه پایین دست تلاقی منحرف می‌شود (شکل ۴). مقطع برش داده شده در ۱ سانتی‌متری بالای بستر است و از این‌رو در تلاقی‌های غیرهمکف به دلیل بیشتر بودن ارتفاع پله از رقوم مورد نظر برای برش، خطوط جریان در کانال فرعی مشاهده نمی‌شود. با افزایش زاویه تلاقی در اتصال‌های غیرهمکف، خطوط جریان کانال فرعی بعد از برخورد به دیواره مقابل به سمت ساحل راست تلاقی تغییر مسیر می‌دهد (شکل ۴-ب) که این مورد در تلاقی‌های همکف دیده نمی‌شود. به عبارتی دیگر، وجود اختلاف رقوم باعث افزایش مومنتم شاخه فرعی می‌گردد که در نتیجه آن جریان به ساحل مقابل برخورد می‌کند و این امر می‌تواند در فرسایش ساحل مقابل و تغییر مسیر تلاقی‌های غیرهمکف نیز تأثیر بگذارد. از این‌رو می‌توان از الگوهای جریان چنین نتیجه گرفت که عامل تغییر مکان و مسیر تلاقی در اتصال‌های همکف تپه رسوبی است، که در ناحیه جداشدگی اتفاق می‌افتد، و در تلاقی‌های غیر همکف برخورد جریان به ساحل مقابل و فرسایش آن است. انتظار می‌رود الگوهای فرسایش و رسوبگذاری در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف متفاوت باشد. مطالعات همتی و شفاعی بجستان (Hemmati & Shafai-Bejestan, 2009) نشان می‌دهد که برای شرایط جریان بالا (بالتر بودن نسبت دبی شاخه فرعی به دبی شاخه اصلی در بالادست تلاقی از ۰/۷۵، وجود اختلاف رقوم بستر بین دو کانال متلاقی، باعث افزایش آبشستگی و در شرایط جریان کم (نسبت دبی کمتر از ۰/۷۵ باعث کاهش آبشستگی نسبت به تلاقی‌های همکف می‌شود.

الگوی جریان در نزدیک سطح آب و نزدیک بستر در هر سه زاویه، به‌ویژه در زاویه ۴۵ درجه، متفاوت است؛ در زاویه ۴۵ درجه، ناحیه جداشدگی در سطح آب شکل می‌گیرد اما در نزدیک بستر تشکیل نمی‌شود. در سایر زاویه‌ها، با اینکه ناحیه جداشدگی در نزدیک بستر و نزدیک سطح آب شکل می‌گیرد ابعاد آن در سطح آب بیشتر است تا در نزدیک بستر. علاوه بر آن، کاملاً مشهود است که با افزایش زاویه، اندازه ناحیه جداشدگی جریان در نزدیک بستر و نزدیک سطح آب زیاد می‌شود که این امر باعث کاهش سطح مقطع عبوری جریان و در نتیجه افزایش سرعت خواهد شد زیرا با افزایش زاویه تلاقی، میزان نفوذ جریان شاخه فرعی در تلاقی افزایش می‌یابد که در نتیجه آن لایه اختلاط به سمت ساحل مقابل منتقل می‌شود و اندازه ناحیه جداشدگی جریان افزایش می‌یابد. اما نتایج به دست آمده از شکل ۴ حاکی از وجود اختلاف فاحش بین الگوهای جریان در نزدیک بستر و نزدیک سطح آب در تلاقی‌های غیرهمکف است. ناحیه جداشدگی جریان در این نوع تلاقی‌ها در نزدیک بستر برای هر سه زاویه مشاهده نمی‌شود (شکل ۴-الف) در حالی که در نزدیک سطح آب این ناحیه برای هر سه زاویه تشکیل می‌شود (شکل ۴-ب). این نتایج در راستای نتایج تحقیقات بابرون و همکاران (Biron *et al.*, 1996b) و وانگ و یان (Wang & Yan, 2007) است.

در تلاقی‌های غیرهمکف، یک جریان برخاستی از کف کانال به سمت بالا وجود دارد که درست در گوشه پایین دست تلاقی (همان محل تشکیل ناحیه جداشدگی) شکل می‌گیرد. این حالت با افزایش زاویه تلاقی شدت می‌گیرد به طوری که در زاویه ۹۰ درجه، کل جریان کانال



شکل ۳- تأثیر زاویه تلاقی بر الگوی جریان در تلاقی‌های همکف در نسبت دبی ۰/۶۷  
الف) نزدیک بستر و ب) سطح آب



شکل ۴- تأثیر زاویه تلاقی بر خطوط جریان در تلاقی غیرهمکف ( $R_z=0.3$ ) در نسبت دبی ۰/۶۷  
الف) نزدیک بستر و ب) سطح آب

جداشدگی جریان در نزدیک سطح آب در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف زیاد می‌شود (شکل ۵). اما شیب تغییرات در تلاقی‌های همکف بیشتر از شیب تغییرات در تلاقی‌های غیرهمکف است و با افزایش اختلاف رقم نسبتی دو کانال ( $R_z$ )، شیب تغییرات طول نسبی ناحیه جداشدگی کاهش می‌یابد. به‌طور نمونه در نسبت دبی ۰/۶۷، مقدار طول نسبی ناحیه جداشدگی در تلاقی‌های همکف برای دو زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه به‌ترتیب برابر با

تأثیر زاویه اتصال دو کانال بر ابعاد ناحیه جداشدگی جریان

نتایج تأثیر زاویه تلاقی بر نسبت طول ناحیه جداشدگی جریان به عرض آبراهه اصلی ( $R_L$ ) در نسبت‌های دبی مختلف در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف در دو تراز نزدیک سطح آب و نزدیک بستر به‌ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با افزایش زاویه تلاقی، طول نسبی ناحیه

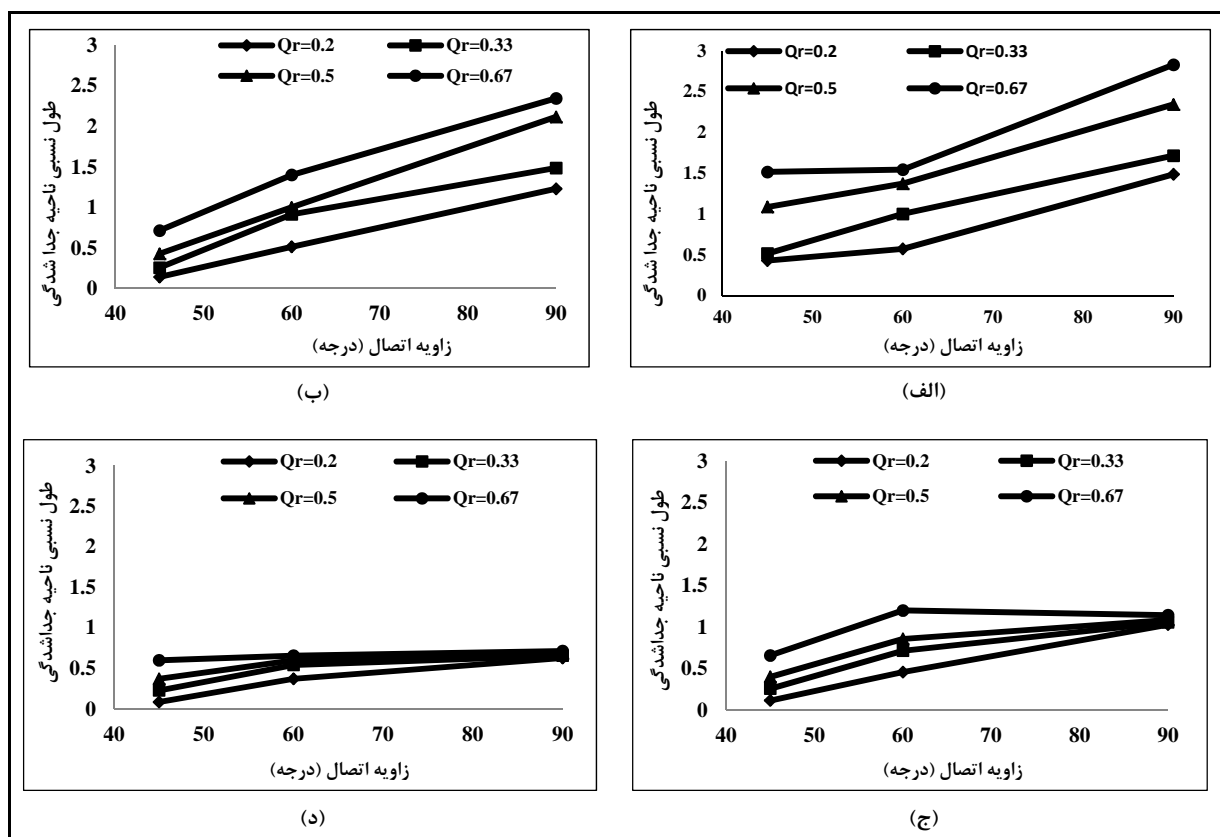


رقوم دو شاخه، مومنتم شاخه فرعی زیاد و جریان پس از برخورد به ساحل مقابل برگشت داده می‌شود. جریان برگشتی باعث کاهش طول ناحیه جداسازی جریان خواهد شد.

اما طول نسبی ناحیه جداسازی جریان در نزدیکی بستر روندی متفاوت با آن در نزدیکی سطح آب دارد. در تلاقی‌های غیرهمکف و در زاویه‌های مختلف در نزدیک بستر، ناحیه جداسازی وجود ندارد (که در بخش قبلی نیز به آن اشاره شد)؛ اما در تلاقی‌های همکف، طول نسبی ناحیه جداسازی جریان در نزدیک بستر نیز همانند طول نسبی ناحیه جداسازی جریان در نزدیکی سطح آب، با افزایش زاویه تلاقی افزایش می‌یابد با این تفاوت که ناحیه جداسازی در نزدیک بستر برای زاویه ۴۵ درجه در تلاقی‌های همکف شکل نگرفت (شکل ۶).

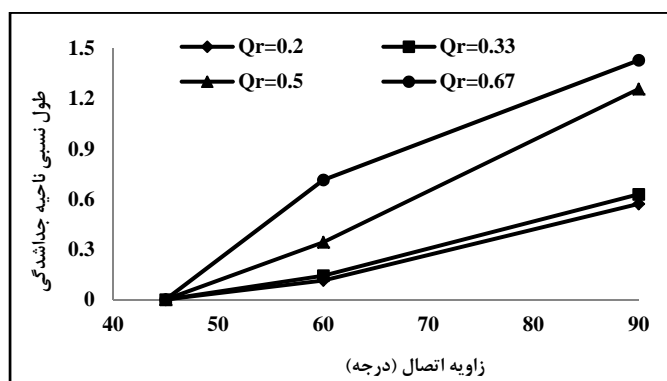
۱/۵۵ و ۲/۸ است (شکل ۵ - الف) اما در تلاقی‌های غیرهمکف ( $R_z=0.3$ )، این مقدار برای دو زاویه تقریباً یکسان و برابر با ۰/۶ است (شکل ۵ - د). به عبارتی دیگر می‌توان گفت که تأثیر زاویه تلاقی بر ابعاد ناحیه جداسازی جریان، به‌ویژه طول نسبی ناحیه جداسازی، در تلاقی‌های همکف بیشتر از تلاقی‌های غیرهمکف با اختلاف رقوم نسبی بیشتر از ۰/۱ ( $R_z > 0.1$ ) است. همچنین، نتایج بررسی‌های قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) نشان می‌دهد که در تلاقی‌های همکف، افزایش زاویه اتصال دو کانال باعث افزایش طول و عرض ناحیه جداسازی جریان در نزدیکی سطح آب می‌گردد.

با افزایش اختلاف رقوم نسبی دو کانال، تأثیر زاویه اتصال بر تغییرات طول نسبی ناحیه جداسازی جریان کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش اختلاف



شکل ۵- تأثیر زاویه تلاقی بر طول نسبی ناحیه جداسازی در نزدیک سطح آب

(الف)  $R_z=0$ ، (ب)  $R_z=0.1$ ، (ج)  $R_z=0.2$  و (د)  $R_z=0.3$

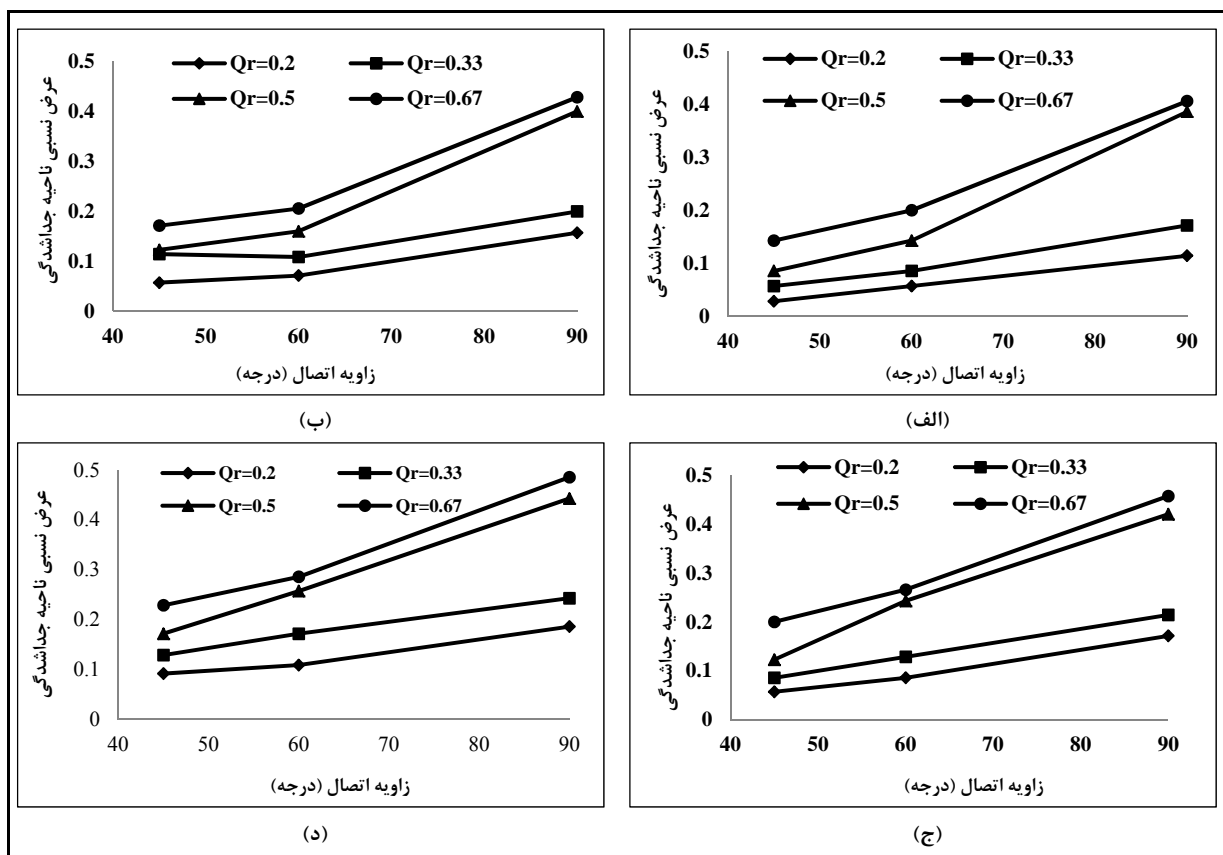


شکل ۶- تأثیر زاویه تلاقی بر طول بی‌بعد ناحیه جدا شدگی در نزدیک بستر برای  $R_z=0$

می‌یابد (شکل ۸).

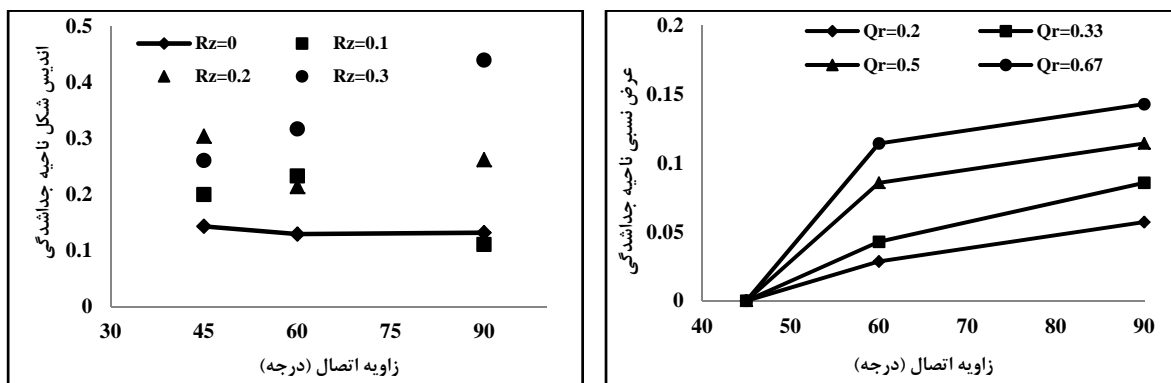
به‌طور کلی، از نظر طول و عرض بی‌بعد ناحیه جداشدگی جریان، زاویه ۴۵ درجه کمترین و زاویه ۹۰ درجه بیشترین مقدار را دارد. شاخص شکل ناحیه جداشدگی جریان (نسبت عرض ناحیه جداشدگی جریان به طول آن) در مقابل زاویه تلاقی برای تلاقی‌های همکف و غیرهمکف در شکل ۹ نشان می‌دهد که اندازه شاخص مذکور در تلاقی‌های غیرهمکف بیشتر است تا در تلاقی‌های همکف، به‌طوری‌که متوسط مقادیر شاخص در هر سه زاویه و نسبت‌های دبی مختلف برای تلاقی‌های همکف در حدود ۰/۱۲۷ و در تلاقی‌های غیرهمکف با اختلاف رقوم نسبی برابر با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۰/۲۴۵، ۰/۲۲۵ و ۰/۳۱ است. با افزایش زاویه تلاقی، شاخص شکل ناحیه جداشدگی در دو تلاقی همکف و غیرهمکف از روندی منظم تبعیت نمی‌کند و از این‌رو می‌توان گفت که اختلاف رقوم بستر نقش اساسی در تعیین اندازه شاخص شکل ناحیه جداشدگی دارد. در تحقیقات قبادیان و همکاران (Ghobadian et al., 2006) تغییرات شاخص شکل ناحیه جداشدگی نسبت به تغییرات نسبت دبی و عدد فرود جریان از روند خاصی تبعیت نمی‌کند و با افزایش ۵۰ درصد در زاویه تلاقی، میزان اندیس تنها ۴/۶ درصد کاهش می‌یابد.

نتایج تأثیر زاویه تلاقی دو کانال بر نسبت عرض ناحیه جداشدگی جریان به عرض آبراهه اصلی ( $R_H$ ) در نزدیک سطح آب در شکل ۷ نشان‌دهنده افزایش مقدار آن با افزایش زاویه تلاقی است. به‌عبارت دیگر، با افزایش زاویه تلاقی، پهنای بی‌بعد ناحیه جداشدگی جریان در نزدیک سطح آب افزایش می‌یابد. افزایش عرض ناحیه جداشدگی جریان در محل تلاقی، سطح مقطع عبوری جریان را کاهش می‌دهد. از این‌رو، جریان در محل اتصال مجبور است از عرض کمتری عبور کند که این امر باعث افزایش سرعت در این محدوده می‌شود و در نتیجه می‌تواند بر الگوهای فرسایش و رسوبگذاری نیز تأثیر گذارد. علاوه بر آن، اندازه ناحیه جداشدگی جریان می‌تواند بر سایر پارامترهای دینامیک جریان نیز در محل تلاقی تأثیرگذار باشد. کمترین مقدار پهنای ناحیه جداشدگی را در زاویه ۴۵ درجه و بیشترین آن را در زاویه ۹۰ درجه می‌توان دید. مقدار  $R_H$  در دو زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه برای تلاقی‌های همکف (شکل ۷- الف) به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۴۱ و برای تلاقی‌های غیرهمکف (اختلاف رقوم نسبی برابر با ۰/۳) به ترتیب برابر با ۰/۲۳ و ۰/۴۹ است (شکل ۷- د). همچنین، عرض بی‌بعد ناحیه جداشدگی جریان در نزدیک بستر نیز برای تلاقی‌های همکف با افزایش زاویه تلاقی افزایش



شکل ۷- تأثیر زاویه تلاقی بر عرض ناحیه جدشدگی در نزدیک سطح آب

(الف)  $R_z=0$ ، (ب)  $R_z=0.1$ ، (ج)  $R_z=0.2$  و (د)  $R_z=0.3$



شکل ۸- تأثیر زاویه تلاقی بر عرض ناحیه جدشدگی در

نزدیک بستر برای تلاقی همکف

شکل ۹- تأثیر زاویه تلاقی بر اندیس ناحیه جدشدگی جریان در

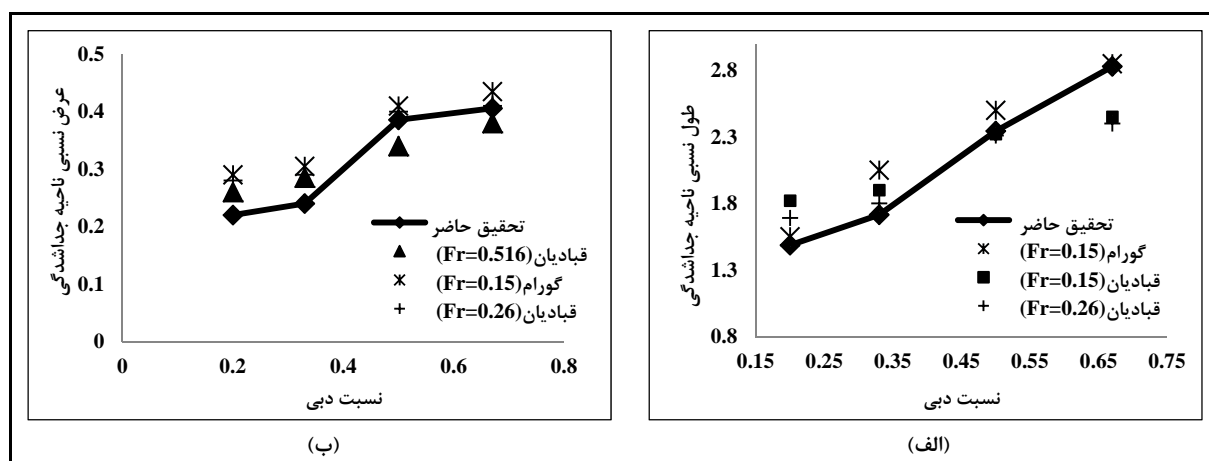
تلاقی های همکف و غیرهمکف در نسبت دبی ۰/۶۷

آمده از تحقیقات آنها با نتایج به دست آمده از این تحقیق مقایسه شد. نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ مربوط است به زاویه ۹۰ درجه، نسبت عرض شاخه فرعی به شاخه اصلی برابر با ۰/۷۱۴ و برای تلاقی های همکف. درصد خطای نسبی نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات قبادیان و

برخی محققان از جمله گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) و قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) با استفاده از نتایج بررسی های آزمایشگاهی و مشاهداتی، روابطی را برای تعیین ابعاد ناحیه جدشدگی جریان ارائه کرده اند که نتایج به دست

ریاضی به احتمال زیاد به خطای بصری در اندازه‌گیری ابعاد ناحیه جداسدگی ارتباط دارد که با تزریق مواد رنگی اندازه‌گیری می‌شود. علامت منفی نشان‌دهنده کم بودن مقادیر برآورد شده تحقیق حاضر نسبت به نتایج بررسی‌های محققان دیگر است. علاوه بر آن، درصد خطای نسبی در محاسبه عرض ناحیه جداسدگی جریان تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) ( $F_r=0.26$ ) کمتر از ۲۰ درصد و با نتایج تحقیقات گورام کمتر از ۱۵ درصد است.

همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) در محاسبه طول نسبی ناحیه جداسدگی جریان برای عدد فرود ۰/۲۶ برای نسبت‌های دبی ۰/۲، ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۶۷ به ترتیب برابر با ۱۲-، ۴/۷-، ۱/۴ و ۱۷/۸ درصد و برای عدد فرود ۰/۱۵ میزان خطا کمتر از ۱۸/۴ درصد است. در مقایسه با نتایج تحقیقات گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997)، درصد خطای نسبی برای نسبت دبی‌های مذکور به ترتیب برابر با ۱۸/۳-، ۹/۷-، ۱ و ۱۵/۴ درصد است. علت وجود تفاوت بین نتایج آزمایشگاهی و مدل



شکل ۱۰- مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق در خصوص تغییرات ابعاد ناحیه جداسدگی در مقابل تغییرات نسبت دبی با نتایج به دست آمده از محققان دیگر: (الف) طول نسبی ناحیه جداسدگی و (ب) عرض نسبی ناحیه جداسدگی

بالا آمدگی تراز آب در بالادست کانال اصلی ۶/۸ درصد (شکل ۱۱ - الف) و در تلاقی‌های غیرهمکف ( $R_z=0.3$ ) برابر با ۳/۲ درصد است (شکل ۱۱ - ب). این روند در کانال فرعی نیز مشابه کانال اصلی در بالادست تلاقی است. در اینجا تراز آب در کانال فرعی در تلاقی همکف ۶/۷ درصد و در تلاقی غیرهمکف ( $R_z=0.3$ ) ۳/۵ درصد نسبت به تراز آب در پایین دست تلاقی افزایش یافته است (شکل ۱۲). علاوه بر آن، تراز بی بعد آب در کانال فرعی در تلاقی غیرهمکف و در زاویه اتصال ۴۵ درجه در بیشتر حالات کمتر از ۱ است (شکل ۱۲ - ب)، زیرا علاوه بر اینکه ابعاد ناحیه جداسدگی جریان در زاویه ۴۵ درجه کمتر از دیگر

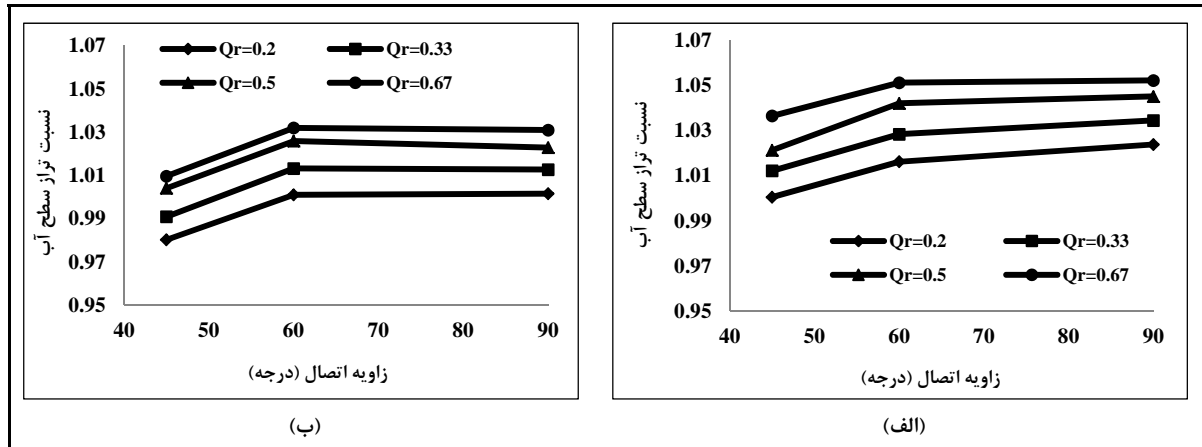
### تأثیر زاویه تلاقی بر تراز آب در بالادست کانال‌های اصلی و فرعی

نتایج تأثیر زاویه تلاقی دو کانال بر نسبت بی بعد تراز آب در کانال اصلی ( $R_{Hu}$ ) و در کانال فرعی ( $R_{Hl}$ )، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است. با افزایش زاویه تلاقی، تراز سطح آب در بالادست کانال‌های اصلی و فرعی در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش زاویه اتصال، پهنای ناحیه جداسدگی زیاد می‌شود و سطح مقطع عبوری جریان در محل تلاقی کاهش می‌یابد که این امر باعث افزایش تراز آب در بالادست کانال‌های اصلی و فرعی می‌گردد. حداکثر

بررسی عددی تأثیر زاویه تلاقی بر دینامیک جریان در...

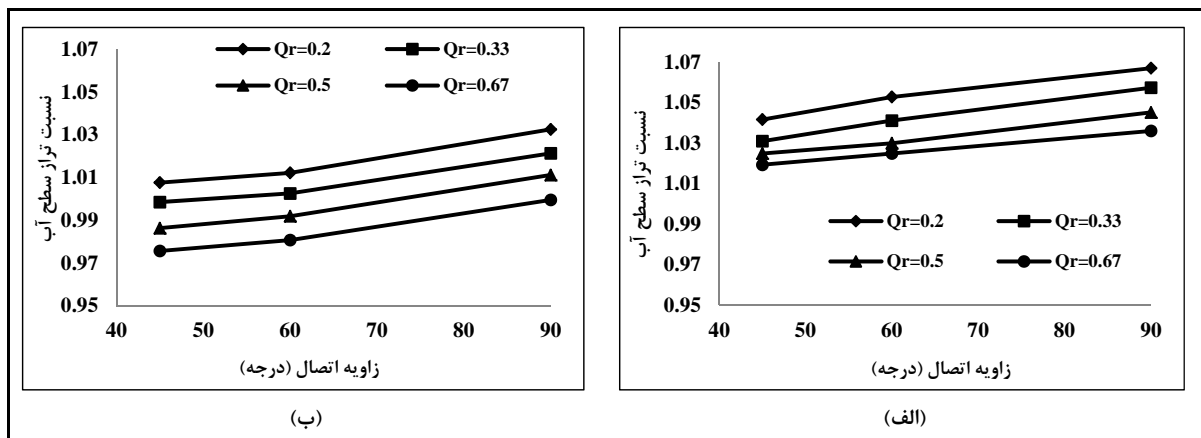
کانال اتفاق نمی‌افتد یا اگر اتفاق افتد قابل توجه نیست. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که برگشت آب در تلاقی‌های همکف بیشتر است تا در تلاقی‌های غیرهمکف.

زاویه‌هاست، افزایش اختلاف رقوم دو کانال باعث افزایش مومنتم در شاخه فرعی و در نتیجه افزایش سرعت در کانال فرعی می‌شود که به این دلایل برگشت آب در این



شکل ۱۱- تأثیر زاویه تلاقی دو کانال بر بالآمدگی تراز آب در بالادست کانال اصلی

(الف)  $R_z=0$  و (ب)  $R_z=0.3$



شکل ۱۲- تأثیر زاویه تلاقی دو کانال بر بالآمدگی تراز آب در بالادست کانال فرعی

(الف)  $R_z=0$  و (ب)  $R_z=0.3$

با هم یکسان اما در تلاقی‌های غیر همکف نایکسان است. در تلاقی‌های همکف، ناحیه جداسازی جریان در نزدیک بستر برای زاویه ۴۵ درجه مشاهده نمی‌شود اما در زاویه‌های ۶۰ و ۹۰ درجه این ناحیه قابل مشاهده است. در نزدیک سطح آب در هر سه زاویه، ناحیه جداسازی جریان ایجاد می‌شود.

- در هر سه زاویه تلاقی، ناحیه جداسازی در نزدیک بستر برای تلاقی‌های غیرهمکف مشاهده

## نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی اثر زاویه تلاقی دو کانال بر الگوی خطوط جریان، ناحیه جداسازی جریان و تراز آب در بالادست تلاقی در کانال‌های اصلی و فرعی در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف پرداخته شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که:

- الگوی جریان در نزدیک سطح آب با الگوی جریان در نزدیک بستر در تلاقی‌های همکف، جز در زاویه ۴۵ درجه،

- نمی‌شود اما در نزدیک سطح آب این پدیده قابل مشاهده  
است.
- ۴/۵، ۳ و ۲/۱ است.
- با افزایش زاویه تلاقی، تراز آب در بالادست کانال‌های  
اصلی و فرعی در اتصال‌های همکف تا ۷ درصد و در  
اتصال‌های غیرهمکف تا ۳/۵ درصد نسبت به تراز آب در  
پایین دست تلاقی در کانال اصلی افزایش می‌یابد.
- با افزایش زاویه تلاقی، ابعاد ناحیه جداشدگی جریان  
در تلاقی‌های همکف و غیرهمکف افزایش می‌یابد؛ در  
تلاقی‌های همکف متوسط طول ناحیه جداشدگی جریان  
در نزدیک سطح آب در زاویه ۹۰ درجه ۲/۳ برابر طول  
ناحیه جداشدگی جریان در نزدیک سطح آب در زاویه ۴۵  
درجه است. این مقدار در تلاقی‌های غیر همکف با اختلاف  
رقوم نسبی برابر با ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با
- با افزایش زاویه تلاقی، تراز آب در بالادست کانال‌های  
اصلی و فرعی در اتصال‌های همکف تا ۷ درصد و در  
اتصال‌های غیرهمکف تا ۳/۵ درصد نسبت به تراز آب در  
پایین دست تلاقی در کانال اصلی افزایش می‌یابد.
- اختلاف رقوم بستر بیشترین تأثیر را در افزایش شاخص  
شکل ناحیه جداشدگی جریان ایجاد می‌کند، به طوری که  
میزان آن در اختلاف رقوم نسبی برابر با ۰/۳ در حدود ۲/۵  
برابر حالت همکف است.

## مراجع

- Best, J. L. 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*. 35(3): 481-498.
- Best, J. L. and Reid, I. 1984. Separation zone at open – channel junctions. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 100(11): 1588-1594.
- Best, J. L. and Roy, A. G. 1991. Mixing- layer distortion at the confluence of channels of different depth. *Nature*. 350, 411-413.
- Biron, P. M., Roy, A. G., Best, J. L. and Boyer, C. J. 1993. Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels. *Geomorphology*. 8(2-3): 115-129.
- Biron, P. M., Roy, A. G. and Best, J. L. 1996a. Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences. *Exp. Fluids*. 21(6): 437-446.
- Biron, P. M., Best, J. and Roy, A. G. 1996b. Effect of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 122(12): 676-682.
- Biron, P. M., Richer, A., Kirkbride, D. A., Roy, G. A. and Han, S. 2002. Spatial patterns of topography at a river confluence. *Earth Sur. Proc. Land*. 28(9): 913-928.
- Borghae, S. M., Sakhaefar, S. M. and Daemi, A. 2003. Experimental investigation of canal junctions. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International River Engineering Conference*. Jan. 28-30. University of Shahid Chamran Ahvaz. Ahvaz, Iran. (in Persian).
- Borghae, S. M. and Nazari, A. 2003. Experimental investigation of sediment pattern at canal junctions. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Civil Engineering*. May 5-7. Isfahan University of Technology. Isfahan, Iran. (in Persian)
- Boyer, C., Roy, A. G. and Best, J. L. 2006. Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology. *Geophys. Res-Earth Surf*. 111(4): 1-22.
- Bryan, R B. and Kuhn, N. J. 2002. Hydraulic conditions in experimental rill confluences and scour in erodible soils. *Water Resour. Res*. 38(5): 21-1-21-13.
- Christodoulou, G. C. 1993. Incipient hydraulic jump of channel junction. *J. Hydraul. Eng-ASCE*. 119(3): 409-421.

- Dorđević, D. 2012. Application of 3D numerical models in confluence hydrodynamics modelling. Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Computational Methods in Water Resources, (CMWR). University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ghobadian, R., Shafai-Bajestan, M. and Mousavi-Jahromi, H. 2006. Experimental investigation of flow separation zone in river confluence in subcritical flow conditions. *Iran Water Resour. Res.* 2(2): 67-77. (in Persian)
- Ghobadian, R. 2008. The study effect of tailwater level changes on secondary currents at rectangular channels confluence with a three-dimensional models. Proceedings of the 4<sup>th</sup> National Congress of Civil Engineering. Tehran University. Tehran, Iran. (in Persian)
- Guillén-Ludeña, S., Franca, M. J., Cardoso, A. H. and Schleiss, A. J. 2016. Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles. *Geomorphology.* 255, 1-15.
- Gurram, S. K., Karki, K. S. and Hager, W. H. 1997. Subcritical junction flow. *J. Hydraul. Eng-ASCE.* 123(5): 447-455.
- Habibi, S., Rostami, M. and Mousavi, S. A. 2014. Numerical simulation of flow and sediment structure in confluence of rivers. *Iran-Watershed Manage. Sci. Eng.* 8(24): 19-29.
- Hemmati, M. 2008. Investigation of the effect of bed discordance on scouring at river confluence. M.Sc. Thesis. University of Shahid Chamran. Ahvaz, Iran. (in Persian)
- Hemmati, M. and Shafai-Bejestan, M. 2009. Comparing the sediment pattern in river confluence of equal and unequal bed levels. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering. May 11-13. University of Shiraz. Shiraz, Iran. (in Persian)
- 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. *Knowl. Soil Water J.* 25(3): 105-119. (in Persian)
- Lane, S. N., Bradbrook, K. F., Richards, K. S, Biron, P. M. and Roy, A. G. 2000. Secondary circulation cells in river channel confluences: measurement artefacts or coherent flow structures. *Hydrol. Process.* 14(11-12): 2047-2071.
- Mousavi-Jahromi H. and Godarizadeh, R. 2011. Numerical simulation of 3D flow pattern at open-channel junctions. *J. Irrig. Sci. Eng.* 34(2): 61-70. (in Persian)
- Nazari-Giglou, A., Jabbari- Sahebari, A., Shakibaenia, A. and Borghei, S. M. 2016. An experimental study of sediment transport in channel confluences. *Int. J. Sediment Res.* 31(1): 87-96.
- Riley, D. J. and Rhoads, B. L. 2011. Flow Structure and channel morphology at a natural confluent meander bends. *Geomorphology.* 129(3): 1-15.
- Rhoads, B. L. and Sukhodolov, A. N. 2004. Spatial and temporal structure of shear layer turbulence at a stream confluence. *Water Resour. Res.* 40(6): 1-13.
- Roy, A. G., Roy, R. and Bergeron, N. 1988. Hydraulic geometry and changes in flow velocity at a river confluence with coarse bed material. *Earth Surf. Proc. Land.* 13(7): 583-598.
- Shafai-Bejestan, M. and Hemmati, M. 2008. Scour depth at river confluence of unequal bed level. *J. Appl. Sci.* 8(9): 1766-1770
- Wang, X. G. and Yan, Z. M. 2007. Three-dimensional simulation for effects of bed discordance on flow dynamics at y-shaped open channel confluences. *J. Hydraul. Eng.* 19(5): 587-593.
- Weber, L. J., Shumate, E. D. and Mawer, N. 2001. Experiments on flow at a 90° open-channel junction. *J. Hydraul. Eng-ASCE.* 127(5): 340-350.

## **Numerical Investigation of the Effect of Junction Angle on Flow Dynamic at the Canal Junction of Concordance and Discordance Bed Level**

**T. Aghazade-Sure and M. Hemmati\***

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department of Agriculture Faculty, Urmia University, Urmia, Iran. Email: m.hemmati@urmia.ac.ir

Received: 24 August 2016, Accepted: 24 April 2017

Flow dynamics at river confluences can be characterized by six major regions of flow stagnation, flow deflection, flow separation, maximum velocity, flow recovery and distinct shear layers. The junction angle, discharge ratio channels and bed elevation differences are the parameters that affect the magnitude of these regions. Most of previous studies have paid attention to the concordance canal confluences, but few studies have been conducted on the bed discordance confluences. This study investigates the effect of junction angles on flow dynamics (separation zone, flow patterns and water level) in concordance and discordance bed levels of confluences by using a 3-D numerical model (Flow-3D). Important factors that are considered in this study are the four discharge ratios (ratio of tributary channel discharge to total discharge equal to 0.2, 0.33, 0.5 and 0.67), three angles (45, 60 and 90 degree) and variable river bed levels. The numerical simulation results showed good agreement with the experimental results. The results indicated that there are a lot of differences between dynamic of confluences with concordance and discordance bed levels and the junction angle plays an important role at the river confluences, especially in bed concordance junctions. Also as the angle increases, the flow separation zone dimensions increases; in such a way the separation zone length at 90 degree angle was 2.3 times of 45 degree in concordance bed level. Finally the value in case of relative bed discordance levels of 0.1, 0.2 and 0.33 were found to be 4.5, 3 and 2.1, respectively.

**Key words:** Flow Pattern, Flow Separation, Junction Angle, Numerical Simulation, Unequal Bed Junctions