

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر شیب جانبی دیوار کانال اصلی در تلاقی کانال‌های روباز بر ابعاد ناحیه جداشدگی

پیام خسروی نیا<sup>۱</sup>، علی حسین‌زاده دلیر<sup>۲</sup>، محمود شفاعی بجنستان<sup>۳</sup> و محمدرضا نیک‌پور<sup>\*</sup>

- ۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
  - ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
  - ۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده علوم و مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
  - ۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
- تاریخ دریافت: ۹۶/۶/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۳

### چکیده

مطالعه هیدرولیک جریان در تلاقی رودخانه‌ها و کانال‌های روباز از جنبه‌های مختلف شامل فرسایش، رسوب‌گذاری و ملاحظات زیست محیطی بااهمیت است. یکی از مهم‌ترین خصوصیات مورد توجه در محل تلاقی، ابعاد ناحیه جداشدگی جریان است. این ناحیه بلافاصله بعد از گوشه پایینی محل تلاقی در حین ورود جریان از شاخه فرعی به شاخه اصلی به وجود می‌آید. در پژوهش حاضر تأثیر شیب جانبی دیوار کانال اصلی بر ابعاد ناحیه جداشدگی جریان بررسی شده است. آزمایش‌ها به‌ازای چهار نسبت دبی، چهار عدد فرود پایاب و زاویه‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه اجرا شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از افزایش ابعاد ناحیه جداشدگی در اثر کاهش زاویه شیب جانبی دیوار کانال اصلی است. میانگین افزایش طول ناحیه جداشدگی به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به دیوار قائم به‌ترتیب برابر ۳/۵۵، ۳/۳۰ و ۵/۱۵ درصد به‌دست آمده است. مقادیر گفته شده برای پهنای ناحیه جداشدگی به‌ترتیب برابر ۸/۳۳، ۷/۲۲ و ۸/۱۰ درصد است. کاهش عدد فرود پایاب و افزایش نسبت دبی کانال فرعی به کانال اصلی نیز با افزایش ابعاد ناحیه جداشدگی همراه است. همچنین، متناسب با افزایش زاویه شیب جانبی، شاخص شکل ناحیه جداشدگی افزایش می‌یابد به‌طوری‌که میانگین مقادیر آن به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه به‌ترتیب برابر ۱۴۴/۰، ۱۴۷/۰، ۱۵۰/۰ و ۱۵۶/۰ به‌دست آمده است. علاوه بر آن، روابطی رگرسیونی برای محاسبه طول و پهنای ناحیه جداشدگی و بر اساس متغیرهای بی‌بعد تحقیق حاضر استخراج و به‌ازای شیب جانبی ۹۰ درجه با روابطی مقایسه شد که دیگر محققان به‌کار برده‌اند.

### واژه‌های کلیدی

تحلیل ابعادی، خصوصیات هیدرولیکی، دیوار شیب‌دار، رابطه رگرسیونی

### مقدمه

هیدرولیکی کانال اصلی نظیر سطح آب، پروفیل سرعت و مشخصات ناحیه جداشدگی جریان در پایین‌دست منطقه تلاقی، این پدیده پیچیده خواهد بود (Boyer et al., 2006). داشتن آگاهی کافی از فرسایش و رسوب‌گذاری در محدوده تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها مستلزم تعیین ابعاد ناحیه جداشدگی جریان است. از سوی دیگر، تعیین فاصله مطمئن

جریان در تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها در اثر برخورد دو جریان کانال اصلی و شاخه فرعی و اثر متقابل آنها با بستر به‌صورت سه بعدی است. بنابراین، با توجه به الگوی جریان نزدیک محل تلاقی در اثر همگرایی جریان شاخه فرعی و کانال اصلی، همچنین تأثیر جریان شاخه فرعی بر پارامترهای

با زاویه‌های ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه، روابط ۳ و ۴ را برای محاسبه ابعاد ناحیه جداسازی در شرایط زیر بحرانی بر اساس عدد فرود پایاب و زاویه اتصال کانال‌های اصلی و فرعی ارائه دادند. در این دو رابطه،  $F_d$  عدد فرود پایاب و  $\theta$  زاویه اتصال است.

$$\frac{H}{B_3} = 0.5 \left( F_d - \frac{2}{3} \right)^2 + 0.45 (Q_r)^{0.5} \left( \frac{\theta}{90} \right) \quad (3)$$

$$\frac{L}{B_3} = 3.8 \sin^3 \theta \left( 1 - \frac{1}{2} F_d \right) (Q_r)^{0.5} \quad (4)$$

وبر و همکاران (Weber *et al.*, 2001) مؤلفه‌های سه‌بعدی سرعت را در محدوده تلاقی ۹۰ درجه اندازه‌گیری کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که طول و پهنای ناحیه جداسازی در نزدیک سطح آب نسبت به کف بزرگ‌تر است و هرچه نسبت دبی کانال اصلی بالادست به دبی کل بیشتر شود، طول و پهنای ناحیه جداسازی کوچک‌تر خواهد شد. هوانگ و همکاران (Huang *et al.*, 2002) و بنکداری و همکاران (Bonakdari *et al.*, 2011) نتایجی مشابه گزارش کرده‌اند. قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) تأثیر عوامل نسبت دبی شاخه فرعی به دبی کل، نسبت پهنای کانال فرعی به پهنای کانال اصلی و عدد فرود جریان در پایین‌دست را بر ابعاد ناحیه جداسازی جریان در یک تلاقی ۹۰ درجه بررسی کردند و روابط ۵ و ۶ را برای محاسبه ابعاد ناحیه جداسازی به‌دست آوردند. در این دو رابطه،  $B_r$  نسبت پهنای کانال فرعی به پهنای کانال پایین‌دست است.

نتایج پژوهش این محققان همچنین نشان داد که افزایش نسبت دبی باعث افزایش طول و پهنای ناحیه جداسازی جریان می‌شود. در حالی که افزایش عدد فرود پایاب و نسبت پهنای ابعاد این ناحیه را کاهش می‌دهد.

سازه‌های هیدرولیکی مانند ایستگاه پمپاژ و آبگیرها از محل تلاقی بستگی به ابعاد ناحیه جداسازی جریان دارد (Ghobadian *et al.*, 2006). بست (Best, 1987) دینامیک جریان در محل تلاقی رودخانه‌ها را به‌صورت شماتیک بر اساس شکل ۱ نشان داد. بست و رید (Best & Reid, 1984) الگوی جریان را در یک تلاقی با چهار زاویه اتصال متفاوت ۱۵، ۴۵، ۷۰ و ۹۰ درجه به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. نتایج پژوهش این محققان نشان داد که با افزایش نسبت دبی، طول و پهنای ناحیه جداسازی جریان افزایش می‌یابد ولی به‌ازای نسبت‌های دبی مختلف، شاخص شکل ناحیه جداسازی (نسبت پهنای به طول ناحیه جداسازی) حول مقدار میانگین ۰/۱۹ باقی می‌ماند. آنها همچنین به‌ازای زاویه ۹۰ درجه دو رابطه بدون بعد ۱ و ۲ را برای محاسبه طول ( $L$ ) و پهنای ناحیه جداسازی ( $H$ ) ارائه دادند. در دو رابطه ۱ و ۲،  $Q_r$  نسبت دبی کانال فرعی به کانال پایین‌دست و  $B_3$  عرض کانال پایین‌دست است.

$$\frac{L}{B_3} = 2.587 + 1.025 \ln(Q_r) \quad (1)$$

$$\frac{H}{B_3} = 0.506 + 0.205 \ln(Q_r) \quad (2)$$

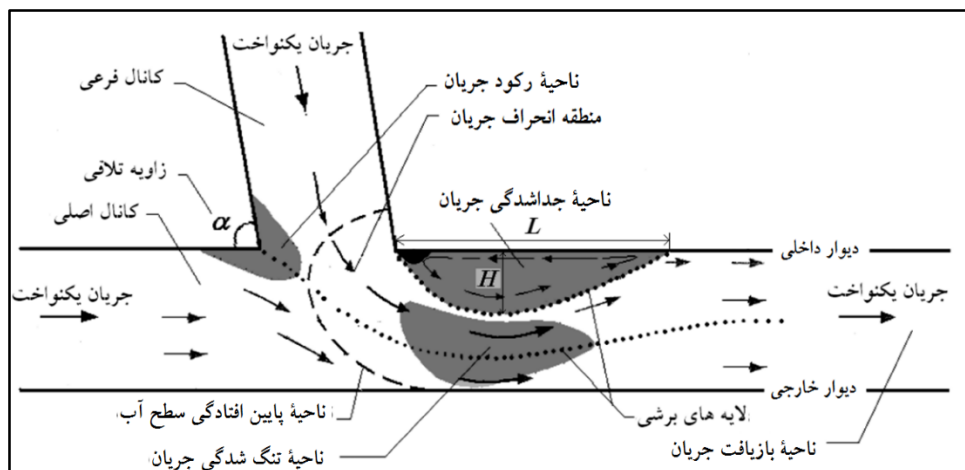
نتایج آزمایش‌های بیرون و همکاران (Biron *et al.*, 2004) روی تلاقی کانال‌های غیر همکف نشان داد که اختلاف رقوم بستر در محدوده تلاقی تأثیر محسوسی بر الگوی جریان دارد به‌طوری‌که در نزدیک بستر اثری از ناحیه جداسازی جریان دیده نمی‌شود ولی در سطح آب این ناحیه به‌وضوح دیده می‌شود و حتی بردارهای سرعت معکوس نیز قابل دیدن است. گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) با مطالعه هیدرولیک جریان روی یک اتصال

$$\frac{H}{B_3} = 0.429(Q_r)^{0.354} e^{-0.457Fr_d} (B_r)^{-0.207} \quad (5)$$

$$\frac{L}{B_3} = 1.713(Q_r)^{0.846} - 0.265 \ln(Fr_d) - 0.999(B_r) + 1.051 \quad (6)$$

(2015) پروفیل سطح آب را در تلاقی کانال‌های روباز به‌ازای زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه و در شرایط جریان‌های زیر بحرانی و فوق بحرانی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کرد و نشان داد که افزایش سطح آب در بالادست تلاقی در حالت برقراری جریان زیر بحرانی و بروز امواج ضربه‌ای مورب در کانال پایین‌دست در شرایط جریان فوق بحرانی است. بررسی منابع وسیع در زمینه هیدرولیک جریان در محل تلاقی کانال‌ها، نشان می‌دهد که مطالعات آزمایشگاهی و عددی در فلوم‌های مستطیلی شکل بوده است در حالی‌که کانال‌های اجرایی عمدتاً با مقطع دوزنقه‌ای طراحی و ساخته می‌شوند و سواحل رودخانه‌ها نیز در حالت طبیعی شیب جانبی دارند. از طرفی، شیب سواحل باعث تغییر الگوی سه‌بعدی جریان در محل تلاقی نسبت به دیوار قائم می‌شود. بررسی میزان این تغییرات روی ابعاد نواحی جداشدگی در اثر مایل کردن دیوار کانال اصلی با زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه، در مقایسه با دیوار قائم، هدف اصلی این مطالعه است.

موسوی جهرمی و گودرزی‌زاده (Mousavi-Zadeh & Jahromi & Goudarizadeh, 2011) و گوهری (Gohari, 2013) با استفاده از نرم‌افزار Fluent، خصوصیات هیدرولیکی جریان از جمله ابعاد ناحیه جداشدگی جریان و تنش برشی بستر را در محدوده تلاقی ۹۰ درجه، به‌ازای نسبت‌های دبی مختلف بررسی کردند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که با افزایش نسبت دبی کانال اصلی بالادست به دبی کل، ابعاد ناحیه جداشدگی جریان کاهش می‌یابد؛ همچنین مشخص شد که دقت نرم‌افزار Fluent در شبیه‌سازی الگوی جریان در محل تلاقی قابل قبول است. دوردویچ (Dordevic, 2012) با استفاده از نرم‌افزار SSIM2، جریان در تلاقی کانال‌ها را شبیه‌سازی کرد. نتایج تحقیق او نشان داد که مومنتم انتقالی از شاخه فرعی به کانال اصلی، تغییرات ناحیه جداشدگی جریان و پروفیل سرعت به‌طور رضایت‌بخشی شبیه‌سازی می‌شود. با این همه، مقادیر سرعت به‌ویژه سرعت‌های عمودی کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. کوهلو (Cohelo,



شکل ۱- الگوی جریان در محل تلاقی کانال‌های باز (Best, 1987)  
 Fig. 1. Flow pattern at open-channels junction (Best, 1987)

**مواد و روش‌ها****تحلیل ابعادی**

برای دستیابی به هدف‌های این پژوهش، متغیرهای بدون بعد تأثیرگذار بر ابعاد ناحیه جداشتگی به صورت روابط ۷ و ۸ نوشته می‌شود:

$$\frac{L}{B_3} = f_1 \left( \frac{Q_2}{Q_3}, Fr_3, S_0, \alpha, \theta, Re, We \right) \quad (7)$$

$$\frac{H}{B_3} = f_2 \left( \frac{Q_2}{Q_3}, Fr_3, S_0, \alpha, \theta, Re, We \right) \quad (8)$$

که در آنها،

L و H به ترتیب طول و حداکثر پهنای ناحیه جداشتگی و  $Q, B, Fr, S_0, \alpha, \theta, Re$  و We به ترتیب دبی جریان، پهنای کف کانال، عدد فرود، شیب کف کانال، زاویه اتصال، زاویه شیب جانبی دیوار کانال اصلی، عدد رینولدز و عدد وبر هستند. اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب مربوطند به کانال بالادست تلاقی، کانال فرعی و کانال پایین دست تلاقی. برای ابعاد فلوم آزمایشگاهی، نیروهای لزوجت و کشش سطحی اثر ناچیزی دارند و از این رو در این پژوهش از تأثیر اعداد رینولدز و وبر صرف نظر شد. همچنین، شیب کف هر دو کانال افقی و زاویه اتصال کانال‌ها در تمام آزمایش‌ها برابر ۹۰ درجه در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، دو رابطه ۷ و ۸ به صورت روابط ۹ و ۱۰ تغییر می‌یابند:

$$\frac{L}{B_3} = f_1 (Q_r, Fr_3, \theta) \quad (9)$$

$$\frac{H}{B_3} = f_2 (Q_r, Fr_3, \theta) \quad (10)$$

بنابراین در این پژوهش، اثر سه متغیر بدون بعد نسبت دبی، عدد فرود کانال پایین دست و زاویه شیب جانبی کانال اصلی بر ابعاد ناحیه جداشتگی بررسی شده است.

**روش اجرای آزمایش‌ها**

آزمایش‌های پژوهش حاضر در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز اجرا شد. شکل ۲ نمایی کلی از فلوم‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، کانال اصلی به طول ۶، ارتفاع ۰/۵ و پهنای ۰/۸ متر و کانال فرعی عمود بر کانال اصلی به طول ۵، عمق ۰/۵ و پهنای ۰/۲۴

متر است. در خلال اجرای آزمایش‌ها، به خاطر استقرار دیوار کانال اصلی با زاویه‌های شیب جانبی مختلف، پهنای کانال اصلی از ۰/۸ به ۰/۵ متر کاهش داده شد. تنظیم دبی در کانال‌ها بدین صورت بود که ابتدا دبی مورد نظر در کانال اصلی با کنترل شیر فلکه نصب شده روی لوله انتقال جریان تثبیت شد و در این زمان، کانال فرعی مانند کانال جانبی بدون خروجی عمل می‌کرد که جریان در آن ساکن بود. پس از آن، شیر فلکه کانال فرعی به تدریج باز شد تا نسبت دبی مورد نظر حاصل شود. برای تنظیم عمق پایاب تیرک‌های آب‌بند<sup>۱</sup> به ارتفاع ۱ سانتی‌متر و از دستگاه عمق‌سنج آلتراسونیک با دقت  $\pm 1$  میلی‌متر به کار گرفته شد. برای جلوگیری از اغتشاش جریان، در ابتدای کانال‌های اصلی و فرعی از آرام‌کننده‌های جریان و برای اندازه‌گیری دبی جریان از سرریز مستطیلی نصب شده در حوضچه انتهایی کانال اصلی استفاده شد. برای ایجاد شیب جانبی، صفحات پلکسی‌گلاس نصب شدند. این صفحات به گونه‌ای در کانال اصلی قرار داده شدند که ضمن ایجاد زاویه شیب جانبی مورد نظر، پهنای کانال نیز برابر ۰/۵ متر باشد. شکل ۳ مدل آزمایشگاهی پژوهش حاضر را به‌ازای زاویه‌های شیب جانبی ۴۵ و ۹۰ درجه نشان می‌دهد. پس از برقراری جریان و تنظیم نسبت دبی و عدد فرود مورد نظر، با تزریق ماده رنگی از بالادست گوشه تلاقی در کانال فرعی، طول و پهنای ناحیه جداشتگی اندازه‌گیری شد. گفتنی است که حداکثر طول و پهنای مشاهده شده در حین تزریق

این رو در پژوهش حاضر نیز سعی شد با کنترل عمق پایاب (با استفاده از تیرک‌های آب‌بند) عدد فرود پایاب در محدوده مذکور قرار گیرد تا از این لحاظ مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات دیگر محققان امکان‌پذیر باشد. علاوه بر آن، کانال‌های روباز با مقطع دوزنقه‌ای عمدتاً با زاویه‌های شیب جانبی  $33/69$  درجه  $(Z=1.5)$  و  $45$  درجه  $(Z=1)$  اجرا و بهره‌برداری می‌شوند. ایجاد زاویه  $33/69$  درجه در فلوم آزمایشگاهی میسر نشد. بنابراین، زاویه‌های شیب جانبی برای پژوهش حاضر در محدوده  $45-90$  درجه با گام افزایشی  $15$  درجه در نظر گرفته شد.

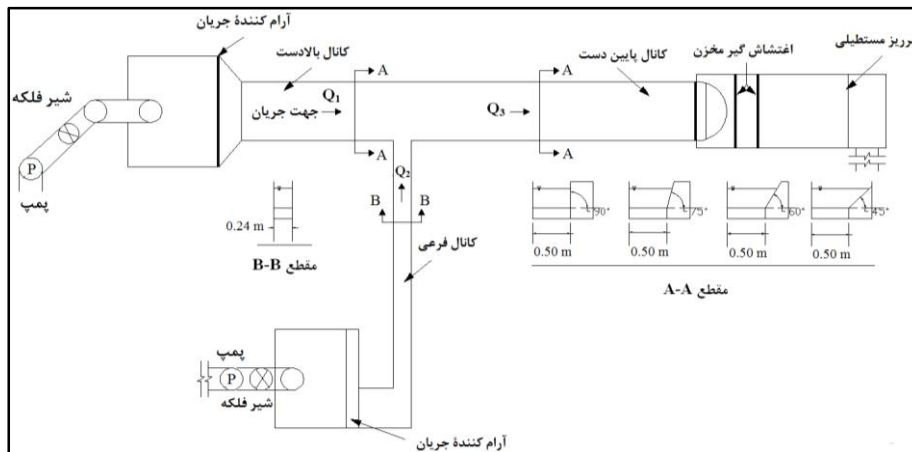
مواد رنگی مدنظر قرار گرفت. دامنه تغییرات متغیرهای بدون بعد به‌کار رفته در پژوهش حاضر در جدول ۱ ارائه شده است.

در خصوص محدوده‌های انتخاب شده باید گفت که نسبت دبی کانال فرعی به دبی کانال اصلی به‌طور معمول، کوچک‌تر از ۱ است و در تحقیقات مشابه نیز این نسبت در محدوده  $0/8-0/2$  در نظر گرفته شده است. مقادیر انتخابی برای نسبت دبی در تحقیق حاضر نیز  $(0/194-0/552)$  در محدوده مذکور قرار دارد. در مطالعات آزمایشگاهی مشابه، عدد فرود پایاب در محدوده  $0/51-0/14$  قرار داشته است و از

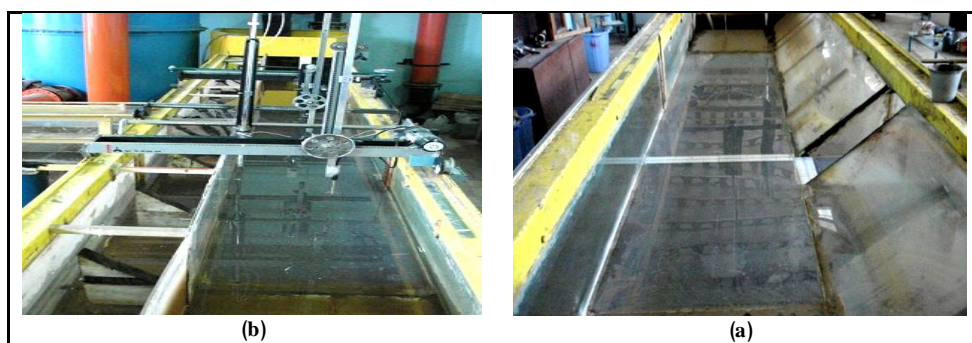
جدول ۱- محدوده متغیرهای به‌کار رفته در پژوهش حاضر (۶۴ آزمایش)

Table 1. The range of used variables in this research (64 experiments)

Variation range	Variable
0.194, 0.276, 0.4, 0.552	$Q_f$
0.124-0.270	$Fr_3$
$45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90$	$\theta$



شکل ۲- نمای کلی از فلوم‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر  
Fig. 2. Schematic view of the flumes used in this research



شکل ۳- مدل آزمایشگاهی پژوهش حاضر. الف) شیب جانبی ۴۵ درجه و ب) شیب جانبی ۹۰ درجه  
 Fig. 3. Experimental model of the present study a): side slope of 45°, b): side slope of 90°

### نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، تأثیر متغیرهای عدد فرود پایاب، نسبت دبی و زاویه شیب جانبی بر طول ناحیه جداشدگی (L) و پهنای ناحیه جداشدگی (H) بررسی شد که به تفکیک نتایج ارائه می‌شوند.

#### طول ناحیه جداشدگی

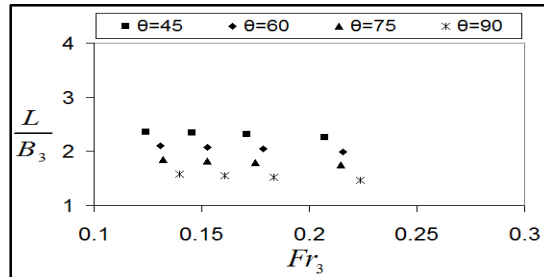
در شکل‌های ۴ تا ۷، نمودارهای بی‌بعد طول ناحیه جداشدگی جریان نسبت به تغییرات عدد فرود پایاب، به‌ازای زاویه‌های مختلف شیب جانبی و برای نسبت‌های دبی مختلف رسم شده است. با توجه به شکل‌های مذکور، با تغییر دیوار جانبی کانال اصلی از حالت قائم به مایل یعنی با کاهش زاویه شیب جانبی، طول ناحیه جداشدگی افزایش می‌یابد. در واقع به دلیل اینکه پهنای سطح آزاد آب در کانال‌های اصلی با دیواره مایل در شرایط هیدرولیکی یکسان نسبت به دیواره قائم بزرگ‌تر است، جریان ورودی از کانال فرعی در این حالت فرصت بیشتری برای ورود به کانال اصلی دارد و از این‌رو مسافت بیشتری باید طی شود تا جریان به حالت بازیافت درآید. این مسئله در مبحث فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه بااهمیت است. زمانی که طول ناحیه جداشدگی افزایش می‌یابد رسوباتی که از محل تلاقی فرسایش می‌یابند و به پایین‌دست می‌روند در فاصله‌ای طولانی‌تر نشست می‌کنند و از این‌رو تغییرات ریخت‌شناختی محسوس در پایین‌دست

تلاقی به وجود نمی‌آید. در صورتی که در حالت دیوار قائم، به دلیل اینکه ناحیه رسوب‌گذاری عموماً بلافاصله بعد از تلاقی ایجاد می‌شود، حجم رسوبات انباشته شده زیادی به همراه خواهد داشت. این مسئله باعث می‌شود سطح مقطع جریان در محدوده مذکور به مرور کاهش و سرعت جریان افزایش یابد که در نتیجه آن، ناحیه حداکثر سرعت و لایه برشی به سمت دیوار مقابل تلاقی پیشروی می‌کند و با گذر زمان به ساحل مقابل تلاقی آسیب می‌رساند. دیده می‌شود که با افزایش نسبت دبی، طول ناحیه جداشدگی افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش نسبت دبی، مومنتم و سرعت جریان در کانال فرعی افزایش می‌یابد و از این‌رو جریان کانال فرعی سهولت بیشتری در کانال اصلی نفوذ می‌کند. این قدرت نفوذ بیشتر، به افزایش طول ناحیه جداشدگی جریان می‌انجامد. علاوه بر آن، افزایش عدد فرود کاهش نسبی طول ناحیه جداشدگی را به همراه داشته است. در واقع، افزایش عدد فرود پایین‌دست در اثر افزایش سرعت جریان ورودی از کانال اصلی به درون محدوده تلاقی است و این امر کاهش طول ناحیه جداشدگی را به دنبال داشته است. به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان زاویه شیب جانبی، نسبت دبی و عدد فرود پایاب بر طول ناحیه جداشدگی، از رگرسیون گیری چند متغیره در محیط نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۶ استفاده شد. و سرانجام اینکه رابطه

بدون بعد ۱۱ با بیشترین ضریب تعیین ( $R^2=0.92$ ) و استخراج گردید. (MAE=0.096)

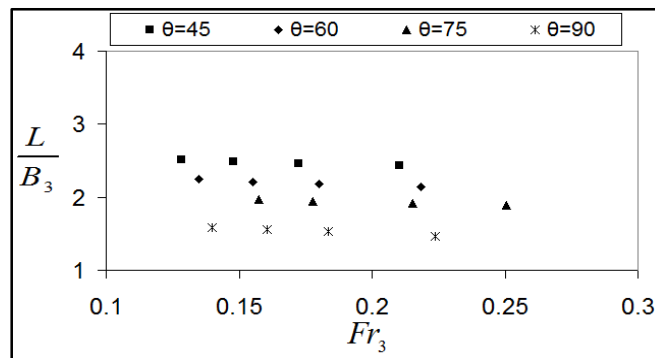
$$\frac{L}{B_3} = 2.022Q_r^{0.264} Fr_3^{-0.146} (\sin\theta)^{-0.807} \quad (11)$$

کمترین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE=0.109) و میانگین قدر مطلق خطا



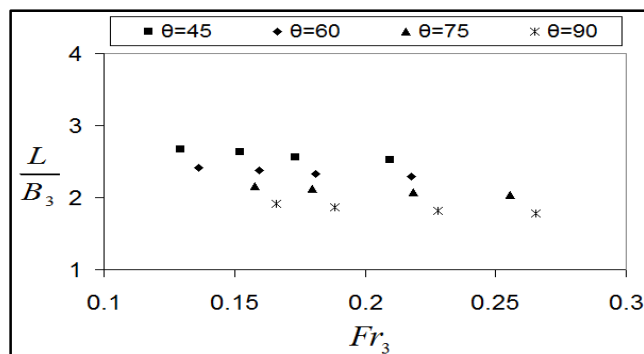
شکل ۴- تغییرات بدون بعد طول ناحیه جدانشدگی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی ( $Q_r=0.194$ )

Fig. 4. Dimensionless variations of flow separation zone length for various Froude numbers and side slope angels ( $Q_r=0.194$ )



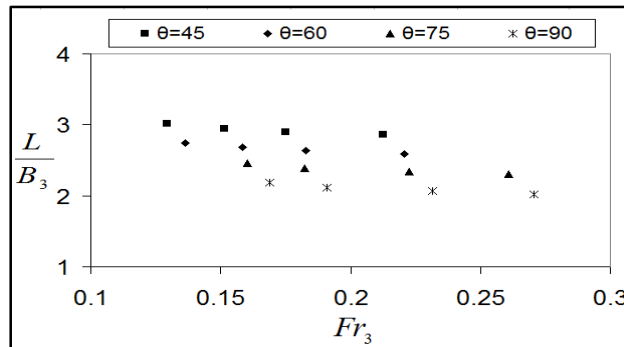
شکل ۵- تغییرات بدون بعد طول ناحیه جدانشدگی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی ( $Q_r=0.276$ )

Fig. 5. Dimensionless variations of flow separation zone length for various Froude numbers and side slope angels ( $Q_r=0.276$ )



شکل ۶- تغییرات بدون بعد طول ناحیه جدانشدگی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی ( $Q_r=0.4$ )

Fig. 6. Dimensionless variations of flow separation zone length for various Froude numbers and side slope angels ( $Q_r=0.4$ )



شکل ۷- تغییرات بدون بعد طول ناحیه جداسدگی جریان به‌ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی ( $Q_r=0.552$ )

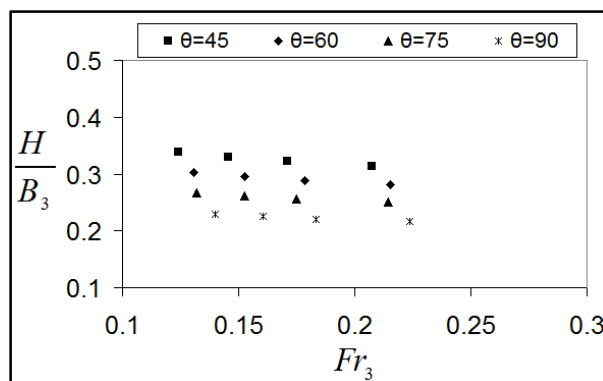
Fig. 7. Dimensionless variations of flow separation zone length for various Froude numbers and side slope angels ( $Q_r=0.194$ )

پایاب با کاهش پهنای ناحیه جداسدگی. برای بررسی تأثیر هم‌زمان متغیرهای مذکور بر پهنای ناحیه جداسدگی، رابطه ۱۲ با بیشترین ضریب تعیین ( $0/94$ ) و کمترین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا ( $0/13$ ) و میانگین قدر مطلق خطا ( $0/11$ ) استخراج شد.

$$\frac{H}{B_3} = 0.318Q_r^{0.291}Fr_3^{-0.146}(\sin\theta)^{-0.629} \quad (12)$$

### پهنای ناحیه جداسدگی

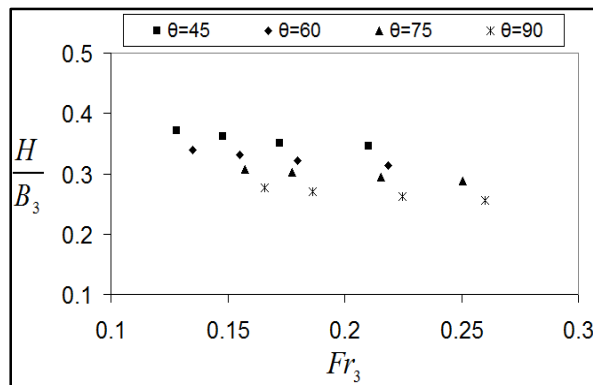
در شکل‌های ۸ تا ۱۱، نمودارهای بی‌بعد پهنای ناحیه جداسدگی جریان نسبت به تغییرات عدد فرود پایاب، به‌ازای زاویه‌های مختلف شیب جانبی و برای نسبت‌های دبی مختلف رسم شده است. با توجه به شکل‌های مذکور، رفتاری مشابه با رفتار طول ناحیه جداسدگی مشاهده می‌شود به‌طوری‌که کاهش زاویه شیب جانبی و افزایش نسبت دبی با افزایش پهنای ناحیه جداسدگی همراه است و افزایش عدد فرود



شکل ۸- تغییرات بدون بعد پهنای ناحیه جداسدگی جریان به‌ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی ( $Q_r=0.194$ )

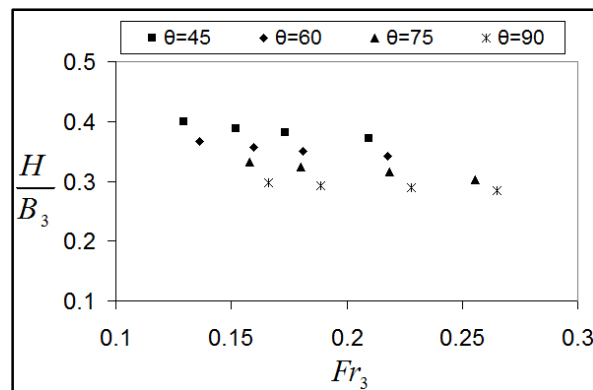
Fig. 8. Dimensionless variations of flow separation zone width for various Froude numbers and side slope angels ( $Q_r=0.194$ )





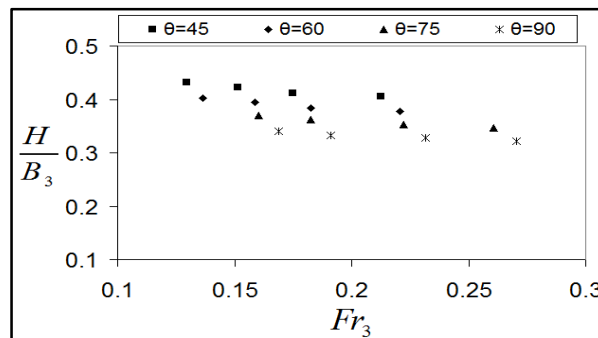
شکل ۹- تغییرات بدون بعد پهنای ناحیه جداسدگی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Q<sub>r</sub>=0.276)

Fig. 9. Dimensionless variations of flow separation zone width for various Froude numbers and side slope angels (Q<sub>r</sub>=0.276)



شکل ۱۰- تغییرات بدون بعد پهنای ناحیه جداسدگی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Q<sub>r</sub>=0.4)

Fig. 10. Dimensionless variations of flow separation zone width for various Froude numbers and side slope angels (Q<sub>r</sub>=0.4)



شکل ۱۱- تغییرات بدون بعد پهنای ناحیه جداسدگی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Q<sub>r</sub>=0.552)

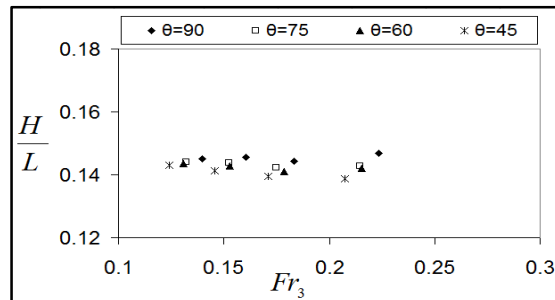
Fig. 11. Dimensionless variations of flow separation zone width for various Froude numbers and side slope angels (Q<sub>r</sub>=0.552)

نسبت‌های دبی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل‌های مذکور، تغییرات شاخص شکل نسبت به تغییرات نسبت دبی و عدد فرود پایاب از روندی خاص تبعیت نمی‌کند و از این لحاظ این

### شاخص شکل ناحیه جداسدگی

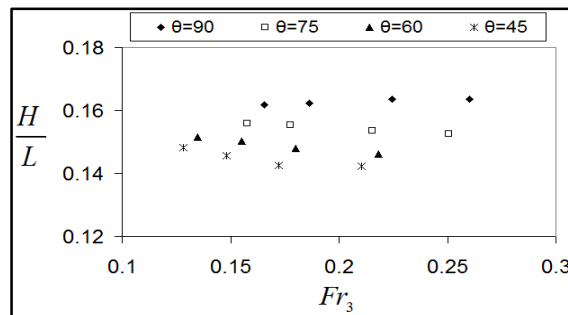
در شکل‌های ۱۲ تا ۱۵، تغییرات شاخص شکل ناحیه جداسدگی جریان نسبت به عدد فرود پایاب، به ازای زاویه‌های مختلف شیب جانبی و برای

نتیجه با نتایج تحقیق قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) هم‌خوانی دارد. همچنین، مقدار میانگین شاخص شکل ناحیه جداسازی به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه جداسازی به‌ازای زاویه‌های مختلف شیب جانبی دیوار کانال هم‌زمان با افزایش زاویه شیب جانبی دیوار کانال اصلی است.



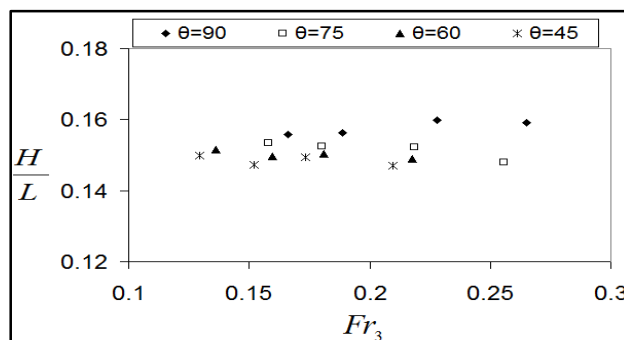
شکل ۱۲- تغییرات شاخص شکل ناحیه جداسازی جریان به‌ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Qr=0.194)

Fig. 12. Shape factor dimensionless variations of flow separation zone for various Froude numbers and side slope angels (Qr=0.194)



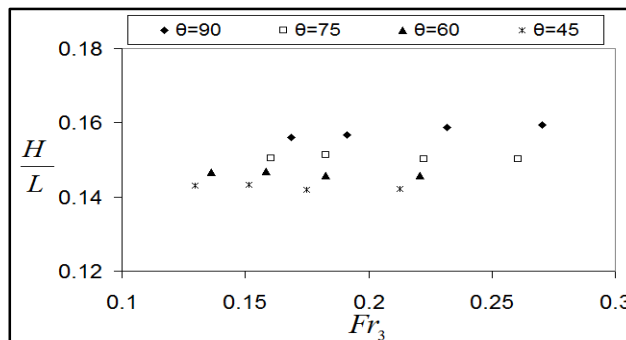
شکل ۱۳- تغییرات شاخص شکل ناحیه جداسازی جریان به‌ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Qr=0.276)

Fig. 13. Shape factor dimensionless variations of flow separation zone for various Froude numbers and side slope angels (Qr=0.276)



شکل ۱۴- تغییرات شاخص شکل ناحیه جداسازی جریان به‌ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Qr=0.4)

Fig. 14. Shape factor dimensionless variations of flow separation zone for various Froude numbers and side slope angels (Qr=0.4)



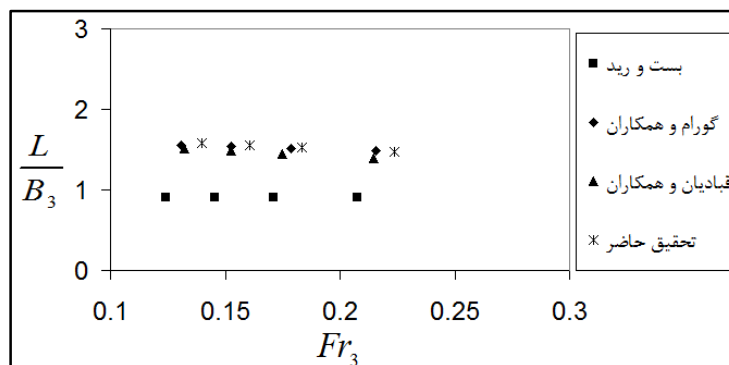
شکل ۱۵- تغییرات شاخص شکل ناحیه جداسازی جریان به ازای اعداد فرود و زاویه‌های مختلف شیب جانبی (Qr=0.552)  
 Fig. 15. Shape factor dimensionless variations of flow separation zone for various Froude numbers and side slope angles (Qr=0.552)

با توجه به شکل‌های گفته شده، می‌بینیم که در حالت کلی، نتایج پژوهش حاضر در خصوص طول ناحیه جداسازی با نتایج پژوهش‌های قبلیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) همخوانی خوبی دارد.

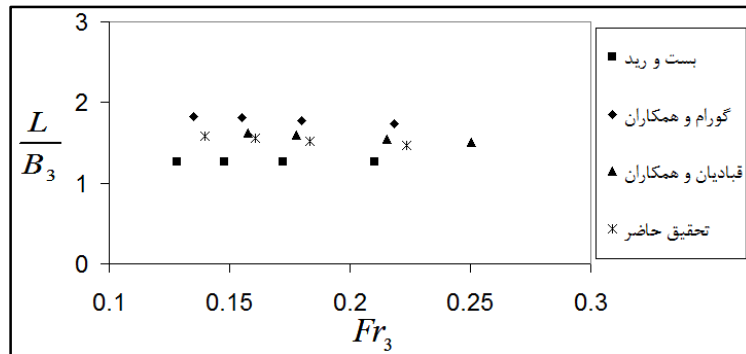
همچنین، به ازای نسبت‌های دبی کوچک‌تر از ۰/۳، نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) همخوانی نسبی دارد اما با نتایج تحقیقات بست و رید (Best & Reid, 1984) اختلاف قابل توجهی دارد و این اختلاف برای اعداد فرود کوچک، محسوس‌تر است. به ازای نسبت‌های دبی بزرگ‌تر از ۰/۳، نتایج به دست آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) فاصله می‌گیرد و با نتایج پژوهش‌های بست و رید (Best & Reid, 1984) همخوانی بیشتری نشان می‌دهد.

### مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان

در خصوص ابعاد ناحیه جداسازی در تلاقی کانال‌ها، تحقیقات گذشته فقط برای حالت دیوار قائم بوده است و به سخنی دیگر بررسی زاویه‌های مختلف شیب جانبی نوآوری این تحقیق به‌شمار می‌آید. از این‌رو در این بخش، نتایج پژوهش حاضر به ازای شیب جانبی ۹۰ درجه با نتایج پژوهش‌های بست و رید (Best & Reid, 1984)، گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) و قبلیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) مقایسه می‌شود. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹، نمودارهای بی‌بعد طول ناحیه جداسازی جریان نسبت به تغییرات عدد فرود پایاب، به ازای نسبت‌های دبی مختلف، در مقایسه با نتایج به دست آمده از رابطه‌های سایر محققان آورده شده است.

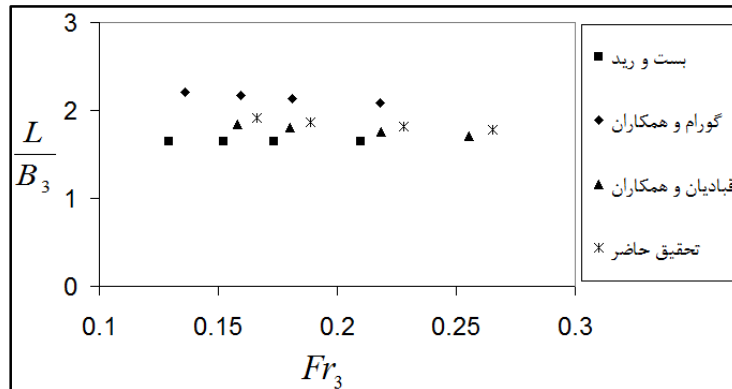


شکل ۱۶- تغییرات طول ناحیه جداسازی جریان به ازای اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Qr=0.194)  
 Fig. 16. Variations of flow separation zone length for various Froude numbers in comparison with the results of other researches (Qr=0.194)



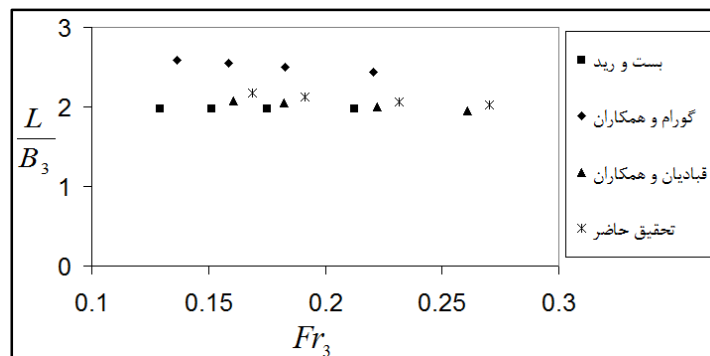
شکل ۱۷- تغییرات طول ناحیه جدانشدگی جریان به‌ازای اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان ( $Q_r=0.276$ )

Fig. 17. Variations of flow separation zone length for various Froude numbers in comparison with the results of other researches ( $Q_r=0.276$ )



شکل ۱۸- تغییرات طول ناحیه جدانشدگی جریان به‌ازای اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان ( $Q_r=0.4$ )

Fig. 18. Variations of flow separation zone length for various Froude numbers in comparison with the results of other researches ( $Q_r=0.4$ )



شکل ۱۹- تغییرات طول ناحیه جدانشدگی جریان به‌ازای اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان ( $Q_r=0.552$ )

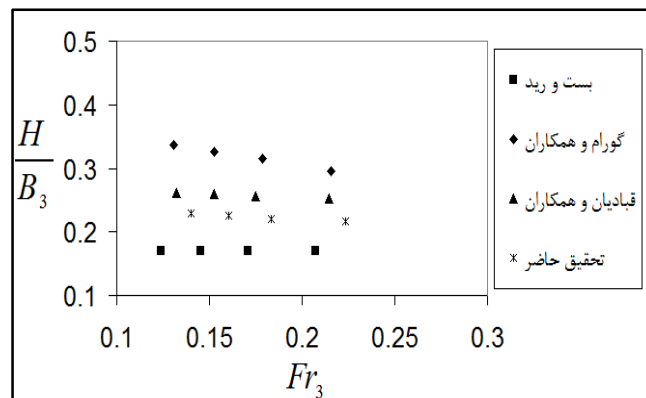
Fig. 19. Variations of flow separation zone length for various Froude numbers in comparison with the results of other researches ( $Q_r=0.552$ )

به شکل‌های گفته شده، مشاهده می‌شود که نتایج پژوهش حاضر در خصوص پهنای ناحیه جدانشدگی با نتایج پژوهش‌های قبادیان و همکاران (Ghobadian *et al.*, 2006) همخوانی خوبی دارد و به‌ازای نسبت‌های دبی بزرگ‌تر از ۰/۲ نیز با نتایج

در شکل‌های ۲۰ تا ۲۳، نمودارهای بی‌بعد پهنای ناحیه جدانشدگی جریان نسبت به تغییرات عدد فرود پایاب، به‌ازای نسبت‌های دبی مختلف در مقایسه با نتایج به‌دست آمده از رابطه‌هایی آورده شده است که دیگر محققان به کار برده‌اند. با توجه

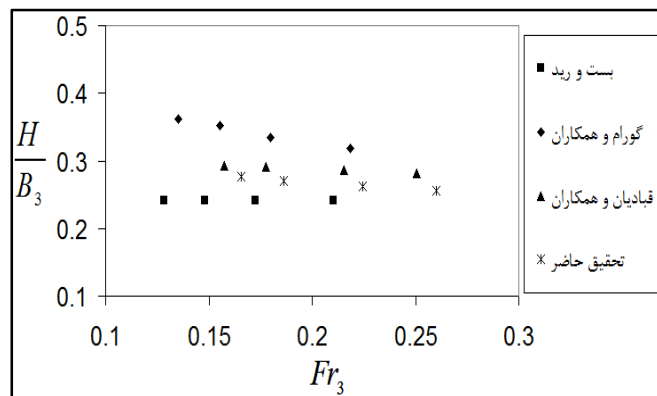
جریان‌های چرخشی ضعیفی در ناحیه جداسازی قابل مشاهده است. به همین دلیل، تشخیص دقیق ناحیه چرخشی مشکل است و خطای اندازه‌گیری زیاد می‌شود. بنابراین، یکی از علت‌های اختلاف‌های مذکور می‌تواند ناشی از تشخیص انتهای ناحیه جداسازی باشد. ضمناً، آزمایش‌های گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) به‌ازای دو نسبت پهنای ۰/۶ و ۱ بوده در حالی که در معادله آنها اشاره‌ای به نسبت پهنای نشده است.

پژوهش‌های بست و رید (Best & Reid, 1984) تقریباً همخوانی دارد. از سوی دیگر، نتایج پژوهش حاضر در خصوص پهنای ناحیه جداسازی مقادیر کمتری را نسبت به نتایج پژوهش‌های گورام و همکاران (Gurram *et al.*, 1997) نشان می‌دهد و همان‌گونه که اشاره شد، به‌ازای اعداد فرود کوچک، میزان اختلاف مشهودتر است. یادآوری می‌شود که در اعداد فرود کوچک، سطح آب پایاب در رقوم بالایی قرار دارد و



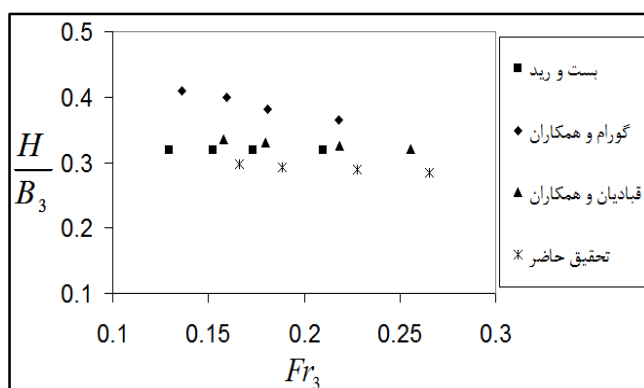
شکل ۲۰- تغییرات پهنای ناحیه جداسازی جریان نسبت به اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Q<sub>r</sub>=0.194)

Fig. 20. Variations of flow separation zone width for various Froude numbers in comparison with the results of other researches (Q<sub>r</sub>=0.194)



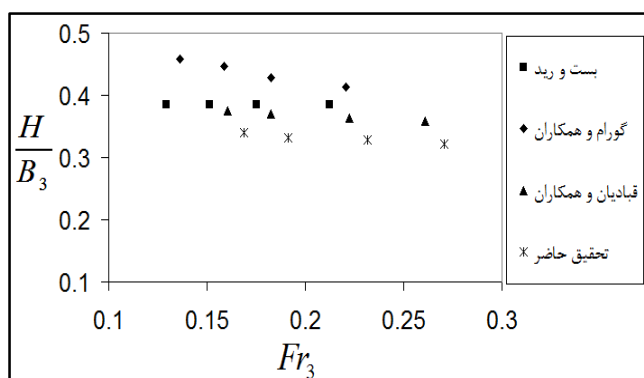
شکل ۲۱- تغییرات پهنای ناحیه جداسازی جریان نسبت به اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Q<sub>r</sub>=0.276)

Fig. 21. Variations of flow separation zone width for various Froude numbers in comparison with the results of other researches (Q<sub>r</sub>=0.276)



شکل ۲۲- تغییرات پهنای ناحیه جدانشدگی جریان نسبت به اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Qr=0.4)

Fig. 22. Variations of flow separation zone width for various Froude numbers in comparison with the results of other researches (Qr=0.4)



شکل ۲۳- تغییرات پهنای ناحیه جدانشدگی جریان نسبت به اعداد فرود مختلف در مقایسه با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان (Qr=0.552)

Fig. 23. Variations of flow separation zone width for various Froude numbers in comparison with the results of other researches (Qr=0.552)

و پهنای ناحیه جدانشدگی جریان در پایین دست تلاقی نیز افزایش یابد.

- میانگین افزایش طول ناحیه جدانشدگی به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به دیوار قائم به‌ترتیب برابر ۵۵/۳، ۳۰/۳ و ۱۵/۵ درصد است.

- میانگین افزایش پهنای ناحیه جدانشدگی به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه نسبت به دیوار قائم به‌ترتیب برابر ۳۳/۸، ۲۲/۷ و ۱۰/۸ درصد است.

- کاهش عدد فرود پایاب و افزایش نسبت دبی کانال فرعی به کانال اصلی با افزایش ابعاد ناحیه جدانشدگی همراه است و از این لحاظ با نتایج مطالعات آزمایشگاهی سایر محققان همخوانی دارد.

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر شیب جانبی دیواره کانال اصلی بر ابعاد ناحیه جدانشدگی جریان در تلاقی کانال‌ها به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد و نتایج زیر به‌دست آمد:

- به‌ازای نسبت دبی یکسان، در حالت مایل بودن دیوار کانال اصلی، چون جریان ورودی از کانال فرعی فرصت بیشتری برای ورود به کانال اصلی دارد مسافت بیشتری باید طی شود تا جریان به حالت بازیافت برسد. همین عامل باعث می‌شود تا متناسب با کاهش زاویه شیب جانبی دیوار کانال اصلی، طول

زاویه شیب جانبی دیوار کانال اصلی وارد شده بود که در مطالعات گذشته مورد توجه قرار نگرفته بود.

- کانال‌های مورد استفاده در شبکه‌های آبیاری و زهکشی عمدتاً مقطع دوزنقه‌ای دارند، بنابراین مطالعه تأثیر شیب جانبی دیوار کانال اصلی بر ابعاد ناحیه جداشدگی در محدوده تلاقی، برای مهندسان طراح می‌تواند بسیار مفید واقع شود. از این‌رو، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود تأثیر هم‌زمان شیب جانبی دیوارهای کانال‌های اصلی و فرعی بر خصوصیات هیدرولیکی جریان بررسی شود.

- در نمودارهای مرتبط با تغییرات شاخص شکل ناحیه جداشدگی نسبت به تغییرات نسبت دبی و عدد فرود پایاب، مطابق با تحقیقات گذشته روند خاصی مشاهده نشد. اما با افزایش زاویه شیب جانبی دیوار کانال اصلی مقدار شاخص مذکور افزایش می‌یابد به طوری که مقدار آن به‌ازای زاویه‌های ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۰/۱۴۴، ۰/۱۴۷، ۰/۱۵۰ و ۰/۱۵۶ به دست آمده است.

- با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده و متغیرهای بدون بعد، رابطه‌های رگرسیونی با ضرایب تعیین قابل قبول برای محاسبه طول و پهنای ناحیه جداشدگی استخراج شد. در رابطه‌های گفته شده،

## مراجع

- Best, J. L. 1987. Flow dynamics at river channel confluences: implications for sediment transport and bed morphology. In: Ethridge, F.G., Flores, R. M. and Harvey, M. D. (Eds.) Recent Developments in Fluvial Sedimentology. Special Publication of the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM). 39, 27-35.
- Best, J. L. and Reid, I. 1984. Separation zone at open-channel junctions. J. Hydraul. Eng. 110, 1588-1594.
- Biron, P., Ramamurthy, M. A. S. and Han, S. 2004. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluences. J. Hydraul. Eng. 130, 243-253.
- Bonakdari, H., Lipeme-Kouyi, G. and Wang, X. 2011. Experiment validation of CFD modeling of multiphase flow through open channel confluence. World Environmental and Water Resources Congress. May 22-26. California, USA.
- 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. J. Geophysic. Res. 111(4): 1-22.
- Cohelo, M. P. 2015. Experimental determination of free surface levels at open-channel junctions. J. Hydraul. Res. 53(3): 394-399.
- Dordevic, D. 2012. Application of 3D numerical models in confluence hydrodynamics modeling. 19<sup>th</sup> International Conference on Water Resources. June, 17-22. Urbana-Champaign, USA.
- Ghobadian, R., Shafaie-Bajestan, M. and Mousavi-Jahromi, S. H. 2006. Experimental investigation of flow separation zone in river confluence in subcritical flow condition. J. Iran-Water Resour. Res. 2(2): 67-77. (in Persian)
- Gohari, S. 2013. Numerical and experimental study of flow pattern at the junction of 90° rectangular channel. J. Water Soil Conserv. 19(4): 121-137. (in Persian)
- Gurram, S. K., Karki, K. S. and Hager, W. H. 1997. Subcritical junction flow. J. Hydraul. Eng. 123, 447-455.
- Huang, J., Weber, L. J. and Lai, Y. G. 2002. Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. J. Hydraul. Eng. 128, 268-280.
- Mousavi-Jahromi, S. H. and Goudarzizadeh, R. 2011. Three-dimensional numerical simulation of flow pattern in open-channel junctions. J. Sci. Irrig. Eng. 34(2): 61-70. (in Persian)
- Weber, L. J., Shumate, E. D. and Mawer, N. 2001. Experiments on flow at a 90° open-channel junction. J. Hydraul. Eng. 127(5): 340-350.

## **Experimental Study of Side Slope Effect of Main Channel Wall in Open-Channels Junction on Separation Zone Dimensions**

**P. Khosravinia, A. Hosseinzadeh-Dalir, M. Shafai-Bajestan and M. R. Nikpour\***

\* Corresponding Author: Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: m\_nikpour@uma.ac.ir

Received: 19 September 2017, Accepted: 13 January 2018

### **Abstract**

The study of hydraulic condition around the rivers confluence and open-channel is important in various aspects, including erosion, sedimentation and environmental considerations. One of the most important characteristics in the confluences is dimensions of separation zone. This zone immediately develops in the lower corner of the junction, as flow entrance of the lateral channel into the main channel. In this research, side slope effects of the main channel on dimensions of flow separation zone was studied. Experiments were conducted with four discharge ratios, four downstream Froude numbers and four side slope angles of 45°, 60°, 75° and 90°. Results showed that the separation zone enlarges by decreasing of side slope angle of the main channel wall. The results showed that on average, and for side slopes angles of 45°, 60° and 75°, the length of separation zone was increased 55.3%, 30.3% and 15.5% respectively in comparison of the vertical wall. The mentioned values were achieved 33.8%, 22.7% and 10.8% respectively, for the width of separation zone. On the other hand, the dimensions of separation zone increased by decreasing of the downstream Froude number and increasing of the discharge ratio. Also, increasing of side slope angle was accompanied with increment of separation zone shape index. For side slope angles of 45°, 60°, 75° and 90°, values of this index were obtained 0.144, 0.147, 0.150 and 0.156, respectively. Moreover, a regression equation was developed using dimensionless parameters for prediction of separation zone dimensions; it was compared with the equations presented by other researchers, for side slope angle of 90°.

**Keywords:** Dimensional Analysis, Hydraulic Characteristics, Inclined Wall, Regression Equation