

## مدل تحلیلی یک بعدی توزیع جریان زیربحرانی در تقاطع چهارشاخه کانال‌های روباز

سید حسین حسینی\*<sup>۱</sup>، داود فرسادی زاده<sup>۲</sup>، علی حسین زاده دلیر<sup>۳</sup> و فرزین سلماسی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۵/۲۶

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: saiiid9@yahoo.com

### چکیده

پیش‌بینی توزیع جریان در محل تقاطع کانال‌ها در شبکه‌های آبیاری و انتقال آب به منظور ارائه راهکار مناسب برای طراحی و حفاظت آن‌ها در مواقع اضطراری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مطالعه با استفاده از قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتم مدل تحلیلی یک بعدی توزیع جریان زیربحرانی در تقاطع چهارشاخه کانال‌های روباز ارائه و نتایج آن با مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت دبی ورودی و تراز کف کانال‌های فرعی دبی خروجی از کانال اصلی افزایش یافت. کاهش عدد فرود کانال ورودی اصلی سبب افزایش دبی خروجی از کانال اصلی شد. تغییر ارتفاع سرریزهای خروجی تاثیر قابل توجهی بر روی توزیع دبی نداشت. بیشترین انحراف مقدار جریان به کانال خروجی فرعی برای زاویه ۶۰ درجه و کمترین انحراف جریان در زاویه ۹۰ درجه اتفاق افتاد. مقایسه نتایج مدل تحلیلی و آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان داد به طوری که حداکثر خطای محاسباتی کمتر از ۱۰٪ بود.

واژه‌های کلیدی: تقاطع چهار شاخه، توزیع جریان، کانال‌های روباز، قانون بقای جرم - انرژی و مومنتم، مدل تحلیلی

## 1D Analytical Model of the Subcritical Flow Distribution in Four- Branch Junctions of Open Channels

SH Hosseini<sup>\*1</sup>, D Farsadizadeh<sup>2</sup>, A Hosseinzadeh Dalir<sup>3</sup> and F Salmasi<sup>2</sup>

Received: 14 March 2014 Accepted: 17 August 2014

<sup>1</sup>Ph.D. Student of Water Structures, Dept of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Univ of Tabriz, Iran

<sup>2</sup>Assoc. Prof., Dept of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Univ of Tabriz, Iran

<sup>3</sup>Prof., Dept of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Univ of Tabriz, Iran

\*Corresponding Author, Email: saiiid9@yahoo.com

### Abstract

Prediction of flow distribution is necessary in open channels junctions at irrigation and conveyance water systems in order to design suitable plans and protect them in emergency situations. In this study, a one dimensional analytical model of subcritical flow distribution using mass - energy and momentum conservation laws was presented for a four-branch junction of open channels and compared with experimental results. The results showed that as the inlet discharge ratio and bed elevation of the lateral channels increased, the outlet discharge of the main channel increased. Furthermore, as the Froud number at the inlet of the main channel decreased, the outlet discharge of it increased. Changes in the height of the weirs at the end of the outlet channels had no considerable effect on the flow distribution. The maximum and minimum deviations of the flow amounts to the outlet lateral channel occurred at the angles of 60 and 90 degrees, respectively. Comparison of the analytical and experimental results showed a good agreement between them so that the maximum error was less than 10%.

**Keywords:** Analytical model, Flow distribution, Four-branch junction, Mass - energy and momentum conservation laws, Open channels

محل تقاطع کانال‌ها برخوردار هستند. تیلور (۱۹۴۴) احتمالاً اولین کسی بود که با فرضیات ساده کننده و کاربرد یک مدل تحلیلی برای جریان در تقاطع کانال-های روباز توانست به پیش‌بینی عمق آب در کانال فرعی بالادست تقاطع بپردازد. هگر (۱۹۸۹) با فرض اینکه در محل حداکثر سرعت (بیشترین انقباض) عمق بحرانی ایجاد می‌شود و با استفاده از سه معادله پیوستگی، مومنتم و انرژی معادلاتی را برای محاسبه عمق نسبی و ضریب انقباض جریان ارائه نمود.

### مقدمه

مطالعات آزمایشگاهی متعددی در مورد توزیع جریان زیربحرانی در محل تقاطع کانال‌ها انجام شده است، اما با توجه به هزینه زیاد و زمان‌بر بودن این مطالعات مدل‌های تحلیلی و عددی همواره مورد توجه قرار داشته است. طبق نظر محققین مدل‌های ارائه شده براساس معادلات یک بعدی سنت و نانت در اعداد فرود پایین که شدت تلاطم کم بوده و شیب سطح آب ناچیز است، از دقت قابل قبولی در پیش‌بینی توزیع جریان در

مرزی و نیروی برشی ناحیه جداشدگی پایین‌دست کانال ورودی فرعی را در نظر گرفتند و معادلاتی را ارائه دادند. روییره و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی آزمایشگاهی جریان زیر بحرانی در تقاطع ۴ شاخه (دو کانال ورودی و دو کانال خروجی) پرداخته و یک مدل یک بعدی برای آن ارائه دادند. نانیا و همکاران (۲۰۱۱) از طریق مطالعه آزمایشگاهی به بررسی خصوصیات جریان زیر بحرانی در تقاطع چهار شاخه ۹۰ درجه هم عرض پرداختند. در مطالعات آن‌ها تقاطع دارای دو ورودی و دو خروجی بود. جریان در منطقه تقاطع و بویژه قبل از تقاطع یکنواخت بود که با مطالعه تیلور (۱۹۴۴) تطابق داشت و با کاهش عدد فرود یکنواخت‌تر می‌شد. روییره و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه (دو کانال ورودی و دو کانال خروجی) پرداختند. آن‌ها با استفاده از فرضیات ساده کننده، همراه با معادلات پیوستگی و مومنتم یک مدل تحلیلی هیدرولیکی برای توزیع جریان ارائه دادند و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند که مطابقت خوبی داشت، به طوری که در محدوده شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی دارای خطای  $\pm 5\%$  بود. هدف از این تحقیق ارائه یک مدل تحلیلی برای توزیع جریان در تقاطع چهار شاخه کانال‌های روباز براساس معادلات پیوستگی، انرژی و مومنتم و یکسری فرضیات ساده کننده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی به منظور صحت-سنجی مدل تحلیلی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

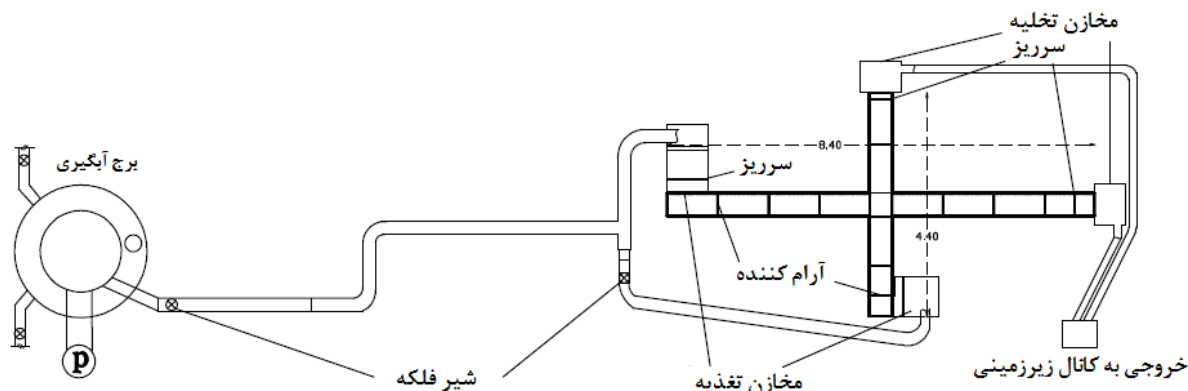
#### مدل آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز انجام شد. مدل آزمایشگاهی از دو کانال فلزی - شیشه‌ای تشکیل شده که طول کانال اصلی و فرعی به ترتیب  $8/4$  و  $4/4$  متر و ارتفاع و عرض کانال‌ها به ترتیب  $0/5$  و  $0/4$  متر بود. شیب کف کانال‌ها ثابت و برابر صفر در نظر گرفته شد. در ابتدا و انتهای کانال اصلی و فرعی مخازن تخلیه و تغذیه قرار داشت. آب مورد نیاز آزمایش‌ها توسط یک

رامامورتی و همکاران (۱۹۹۰) مدلی را برای توزیع جریان در تقاطع سه شاخه‌ی راست گوشه برحسب عدد فرود بالادست کانال اصلی و پایین دست تقاطع ارائه دادند و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. علاوه بر این گورام و همکاران (۱۹۹۷) با کاربرد معادله مومنتم در محل سه شاخه رابط‌های را برای محاسبه نسبت عمق جریان در بالادست اتصال به عمق پایاب بدست آوردند که این نسبت همواره بزرگتر از یک می‌باشد. برقی و همکاران (۱۳۸۱) با استفاده از معادلات پیوستگی و اندازه حرکت و در نظر گرفتن چندین فرض ساده کننده، روابطی را برای محاسبه اعماق و شرایط ایجاد پرش هیدرولیکی در پایین دست محل تلاقی ۹۰ درجه ارائه نمودند. فریزل و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی آزمایشگاهی و عددی الگوی جریان در تقاطع سه شاخه ۹۰ درجه پرداختند که در آن دو جریان ورودی در خلاف جهت یکدیگر با هم برخورد می‌کنند. آن‌ها در مطالعه خود از مدل تلاطم دو بعدی  $k-\epsilon$  استفاده کردند. با وجود مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی مورد استفاده توسط آن‌ها در پیش‌بینی مشخصات اصلی جریان از جمله انقباض جریان در کانال فرعی از دقت قابل قبولی برخوردار بود. هانگ و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی عددی جریان سه بعدی در محل تقاطع کانال-های روباز پرداختند. آن‌ها نتایج حاصل از تحقیق خود را با نتایج آزمایشگاهی شومت (۱۹۹۸) مربوط به تقاطع ۹۰ درجه مقایسه کردند و از مدل خود به منظور بررسی تاثیر تغییر زاویه بر روی خصوصیات جریان در محل تقاطع استفاده کردند. مقایسه نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ارائه شده در پیش‌بینی خصوصیات هیدرودینامیکی جریان در محل تقاطع از دقت خوبی برخوردار بوده و تطابق خوبی با داده‌های آزمایشی دارد. شابایک و همکاران (۲۰۰۲) براساس قانون بقای مومنتم در راستای جریان اصلی و بقای جرم برای کل سیستم، مدل تحلیلی یک بعدی برای جریان زیربحرانی در یک تقاطع سه شاخه ارائه دادند. آن‌ها در مدل خود نیروی برشی بین دو حجم کنترل، نیروی اصطکاک

پمپ با ظرفیت ۱۰۰ لیتر بر ثانیه با پمپاژ از مخزن زیر

زمینی به داخل برج آبیگیری تامین می‌شد (شکل ۱).



شکل ۱- پلان مدل آزمایشگاهی.

ثقل  $g$ ، جرم مخصوص سیال  $\rho$ ، لزجت دینامیکی  $\mu$ ، ارتفاع سرریزهای انتهایی کانال‌های خروجی  $c_x, c_y$ ، تراز کف کانال‌های فرعی ورودی و خروجی  $z_{y0}, z_{yi}$ ، در آزمایش‌ها تاثیر هر یک از پارامترهای فوق به صورت جداگانه بر روی نسبت دبی خروجی به ورودی اصلی بررسی شد. در جدول ۱ پارامترها و محدوده تغییرات آن‌ها نشان داده شده است.

پارامترهای موثر بر روی الگوی توزیع جریان در این تحقیق را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی کرد. دبی جریان کانال‌های ورودی  $Q_{xi}, Q_{yi}$  دبی جریان کانال‌های خروجی  $Q_{xo}, Q_{yo}$ ، عمق آب در کانال‌های ورودی  $y_{xi}, y_{yi}$  عرض کانال‌های ورودی  $b_{xi}, b_{yi}$  عمق آب در کانال‌های خروجی  $y_{xo}, y_{yo}$ ، عرض کانال‌های خروجی  $b_{xo}, b_{yo}$  زاویه تقاطع کانال‌ها  $\theta$ ، شتاب

جدول ۱- پارامترهای مورد بررسی در آزمایش‌ها.

عنوان پارامتر	محدوده تغییرات
نسبت دبی ورودی $(\frac{Q_{yi}}{Q_{xi}})$	۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱
ارتفاع سرریزها در کانال خروجی $(c_x, c_y)$ (cm)	۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵، ۲۵
زاویه بین کانال‌های ورودی و خروجی (درجه) $(\theta)$	۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰
تراز کف کانال‌های فرعی ورودی و خروجی نسبت به کف کانال اصلی $z$ (cm)	۰، ۲/۵، ۵، ۷/۵، ۱۰
عدد فرود کانال ورودی اصلی $(Fr_{xi})$	صفر تا ۰/۲

#### مدل تحلیلی

سری فرضیات ساده کننده در نظر گرفته شد که عبارتند از:

- جریان در کانال‌های ورودی و خروجی بلافاصله قبل و بعد از تقاطع یکنواخت می‌باشد.
- توزیع سرعت در مقطع عرضی در کانال‌های ورودی و خروجی یکنواخت است.

مدل عددی ارائه شده در این تحقیق یک بعدی بوده و هدف از آن تعیین توزیع جریان و عمق آب در کانال‌ها بر مبنای قانون بقای جرم، انرژی و مومنتم می‌باشد. در بدست آوردن معادلات مربوط به مدل یک-

- معادله‌ی دبی - اشل مربوط به سرریزهای انتهایی کانال‌های خروجی

$$Q_{xo} = 0.715(y_{xo} - h_{xo})^{1.5} \quad [۵]$$

$$Q_{yo} = 0.715(y_{yo} - h_{yo})^{1.5} \quad [۶]$$

در معادلات ۵ و ۶،  $h_{xo}$  و  $h_{yo}$  ارتفاع لبه بالایی سرریزهای انتهایی کانال‌های خروجی می‌باشند. در معادلات فوق واحد جرم کیلوگرم، واحد طول متر و واحد زمان ثانیه می‌باشد. معادلات ۱ تا ۶ در مجموع ۶ معادله را تشکیل می‌دهد که از آن‌ها می‌توان برای تعیین پارامترهای مجهول استفاده کرد. در معادله ۲، دو پارامتر  $\delta_{yo}$  و  $\delta_{yi}$  وجود دارد که با تعیین آن‌ها می‌توان دستگاه معادلات را حل نمود. برای تعیین پارامترهای فوق روش‌های زیر ارائه شد.

تعیین زاویه جریان ورودی از کانال فرعی با راستای مثبت محور  $x$  ( $\delta_{yi}$ )

فرض کنید انحراف جریان ورودی از کانال فرعی سهمی شکل است. اگر محورهای مختصات دکارتی را به صورتی در نظر گرفته شود که راس آن در گوشه بالادست تقاطع، بین دو کانال ورودی اصلی و فرعی (نقطه‌ی  $a$ ) واقع شود، طوری که جهت مثبت محور  $x$  ها در راستای کانال اصلی به سمت پایین دست و جهت مثبت محور  $y$  ها در راستای کانال فرعی و به سمت پایین دست باشد (شکل ۲)، معادله سهمی مربوط به انحراف جریان آب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$y^2 = 4px \quad [۷]$$

- توزیع فشار در کانال‌های ورودی و خروجی هیدرواستاتیک است.

- ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و مومنتم برابر یک می‌باشد ( $\alpha = \beta = 1$ ).

- با توجه به جنس شیشه‌ای کف و جداره‌های کانال‌ها از افت اصطکاک ناشی از آن‌ها صرف نظر شد.

- از افت ناشی از تلاطم و تنش برشی نیز به دلیل کم بودن مقدار عدد فرود صرف نظر شد.

با توجه به اینکه در این تحقیق هدف تعیین دبی جریان کانال‌های خروجی و عمق آب در تمام کانال‌ها می‌باشد در مجموع تعداد شش مجهول وجود خواهد داشت که برای تعیین آن‌ها به شش معادله نیاز است. به همین منظور معادلات زیر در نظر گرفته شد.

- معادله پیوستگی برای کل سیستم

$$Q_{xi} + Q_{yi} = Q_{xo} + Q_{yo} \quad [۸]$$

- معادله مومنتم در راستای کانال اصلی

$$\frac{y_{xi}^2}{2} b_{xi} - \gamma \frac{y_{xo}^2}{2} b_{xo} + \rho \frac{Q_{xi}^2}{(b_{xi} \times y_{xi})} - \rho \frac{Q_{xo}^2}{(b_{xo} \times y_{xo})} + \frac{Q_{yi}^2 \cos(\delta_{yi})}{(b_{yi} \times y_{yi} \cos(\theta - \delta_{yi}))} - \rho \frac{Q_{yo}^2 \cos(\delta_{yo})}{(b_{yo} \times y_{yo} \cos(\theta - \delta_{yo}))} = 0 \quad [۲]$$

- معادله انرژی

در این حالت دو معادله بین جریان کانال فرعی ورودی و کانال اصلی خروجی و جریان کانال ورودی اصلی و خروجی فرعی نوشته می‌شود.

$$y_{yi} + z_{yi} + \frac{Q_{yi}^2}{2g(b_{yi} \times y_{yi})^2} = y_{xo} + z_{xo} + \frac{Q_{xo}^2}{2g(b_{xo} \times y_{xo})^2} \quad [۳]$$

$$y_{xi} + z_{xi} + \frac{Q_{xi}^2}{2g(b_{xi} \times y_{xi})^2} = y_{yo} + z_{yo} + \frac{Q_{yo}^2}{2g(b_{yo} \times y_{yo})^2} \quad [۴]$$



$$\Rightarrow y = \pm \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})}{\sqrt{(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})}} \sqrt{-(x - b_{xi} \cot \theta - \frac{b_{yo}}{\sin \theta}) + b_{xo}} \quad [19]$$

در این حالت مقدار منفی  $y$  قابل قبول است. همانند حالت قبل شیب خط انحراف جریان در نقطه  $b$  برابر با  $\tan \delta_{yo}$  فرض شد. بدین ترتیب مقدار زاویه  $\delta_{yo}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})^2}{2(y - b_{xo})(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})} \quad [20]$$

با جایگذاری  $y$  از معادله ۱۹ در رابطه ۲۰ می‌توان روابط زیر را به دست آورد:

$$\frac{dy}{dx} = - \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})}{2\sqrt{(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})}} \times \frac{1}{\sqrt{-(x - b_{xi} \cot \theta - \frac{b_{yo}}{\sin \theta})}} \quad [21]$$

چنانچه در معادله فوق بجای  $X$  مقدار  $b_{xi} \cot \theta$  جایگزین شود، در نهایت خواهیم داشت:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{2} \times \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})}{\sqrt{(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})}} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{b_{yo}}{\sin \theta}}} = \tan \delta_{yo} \quad [22]$$

$$\Rightarrow \delta_{yo} = \arctan\left(\frac{1}{2} \times \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})}{\sqrt{(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})}} \times \frac{\sqrt{\sin \theta}}{\sqrt{b_{yo}}}\right) \quad [23]$$

در دو حالت بررسی شده ارتفاع سرریزهای انتهای کانال‌ها با یکدیگر برابر بود. با جایگزینی مقادیر  $\delta_{yo}$  و  $\delta_{yi}$  محاسبه شده در معادله ۲ می‌توان دستگاه معادلات (۶ معادله، ۶ مجهول) را تشکیل داده و حل نمود. در این تحقیق معادلات با استفاده از کدنویسی در برنامه MATLAB 2011 حل شد.

$$\delta_{yi} = \arctan\left(\frac{b_{xo} \left[\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}}\right]}{2\sqrt{(\frac{b_{yi}}{\sin \theta} + b_{xo} \cot \theta + L_{xo})}} \times \frac{\sqrt{\sin \theta}}{\sqrt{b_{yi}}}\right) \quad [14]$$

تعیین زاویه جریان خروجی از کانال فرعی با راستای مثبت محور  $x$  ( $\delta_{yo}$ )

در این حالت معادله سهمی عبوری از مرکز مختصات (نقطه  $a$ ) به صورت زیر می‌باشد (شکل ۳).

$$y^2 = -4px \quad [15]$$

با انتقال راس سهمی از نقطه  $a$  به  $c$  معادله خط انحراف جریان آب ورودی به کانال خروجی فرعی به صورت زیر خواهد بود:

$$(y - b_{xo})^2 = -4p(x - b_{xi} \cot \theta - \frac{b_{yo}}{\sin \theta})$$

$$c_x = b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta}$$

$$c_y = b_{xo}$$

[16]

با جایگذاری مختصات نقطه  $d$  در معادله ۱۶ مقدار  $P$  را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$x_d = -L_{xi}$$

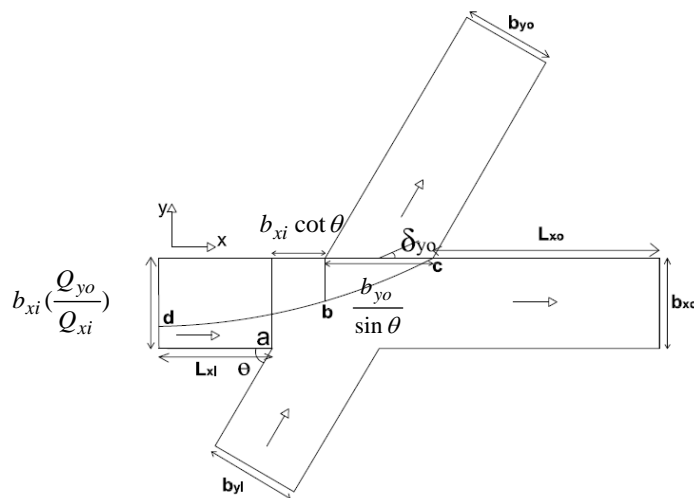
$$y_d = b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}})$$

$$(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})^2 = -4p(-L_{xi} - b_{xi} \cot \theta - \frac{b_{yo}}{\sin \theta})$$

$$\Rightarrow p = \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})^2}{4(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})} \quad [17]$$

با جایگزینی  $p$  در معادله ۱۶ داریم:

$$(y - b_{xo})^2 = - \frac{(b_{xi}(1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})^2}{(b_{xi} \cot \theta + \frac{b_{yo}}{\sin \theta} + L_{xi})} (x - b_{xi} \cot \theta - \frac{b_{yo}}{\sin \theta}) \quad [18]$$



شکل ۳- طرح شماتیک الگوی جریان در محل تقاطع.

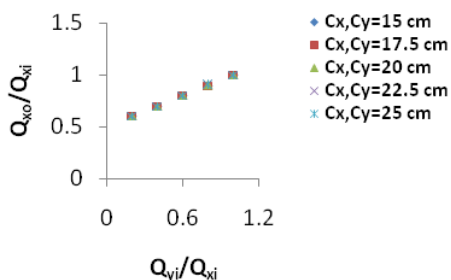
## نتایج و بحث

### مدل تحلیلی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت نتایج مربوط به توزیع دبی جریان با مدل تحلیلی ارائه و با نتایج آزمایشگاهی برای نشان دادن قابلیت مدل مقایسه شده است.

### نسبت دبی ورودی

نتایج مدل تحلیلی نشان می‌دهد که با افزایش نسبت دبی ورودی، دبی خروجی از کانال اصلی افزایش می‌یابد که روند افزایش آن خطی می‌باشد. با افزایش دبی کانال فرعی ورودی با توجه به اینکه تقریباً همه جریان به داخل کانال خروجی اصلی منحرف می‌شود، دبی خروجی از کانال اصلی افزایش می‌یابد. دلیل افزایش خطی دبی خروجی، مقدار ثابت افزایش دبی ورودی می‌باشد. شکل ۴ نتایج مربوط به مدل تحلیلی در مورد تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال اصلی را در برابر دبی ورودی به کانال فرعی برای زاویه تقاطع ۳۰ درجه، تراز کف صفر و ارتفاع متفاوت سرریزهای خروجی نشان می‌دهد.



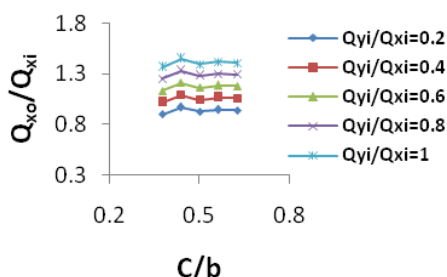
شکل ۴- تغییرات دبی خروجی از کانال اصلی در برابر دبی ورودی به کانال فرعی.

به منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی میزان خطای مقادیر به دست آمده از مدل تحلیلی به صورت زیر محاسبه شد.

$$Error(\%) = \frac{|Q_{predicted} - Q_{measured}|}{Q_{measured}} \times 100 \quad [24]$$

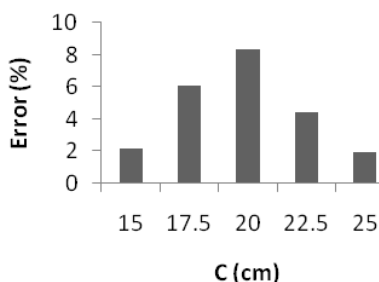


مشخص است به ازای یک نسبت دبی ورودی ثابت، تغییر ارتفاع سرریزها سبب نوساناتی بسیار ناچیز بر روی دبی خروجی از کانال اصلی می‌شود اما تقریباً می‌توان گفت که مقدار دبی خروجی ثابت است. با افزایش مقدار نسبت دبی ورودی، مقدار دبی خروجی از کانال اصلی افزایش می‌یابد اما روند تغییرات تقریباً ثابت است.



شکل ۶- تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال اصلی در برابر ارتفاع سرریزهای متفاوت.

خطای مربوط به مقادیر محاسبه شده توسط روش تئوری در این حالت نیز حداکثر ۱۰٪ بود. شکل ۷ مقدار خطای محاسبه شده توسط رابطه ۲۴ را برای زاویه تقاطع ۶۰ درجه، تراز کف ۵ سانتی‌متر و نسبت دبی ۰/۴ نشان می‌دهد.

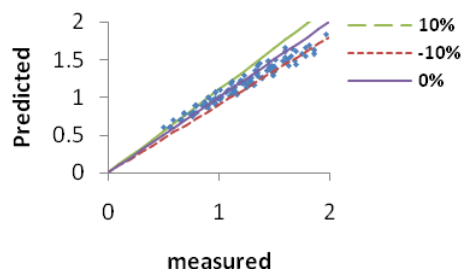


شکل ۷- خطای محاسباتی مدل تحلیلی برای ارتفاع سرریزهای مختلف.

#### تراز کف کانال‌های فرعی

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است با افزایش نسبت تراز کف کانال‌های فرعی نسبت دبی خروجی از کانال اصلی افزایش می‌یابد و در نهایت به یک مقدار ثابت میل می‌کند. دلیل این شرایط آن است که با افزایش تراز کف کانال‌های فرعی، در ترازهای بالاتر تقریباً همه جریان ورودی از کانال اصلی خارج می‌شود.

در رابطه فوق  $Q_{predicted}$  و  $Q_{measured}$  به ترتیب دبی اندازه‌گیری و محاسبه شده و  $Error$  درصد خطا را نشان می‌دهد. مقادیر خطای محاسبه شده توسط رابطه فوق برای دبی خروجی از کانال اصلی و زاویه تقاطع ۳۰ درجه بجز برخی موارد معدود (برای مثال برای ارتفاع سرریزهای مختلف در برخی نسبت دبی‌های ورودی مقدار خطای ۱۱٪، ۱۴٪ و ۱۶٪ مشاهده شد که با توجه به پراکندگی خطاها، احتمالاً ناشی از خطای اندازه‌گیری دبی در آزمایشگاه می‌باشد) در اکثر آزمایش‌ها کمتر از ۱۰٪ بود. در شکل ۵ مقادیر محاسبه شده  $(\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}})$  در برابر مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از مدل تحلیلی ترسیم شده است. خطوط ترسیم شده مربوط به خطای  $\pm 10\%$  می‌باشد، همان‌طور که در شکل مشخص است اکثر داده‌ها بین دو خط قرار دارند که نشان‌دهنده این است که مقدار خطای مربوط به مدل تحلیلی کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. علامت مثبت خطا مربوط به زمانی است که دبی محاسبه شده با استفاده از مدل تحلیلی بیشتر از دبی اندازه‌گیری شده و مقدار منفی مربوط به حالتی است که دبی محاسبه شده توسط مدل تحلیلی کمتر از دبی اندازه‌گیری شده می‌باشد.

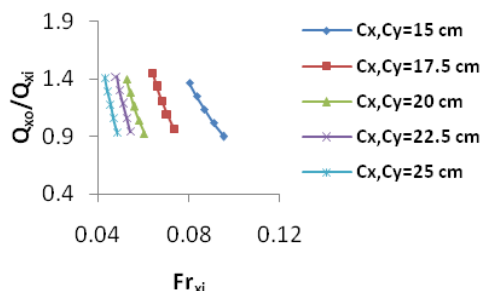


شکل ۵- مقایسه مقادیر تئوری و تجربی نسبت دبی خروجی برای زاویه تقاطع ۳۰ درجه.

#### ارتفاع سرریزهای خروجی

شکل ۶ تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال اصلی را در برابر ارتفاع سرریزهای مختلف برای زاویه تقاطع ۶۰ درجه و تراز کف صفر برای نسبت دبی‌های ورودی متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل

کانال اصلی را به دنبال دارد. شکل ۱۰ تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال اصلی را در برابر عدد فرود کانال ورودی اصلی برای زاویه تقاطع ۶۰ درجه و تراز کف ۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد.

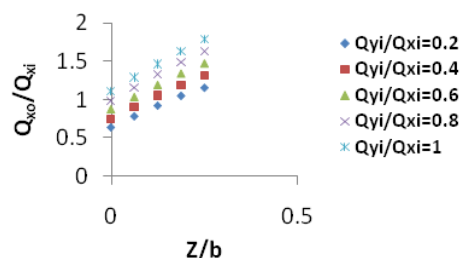


شکل ۱۰- تغییرات دبی خروجی از کانال اصلی به ازای عدد فرود کانال ورودی اصلی.

#### زاویه تقاطع کانال‌ها

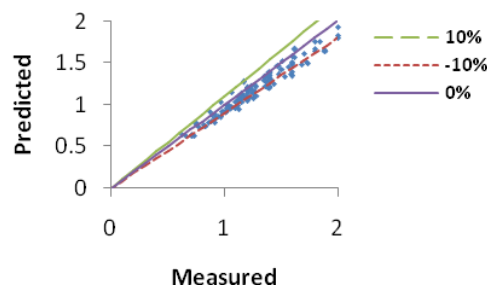
شکل ۱۱ تغییرات نسبت  $(\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}})$  را در برابر زاویه تقاطع برای تراز کف صفر و ارتفاع سرریزهای خروجی ۱۵ سانتی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است به ازای یک نسبت دبی ورودی ثابت حداکثر دبی خروجی از کانال اصلی مربوط به زاویه تقاطع ۹۰ درجه می‌باشد و برای زوایای کمتر میزان دبی خروجی از کانال اصلی تقریباً نزدیک به هم است، با این تفاوت که با افزایش نسبت دبی ورودی میزان دبی خروجی از کانال اصلی برای زاویه ۶۰ درجه حداقل می‌شود. به عبارت دیگر برای زاویه ۶۰ درجه حداکثر انحراف جریان به سمت کانال خروجی فرعی اتفاق می‌افتد.

خطای محاسباتی مدل تحلیلی برای نسبت  $(\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}})$  نیز با استفاده از رابطه ۲۴ محاسبه شد که مقدار خطای مربوط به اکثر داده‌ها کمتر از  $\pm 10\%$  بود. شکل ۱۲ مقدار خطای داده‌های مدل تحلیلی را برای تراز کف صفر، ارتفاع سرریزهای خروجی ۱۵ سانتی‌متر و برای زوایای تقاطع مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۸- تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال اصلی در برابر نسبت تراز کف برای زاویه تقاطع ۹۰ درجه و ارتفاع سرریزهای خروجی ۱۵ سانتی‌متر.

شکل ۹ تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده دبی خروجی از کانال اصلی را در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، خطوط بریده مربوط به خطای  $\pm 10\%$  می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص است اکثر داده‌ها در حدفاصل بین دو خط قرار دارند. واقع شدن اکثر داده‌ها در زیر خط صفر درصد نشان‌دهنده این است که مدل تحلیلی مقادیر نسبت دبی خروجی را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده تخمین زده است (شکل ۹).

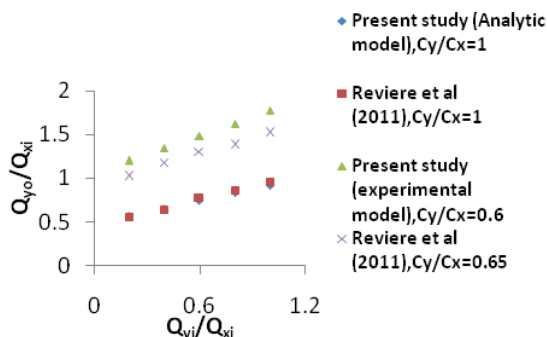


شکل ۹- تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده  $(\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}})$  در برابر مقادیر تئوری برای ترازهای مختلف کف.

#### عدد فرود ورودی اصلی $(Fr_{xi})$

بررسی نتایج مدل تحلیلی نشان می‌دهد که با افزایش عدد فرود کانال ورودی اصلی میزان دبی خروجی از کانال اصلی کاهش می‌یابد. با افزایش دبی ورودی به کانال فرعی عمق آب در محل تقاطع و کانال‌های ورودی افزایش می‌یابد، این افزایش نسبت دبی ورودی با توجه به ثابت بودن مقدار دبی کانال ورودی اصلی از یک طرف سبب کاهش عدد فرود کانال اصلی ورودی شده و از طرف دیگر افزایش دبی خروجی از

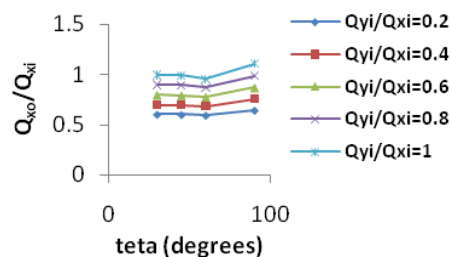
ارتفاع سرریزهای انتهایی کانال می‌باشد که در تحقیق حاضر این نسبت ۰/۶ و در مطالعه روییره و همکاران (۲۰۱۱) ۰/۶۵ بود.



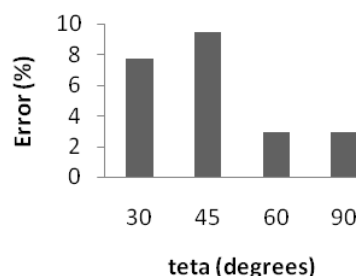
شکل ۱۳- مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج روییره و همکاران (۲۰۱۱).

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدل یک بعدی مربوط به توزیع جریان زیربحرانی در تقاطع چهار شاخه کانال‌های روباز با استفاده از معادلات پیوستگی، انرژی و مومنتم و یکسری فرضیات ساده کننده ارائه و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج مدل نشان داد که با افزایش نسبت دبی ورودی و تراز کف کانال‌های فرعی میزان دبی خروجی از کانال اصلی افزایش می‌یابد. میزان دبی خروجی از کانال اصلی با عدد فرود کانال ورودی اصلی رابطه عکس دارد و تغییر ارتفاع سرریزهای انتهایی تأثیر چندانی بر روی توزیع دبی ندارد. بیشترین انحراف جریان به کانال فرعی در زاویه ۶۰ درجه اتفاق می‌افتد. مقایسه نتایج مدل تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داد که مدل تحلیلی مطابقت خوبی با مدل آزمایشگاهی دارد به طوری که حداکثر خطای به دست آمده ۱۰٪ بود.



شکل ۱۱- تغییرات  $(\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}})$  به ازای زاویه تقاطع کانال‌ها.



شکل ۱۲- خطای محاسباتی مربوط به  $(\frac{Q_{xo}}{Q_{xi}})$  برای زوایای تقاطع مختلف.

### مقایسه با نتایج سایر محققین

با توجه به کمبود مطالعات در زمینه تقاطع چهارشاخه با جریان زیربحرانی، نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی روییره و همکاران (۲۰۱۱) مقایسه شد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است نتایج مدل تحلیلی برای تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال فرعی به دبی ورودی کانال اصلی در برابر نسبت دبی‌های ورودی با نتایج آزمایشگاهی روییره و همکاران (۲۰۱۱) با نسبت ارتفاع سرریزهای خروجی ۱ مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. اما مقایسه نتایج آزمایشگاهی تغییرات نسبت دبی خروجی از کانال فرعی به دبی ورودی کانال اصلی در برابر نسبت دبی‌های ورودی علی‌رغم یکسان بودن روند تغییرات، اندکی تفاوت نشان داد که دلیل آن متفاوت بودن نسبت

**منابع مورد استفاده**

- برقعی سم، سخائی فر سم و دائمی ع، ۱۳۸۱. بررسی آزمایشگاهی اتصال کانالها، صفحه‌های ۶۱۱-۶۱۹. مجموعه مقالات ششمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ایران.
- Frizzell CS, Khan AA and Werth DE, 2008. Numerical simulation of equal and opposing subcritical flow junctions. *J Hydraul Eng ASCE* 134(2): 267-273.
- Gurram SK, Karki KS and Hager WH, 1997. Subcritical junction flow. *J Hydraul Eng ASCE* 123(5): 447-455.
- Hager WH. 1989. Transitional flow in channel junctions. *J Hydraul Eng ASCE* 115(2): 243-259.
- Huang j, Weber L and Lia Y, 2002. Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. *J Hydraul Eng ASCE* 128(3): 268-280.
- Nania LS, Gomez M, Dolz J, Comas P and Pomares J, 2011. Experimental study of subcritical dividing flow in an equal-width, four-branch junction. *J Hydraul Eng ASCE* 137(10): 1298-1305.
- Ramamurthy AS, Tran DM and Carballada LB, 1990. Dividing flow in open channels. *J Hydraul Eng ASCE* 116(3): 449-455.
- Rivie`re N, Perkins RJ, Chocat B and Lecus A, 2006. Flooding flows in city crossroads: 1D modeling and prediction. *Water Sci Technol* 54(6-7): 75-82.
- Rivie`re N, Travin G and Perkins RJ, 2011. Subcritical open channel flows in four branch intersections. *W Resources Research* 147. W10517. 1-10.
- Shabayek S, Steffler P and Hicks F, 2002. Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions. *J Hydraul Eng ASCE* 128(9): 821-828.
- Shumate ED, 1998. Experimental description of flow at an open- channel junction. Master Thesis, Univ of Iowa, Iowa.
- Taylor E, 1944. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. *ASCE Trans* 109: 893-902.