

مدل تحلیلی تغییرات عمق آب در کانال پایین دست تقاطع چهارشاخه با جریان زیربحرانی

سید حسین حسینی^{۱*}، داود فرسادی زاده^۲، علی حسین زاده دلیر^۳ و فرزین سلماسی^۴

چکیده

مطالعه‌ی تغییرات عمق آب در کانال‌های پایین دست تقاطع کانال‌ها، برای فراهم کردن وضعیت لازم در دهانه آبگیرها بسیار مهم است. در این پژوهش، مدلی تحلیلی برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مختلف نظیر نسبت دبی ورودی، ارتفاع سرریزهای خروجی، نسبت ارتفاع سرریزهای انتهایی کانال‌ها، تراز کف کانال‌های فرعی، عدد فرود کانال ورودی اصلی و زاویه تقاطع کانال‌ها روی تغییرات عمق آب پایین دست تقاطع چهارشاخه با جریان زیربحرانی ارائه و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت دبی ورودی، نسبت ارتفاع سرریز انتهایی کانال خروجی فرعی به ارتفاع سرریز انتهایی کانال خروجی اصلی $(\frac{C_y}{C_x})$ ، تراز کف کانال‌های فرعی و ارتفاع سرریزهای خروجی عمق جریان در کانال خروجی اصلی افزایش می‌یابد. با افزایش عدد فرود کانال ورودی اصلی عمق جریان در کانال خروجی اصلی کاهش یافت. با تغییر زاویه تقاطع میزان دبی منحرف شده به داخل کانال خروجی اصلی تغییر کرده که با تغییر عمق جریان همراه بود؛ به گونه‌ای که برای زاویه ۹۰ درجه، عمق آب حداکثر و با کاهش زاویه تقاطع، کاهش یافت. مقایسه نتایج مدل تحلیلی و آزمایشگاهی مربوط به عمق جریان در کانال پایین دست نیز مطابقت خوبی را نشان داد، به گونه‌ای که حداکثر خطای به دست آمده کمتر از ۱۰٪ بود.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای هندسی و هیدرولیکی، تقاطع کانال‌ها، جریان زیربحرانی، حل تحلیلی، عمق کانال خروجی.

ارجاع: حسینی س.ح. فرسادی زاده د. حسین زاده دلیر ع. و سلماسی ف. ۱۳۹۷. مدل تحلیلی تغییرات عمق آب در کانال پایین دست تقاطع چهارشاخه با جریان زیربحرانی. مجله پژوهش آب ایران. ۲۸: ۷۳-۸۱.

۱- استادیار گروه آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

* نویسنده مسئول: savvedhossein.hosseini@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۵

مقدمه

مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی شبیه‌سازی جریان زیربحرانی در تقاطع کانال‌ها پرداختند. بررسی نتایج نشان داد که مدل یک‌بعدی همیشه نتایج قابل قبولی نمی‌دهد و تنها برای اعداد فرود پایین مناسب است؛ درحالی‌که مدل دوبعدی به ازای پارامترهای مختلف نتایج قابل قبولی از خود نشان داد. کسروانی و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل ریاضی برای توزیع جریان غیرماندگار در یک تقاطع سه شاخه راست گوشه ارائه دادند. آن‌ها در مطالعه‌ی خود جریان کانال فرعی را به‌عنوان یک سرریز جانبی با ارتفاع صفر در نظر گرفتند. مقایسه کلیه‌ی نتایج نشان داد که میزان خطای میانگین و حداکثر از ۴ و ۹ درصد تجاوز نمی‌کند. شابایک و همکاران (۲۰۰۲) براساس قانون بقای مومنتم در راستای جریان اصلی و بقای جرم برای کل سیستم، مدل تحلیلی یک‌بعدی برای جریان زیربحرانی در یک تقاطع سه شاخه را ارائه دادند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج مدلی بر پایه‌ی قانون بقای انرژی مقایسه کردند که مدل آن‌ها نسبت به مدل انرژی برتری داشت. همچنین مطابقت خوبی بین مدل آن‌ها و مدل‌های دیگری که بر مبنای قانون مومنتم ارائه شده، وجود و حتی در برخی موارد نسبت به مدل‌های دیگر برتری داشت. نانیا و همکاران (۲۰۱۱) از طریق مطالعه‌ی آزمایشگاهی به بررسی ویژگی‌های جریان زیربحرانی در تقاطع چهارشاخه‌ی ۹۰ درجه هم عرض پرداختند. در مطالعات آنان تقاطع دارای دو ورودی و دو خروجی بود. جریان در منطقه‌ی تقاطع و بویژه قبل از تقاطع یکنواخت بود که با مطالعه‌ی تیلور (۱۹۴۴) تطابق داشت و با کاهش عدد فرود یکنواخت‌تر می‌شد. روییره و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی آزمایشگاهی جریان زیربحرانی در تقاطع چهارشاخه (دو کانال ورودی و دو کانال خروجی) پرداختند. آن‌ها یک مدل تحلیلی هیدرولیکی برای توزیع جریان ارائه دادند و نتایج حاصل از آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند که مطابقت خوبی داشت؛ به‌گونه‌ای که در محدوده‌ی شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی دارای خطای $\pm 5\%$ بود. در این پژوهش، تأثیر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی مختلف روی تغییرات عمق جریان در کانال‌های خروجی در یک تقاطع چهارشاخه با جریان زیربحرانی با استفاده از مدل تحلیلی بررسی و نتایج حاصل با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

بررسی تغییرات عمق آب در پایین دست محل تقاطع کانال‌ها در شبکه‌های انتقال آب، برای آبیگری در این محل‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اهمیت مسأله، بررسی تغییرات عمق جریان در این محل‌ها همواره مورد توجه پژوهشگران مختلف در سراسر جهان بوده و مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی بسیاری در این زمینه انجام شده است. بیشتر مطالعات موجود مربوط به تقاطع سه شاخه بوده و مطالعات کمی در مورد تقاطع چهارشاخه انجام شده است. تیلور (۱۹۴۴) احتمالاً اولین کسی بود که با به‌کارگیری یک مدل تحلیلی برای جریان در تقاطع کانال‌های روباز، عمق آب در کانال فرعی بالادست تقاطع را شبیه‌سازی کرد. 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. آن‌ها با در نظر گرفتن فرضیات ساده‌کننده و تحلیل‌های ریاضی بر مبنای مومنتم انتقالی از کانال اصلی به فرعی در نهایت معادله‌ای ارائه دادند. مقایسه نتایج آن‌ها در مورد مومنتم انتقالی از کانال اصلی به فرعی و عمق جریان در کانال پایین دست اصلی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی را نشان داد. همچنین نتایج مربوط به عمق جریان در کانال پایین دست اصلی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی داشت. سو و همکاران (۱۹۹۸) با حذف بعضی فرضیات تیلور (۱۹۴۴) از جمله، صرف‌نظر کردن از افت انرژی، عدم توزیع یکنواخت سرعت، یکسان نبودن عمق جریان در کانال‌های بالادست تلاقی و تمایز بین زاویه‌ی اتصال و زاویه‌ی ورود جریان از کانال فرعی به اصلی روابط خود را برای محاسبه‌ی افت انرژی و همچنین عمق نسبی به‌دست آورد. 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 مطالعه‌ی خود از مدل تلاطم دوبعدی $k-e$ استفاده کردند. با وجود مقداری اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی، نتایج مدل عددی مورد استفاده با آن‌ها در پیش‌بینی مشخصات اصلی جریان از جمله انقباض جریان در کانال فرعی از دقت قابل قبولی برخوردار بود. گوستین و همکاران (۲۰۱۰) به مقایسه

مواد و روش‌ها

با توجه به اینکه در این پژوهش تقاطع مورد بررسی از نوع چهار شاخه با دو ورودی و دو خروجی است، پارامترهای مؤثر روی عمق جریان عبارتند از: دبی جریان کانال‌های ورودی Q_{xi} ، Q_{yi} ، دبی جریان کانال‌های خروجی Q_{xo} ، Q_{yo} (دبی جریان در واحد عرض کانال‌های ورودی q_{xi} ، دبی جریان در واحد عرض کانال‌های خروجی q_{xo} ، عمق آب در کانال‌های ورودی y_{xi} ، y_{yi} ، عرض کانال‌های ورودی b_{xi} ، b_{yi} ، زاویه تقاطع کانال‌ها q ، عمق

آب در کانال‌های خروجی y_{xo} ، y_{yo} ، عرض کانال‌های خروجی b_{xo} ، b_{yo} ، شتاب ثقل g ، جرم مخصوص سیال ρ ، لزجت دینامیکی m ، ارتفاع سرریزهای انتهایی کانال‌های خروجی c_x ، c_y (x کانال اصلی و y کانال فرعی) ارتفاع کف کانال فرعی ورودی نسبت به کف کانال اصلی z_{yi} ، ارتفاع کف کانال فرعی خروجی نسبت به کف کانال اصلی z_{yo} ، در معادله نهایی عرض کانال‌ها با پارامتر b و ارتفاع کف کانال فرعی خروجی نسبت به کف کانال اصلی z_{yo} در نظر گرفته شد. با توجه به عوامل فوق معادله (۱) را می‌توان تشکیل داد:

$$F(q_{xi}, q_{yi}, q_{xo}, q_{yo}, y_{xi}, y_{yi}, y_{xo}, y_{yo}, c_x, c_y, z_{yo}, b, r, m, g, q) = 0 \quad (1)$$

با انجام تحلیل ابعادی به روش باکینگهام می‌توان پارامترهای بی‌بعد (۲) را مشخص کرد:

$$f\left(\frac{q_{yi}}{q_{xi}}, \frac{q_{xo}}{q_{xi}}, \frac{q_{yo}}{q_{xi}}, \frac{y_{xi}}{b}, \frac{y_{yi}}{b}, \frac{y_{xo}}{b}, \frac{y_{yo}}{b}, \frac{c_x}{b}, \frac{c_y}{b}, \frac{z_{yo}}{b}, Fr_{xi}, Re_{xi}, q\right) = 0 \quad (2)$$

با حذف پارامترهای وابسته نظیر نسبت عمق آب در کانال‌های ورودی $\left(\frac{y_{xi}}{y_{yi}}\right)$ و نسبت دبی خروجی از کانال فرعی به کانال ورودی اصلی $\left(\frac{q_{yo}}{q_{xi}}\right)$ در نهایت پارامترهای

بدون بعد مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$f\left(\frac{y_{xo}}{b}, \frac{q_{yi}}{q_{xi}}, \frac{c_x}{b}, \frac{c_y}{b}, \frac{z_{yo}}{b}, Fr_{xi}, Re_{xi}, q\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به آشفتگی بودن جریان از تأثیر عدد رینولدز صرف نظر می‌شود (حداقل عدد رینولدز محاسبه شده در آزمایش‌ها در حدود ۱۱۰۰۰ بود). با حذف تابع بی‌بعد Re_{xi} معادله (۳) به صورت (۴) نوشته می‌شود:

$$f\left(\frac{y_{xo}}{b}, \frac{q_{yi}}{q_{xi}}, \frac{c_x}{b}, \frac{c_y}{b}, \frac{z_{yo}}{b}, Fr_{xi}, q\right) = 0 \quad (4)$$

با ترکیب برخی پارامترهای فوق، در نهایت عمق آب در کانال خروجی را می‌توان به صورت رابطه (۵) نشان داد:

$$\frac{y_{xo}}{b} = f\left(\frac{q_{yi}}{q_{xi}}, \frac{c_x}{b}, \frac{c_y}{c_x}, \frac{z_{yo}}{b}, Fr_{xi}, q\right) \quad (5)$$

مدل تحلیلی

مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش یک بعدی بوده که در آن از قوانین بقای جرم، انرژی و مومنتم همراه فرضیات زیر استفاده شده است:

- یکنواخت بودن جریان در کانال‌های ورودی و خروجی؛
- توزیع یکنواخت سرعت در مقطع عرضی؛
- توزیع هیدرواستاتیک فشار در کانال‌های ورودی و خروجی؛
- برابر یک در نظر گرفتن ضرایب تصحیح انرژی جنبشی و مومنتم ($a = b = 1$)؛
- صرف نظر کردن از افت اصطکاکی ناشی از جداره‌ها و کف؛
- صرف نظر کردن از افت ناشی از تلاطم و تنش برشی؛

با توجه به تعداد متغیرها (دبی جریان در کانال‌های خروجی و عمق آب در همه‌ی کانال‌ها) در مجموع تعداد شش مجهول وجود دارد که برای تعیین آن‌ها به شش معادله نیاز است. به همین منظور معادلات زیر در نظر گرفته شد:

- معادله‌ی پیوستگی برای کل سیستم

$$Q_{xi} + Q_{yi} = Q_{xo} + Q_{yo} \quad (6)$$

- معادله مومنتم در راستای کانال اصلی و فرعی

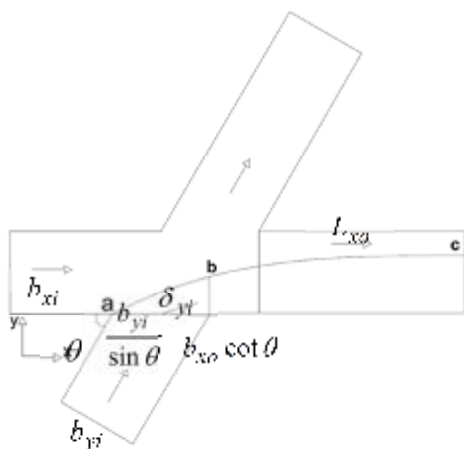
$$g \frac{y_{xi}^2}{2} b_{xi} - g \frac{y_{xo}^2}{2} b_{xo} + \frac{r Q_{xi}^2}{(b_{xi} \times y_{xi})} - \frac{r Q_{xo}^2}{(b_{xo} \times y_{xo})} + \frac{r Q_{yi}^2 \cos(d_{yi})}{(b_{yi} \times y_{yi} \cos(q - d_{yi}))} - \frac{r Q_{yo}^2 \cos(d_{yo})}{(b_{yo} \times y_{yo} \cos(q - d_{yo}))} = 0 \quad (7)$$

می‌توان دستگاه معادلات را حل کرد. برای تعیین پارامترهای فوق روش‌های زیر ارائه شد.

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

فرض می‌کنیم جریان ورودی از کانال فرعی سهمی شکل است. اگر محورهای مختصات دکارتی را به صورتی در نظر بگیریم که رأس آن در گوشه‌ی 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 ۱)، معادله‌ی سهمی مربوط به پروفیل سطح آب را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$y^2 = 4px \quad (13)$$



شکل ۱- طرح شماتیک الگوی جریان در محل تقاطع (x جهت کانال اصلی و y جهت کانال فرعی)

پارامتر p را می‌توان با جایگزینی مختصات یک نقطه از منحنی ac ، در معادله‌ی فوق تعیین کرد. چنانچه مختصات نقطه‌ی c را در آن جایگزین و پارامتر p را تعیین کنیم، در نهایت معادله‌ی (۱۳) را می‌توان به صورت معادله (۱۴) نوشت:

$$y^2 = \frac{b_{xo}^2 \left[\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}} \right]^2}{\left(\frac{b_{yi}}{\sin q} + b_{xo} \cot q + L_{xo} \right)} x \quad (14)$$

با فرض اینکه شیب خط انحراف جریان ورودی از کانال فرعی با شیب منحنی مربوط به انحنا‌ی جریان در نقطه‌ی

$$g \frac{y_{yi}^2}{2} - b_{yi} - g \frac{y_{yo}^2}{2} - b_{yo} + \frac{rQ_{yi}^2}{(b_{yi} \times y_{yi})} - \frac{rQ_{yo}^2}{(b_{yo} \times y_{yo})} \quad (8)$$

$$+ \frac{rQ_{yi}^2 \cos(d_{yi})}{(b_{yi} \times y_{yi} \cos(q - d_{yi}))} - \frac{rQ_{yo}^2 \cos(d_{yo})}{(b_{yo} \times y_{yo} \cos(q - d_{yo}))} = 0$$

با توجه به شرایط جریان، یکی از دو معادله‌ی (۷) یا (۸) در نظر گرفته می‌شود. چنانچه ارتفاع سرریزهای انتهای کانال‌ها با یکدیگر برابر یا ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی اصلی کمتر از ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی فرعی باشد، از معادله‌ی (۷) و در صورتی که ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی اصلی کمتر از ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی اصلی باشد، از معادله‌ی (۸) استفاده می‌شود.

- معادله‌ی انرژی

در این حالت دو معادله بین جریان کانال فرعی ورودی و کانال اصلی خروجی (بین دو نقطه‌ی b_{yi} و c در شکل ۱ و جریان کانال ورودی اصلی و خروجی فرعی) بین دو نقطه b_{xi} و c در شکل ۲ نوشته می‌شود.

$$y_{yi} + z_{yi} + \frac{Q_{yi}^2}{2g(b_{yi} \times y_{yi})^2} = \quad (9)$$

$$y_{xo} + z_{xo} + \frac{Q_{xo}^2}{2g(b_{xo} \times y_{xo})^2}$$

$$y_{xi} + z_{xi} + \frac{Q_{xi}^2}{2g(b_{xi} \times y_{xi})^2} = \quad (10)$$

$$y_{yo} + z_{yo} + \frac{Q_{yo}^2}{2g(b_{yo} \times y_{yo})^2}$$

- معادله‌ی دبی- اشل مربوط به سرریزهای انتهای کانال‌های خروجی

$$Q_{xo} = 0.715(y_{xo} - h_{xo})^{1.5} \quad (11)$$

$$Q_{yo} = 0.715(y_{yo} - h_{yo})^{1.5} b_{xo} \left(\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}} \right) \quad (12)$$

در معادلات (۱۱) و (۱۲) ارتفاع سرریزهای انتهای کانال‌های خروجی هستند. در معادلات فوق واحد جرم (kg)، واحد طول (m) و واحد زمان (s) است. معادلات (۶) تا (۱۲) در مجموع ۶ معادله را تشکیل می‌دهند که از آن‌ها می‌توان برای تعیین پارامترهای مجهول استفاده کرد. در معادلات (۷) و (۸) چهار پارامتر d_{xo} ، d_{xi} ، d_{yo} ، d_{yi} وجود دارد که با تعیین آن‌ها

تعیین زاویه جریان خروجی از کانال اصلی با راستای

مثبت محور $y (d_{xi})$

در این حالت جهت مثبت محور y ، هم‌راستا با کانال فرعی خروجی و محور x در جهت عمود بر آن در نظر گرفته شد که با تغییر زاویه q راستای محورهای مختصات تغییر می‌کند (شکل ۲). مشابه حالت‌های قبل فرض می‌کنیم خط انحراف جریان سهمی شکل باشد، در این صورت با توجه به موقعیت آن در صفحه‌ی مختصات، معادله‌ی سهمی به صورت معادله (۱۹) خواهد بود.

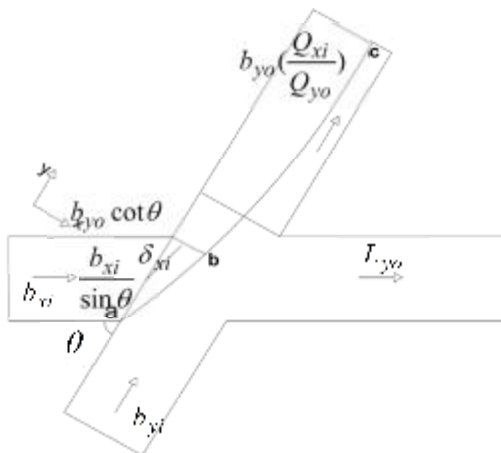
$$x^2 = 4py \quad (19)$$

با جای‌گذاری مختصات نقطه‌ی c در معادله‌ی فوق می‌توان پارامتر p را محاسبه کرد. در نتیجه شکل نهایی معادله‌ی سهمی به صورت معادله (۲۰) خواهد بود:

$$x^2 = \frac{b_{yo}^2 \left[\frac{Q_{xi}}{Q_{yo}} \right]^2}{\left(\frac{b_{xi}}{\sin q} + b_{yo} \cot q + L_{yo} \right)} y \quad (20)$$

$$\Rightarrow x = \pm \frac{b_{yo} \left[\frac{Q_{xi}}{Q_{yo}} \right]}{\sqrt{\left(\frac{b_{xi}}{\sin q} + b_{yo} \cot q + L_{yo} \right)}} \sqrt{y} \quad (21)$$

با توجه به موقعیت سهمی، مقدار مثبت x قابل قبول خواهد بود.



شکل ۲- شکل شماتیک انحراف جریان خروجی از کانال اصلی

با فرض اینکه مشتق معادله‌ی (۲۰) در نقطه‌ی b برابر با $\tan d_{xi}$ باشد (شکل ۲)، خواهیم داشت:

b برابر است، می‌توان زاویه‌ی انحراف جریان ورودی را تعیین کرد.

چنانچه از معادله‌ی (۱۴) مشتق بگیریم، خواهیم داشت:

$$2y \frac{dy}{dx} = \frac{b_{xo}^2 \left[\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}} \right]^2}{\left(\frac{b_{yi}}{\sin q} + b_{xo} \cot q + L_{xo} \right)} \quad (15)$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{b_{xo} \left[\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}} \right]}{2y \left(\frac{b_{yi}}{\sin q} + b_{xo} \cot q + L_{xo} \right)}$$

با جای‌گذاری مقدار y از معادله‌ی (۱۴) در معادله‌ی (۱۵)، آن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{b_{xo} \left[\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}} \right]}{2 \sqrt{\left(\frac{b_{yi}}{\sin q} + b_{xo} \cot q + L_{xo} \right)}} \times \frac{1}{\sqrt{x}} = \tan d_{yi} \quad (16)$$

طبق فرض انجام شده و با جای‌گذاری $x = \frac{b_{yi}}{\sin q}$ در معادله‌ی (۱۶) خواهیم داشت:

$$\Rightarrow d_{yi} = \arctan \left(\frac{1}{2} \times \frac{b_{xo} \left[\frac{Q_{yi}}{Q_{xo}} \right]}{\sqrt{\left(\frac{b_{yi}}{\sin q} + b_{xo} \cot q + L_{xo} \right)}} \times \frac{\sqrt{\sin q}}{\sqrt{b_{yi}}} \right) \quad (17)$$

تعیین زاویه‌ی جریان خروجی از کانال فرعی با راستای

مثبت محور $x (d_{yo})$

در این حالت نیز به‌طور مشابه با نوشتن معادلات، ساده‌سازی و جای‌گذاری در نهایت معادله (۱۸) را خواهیم داشت:

$$\Rightarrow d_{yo} = \arctan \left(\frac{1}{2} \times \frac{(b_{xi} (1 - \frac{Q_{yo}}{Q_{xi}}) - b_{xo})}{\sqrt{(b_{xi} \cot q + \frac{b_{yo}}{\sin q} + L_{xi})}} \times \frac{\sqrt{\sin q}}{\sqrt{b_{yo}}} \right) \quad (18)$$

در دو حالت بررسی شده ارتفاع سرریزهای انتهای کانال‌ها با یکدیگر برابر یا ارتفاع سرریز انتهای کانال خروجی اصلی کمتر از ارتفاع سرریز انتهای کانال فرعی خروجی بود. با جایگزینی مقادیر محاسبه شده d_{yo} و d_{yi} در معادله (۷) می‌توان دستگاه معادلات (۶ معادله، ۶ مجهول) را تشکیل داده، حل کرد.

تعیین زاویه جریان ورودی به کانال اصلی با راستای

مثبت محور $y(d_{xo})$

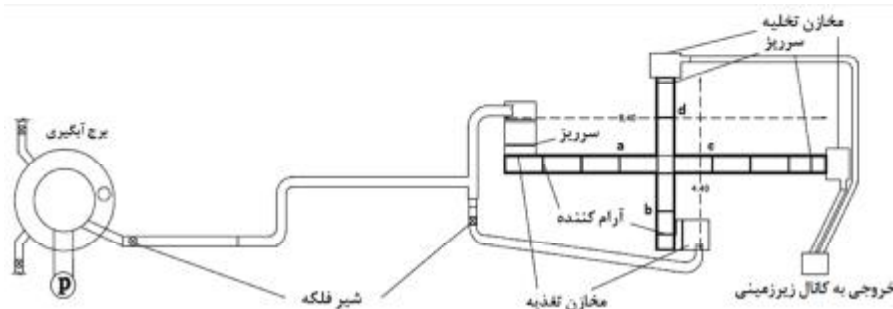
در این حالت نیز به طور مشابه با نوشتن معادلات، ساده سازی و جای گذاری در نهایت معادله زیر را خواهیم داشت:

$$\Rightarrow d_{xo} = \arctan\left(\frac{1}{2} \times \frac{(b_{yi}(1 - \frac{Q_{xo}}{Q_{yi}}) - b_{yi}) \times \sqrt{\sin q}}{\sqrt{(b_{yi} \cot q + \frac{b_{xo}}{\sin q} + L_{yi})} \times \sqrt{b_{xo}}}\right) \quad (25)$$

با تعیین d_{xi} و d_{xo} می توان در مواقع لزوم با کاربرد معادله ی (۸) همراه معادلات دیگر دستگاه معادلات (۶) معادله ۶ مجهول) را تشکیل داده و دستگاه معادلات به دست آمده، با کد نویسی در نرم افزار (2011) MATLAB حل و بدین ترتیب مقادیر دبی خروجی و عمق جریان در کانالها تعیین شد.

مدل فیزیکی

مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز ساخته شد. طول کانال اصلی ۸/۴ متر و طول کانال فرعی ۴/۴ بود. ارتفاع و عرض کانالها به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۴ متر بود. شیب کف کانالها ثابت و برابر صفر در نظر گرفته شد. در ابتدای کانالها مخازن تغذیه و در انتهای کانالها مخازن تخلیه قرار داشت. آب مورد نیاز آزمایشها از برج آگیری با یک پمپ با ظرفیت ۱۰۰ لیتر بر ثانیه تأمین شد (شکل ۳).



شکل ۳- پلان مدل آزمایشگاهی

میزان دبی خروجی از کانال اصلی افزایش می یابد که با توجه به ارتفاع ثابت سرریزهای انتهای کانالها عمق جریان افزایش خواهد یافت (شکل ۴). به دلیل افزایش ثابت دبی کانال فرعی تغییرات عمق جریان خطی است.

$$2x \frac{dx}{dy} = \frac{b_{yo}^2 \left[\frac{Q_{xi}}{Q_{yo}} \right]^2}{\left(\frac{b_{xi}}{\sin q} + b_{yo} \cot q + L_{yo} \right)} \quad (22)$$

$$\Rightarrow \frac{dx}{dy} = \frac{b_{yo}^2 \left[\frac{Q_{xi}}{Q_{yo}} \right]^2}{2x \left(\frac{b_{xi}}{\sin q} + b_{yo} \cot q + L_{yo} \right)}$$

با جای گذاری معادله ی (۲۱) در معادله ی (۲۲)، نهایتاً معادله (۲۳) به دست خواهد آمد:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{b_{yo} \left[\frac{Q_{xi}}{Q_{yo}} \right]}{2 \sqrt{\left(\frac{b_{xi}}{\sin q} + b_{yo} \cot q + L_{yo} \right)}} \times \frac{1}{\sqrt{y}} = \tan d_{xi} \quad (23)$$

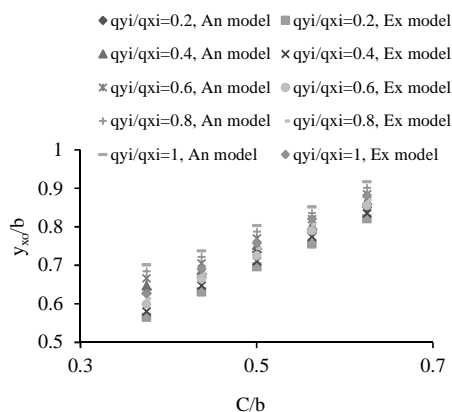
چنانچه y مربوط به نقطه ی b را در معادله (۲۳) قرار دهیم، مشتق معادله در نقطه ی b به دست خواهد آمد (شکل ۲):

$$\Rightarrow d_{xi} = \arctan\left(\frac{1}{2} \times \frac{b_{yo} \left[\frac{Q_{xi}}{Q_{yo}} \right] \times \sqrt{\sin q}}{\sqrt{\left(\frac{b_{xi}}{\sin q} + b_{yo} \cot q + L_{yo} \right)} \times \sqrt{b_{xi}}}\right) \quad (24)$$

نتایج و بحث

نسبت دبی ورودی کانال فرعی به اصلی

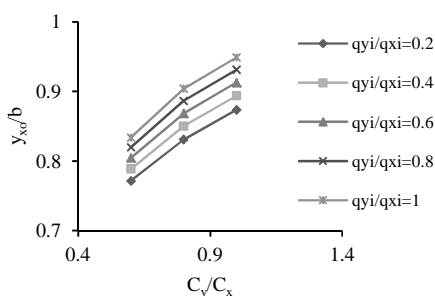
بررسی نتایج مدل تحلیلی نشان داد که با افزایش نسبت دبی ورودی کانال فرعی به اصلی عمق جریان در کانال خروجی اصلی افزایش می یابد. با افزایش دبی ورودی



شکل ۶- تغییرات عمق آب در کانال خروجی اصلی در برابر ارتفاع سرریزهای خروجی

نسبت ارتفاع سرریزهای انتهای کانال‌ها

نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش نسبت $\frac{c_y}{c_x}$ عمق جریان در کانال خروجی اصلی افزایش می‌یابد (شکل ۷). با افزایش نسبت $\frac{c_y}{c_x}$ میزان دبی خروجی از کانال خروجی اصلی افزایش یافته که با توجه به ثابت بودن، ارتفاع سرریز خروجی کانال اصلی، با افزایش دبی خروجی، عمق آب در کانال خروجی اصلی افزایش یافت.



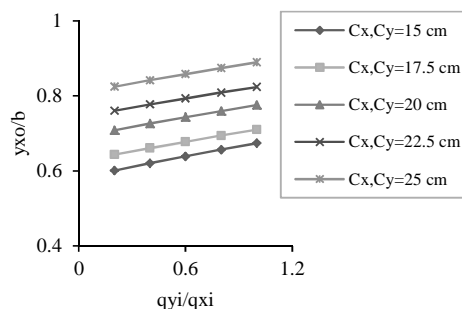
شکل ۷- تغییرات عمق آب در کانال خروجی اصلی در برابر

$$\text{نسبت } \frac{c_y}{c_x}$$

مقدار دقت مدل تحلیلی برای فاکتور فوق بیشتر بود به طوری که حداکثر خطای به دست آمده در حدود ۵٪ بود.

تراز کف کانال‌های فرعی

بررسی نتایج مدل تحلیلی نشان داد که با افزایش تراز کف کانال‌های فرعی، عمق جریان در کانال خروجی اصلی افزایش می‌یابد که در ترازهای کف بالا به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند (شکل ۸). در ترازهای کف بالا تقریباً

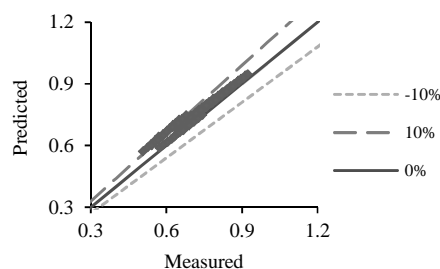


شکل ۴- تغییرات عمق آب در کانال خروجی اصلی در برابر نسبت دبی ورودی

مقدار خطای مقادیر پیش‌بینی شده‌ی عمق جریان نیز با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$\text{Error}(\%) = \frac{|y_{\text{predicted}} - y_{\text{measured}}|}{y_{\text{measured}}} \times 100 \quad (26)$$

این معادله $y_{\text{predicted}}$ مقدار عمق جریان محاسبه شده با مدل تحلیلی و y_{measured} مقدار عمق اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل تحلیلی برای عمق آب در کانال خروجی اصلی نشان داد که مقدار حداکثر خطای به دست آمده در حدود ۱۰٪ است (شکل ۵).

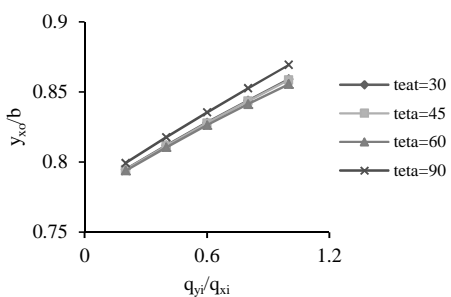


شکل ۵- تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده عمق جریان خروجی در برابر مقادیر پیش‌بینی شده

تأثیر ارتفاع سرریزهای خروجی

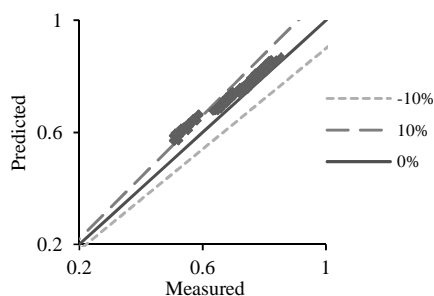
با توجه به اینکه تغییر ارتفاع سرریزها تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی توزیع دبی ندارد در این حالت دبی خروجی تأثیری نداشته و تنها عامل ارتفاع سرریزها است. نتایج مدل تحلیلی نشان داد که به ازای یک نسبت دبی ورودی ثابت با افزایش ارتفاع سرریزها عمق جریان در کانال‌های خروجی افزایش می‌یابد (شکل ۶). مقدار خطای به دست آمده در این حالت نیز کمتر از ۱۰٪ بود.

ورودی یکسان است؛ اما مقدار عمق جریان برای زوایای مختلف، تغییر می‌کند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشخص است، برای یک نسبت دبی ورودی ثابت حداقل عمق آب در کانال خروجی اصلی مربوط به زاویه ۶۰ درجه بوده و حداکثر عمق برای زاویه ۹۰ درجه اتفاق افتاد. در چنین شرایطی تغییرات عمق آب در کانال خروجی اصلی تابع مقدار دبی خروجی از کانال اصلی است که برای زاویه ۹۰ درجه این دبی حداکثر بوده؛ در حالیکه برای زاویه ۶۰ درجه مقدار آن حداقل است.



شکل ۱۰- تغییرات عمق آب در کانال اصلی خروجی در برابر نسبت دبی‌های ورودی برای زوایای تقاطع مختلف

در شکل ۱۱ تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده‌ی عمق جریان کانال خروجی اصلی برای زوایای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است اکثر داده‌ها در حداصل دو خط مربوط به خطای $\pm 10\%$ قرار دارند.

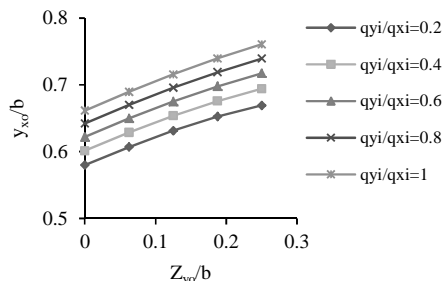


شکل ۱۱- مقادیر اندازه‌گیری شده عمق جریان در برابر مقادیر پیش‌بینی شده برای زوایای مختلف

نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدلی تحلیلی برای بررسی تغییرات عمق جریان در برابر عامل‌های مختلف هندسی و هیدرولیکی ارائه شد و برای ارزیابی قابلیت مدل نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. با توجه به

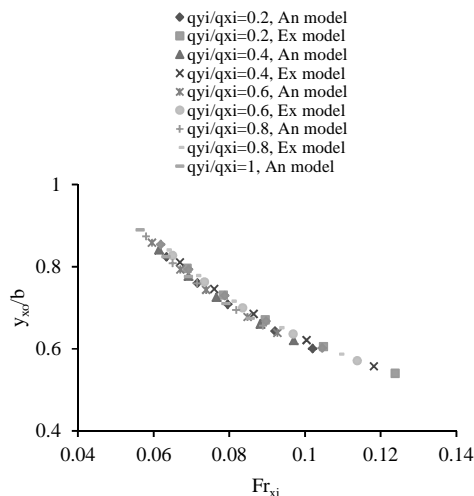
همه‌ی جریان ورودی از کانال خروجی اصلی خارج می‌شود که سبب ثابت شدن عمق آب در کانال خروجی اصلی می‌شود. حداکثر مقدار خطای مدل تحلیلی برای عمق جریان برای ترازهای کف مختلف در حدود ۱۰٪ بود.



شکل ۸- تغییرات عمق آب در کانال خروجی اصلی در برابر تراز کف کانال‌های فرعی

عدد فرود کانال ورودی اصلی

افزایش عدد فرود کانال ورودی اصلی برای یک نسبت دبی ورودی ثابت با کاهش ارتفاع سرریزهای خروجی محقق خواهد شد که این کاهش ارتفاع سرریزهای خروجی سبب کاهش عمق جریان در کانال خروجی اصلی می‌شود (شکل ۹). حداکثر خطای مدل تحلیلی برای محاسبه‌ی عمق جریان نیز در حدود ۱۰٪ بود.



شکل ۹- تغییرات عمق آب در کانال خروجی اصلی در برابر عدد فرود کانال ورودی اصلی

زاویه تقاطع کانال‌ها

بررسی نتایج مدل تحلیلی نشان داد که برای زوایای تقاطع مختلف روند تغییرات عمق جریان در برابر نسبت دبی

- channels. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 116(3): 449-455.
8. Rivie`re N. Travin G. and Perkins R. J. 2011. Subcritical open channel flows in four branch intersections. Water Resources Research. Volume 147. W10517.
 9. Shabayek S. Steffler P. and Hicks F. 2002. Dynamic model for subcritical combining flows in channel junctions. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 128(9): 821-828.
 10. Taylor E. H. 1944. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. American Society of Civil Engineering Trans. 109: 893-902.

اینکه تغییرات عمق جریان در کانال خروجی اصلی با دبی خروجی از آن رابطه‌ی مستقیم دارد و از آنجا که با افزایش نسبت دبی ورودی، نسبت ارتفاع سرریزهای انتهایی کانال‌ها و تراز کف کانال‌های فرعی میزان دبی جریان خروجی افزایش یافت، عمق جریان نیز با افزایش همراه بود. با افزایش ارتفاع سرریزهای خروجی نیز عمق جریان در کانال خروجی اصلی افزایش یافت. تغییرات عمق جریان در کانال خروجی با عدد فرود کانال ورودی اصلی رابطه‌ی عکس داشت؛ به‌گونه‌ای که با افزایش عدد فرود کانال ورودی اصلی عمق جریان در کانال خروجی اصلی کاهش یافت. برای زوایای تقاطع مختلف با توجه به تغییر میزان دبی خروجی از کانال اصلی میزان تغییرات عمق جریان متفاوت بود؛ به‌گونه‌ای که برای زاویه‌ی ۹۰ درجه عمق جریان در کانال خروجی اصلی نسبت به سایر زوایای بیشتر و برای زوایای ۳۰ و ۶۰ درجه تقریباً یکسان بود. مقایسه نتایج مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر خطای به دست آمده در حدود ۱۰٪ بود.

منابع

1. Frizzell C. S. Khan A. A. and Werth D. E. 2008. Numerical simulation of equal and opposing subcritical flow junctions. J Hydraul Eng ASCE. 134(2): 267-273.
2. Ghostine R. Mose R. Vazquez J. Ghenaim A. and Gregorie C. 2010. Two-dimensional simulation of subcritical flow at a combining junction: luxury or necessity? Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 136(10): 799-805.
3. Hsu C. C. Lee W. J. and Chang C. H. 1998. Subcritical open-channel junction flow. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 124(8): 847-855.
4. Kesserwani G. Vazquez J. Riviere N. Liang Q. Travin G. and Mose R. 2010. New approach for predicting flow bifurcation at right-angled open-channel junction. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 136(9): 662-668.
5. Matlab and Statistics Toolbox Release 2011a. The MathWorks Inc Natick Massachusetts United States.
6. Nania L. S. Gomez M. Dolz J. Comas P. and Pomares J. 2011. Experimental study of subcritical dividing flow in an equal-width four-branch junction. Journal of Hydraulic Engineering ASCE. 137(10): 1298-1305.
7. Ramamurthy A. S. Tran D. M. and Carballada L. B. 1990. Dividing flow in open

