

شبیه‌سازی اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر تغییرات تراز سطح آب در کانال‌های متقاطع با استفاده از نرم‌افزار Fluent

سعید گوهری^{*۱}

چکیده

برخورد دو جریان مختلف در رودخانه‌ها، کانال‌های آبیاری و شبکه‌های آب و فاضلاب امری معمول و طبیعی است. در محل برخورد آشفتگی جریان افزایش یافته و جریان سه‌بعدی حاکم می‌شود. در این مقاله تأثیر عامل هندسی زاویه تقاطع (θ) و عوامل هیدرولیکی نسبت دبی جریان بالادست به پایین‌دست و عدد فرود پایین‌دست (F_{rd})، بر تغییرات تراز سطح آب با استفاده از مدل هیدرودینامیک سه‌بعدی فلوئنت بررسی شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برخورد جریان کانال فرعی و اصلی سبب ایجاد شتاب در جریان اختلاطی شده و با کاهش مقدار نسبت دبی جریان، شتاب جریان نیز افزایش می‌یابد. افزایش زاویه تقاطع و عدد فرود در پایین‌دست، مقدار عمق جریان در محل تقاطع را کاهش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تغییرات سطح آب در زاویه تقاطع ۹۰ درجه و کمترین مقدار در زاویه تقاطع ۳۰ درجه رخ می‌دهد. با افزایش نسبت دبی مقدار تغییرات سطح آب کاهش یافته و تغییرات سطح آب در نسبت دبی ۰/۹۱۷ کمترین مقدار و در نسبت دبی ۰/۰۸۳، بیشترین مقدار بوده است. در عدد فرود ۰/۹، زاویه ۹۰ درجه و نسبت دبی ۰/۰۸۳ اختلاف تراز سطح آب در پایین‌ترین و بالاترین نقطه به ۷۵ درصد عمق آب در بالادست کانال اصلی می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: تراز سطح آب، زاویه تقاطع، نسبت دبی، عدد فرود پایین‌دست، مدل عددی فلوئنت.

ارجاع: گوهری س. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی اثر پارامترهای هیدرولیکی و هندسی بر تغییرات تراز سطح آب در کانال‌های متقاطع با استفاده از نرم‌افزار Fluent. مجله پژوهش آب ایران. ۲۳: ۱۱-۲۲.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان.

* نویسنده مسئول: sacedgohari@yahoo.com

تایخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۱۵

مقدمه

مقطع کانال، ابعاد، شیب و زاویه بین دو کانال اصلی و فرعی) و پارامترهای هیدرولیکی (عدد فرود جریان، نسبت دبی در کانال اصلی و کانال فرعی) و همچنین وجود بستر متحرک در کانال‌ها و رسوبات به‌صورت بار معلق و بار بستر اشاره کرد. وجود بستر متحرک می‌تواند پارامترهای هندسی و هیدرولیکی را تحت تأثیر قرار دهد. دو نمونه از جریان متقاطع در شکل ۱ نشان داده شده است.

برخورد دو جریان با همدیگر در طبیعت (رودخانه) و همچنین مجاری دست ساز بشر (کانال‌ها و شبکه‌های آب و فاضلاب) مشاهده می‌شود. پارامترهای زیادی در الگوی جریان در تقاطع کانال‌ها تأثیر دارند و این عوامل سبب پیچیده شدن جریان در کانال‌های متقاطع شده است. از جمله این عوامل می‌توان به پارامترهای هندسی (شکل



شکل ۱- دو نمونه از برخورد دو جریان در مجاری طبیعی (منبع: تصاویر هوایی از سایت گوگل)

(الف) رودخانه کارون (ایران) (ب) روخانه‌های تسا و رانگیت (بنگال غربی)

را بررسی کرده و نشان دادند که تغییرات خط جدایی جریان تحت تأثیر نسبت دبی جریان است. نانا و همکاران (۲۰۱۱) یک بررسی آزمایشگاهی روی جریان‌های زیربحرانی در یک تقاطع با چهار شاخه و دو جریان ورودی و دو جریان خروجی انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که رابطه خطی بین نسبت جریان‌های ورودی، نسبت جریان‌های خروجی، عدد فرود جریان ورودی و نسبت عمق جریان‌های خروجی وجود دارد. تانگ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان و رسوب نشان دادند که حداکثر مقدار چاله فرسایش در محل تقاطع کانال‌ها رخ می‌دهد و در نسبت‌های دبی بسیار کم ابعاد ناحیه جدایی جریان می‌تواند کاهش یابد. مینوت و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی لایه اختلاطی در جریان‌های متقاطع نشان دادند که شکل لایه اختلاطی تحت تأثیر شتاب طولی و دیواره‌های جریان متقاطع است. قبادیان (۱۳۸۸) تأثیر تغییرات تراز سطح آب پایاب بر الگوی جریان‌های ثانویه در محل تلاقی کانال‌های روباز مستطیلی با مدل سه‌بعدی بررسی شد و نشان داد مدل SSIIM قابلیت شبیه‌سازی جریان متقاطع را دارد. گوهری (۱۳۹۱) با بررسی الگوی جریان در تقاطع ۹۰ درجه نشان داد که مدل عددی فلونت شبیه‌سازی دینامیک جریان در تقاطع کانال‌ها را به خوبی انجام می‌دهد. با توجه به اینکه تغییرات تراز سطح آب در جریان‌های متقاطع مهم است و در بررسی‌های گذشته اثر پارامترهای هندسی و

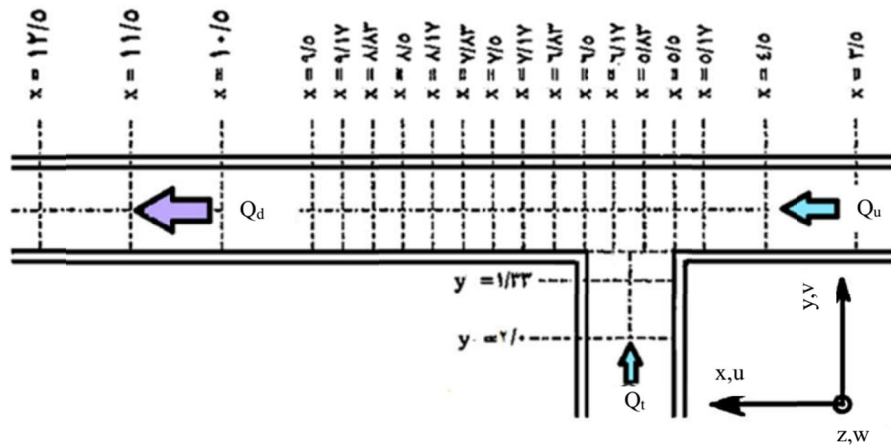
تیلور (۱۹۴۴) از پیشگامان مطالعه جریان متقاطع با بررسی معادله اندازه حرکت، معادله‌ای برای برآورد نسبت عمق جریان در کانال‌های بالادست و پایین‌دست ارائه کرده است. هسو و همکاران (۱۹۹۸) با بررسی جریان متقاطع در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه معادله‌ای را برای به دست آوردن نسبت عمق جریان با حل هم‌زمان معادلات انرژی و اندازه حرکت ارائه کرده‌اند. وبر و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی آزمایشگاهی الگوی جریان در کانال‌های متقاطع ۹۰ درجه پرداختند. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ایشان به‌صورت سرعت‌های سه‌بعدی به همراه نوسانات سرعت و عمق جریان بوده است. رامامورتی و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی جریان متقاطع در کانال‌های روباز مستطیلی ۹۰ درجه و استفاده از یک مدل آشفستگی سه‌بعدی رفتار جریان در تقاطع کانال‌ها را بررسی و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی واسنجی کردند. تینگ و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی تأثیر نسبت دبی بر الگوی جریان نشان دادند که مکان نقطه سکون به نسبت دبی جریان وابسته بوده و با افزایش نسبت دبی از گوشه بالادست کانال فرعی به سمت راست منتقل می‌شود. دیسانایاک (۲۰۰۹) جریان متقاطع دارای بار معلق را با استفاده از مدل فلونت و نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد و نشان داد که این مدل قابلیت خوبی در شبیه‌سازی این نوع جریان‌ها دارد. ترلیتا و همکاران (۲۰۱۰) تغییرات خط جدایی جریان در کانال‌های متقاطع با زاویه ۳۰ درجه

جریان‌های متقاطع فراهم کرده است (وبر و همکاران، ۲۰۰۱). داده‌های آزمایشگاهی روی یک کانال مستطیلی با زاویه تقاطع ۹۰ درجه (شکل ۲) و نسبت‌های دبی ارائه شده در جدول ۱ انجام شده است. عمق جریان در مواردی با تقسیم بر عمق آب در بالادست ($0/3$ m) به صورت بی‌بعد شده ($z^*=z/H$) معرفی می‌شود. سرعت متوسط جریان در پایین‌دست ($V=0/628$ m/s) بوده است. عمق بالادست در کانال اصلی در $x=3/5$ و عمق پایین‌دست در $x=12/5$ تعریف شده است.

هیدرولیکی کمتر مورد توجه بوده پس در این مقاله به بررسی تأثیر همزمان پارامترهای هندسی و هیدرولیکی بر رفتار جریان و تغییرات تراز سطح آب پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

برای صحت‌سنجی و اطمینان از خروجی‌های مدل عددی از داده‌های حاصل از آزمایش‌های انجام شده در مرکز پژوهشی هیدرولیک دانشگاه آیوا استفاده شده است. این داده‌ها بستر مناسبی را برای انجام پژوهش‌ها در زمینه



شکل ۲- مقاطع مختلف سرعت اندازه‌گیری شده در کانال متقاطع ۹۰ درجه (وبر و همکاران، ۲۰۰۱)

جدول ۱- داده‌های آزمایشگاهی (وبر و همکاران، ۲۰۰۱)

Q_u (m ³ /sec)	۰/۰۱۴	۰/۰۴۲	۰/۰۷۱	۰/۰۹۹	۰/۱۲۷	۰/۱۵۶
Q_t (m ³ /sec)	۰/۱۵۶	۰/۱۲۷	۰/۰۹۹	۰/۰۷۱	۰/۰۴۲	۰/۰۱۴
$Q^*=Q_u/(Q_u+Q_t)$	۰/۰۸۳	۰/۲۵۰	۰/۴۱۷	۰/۵۸۳	۰/۷۵۰	۰/۹۱۷

Q_u : دبی کانال بالادست، Q_t : دبی کانال فرعی و Q^* : نسبت دبی بالادست به کل دبی پایین‌دست

که در معادلات بالا، u_i مؤلفه سرعت در جهت محور x_i ($i=1,2,3$)، فشار کل، P چگالی سیال، ρ شتاب ثقل در جهت x_i و τ_{ij} تانسور تنش بوده ($j=1,2,3$) که در حالت جریان آشفته به صورت معادله (۳) بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = \left[\rho(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \right] \rho(k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

در جریان‌های آشفته، تنش برشی شامل دو ترم بوده و علاوه بر تنش برشی ناشی از مؤلفه متوسط جریان، تنش برشی دیگری ناشی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت ایجاد می‌شود که به تنش‌های رینولدز معروف بوده و به صورت معادله (۴) نشان داده می‌شود:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

مدل فلونت و معادلات

فلونت یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم‌ناپذیر لزج در حالت آشفته، با معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده بیان می‌شوند. معادلات پیوستگی (بقای جرم) و اندازه حرکت (بقای مومنتوم) به صورت زیر هستند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (2)$$

آشفته‌نگی وجود دارد که در این پژوهش از مدل آشفته‌نگی تنش رینولدز^۱ استفاده شده است. این مدل آشفته‌نگی دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های ثانویه و توزیع تنش برشی در بستر دارد. در مدل فلونتت از روش حجم محدود^۲ برای حل معادلات استفاده می‌شود که از معادلات دیفرانسیلی که به فرم عددی منفصل شده‌اند روی حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود. نحوه انفعال معادلات از روش آپونید مرتبه دوم^۳ بوده و همچنین برای ارتباط بین ترم‌های فشار و سرعت از الگوریتم PISO^۴ استفاده شده است که این روش‌ها همگرایی بهتری در حل معادلات داشته‌اند. از الگوریتم سیمپل^۵ برای ارتباط سرعت و فشار، از روش آپونید مرتبه اول^۶ به عنوان روش گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، افت انرژی جنبشی آشفته‌نگی و تنش‌های رینولدز و همچنین از روش استاندارد برای گسسته‌سازی معادله فشار، استفاده شده است. همچنین برای شبیه‌سازی تغییرات سطح آب از روش حجم سیال^۷ استفاده شده و میدان جریان به صورت دوفازی در نظر گرفته می‌شود. برای تولید هندسه مناسب، گره‌بندی هندسه تولید شده با رعایت معیارها و تعریف شرایط مرزی از پیش پردازنده گمبیت^۸ استفاده شده است. در مدل آشفته‌نگی تنش رینولدز به دلیل استفاده از تابع دیواره ارتباط بین ناحیه زیرلایه لزج و ناحیه آشفته باید شبکه‌بندی مناسب استفاده شود. بدین منظور فاصله اولین گره از دیواره ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و به تدریج با دور شده از دیواره فاصله گره‌ها افزایش می‌یابد. بعد از آنالیز حساسیت مدل نسبت به تعداد گره‌ها، برای کانال متقاطع با طول ۲۰ متر کانال اصلی و ۵ متر کانال فرعی و به عرض ۱ متر و عمق ۰/۳ متر، شبکه‌ای با ۱۴۵۱۱۱ گره برای کلیه زوایای تقاطع تولید شد.

شرایط مرزی

با توجه به اینکه از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی جریان دو فازی استفاده شده، فاز آب به صورت یک ستون آب ساکن با عمق ثابت و در ورودی‌های مدل اعمال شد.

در معادلات بالا u' نوسانات سرعت و n_t لزجت آشفته‌نگی است که بر خلاف لزجت مولکولی از نوع خاصیت سیال نیست بلکه تابع ویژگی‌های جریان و آشفته‌نگی آن است و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. انرژی جنبشی آشفته‌نگی بر واحد جرم (k) و d_{ij} به صورت زیر بیان می‌شود:

$$k = \frac{1}{\rho} (\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2}) \quad (5)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

برای حل میدان جریان آشفته براساس معادلات پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنش‌های رینولدز در معادلات به روش خاصی مدل شوند. در این صورت در حالت جریان سه‌بعدی با وجود چهار معادله شامل یک معادله پیوستگی و سه معادله مومنتوم (در سه‌بعد) و همچنین چهار مجهول میدان جریان شامل فشار و سرعت در سه‌بعد مشخص می‌شود. برای بیان تنش‌های رینولدز و یا به عبارت بهتر، بستن سیستم معادلات بالا از مدل‌های آشفته‌نگی استفاده می‌شود. در مدل‌های مزبور، ترم لزجت گردابه‌ای با استفاده از تئوری‌های مختلف (مانند تئوری اختلاط) بیان شده و ارتباط بین تنش‌های رینولدز و مؤلفه‌های متوسط سرعت برقرار می‌شود. در این مورد چنانچه معادله انتقالی برای ترم $\overline{u_i' u_j'}$ حل شود به طور مستقیم تنش‌های رینولدز به دست می‌آیند برای تعیین معادله انتقال برای هر دو مؤلفه i و j معادله مومنتوم از معادله ناویر-استوکس کم شده و سپس معادله حاصل برای مؤلفه i در سرعت نوسانی u_i' معادله حاصل برای مؤلفه j در سرعت نوسانی u_j' ضرب می‌شوند. با جمع معادلات حاصل و متوسط‌گیری زمانی از آن معادله انتقال مطلوب برای $\overline{u_i' u_j'}$ حاصل می‌شود که شکل تانسوری این معادله انتقال به صورت زیر است.

$$U_k \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

در معادله بالا P_{ij} تانسور تولید و Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش و D_{ij} تانسور پخشیدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف هستند. این مدل به دلیل پیچیدگی معادلات، به زمان حل بیشتری نیاز دارد ولی از دقت بسیار بالایی در حل مسائل پیچیده دارد. در مدل هیدرودینامیکی فلونتت چند مدل

1- Reynolds Stress Models

2- Finite Volume

3- Second Order Upwind

4- Pressure-implicit with splitting of operators

5- SIMPLE

6- First Order Upwind

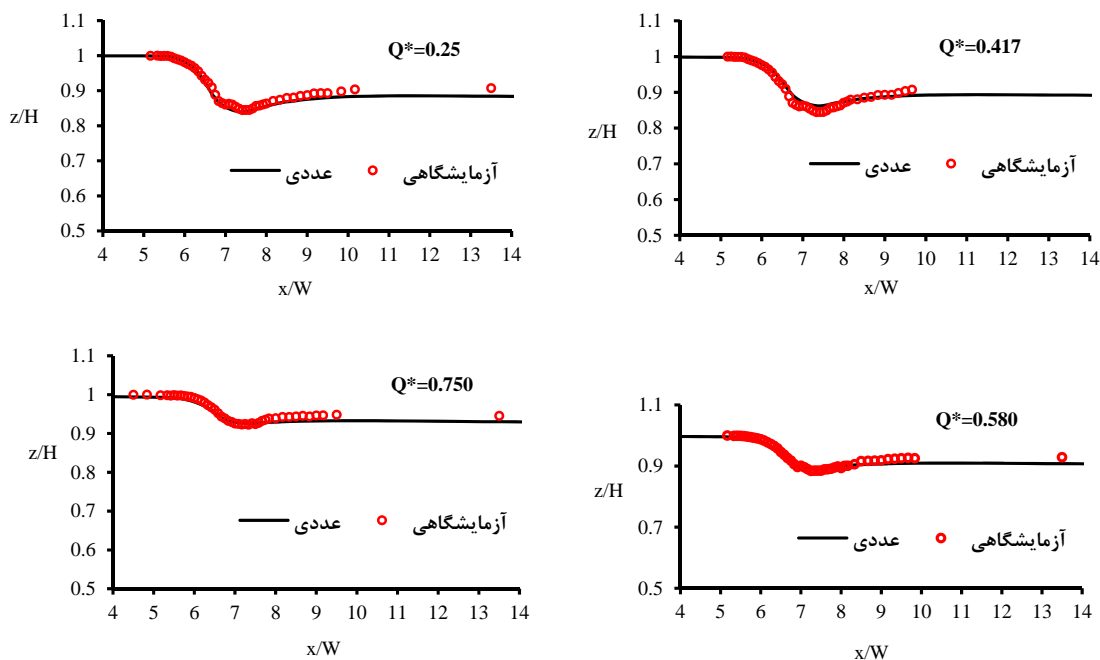
7- VOF

8- Gambit

صحت سنجی مدل

برای اطمینان از صحت نتایج مدل عددی مقایسه‌ای بین خروجی مدل و نتایج آزمایشگاهی (وهر و همکاران، ۲۰۰۱) انجام شده است. با اعمال شرایط مدل آزمایشگاهی در مدل ریاضی و حصول نتایج، مقایسه بردارهای سرعت جریان و تغییرات تراز سطح آب بین نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. در شکل ۳ تغییرات تراز سطح آب در خط مرکزی کانال اصلی برای نسبت‌های مختلف دبی و زاویه تقاطع ۹۰ درجه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود مدل به خوبی می‌تواند تغییرات سطح آب را در مقطع میانی کانال پیش‌بینی کند. متوسط و حداکثر خطا در شبیه‌سازی تغییرات سطح آب در زاویه تقاطع ۹۰ درجه به ترتیب ۱ درصد و ۳ درصد بوده است. همچنین بیشترین مقدار افت سطح آب در نسبت‌های دبی کمتر بوده و با افزایش مقدار نسبت دبی نوسانات سطح آب کاهش پیدا کرده است.

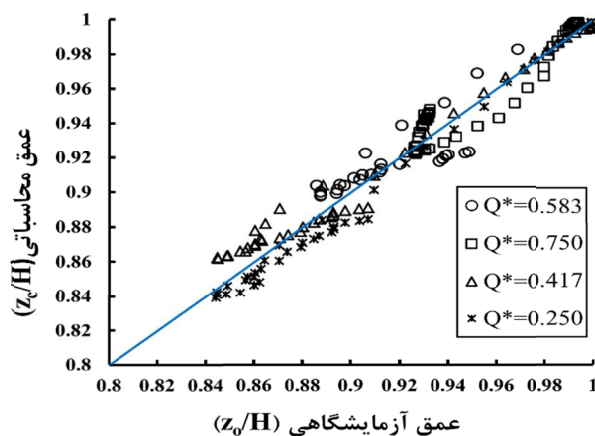
بقیه حجم داخلی میدان (۱۰ سانتی‌متر بالای تراز اولیه سطح آب) از هوا در نظر گرفته شد. در ورودی میدان، برای فاز آب شرط مرزی سرعت ورودی با شرایط مدل آزمایشگاهی و برای فاز هوا نیز شرط مرزی مشابه سرعت بسیار کم (۰/۰۰۰۰۱ متر بر ثانیه) در نظر گرفته شده است. برای مرز خروجی میدان، از شرط مرزی فشار خروجی، برای جداره‌های کانال از شرط مرزی دیواره صلب و بدون شیب و در نهایت شرایط مرزی سطح جریان در کانال نیز متقارن در نظر گرفته شد. در کلیه حالت‌ها، تحلیل جریان در حالت غیرماندگار با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه برای حل میدان استفاده شد و معیار همگرایی برابر با مقدار 10^{-6} تعریف شده است. مدت زمان اجرای مدل ۱۰ دقیقه با پردازش‌گر چهار هسته‌ای ۲/۵ GHz بوده که بعد از گذشت حدود ۱۰ روز معیار همگرایی حاصل شده است.



شکل ۳- تغییرات سطح آب در نسبت‌های مختلف دبی جریان و در خط مرکزی کانال اصلی

همبستگی مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی دیده می‌شود و حداکثر اختلاف بین مدل عددی و آزمایشگاهی ۳ درصد بوده است.

برای درک بهتر دقت مدل عددی، مقادیر عمق عددی آزمایشگاهی در خط مرکزی کانال اصلی در زاویه تقاطع ۹۰ درجه در شکل ۴ نشان داده است. با توجه به شکل



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی در زاویه ۹۰ درجه

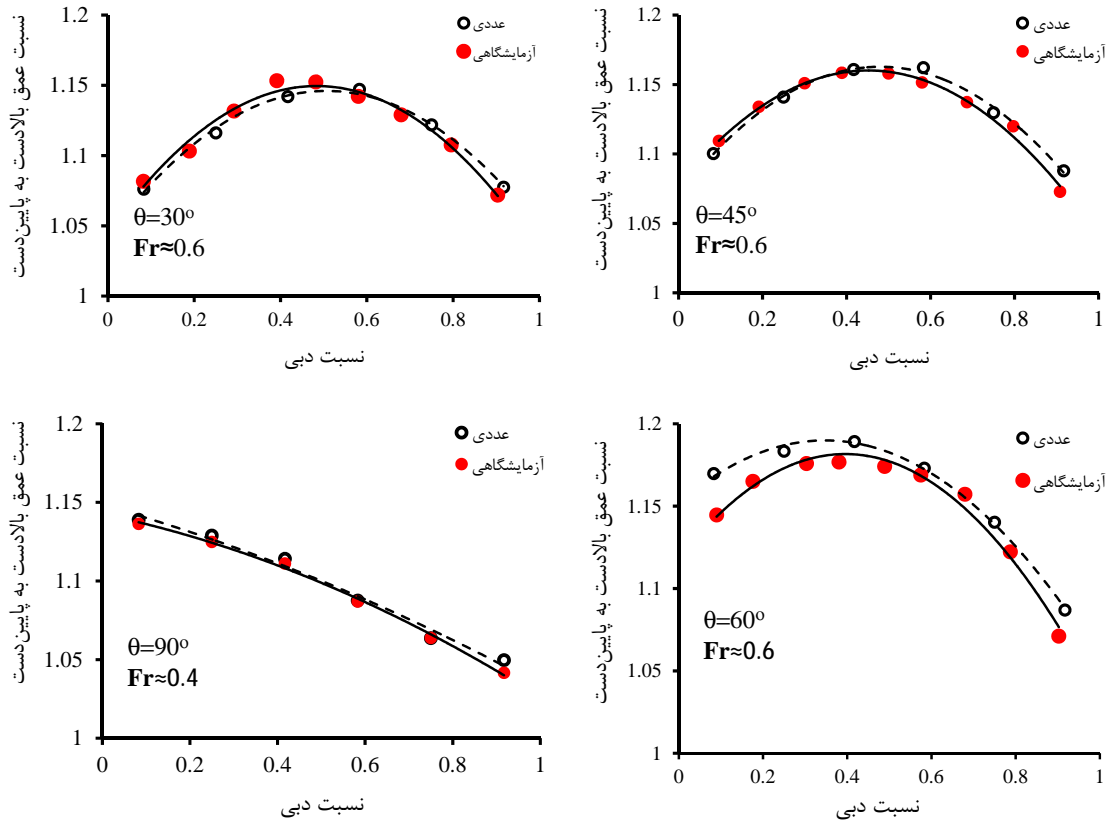
نتایج و بحث

بررسی‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای عدد فرود، نسبت دبی و زاویه تقاطع تأثیر مهمی بر رفتار جریان در تقاطع کانال‌ها دارند. در شکل ۵ تأثیر نسبت دبی بر نسبت عمق بالادست به پایین‌دست با مقایسه مقادیر عددی و آزمایشگاهی (داده‌های هسو و همکاران، ۱۹۹۸) نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها تغییرات نسبت عمق با نسبت دبی خطی نبوده و در نسبت‌های دبی بالا، عمق کاهش پیدا می‌کند. در زوایای تقاطع ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه با افزایش مقدار نسبت دبی، نسبت عمق نیز افزایش یافته و بعد از رسیدن به مقدار حداکثر دوباره کاهش پیدا می‌کند. مقدار حداکثر نسبت عمق و یا به عبارتی کمترین عمق پایین‌دست در زوایای تقاطع ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب در نسبت‌های دبی ۰/۴۸، ۰/۴۶ و ۰/۳۶ رخ داده است. در زاویه تقاطع ۹۰ درجه، بیشترین نسبت عمق جریان در کمترین نسبت دبی مشاهده می‌شود. رفتار جریان در تغییرات سطح آب در زاویه ۹۰ درجه تا حدودی متفاوت از زوایای دیگر بوده و با افزایش نسبت دبی جریان، تغییرات سطح آب در جهت کاهش بوده است. جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) در زوایای تقاطع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر ۰/۰۱۸، ۰/۰۰۹، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۰۲ بوده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی نشان می‌دهد که مدل عددی به خوبی مقادیر آزمایشگاهی را شبیه‌سازی کرده است.

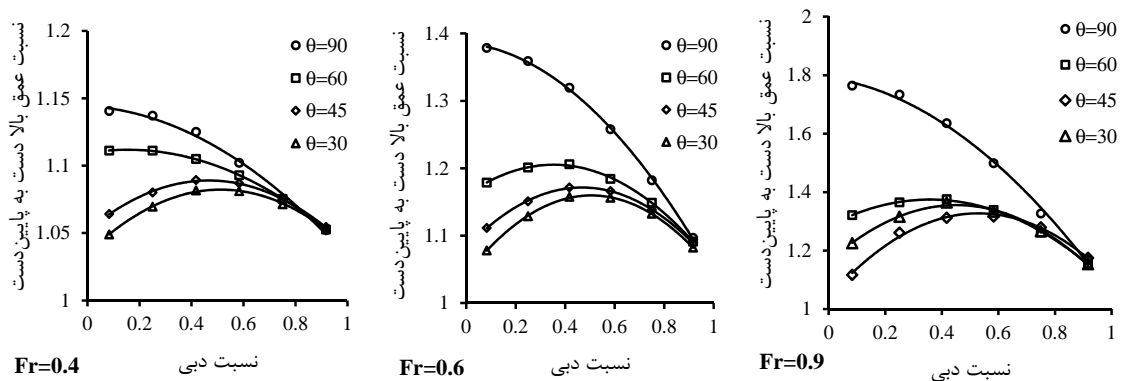
همچنین مقادیر عددی تغییرات نسبت عمق جریان با نسبت دبی در زوایای مختلف از تقاطع در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها عدد فرود

پایین‌دست نقش مهمی در تغییرات عمق جریان در تقاطع کانال‌ها دارد. با افزایش عدد فرود نسبت عمق جریان افزایش یافته است. در تمامی نمودارها با افزایش مقدار نسبت دبی تغییرات نسبت عمق کاهش یافته و در یک نقطه به هم می‌رسند. می‌توان انتظار داشت که با افزایش مقدار نسبت دبی جریان نزدیک به یک، نسبت عمق نیز کاهش یافته و به سمت عدد یک نزدیک شود. در نسبت دبی ۰/۹۱۷ مقدار نسبت عمق بالادست به پایین‌دست به ترتیب برای عددهای فرود ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ معادل ۱/۰۵، ۱/۰۸ و ۱/۱۵ بوده است.

با افزایش نسبت دبی جریان تأثیر جریان کانال فرعی بر کل جریان کم خواهد بود. در زاویه ۹۰ درجه به دلیل برخورد جریان در کانال فرعی با ساحل مقابل کانال اصلی و ترکیب آن با جریان کانال اصلی که از بالادست وارد می‌شود، جریان شتابی ایجاد شده و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. همچنین به دلیل سرعت بالای جریان در لایه‌های بالایی، جریان سطحی پس از برخورد با ساحل مقابل در کانال اصلی به سمت کف حرکت می‌کند. با کاهش حرکت چرخشی به سمت پایین حرکت می‌کند. با کاهش زاویه تقاطع مقدار اختلاط و آشفتگی جریان کم می‌شود و جریان با اتلاف انرژی کمتری به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. اتلاف کمتر انرژی سبب کاهش نسبت عمق بالادست به پایین‌دست خواهد شد. همچنین افزایش عدد فرود جریان می‌تواند شتاب جریان ترکیبی کانال اصلی و فرعی را تقویت کرده و جریان اختلاطی با عمق کمتر و سرعت بیشتری به سمت پایین‌دست حرکت کند.



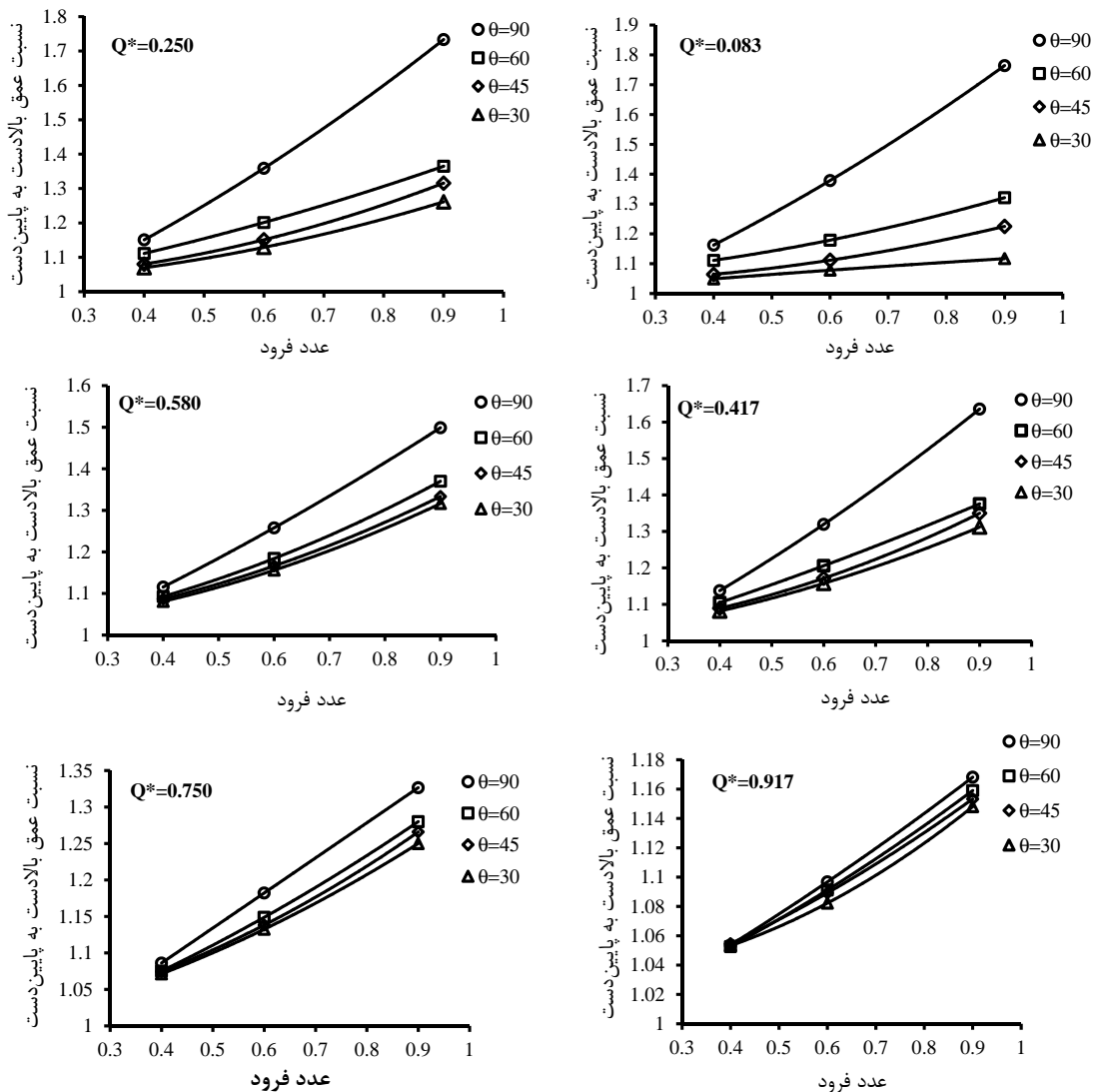
شکل ۵- مقایسه عددی و آزمایشگاهی (داده‌های هسو و همکاران، ۱۹۹۸) تغییرات عمق نسبی تحت تأثیر نسبت دبی



شکل ۶- تغییرات عمق نسبی تحت تأثیر نسبت دبی و زوایای مختلف تقاطع در مدل عددی

عدد فرود 0.9 نسبت عمق بالادست به پایین دست به $1/76$ می‌رسد. افزایش عمق نسبی و یا کاهش عمق جریان در پایین دست تقاطع می‌تواند با افزایش سرعت موضعی جریان تنش برشی بستر همراه باشد که در مجاری با بستر متحرک می‌تواند آب‌شستگی موضعی را افزایش دهد. با افزایش نسبت دبی تأثیر عدد فرود به عنوان متغیر مستقل کاهش پیدا کرده و نمودارها به یک سو متمرکز شده‌اند.

برای درک بهتر تأثیر عدد فرود پایین دست بر رفتار جریان متقاطع شکل ۷ نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش عدد فرود جریان در پایین دست مقدار عمق نسبی افزایش پیدا کرده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات عمق نسبی در زاویه تقاطع 90° درجه و کمترین تغییرات در زاویه 30° درجه مشاهده می‌شود. عدد فرود جریان نقش مهمی در تغییرات عمق نسبی دارد به طوری که در زاویه تقاطع 90° درجه، نسبت دبی 0.083 و



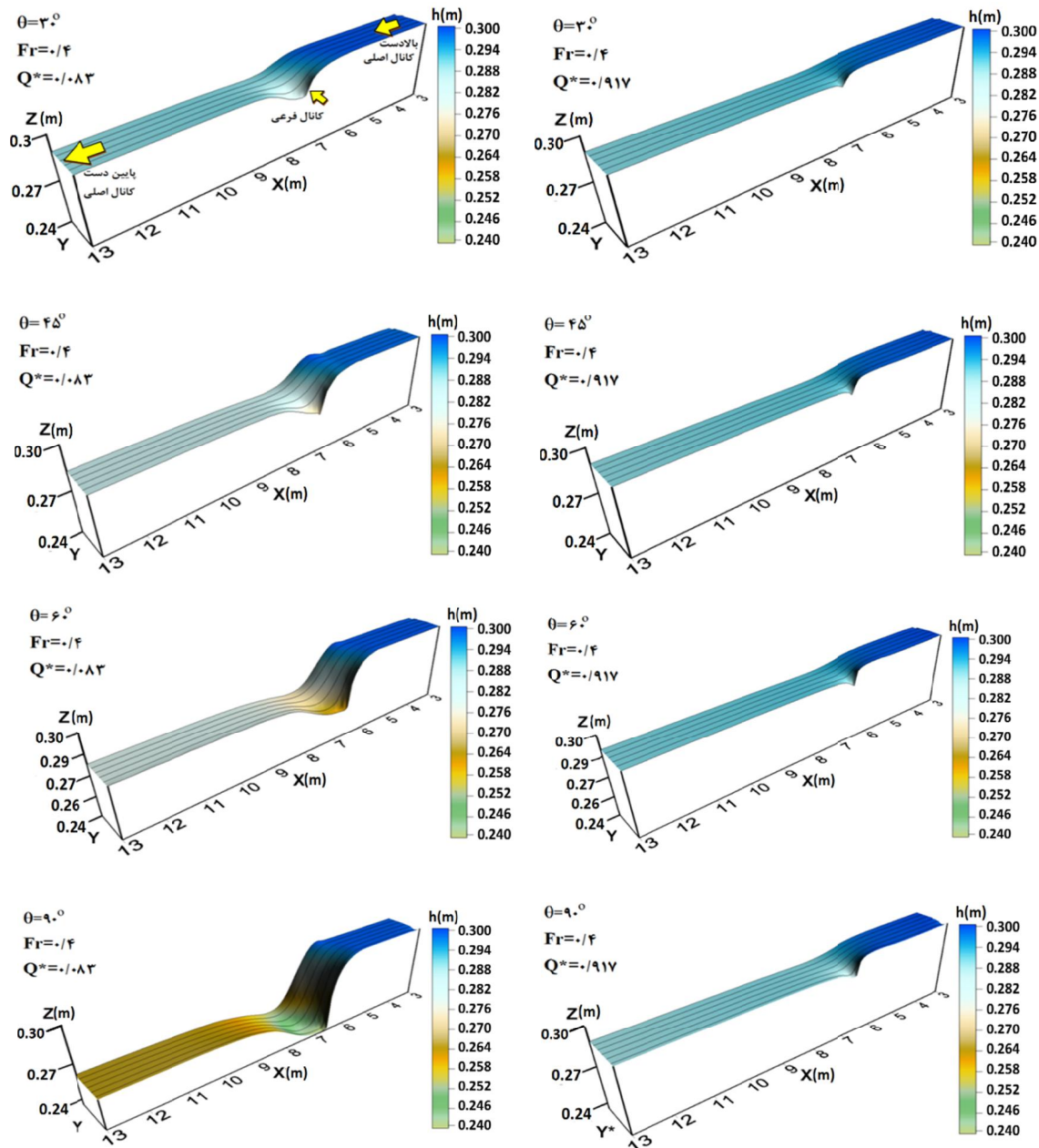
شکل ۷- شبیه‌سازی تغییرات سطح آب در خط مرکزی کانال اصلی

لایه‌های پایینی حرکت می‌کند و می‌تواند سرعت پایین‌جریان را در لایه‌های نزدیک بستر تقویت کرده و سبب افزایش مقدار کل سرعت طولی جریان شود. با کاهش مقدار نسبت جریان (افزایش مقدار دبی در کانال فرعی) مقدار زیادی از جریان با دیواره مقابل برخورد می‌کند و با شتاب زیادی به پایین‌دست حرکت می‌کند. کاهش مقدار نسبت جریان می‌تواند به صورت مانعی در مقابل حرکت جریان بالادست کانال اصلی به سمت پایین‌دست باشد و با ناحیه کم سرعت در بالادست تقاطع را ایجاد کند. ایجاد این ناحیه کم سرعت در بالادست محل تقاطع می‌تواند سبب تجمع رسوبات و کاهش عرض مفید عبور جریان در بالادست شود. بنابراین می‌توان گفت که

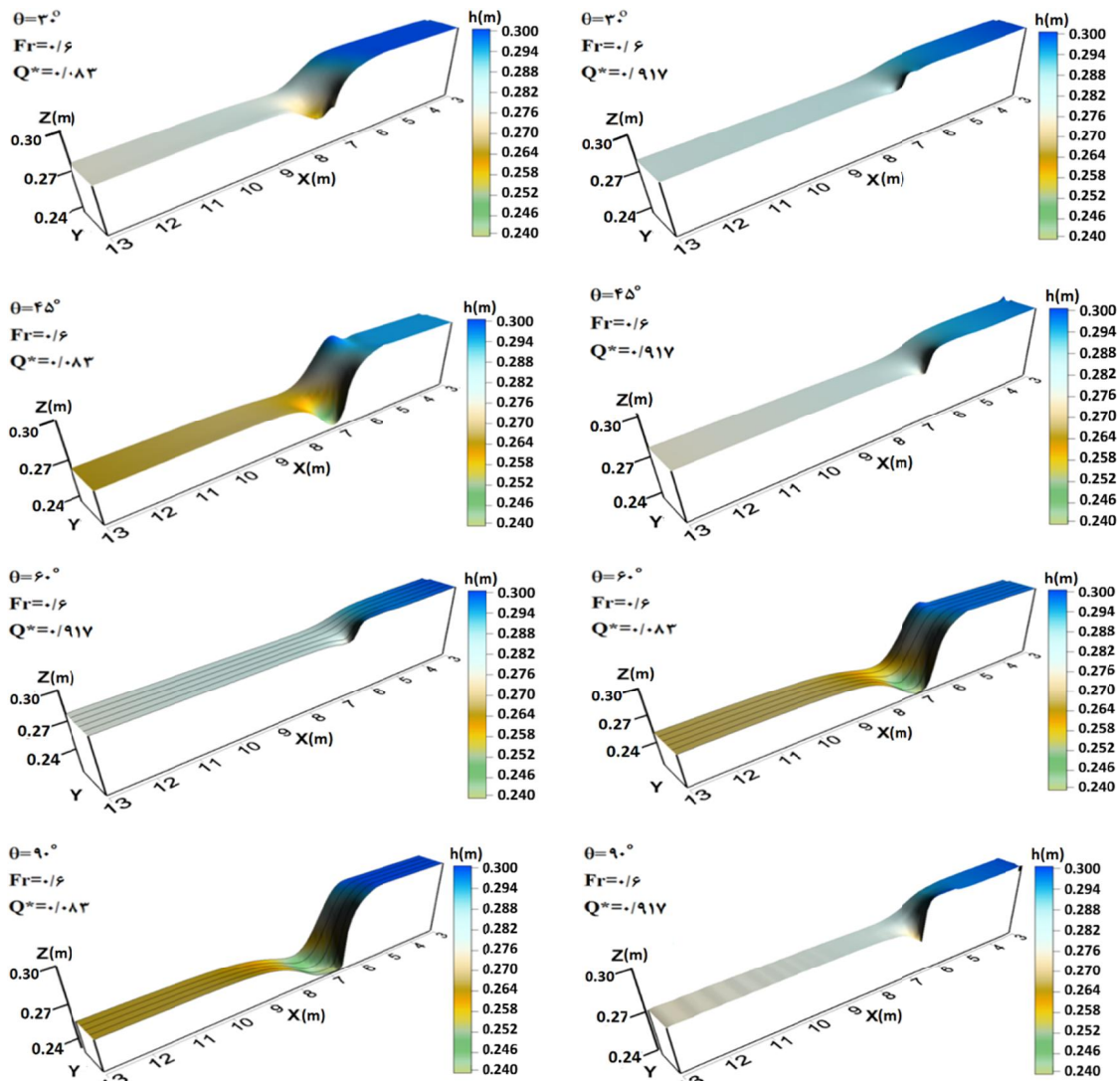
تغییرات سه‌بعدی تراز سطح آب در داخل کانال اصلی در شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. به دلیل آنکه تغییرات سطح در داخل کانال فرعی کم بوده است فقط تغییرات سطح آب در کانال اصلی آورده شده است. با برخورد دو جریان با یکدیگر جریان ترکیبی شتاب پیدا کرده و با سرعت بیشتری به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند. هر چقدر مقدار زاویه تقاطع بیشتر باشد شعاع چرخش جریان کانال فرعی در داخل کانال اصلی پس از برخورد با جریان کاهش می‌یابد. از سویی هر چقدر شعاع چرخش جریان کم باشد مقدار شتاب گریز از مرکز جریان زیاد شده و سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. از سویی جریان کانال فرعی با برخورد به دیواره مقابل به طرف

بالادست بوده است. همچنین کمترین مقدار تغییرات تراز سطح آب در فرود پایین دست ۰/۴ مربوط به زاویه تقاطع ۳۰ درجه با نسبت دبی ۰/۹۱۷ است که ۴ درصد عمق بالادست بوده است. در عدد فرود ۰/۹، زاویه ۹۰ درجه و نسبت دبی ۰/۸۳ اختلاف تراز سطح آب در پایین ترین و بالاترین نقطه به ۷۵ درصد عمق آب در بالادست کانال اصلی می‌رسد.

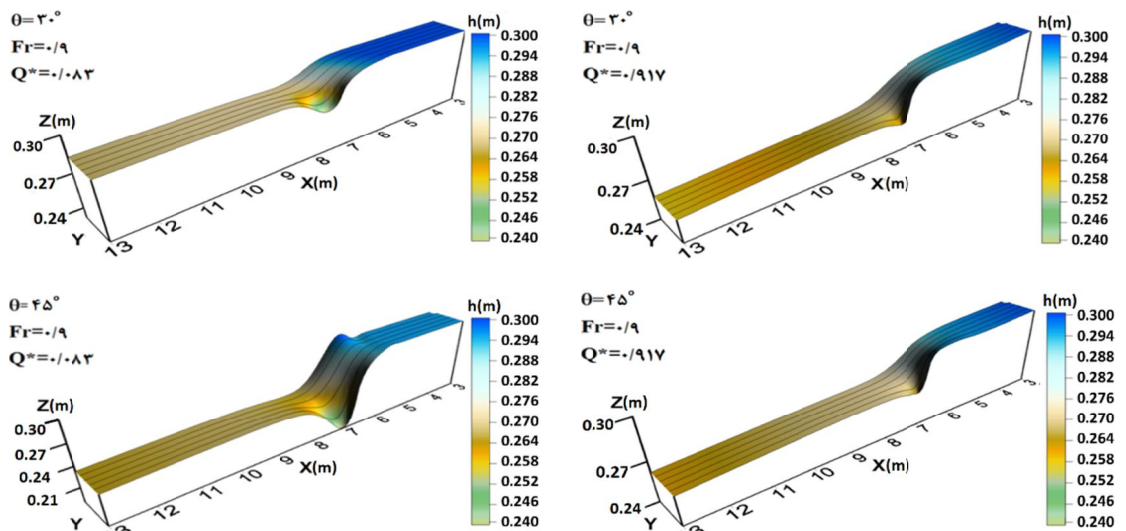
با کاهش زاویه اتصال کانال اصلی به کانال فرعی مقدار جریان شتاب کمتری گرفته و عمق جریان نیز کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بیشترین تغییرات عمق جریان درست در محل برخورد دو جریان رخ می‌دهد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در عدد فرود پایین دست ۰/۴ بیشترین تغییرات تراز سطح آب مربوط به زاویه تقاطع ۹۰ درجه با نسبت دبی ۰/۸۳ است که مقدار ۲۰ درصد عمق



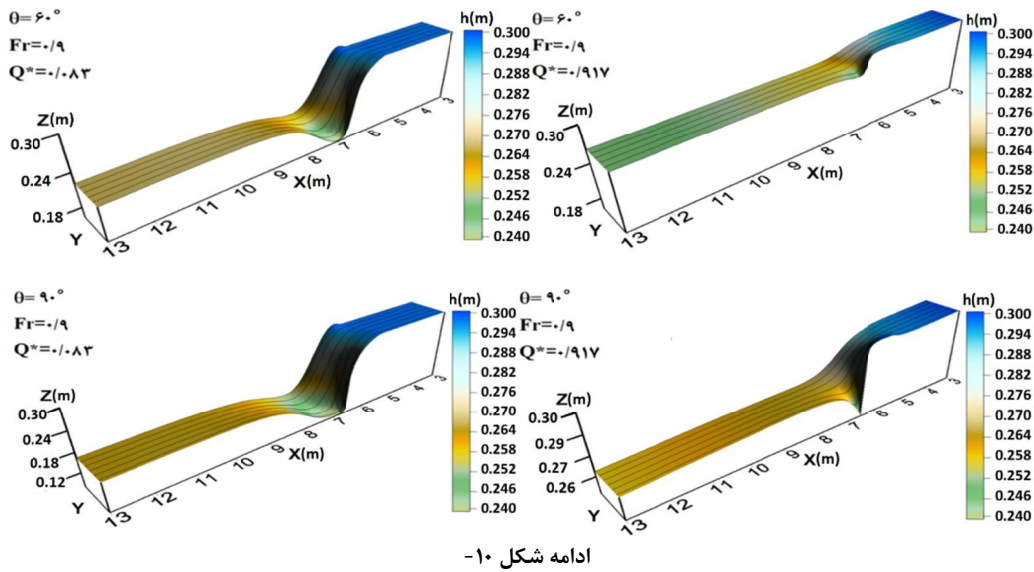
شکل ۸- تغییرات سه بعدی تراز سطح آب در داخل کانال اصلی در عدد فرود ۰/۴



شکل ۹- تغییرات سه‌بعدی تراز سطح آب در داخل کانال اصلی در عدد فرود ۰/۶



شکل ۱۰- تغییرات سه‌بعدی تراز سطح آب در داخل کانال اصلی در عدد فرود ۰/۹



با توجه به شکل‌های ۸ تا ۱۰ مقدار اختلاف بین پایین‌ترین نقطه تراز سطح آب و بالاترین نقطه سطح آب در جدول ۲ خلاصه شده است. حداکثر اختلاف بین بالاترین و پایین‌ترین تراز سطح آب در کانال اصلی و عدد فرود $0.4/0.22$ معادل 0.46 به 0.6 و در عدد 0.9 معادل 0.75 عمق بالادست است.

در بالادست محل تلاقی دو جریان و در ساحل سمت راست در کانال اصلی با برخورد دو جریان ناحیه‌ای به صورت نقطه‌ای به صورت افزایش عمق مشاهده می‌شود. این ناحیه در نسبت دبی‌های پایین نمایان شده و در زاویه 45 درجه به خوبی دیده می‌شود. به نظر می‌رسد که کاهش نسبت دبی (افزایش مقدار دبی در شاخه فرعی) مانند مانعی در مقابل عبور جریان بالادست به سمت پایین دست عمل کرده و سبب ایجاد این ناحیه شده باشد.

جدول ۲- حداکثر اختلاف بالاترین و پایین‌ترین تراز سطح آب

عدد فرود	$Fr_d = 0.4$				$Fr_d = 0.6$				$Fr_d = 0.9$			
	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰
زاویه تقاطع	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰
$Q^* = 0.083$	۰/۰۷	۰/۱۱	۰/۱۳	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۲۹	۰/۴۶	۰/۱۹	۰/۳۶	۰/۴۶	۰/۷۵
$Q^* = 0.0917$	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۲۱

نتیجه‌گیری

اثر زاویه تقاطع به صفر می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه برخورد دو جریان مقدار شتاب جریان افزایش یافته و با برخورد جریان به دیواره مقابل در کانال اصلی و ایجاد جریان چرخشی به سمت پایین دست حرکت می‌کند. با توجه به نمودارها می‌توان گفت که از سه عامل یاد شده بیشترین تأثیر در روند تغییرات سطح آب مربوط به نسبت دبی جریان است. عدد فرود جریان در پایین دست و همچنین مقدار زاویه قاطع دو جریان اصلی و فرعی به ترتیب در درجه اهمیت بعدی در تغییرات سطح

در این مقاله اثر پارامترهای زاویه تقاطع، عدد فرود و نسبت دبی روی تغییرات تراز سطح در تقاطع کانال‌های مستطیلی مورد بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر سه عامل ذکر شده نقش مهمی در الگوی جریان در تقاطع کانال‌ها دارند. مقایسه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل به خوبی می‌تواند تغییرات تراز سطح آب در محل تقاطع کانال‌ها را شبیه‌سازی کند. با افزایش مقدار نسبت دبی تأثیر زاویه تقاطع روی نسبت عمق کاهش یافته و در نسبت 0.0917

- channel confluence. *International Journal of Sediment Research*. 27: 178-187.
11. Trilita M. N. Anwar N. Legono D. and Widodo B. 2010. Dividing streamline formation channel confluences by physical modeling. *The Journal for Technology and Science*. 21(1): 11-17.
12. Weber L.J. Shumate E.D. and Mawer N. 2001. Experiments on Flow at a 90° Open-Channel Junction. *Journal of Hydraulic Engineering*. 127(5): 340-350.

آب هستند. به دلیل تغییرات تراز سطح آب و همچنین ایجاد فرم‌های بستر در بسترهای متحرک بررسی نحوه تأثیر این پارامترها بر رفتار جریان ضروری به نظر می‌رسد. همچنین با آگاهی از نحوه تأثیر این پارامترها می‌توان به طور مؤثری به حفاظت و ساماندهی محل‌های تقاطع اقدام کرد.

منابع

۱. قبادیان ر. ۱۳۸۸. بررسی تأثیر تغییرات تراز سطح آب پایاب بر الگوی جریان‌های ثانویه در محل تلاقی کانال‌های روباز مستطیلی با مدل سه‌بعدی CDF. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
۲. گوهری س. ۱۳۹۱. بررسی عددی و آزمایشگاهی الگوی جریان در تقاطع ۹۰ درجه کانال‌های مستطیلی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۹(۴): ۱۲۱-۱۳۸.
3. Dissanayake K. 2009. Experimental and numerical modeling of flow and sediment characteristics in open channel junctions. Ph.D. dissertation. University of Wollongong. 313 p.
4. Hsu C. C. Wu F. S. and Lee W. J. 1998. Flow at 90° Equal-Width Open-Channel Junction. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 124(2): 186-191.
5. Mignot E. Vinkovic I. Doppler D. and Riviere N. 2013. Mixing layer in open-channel junction flows. *Environmental Fluid Mechanics*. 13(6):1-15.
6. Nania L. S. Gómez 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*. 137(10): 1298-1305.
7. Ramamurthy S. Junying Q. and Diep V. 2007. Numerical and Experimental Study of Dividing Open-Channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(10): 1133-1144.
8. Taylor E. H. 1944. Flow Characteristics at Rectangular Open-Channel Junctions. *Trans. ASCE*. 109: 893-902.
9. Ting Z. Wei-lix X. and Chao W. 2009. Effect of discharge ratio on flow characteristics in 90° equal-width open channel junction. *Journal of Hydrodynamics*. 21(4): 541-549.
10. Tong L. Li C. and Fan. B. 2012. Experimental study on flow pattern and sediment transportation at a 90° open-