

مطالعه اثر زاویه اتصال بر ویژگی‌های جریان در کانال‌های متقاطع

سعید گوهری^{۱*} و محمد امرایی^۲

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۷

^۱ استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

^۲ دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: s.gohari@basu.as.ir

چکیده

برخورد دو جریان با یکدیگر پدیده‌ای است که در سازه‌های دست‌ساز بشر مانند شبکه‌های آبیاری، آب و فاضلاب و مجاری طبیعی مانند رودخانه‌ها مشاهده می‌شود. در این تحقیق با بهره‌گیری از مدل آشفتگی RSM و روش VOF در نرم افزار فلونت، جریان متقاطع در کانال‌های مستطیلی مدل‌سازی شده است. تأثیر زاویه اتصال کانال فرعی به کانال اصلی در زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه بر الگوی جریان و سطح آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد با کاهش زاویه تقاطع، تراز سطح آب در بالادست تقاطع روند کاهشی و در پایین‌دست ناحیه تقاطع روند افزایشی دارد. عمق‌های بالادست تقاطع به ترتیب حدود ۲٪، ۳/۴٪، ۶٪ و ۹٪ بالاتر از عمق‌های پایین‌دست تقاطع در زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه می‌باشند. همچنین یک ناحیه جدایی جریان در پایین‌دست تقاطع و یک ناحیه سکون در گوشه بالادست تقاطع و در داخل کانال اصلی تشکیل می‌شود. کاهش زاویه اتصال به کانال اصلی باعث کاهش ابعاد این نواحی و همچنین کاهش آشفتگی جریان در پایین‌دست محل تقاطع جریان می‌شود. شبیه سازی توزیع تنش برشی نیز نشان می‌دهد که تمرکز بالایی از تنش در دیواره روبروی تقاطع وجود داشته و در زوایای اتصال بزرگتر، مقدار این تنش افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه تقاطع کانال‌ها، ابعاد ناحیه جدایی جریان نیز توسعه پیدا کرده و عرض مفید برای عبور جریان به پایین‌دست کاهش می‌یابد. با کاهش زاویه برخورد دو جریان و در نتیجه کاهش ابعاد ناحیه جدایی مشکلات ناشی از برخورد دو جریان کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تراز سطح آب، زاویه تقاطع، فلونت، مدل حجم سیال

Study of Junction Angle Effect on Flow Characteristics at Channels Confluences

S Gohari^{1*} and M Amraei²

Received: 18 August 2013 Accepted: 8 December 2013

¹- Assist. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Bu Ali Sina. Iran

²- Former M.Sc. Student, Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Univ. of Bu Ali Sina. Iran

*Corresponding Author Email: s.gohari@basu.as.ir

Abstract

Open channel confluences are present in many man-made and natural waterways; such as irrigation and sewage networks and river systems. In this research, it has been attempted to simulate the junction flow in rectangular channels by utilizing, Volume of Fluid (VOF) scheme and RSM based turbulence models of FLUENT software. The effect of branch channel angle on flow behavior pattern and free surface water level for angles 30° , 45° , 60° and 90° are studied. The results show that reduction of branching angle leads to a decrease in water level at the upstream of the cross point and to an increase in water level at the downstream of it. Upstream depths of water at the cross point are found 2%, 4.3%, 6% and 9% higher than the junction depths of water at the downstream for the angles of 30° , 45° , 60° and 90° , respectively. A separation zone and a stagnation point are formed in the main channel at the downstream and upstream corner of the junction, respectively. The decrease of cross angle causes the reduction of separation zone dimensions and flow turbulence. Simulation of the shear stress distribution illustrates high shear stress concentration on the opposite wall of the junction point and it increases with increase of the junction angle. With increase of channel junction angle, the separation zone dimensions increase and the effective width of the channel for the transition of the flow to downstream reduces. Reducing the junction angle and consequently reduction of the separation zone dimensions helps to reduce the crossing problems of the two flows confluence.

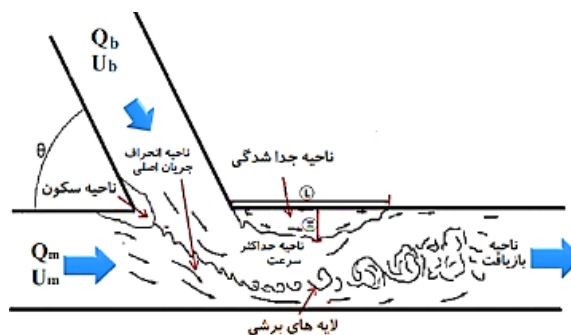
Keywords: Fluent, Junction angle, VOF, Water level

رودخانه‌های طبیعی، تجهیزات تصفیه آب و گذرگاه‌های عبور ماهی را نام برد. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک کانال متقاطع مستطیلی با ویژگی‌های آن نشان داده شده است.

مقدمه

تقاطع دو جریان، یک رخداد رایج در تعداد زیادی از مسائل مهندسی هیدرولیک می‌باشد. از جمله این نوع شرایط می‌توان شبکه‌های آبیاری و زهکشی، شبکه‌های

قبادیان و همکاران (۱۳۸۷) به منظور بررسی تاثیر زاویه تلاقی بر الگوی فرسایش و رسوب، سه زاویه تلاقی ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد با افزایش زاویه تلاقی بدون توجه به نسبت دبی و عدد فرود ذره مقدار عمق نسبی فرسایش موضعی افزایش می‌یابد. هوانگ و همکاران (۲۰۰۲) از یک مدل عددی سه بعدی برای بررسی جریان در تقاطع کانال‌ها با زوایای ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش زاویه تقاطع، ارتفاع آب بالادست تقاطع، ابعاد ناحیه جدایی جریان، پایین افتادگی سطح آب در ناحیه جدایی جریان و تلفات انرژی در تقاطع کانال افزایش می‌یابد. زیکانگ و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیق خود آزمایشاتی روی یک فلوم ترکیبی با زاویه تقاطع ۳۰ درجه انجام دادند. نتایج نشان داد که یک ناحیه پسرقت جریان با سرعت بالا در پائین دست تقاطع و نزدیک آن اتفاق می‌افتد و در مقابل آن یک ناحیه با سرعت بالا مشاهده می‌شود. لی و زنگ (۲۰۰۸) در مطالعه‌ای مدل RANS^۱ را که شامل معادله ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز می‌باشد برای بررسی پدیده جریان متقاطع کانال‌های با پوشش گیاهی و بدون پوشش گیاهی بکار گرفتند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش پهناي کانال فرعی یا کاهش پوشش گیاهی، جریان در کانال فرعی افزایش می‌یابد و در کل نیز ضریب تلفات انرژی در سیستم با مقدار جریان کانال فرعی کاهش می‌یابد. رامامورتی و همکاران (۲۰۰۹) مطالعه‌ای را روی ویژگی‌های جریان در تقاطع کانال‌های روباز مستطیلی با زاویه تقاطع ۹۰ درجه و با پهناي مساوی انجام دادند و با استفاده از یک مدل آشفتگی سه‌بعدی رفتار جریان در تقاطع کانال‌ها بررسی و نتایج را با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی واسنجی کردند. داده‌های آزمایشگاهی صحت نتایج مدل آشفتگی سه‌بعدی را تأیید نمود. گودرزی‌زاده و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی الگوی سه‌بعدی جریان در کانال‌های متقاطع مستطیلی با زاویه تقاطع ۹۰ پرداختند و از روابط ناویر-استوکس مبتنی بر مدل آشفتگی تنش رینولدز که به



شکل ۱- مشخصات جریان در کانال متقاطع (بست و رید ۱۹۸۴).

هیدرودینامیک جریان‌های متقاطع پیچیده بوده و رفتار جریان تحت تاثیر پارامترهای متعددی می‌باشد. متغیرهایی چون نسبت دبی (نسبت دبی در شاخه بالادست مجرای اصلی به کل دبی جریان بعد از اختلاط)، زاویه تقاطع، هندسه کانال، شیب طولی، مقاومت بستر و جدار کانال و عدد فرود می‌توانند الگوی جریان را تحت تاثیر قرار دهند. انتقال رسوب و تغییر پذیری بستر در تقاطع کانال‌ها بر پیچیدگی رفتار و الگوی جریان در این مقاطع می‌افزاید. بطوری‌که بیشتر مواقع در رودخانه‌های طبیعی محل تقاطع با تغییرات شدید بستر و مقطع همراه است. شناخت دینامیک جریان، انتقال رسوب و مورفولوژی بستر می‌تواند در کنترل فرسایش بستر و دیواره‌ها، پیش بینی تراز سطح آب و مدیریت رودخانه تعیین کننده باشد. در محل تلاقی کانال‌ها و رودخانه‌ها دلیل تغییر در مقدار و جهت سرعت، مقدار دبی جریان و دبی رسوب، منجر به پدیده‌هایی چون فرسایش بستر، فرسایش سواحل و رسوب‌گذاری در پائین دست محل تلاقی می‌شود که این امر می‌تواند باعث ایجاد خسارت به ابنیه مجاور و تغییر در ریخت‌شناسی رودخانه شود. مطالعات گذشته در جریان‌های متقاطع در رودخانه‌های طبیعی و مطالعات آزمایشگاهی بوده است. عمده مطالعات انجام شده بر روی جریان‌های متقاطع در یک زاویه تقاطع ثابت بوده و تغییرات الگوی جریان، عمق آب، ناحیه جدایی و همچنین تغییرات تنش برشی بستر در اثر تغییر زاویه تقاطع دیده نشده است.

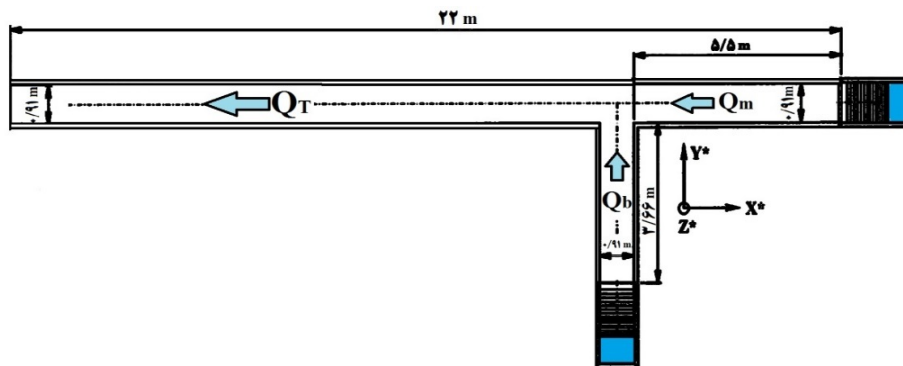
^۱ Reynolds Average Navier-Stokes Equations

هیدرولیکی بر تغییرات تراز سطح آب کمتر مورد توجه بوده است. هدف این تحقیق بررسی اثر زاویه تقاطع بر رفتار جریان در کانال‌های متقاطع به تفصیل می‌باشد.

مواد و روش‌ها

از داده‌های آزمایشگاهی وبر و همکاران (۲۰۰۱) که روی یک فلوم مستطیلی با زاویه تقاطع ۹۰ درجه انجام شده برای صحت سنجی نتایج مدل عددی استفاده شده است (شکل ۲). تقاطع ۹۰ درجه دارای گوشه‌های تیز بوده و دیواره‌های کانال فرعی برای زوایای تقاطع ۴۵ تا ۹۰ درجه قابل تنظیم می‌باشد. نسبت دبی‌های مورد مطالعه در مدل آزمایشگاهی در جدول ۱ آورده شده است. همچنین از بین ۶ نسبت دبی مطالعات وبر و همکاران (۲۰۰۱)، نسبت دبی ۰/۲۵ برای مطالعه حاضر انتخاب گردید به این دلیل که نتایج قبلی (وبر و همکاران، ۲۰۰۱) نشان داده است که جریان ثانویه قوی‌تری در پایین‌دست کانال اصلی نسبت به سایر نسبت‌های دبی ایجاد می‌کند.

روش حجم محدود حل می‌شوند استفاده نمودند. آنها برای اعتبارسنجی نتایج خود نیز یافته‌های آزمایش شومیت (۱۹۹۸) را بکار بردند. مقایسه بین نتایج مدل و یافته‌های آزمایشگاهی یک همبستگی نزدیکی بین الگوی جریان در هر دو نمونه نشان داد و همچنین بیان کردند که نسبت دبی و ابعاد ناحیه جدایی یک رابطه معکوس باهم دارند. بوناک داری و همکاران (۲۰۱۱) با مطالعه جریان متقاطع با یک مدل مبتنی بر تنش رینولدز و اثرات نسبت دبی، یک جریان فرعی سه‌بعدی را به سمت جریان کانال اصلی شبیه سازی کرده و نشان دادند که الگوی جریان در تقاطع یک اثر بزرگ روی نتایج اندازه‌گیری‌ها (فرسایش، انتقال رسوب و پخش آلودگی) دارد. عمده کارهای آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته در کانال‌های متقاطع در زاویه ۹۰ درجه بوده و کمتر اثر سایر زوایا مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به سابقه تحقیق بیشتر کارهایی که در ارتباط با جریان متقاطع انجام شده است در زوایا و یا نسبت دبی‌های ثابت بوده است. همچنین تاثیر عوامل هندسی و



شکل ۲- نمای فلوم آزمایشگاهی (وبر و همکاران ۲۰۰۱).

جدول ۱- مشخصات داده‌های آزمایشگاهی.

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

در این مقاله نتایج حاصل به صورت مقادیر بی-بعد ارائه شده‌اند. بدین منظور، ابعاد کانال با تقسیم بر عرض کانال ($W = 0.91$ m) به صورت ($Z^*=z/W$)، سرعت در مقاطع مختلف با تقسیم بر سرعت متوسط جریان در پائین‌دست ($U_0 = 0.628$ m/s) و انرژی جنبشی (K) نیز با تقسیم بر مجذور سرعت پایین دست بی‌بعد شده‌اند. مقادیر عمق جریان هم با تقسیم بر عمق حداکثر جریان در کانال اصلی بی بعد شده است.

رینولدز در معادلات به روش خاصی مدل شوند. در این صورت در حالت جریان سه بعدی با وجود چهار معادله شامل معادله پیوستگی و معادله مومنتوم در سه بعد و چهار مجهول میدان جریان شامل فشار و سرعت در سه بعد معین می‌شوند. جهت بیان تنش‌های رینولدز و یا به عبارت بهتر، بستن سیستم معادلات فوق از مدل‌های آشفتگی استفاده می‌شود. در مدل‌های مزبور، ترم لزجت گردابه‌ای با استفاده از تئوری‌های مختلف (نظیر 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 گردد مستقیماً تنش‌های رینولدز بدست 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 می‌گردد که شکل تانسوری این معادله انتقال به صورت زیر می‌باشد.

$$U_k \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} = P_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad [۶]$$

در معادله فوق P_{ij} تانسور تولید و Φ_{ij} تانسور فشار-کرنش و D_{ij} تانسور پخشیدگی و ε_{ij} تانسور اتلاف می‌باشند در این تحقیق به دلیل دقت بالا از مدل آشفتگی تنش رینولدز^۱ استفاده شده است. این مدل آشفتگی دقت بالایی در شبیه سازی 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 بر روی حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود. روش انفصال معادلات 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

مدل فلونتت و معادلات حاکم

فلونتت یکی از نرم افزارهای قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است. معادلات حاکم بر حرکت یک سیال تراکم ناپذیر لزج در حالت آشفته، توسط معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده بیان می‌شوند. معادلات پیوستگی (بقای جرم) و اندازه حرکت (بقای مومنتوم) به صورت زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [۱]$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad [۲]$$

که در معادلات فوق:

u_i مؤلفه سرعت در جهت x_i ، P فشار کل، ρ چگالی سیال، g_i شتاب ثقل در جهت x_i و τ_{ij} تانسور تنش بوده که در حالت جریان آشفته به صورت معادله ۳ بیان می‌شود:

$$\tau_{ij} = \left[\rho(v + v_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[\frac{2}{3} \rho(k + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] \quad [۳]$$

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:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad [۴]$$

در معادلات فوق v_t لزجت گردابه‌ای یا لزجت آشفتگی است که بر خلاف لزجت مولکولی از نوع خاصیت سیال نمی‌باشد بلکه تابع خصوصیات جریان و آشفتگی آن است و مقدار آن از سیالی به سیال دیگر و از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم (k) و δ_{ij} به صورت زیر بیان می‌شود:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_i'^2} + \overline{u_j'^2} + \overline{u_k'^2}) \quad [۵]$$

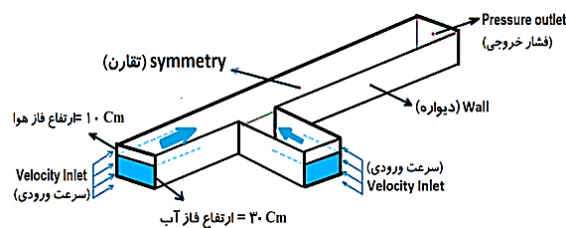
به منظور حل میدان جریان آشفته بر اساس معادلات پیوستگی و مومنتوم، نیاز است تا تنش‌های

^۱ Reynolds stress models

^۲ Finite volume

^۳ Second order upwind

^۴ Pressure-implicit with splitting of operators



شکل ۳- طرح میدان جریان و شرایط مرزی.

در شکل ۴ نحوه تغییرات مولفه طولی سرعت (U^*) در صفحه افقی نزدیک سطح آب ($Z^*=0/95$) در امتداد کانال‌های اصلی و فرعی نشان داده شده و با نتایج آزمایشگاهی وبر و همکاران (۲۰۰۱) مقایسه شده است. مقایسه سرعت‌ها نشان می‌دهد که انطباق مناسبی بین مقادیر پیش‌بینی شده مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی در داخل کانال اصلی و فرعی وجود دارد هر چند در نواحی با آشفتگی بالای جریان بین مقادیر مدل عددی و آزمایشگاهی مقدار کمی اختلاف وجود دارد. در بالادست کانال اصلی بدلیل یکنواخت بودن و عدم اغتشاش در جریان، بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی انطباق خوبی برقرار بوده است. از مقطع $X^*=0$ به بعد به دلیل ورود جریان فرعی با مومنتوم بالا به کانال اصلی و ایجاد آشفتگی در جریان و تشکیل جریان ثانویه در پایین‌دست محل تقاطع، انطباق بین سرعت طولی در مدل عددی و آزمایشگاهی کمتر شده است. با نزدیک شدن به انتهای کانال و با از بین رفتن اثر تقاطع و محو شدن گردابه‌های تشکیل شده جریان یک‌بعدی در کانال برقرار شده و انطباق بین مقادیر سرعت عددی و آزمایشگاهی بهتر می‌شود. برای نواحی داخل کانال فرعی هم، انطباق کاملی بین مقادیر پیش‌بینی شده با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. بطور متوسط مقادیر آزمایشگاهی و مدل عددی ۴ درصد اختلاف دارند.

همچنین نتایج پیش‌بینی پروفیل سطح آب در تقاطع ۹۰ درجه، توسط مدل عددی و آزمایشگاهی در امتداد کانال اصلی و در دو مقطع $Y^*=0/083$ و $Y^*=0/917$ در شکل ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از مدل و مقادیر آزمایشگاهی همبستگی خوبی نشان می‌دهد و مدل عددی بخوبی روند تغییرات تراز سطح آب را در کانال پیش‌بینی می‌نماید. در هر دو

حل معادلات داشته‌اند. همچنین به منظور شبیه‌سازی تغییرات سطح آب از روش حجم سیال^۱ استفاده شده و میدان جریان بصورت دوفازی در نظر گرفته می‌شود. به منظور تولید هندسه مناسب، گره بندی هندسه تولید شده با رعایت معیارها و تعریف شرایط مرزی از پیش پردازنده گمبیت^۲ استفاده شده است. به علت استفاده از تابع دیواره فاصله اولین گره از دیواره ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده و به تدریج با دور شدن از دیواره فاصله گره‌ها افزایش می‌یابد. بعد از آنالیز حساسیت مدل نسبت به تعداد گره‌ها، شبکه‌ای با ۱۴۵۱۱۱ گره برای کلیه زوایای تقاطع تولید گردید.

شرایط مرزی

در شکل ۳ هندسه کامل میدان شبیه‌سازی شده نشان داده شده است. با توجه به اینکه از روش حجم سیال جهت شبیه‌سازی جریان دوفازی استفاده می‌شود فاز آب بصورت یک ستون آب ساکن با عمق ثابت و در ورودی‌های مدل اعمال شد. 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 ($0/0001$ متر برثانیه) لحاظ شده است. برای مرز خروجی میدان، از شرط مرزی فشار خروجی^۳، برای جداره‌های کانال از شرط مرزی دیواره صلب^۴ و بدون شیب و نهایتاً شرایط مرزی سطح جریان در کانال نیز متقارن^۵ در نظر گرفته شد. در کلیه حالت‌های مدل‌سازی شده در این پژوهش، تحلیل جریان در حالت غیرماندگار با گام زمانی $0/01$ ثانیه جهت حل میدان استفاده شد و معیار همگرایی برابر با مقدار 10^{-6} تعریف شده است.

¹ VOF

² Gambit

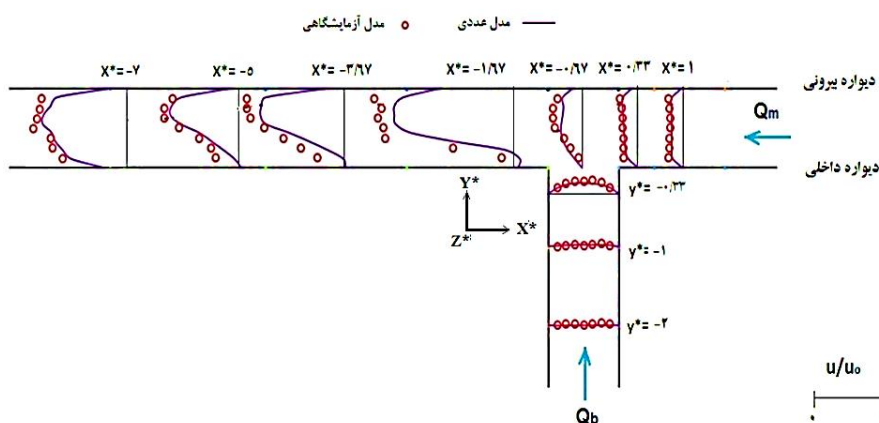
³ Pressure outlet

⁴ Wall boundary condition

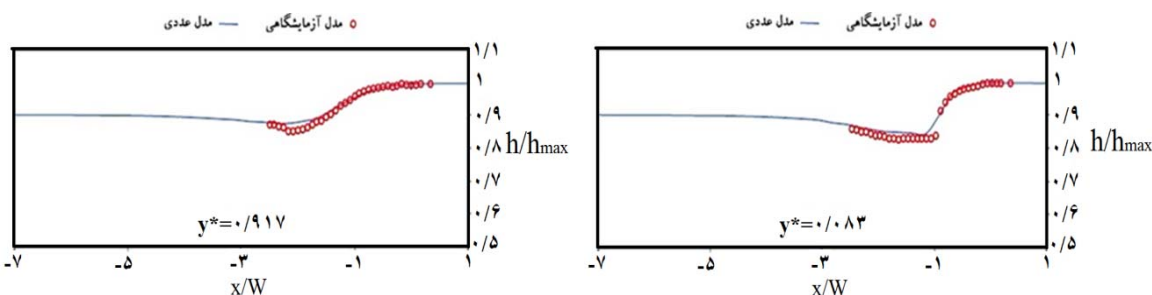
⁵ Symmetry

گردد. عمق آب بعد از مقطع $x^* = -6$ به یک تراز ثابت می‌رسد.

مدل عددی و آزمایشگاهی، سطح آب با ورود به دهانه تقاطع (مقطع $Y^* = 0.83$)، به پایین می‌افتد. بعد از آن سطح آب کم کم افزایش یافته و به تراز قبلی خود بر می‌گردد.



شکل ۴- مقایسه مقادیر طولی سرعت در مدل با نتایج آزمایشگاهی در کانال‌های اصلی و فرعی در نزدیک سطح آب.



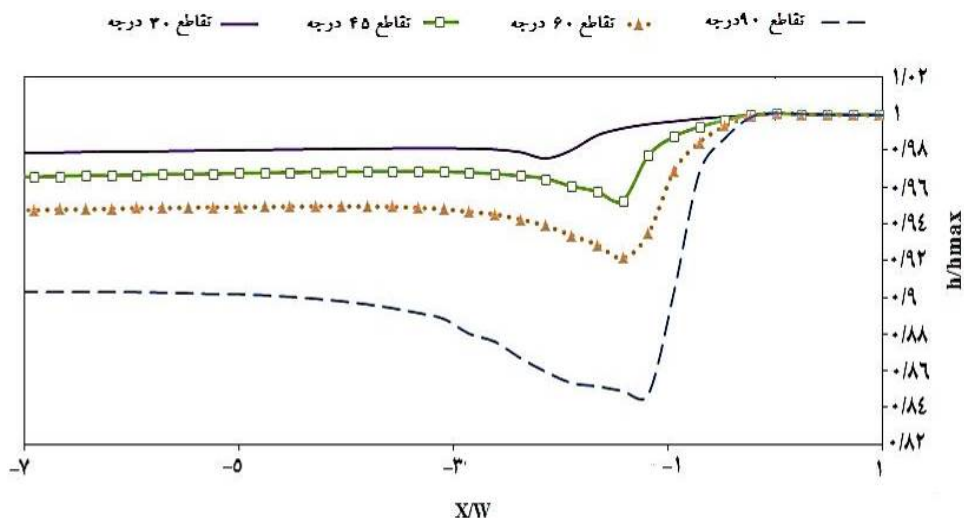
شکل ۵- مقایسه تغییرات تراز سطح آب در مدل با نتایج آزمایشگاهی در خط مرکزی کانال اصلی ($\theta = 90^\circ$ و $Q^* = 0.25$).

ناحیه جدایی به حداقل تراز خود می‌رسد و با حرکت به سمت دیواره بیرونی کانال اصلی سطح آب در این ناحیه افزایش می‌یابد. این روند در زوایای تقاطع دیگر نیز قابل مشاهده بوده به طوری که بیشترین تغییرات تراز سطح آب را به ازای زوایای مختلف تقاطع در این ناحیه می‌توان مشاهده نمود. در شرایط جریان ثابت و با کاهش زاویه اتصال از 90° به 30° درجه، سطح آب در ناحیه جدایی و پایین‌دست آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این با کاهش زاویه اتصال وسعت حفره پایین افتادگی سطح آب در عرض و عمق نیز کاهش می‌یابد که در نتیجه آن سطح آب بعد از تقاطع، خیلی سریع‌تر به تراز اولیه خود رسیده و کاهش عمق کمتری در پایاب نسبت به سایر تقاطع‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۶).

نتایج و بحث

اثر زاویه اتصال روی پروفیل سطح آب

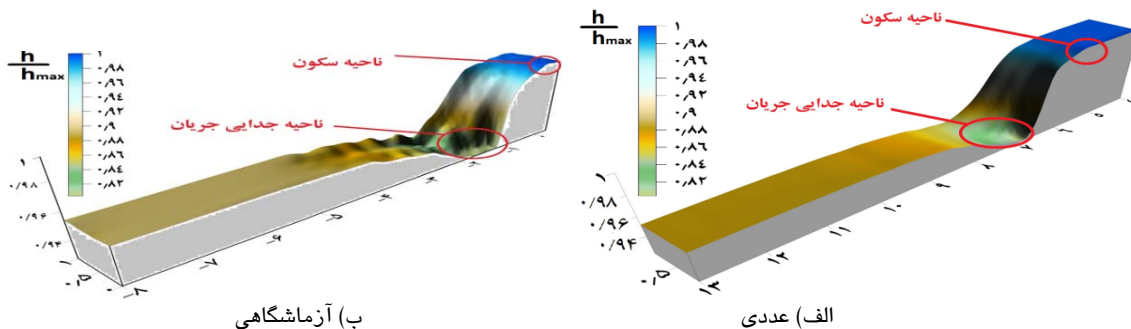
پس از صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی عددی میدان سرعت جریان و پروفیل سطح آزاد و تطابق قابل قبول با نتایج آزمایشگاهی، شبیه‌سازی جریان برای بررسی اثر زاویه اتصال روی پروفیل سطح آب در کانال به کار برده می‌شود. برای این شبیه‌سازی جریان، شرایط مرزی ورودی، خروجی، دیواره و شرایط اولیه در مسأله ثابت نگه داشته شد و با تغییر زوایای اتصال کانال فرعی به کانال اصلی (30° ، 45° ، 60° و 90°) خصوصیات جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که صرف‌نظر از زاویه اتصال، سطح آب در نزدیکی دیواره داخلی بعد از تقاطع ($y^* = 0.83$) در



شکل ۶- مقایسه تغییرات تراز سطح آب در زوایای مختلف تقاطع توسط مدل عددی ($Q^*=0/25$ و $Y^*=0/083$).

می‌باشد که در این جا به منظور نمایش بهتر تغییرات سطح آب در کانال اصلی، محور قائم نسبت به حداقل عمق جریان در ناحیه جدایی رسم شده است. ناحیه جدایی و ناحیه سکون جریان که در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده با کاهش زاویه اتصال کاهش می‌یابد.

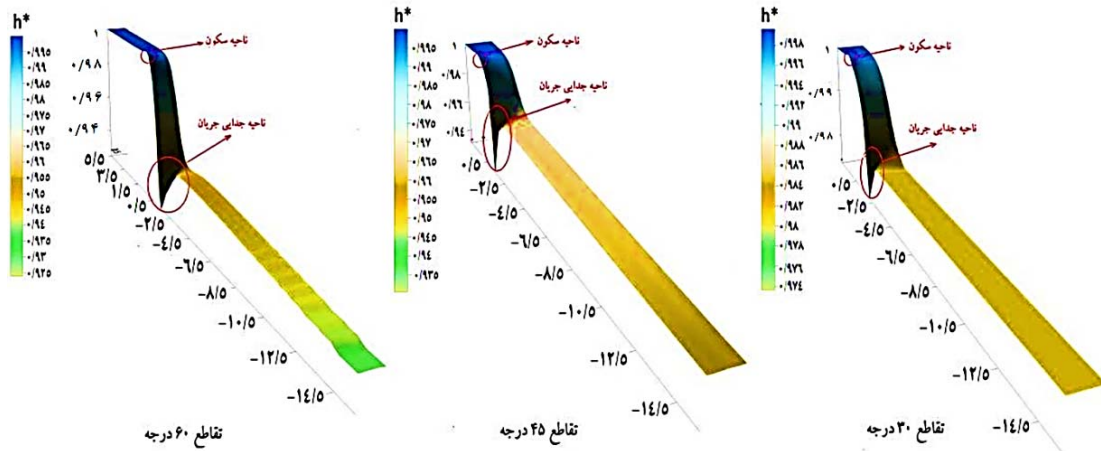
همچنین در شکل ۷ الگوی سه‌بعدی سطح آب در تقاطع ۹۰ درجه (مدل عددی و آزمایشگاهی) نشان داده شده است. محور افقی طول بی بعد شده کانال نسبت به پهناي کانال اصلی و محور قائم عمق بی بعد شده جریان (نسبت به حداقل عمق جریان در کانال اصلی)



شکل ۷- پروفیل سطح آب در مدل عددی و آزمایشگاهی در تقاطع ۹۰ درجه در نسبت دبی ۰/۲۵.

را بخوبی شبیه‌سازی نکرده و این می‌تواند یکی از نقاط ضعف این مدل در شبیه‌سازی دقیق پروفیل سطح آب محسوب گردد.

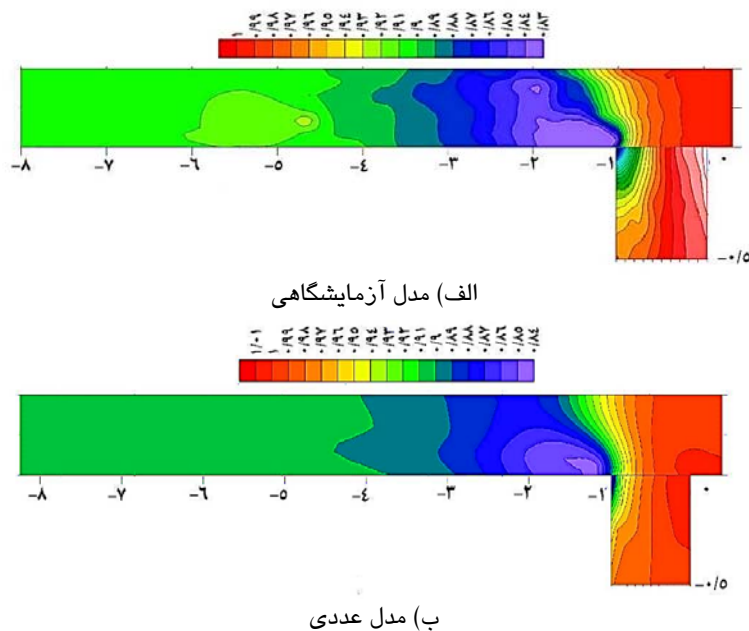
همچنین با مقایسه پروفیل سطح آب در مدل عددی و آزمایشگاهی در تقاطع ۹۰ درجه طبق شکل ۷ می‌توان مشاهده نمود که مدل عددی نوسانات موجی شکل تغییرات سطح آب در محل تقاطع و پایین‌دست آن



شکل ۸- پروفیل سه بعدی سطح آب در زوایای مختلف تقاطع در مدل عددی در نسبت دبی ۰/۲۵.

پایین دست سطح آب افزایش می‌یابد. ابعاد و تغییرات ناحیه جدایی جریان با افزایش زاویه تقاطع بیشتر می‌شود بطوری که در زوایای بررسی شده در این تحقیق زاویه تقاطع ۹۰ درجه دارای بیشترین ابعاد ناحیه جدایی و زاویه ۳۰ درجه کمترین ابعاد ناحیه جدایی را داشته است.

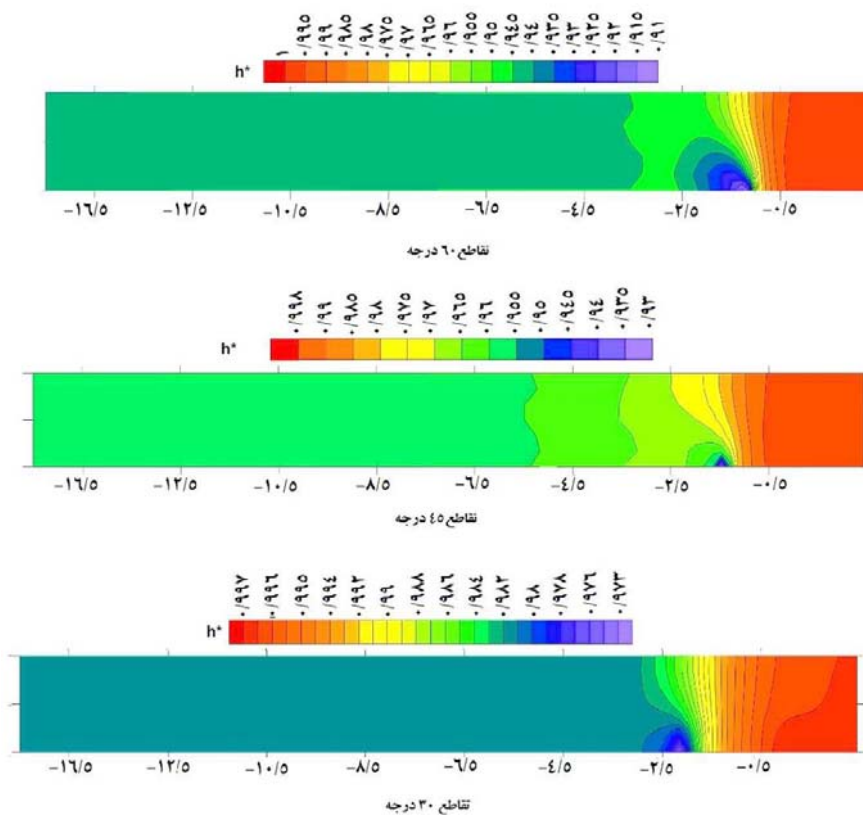
خطوط همتراز سطح آب برای ۴ زاویه تقاطع ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه در شکل ۹ و ۱۰ در مدل عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود برای همه حالت‌های جریان، ورود جریان از کانال فرعی و برخورد آن با شاخه اصلی، ناحیه تنگ شدگی (انقباض) را بوجود می‌آورد و در پروفیل سطح آب یک پایین افتادگی ایجاد می‌گردد و با حرکت به



شکل ۹- خطوط همتراز سطح آب در تقاطع ۹۰ درجه در مدل عددی و آزمایشگاهی در نسبت دبی ۰/۲۵.

انرژی بیشتری در جریان تقاطع اتفاق می‌افتد. با افزایش زاویه اتصال جریان فرعی نیاز به چرخش بیشتری به سمت مسیر جریان کانال اصلی خواهد داشت. با افزایش زاویه اتصال بخشی از جریان به دیواره مقابل در کانال اصلی برخورد می‌کند و پس از ترکیب با جریان کانال اصلی به پایین دست حرکت می‌کند. هر چقدر سهم جریان در کانال فرعی بالاتر باشد می‌توان انتظار آشفته‌گی و تلاطم بیشتری را از برخورد دو جریان با هم داشت. به نظر می‌رسد که قویترین جریان‌های ثانویه و بیشترین اتلاف انرژی در بیشترین زاویه تقاطع 90° و در نسبت‌های پایینی از جریان رخ دهد.

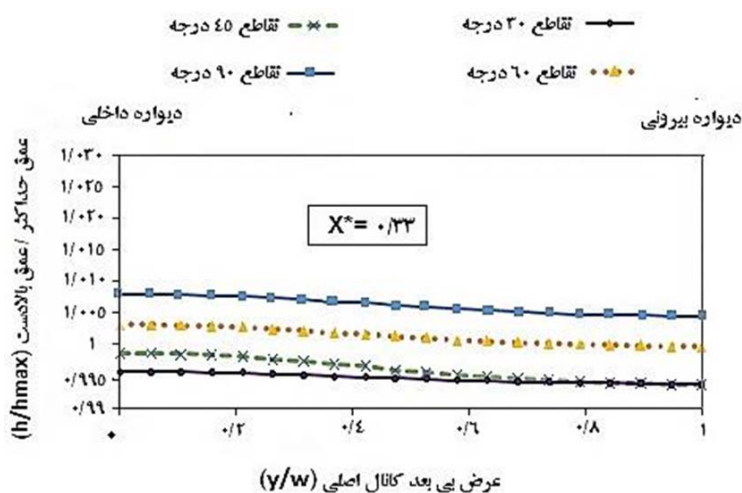
همچنین با توجه به شکل ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که افزایش زاویه اتصال منجر به ارتفاع بیشتر سطح آب در بالادست تقاطع می‌شود. به لحاظ کمی در زوایای 30° ، 45° و 60° و 90° در عمق آب در بالادست تقاطع به ترتیب حدود 2 ، $4/3$ ، 6 و 9 ٪ بالاتر از عمق‌های پایین دست تقاطع می‌باشد و صرف نظر از زاویه اتصال، حداقل ارتفاع بی‌بعد سطح آب تقریباً $0/84$ برآورد شده است. هوانگ و همکاران (۲۰۰۲) در مطالعه خود به نتایج مشابهی در این زمینه رسیدند و عمق‌های بالادست تقاطع را به ترتیب $4/3$ ، 5 ، $6/1$ و $8/8$ درصد بالاتر از عمق‌های پایین دست تقاطع در زوایای 30° ، 45° ، 60° و 90° برآورد کردند. نتایج فوق را می‌توان از نقطه نظر تلفات انرژی نیز توضیح داد. با افزایش زاویه اتصال، تلفات



شکل ۱۰- خطوط هم‌تراز سطح آب در زوایای مختلف تقاطع در مدل عددی در نسبت دبی $0/25$.

است. با صرف نظر از زاویه اتصال، سطح آب بالادست تقاطع دارای یک شیب عرضی به سمت دیواره بیرونی

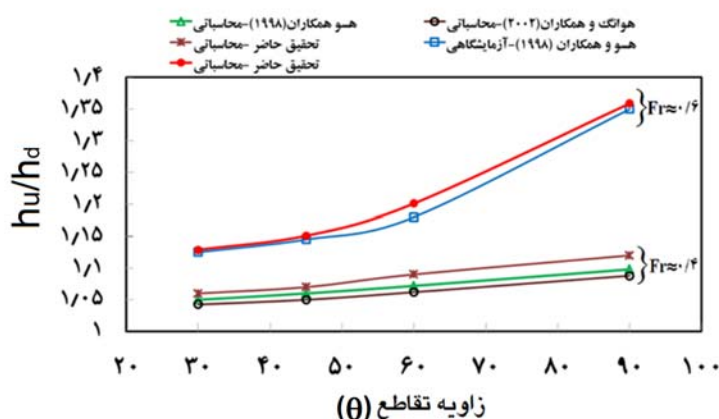
در شکل ۱۱ تغییرات عرضی پروفیل سطح آب به ازای زوایای مختلف تقاطع در $x^*=0/33$ نشان داده شده



شکل ۱۱- تغییرات عمق بالادست کانال اصلی در اثر تغییر زاویه تقاطع در نسبت دبی ۰/۲۵

می‌دهد و با داده‌های آزمایشگاهی هسو و همکاران (۱۹۹۸) همخوانی خوبی دارد. عامل دیگری که در تغییرات نسبی عمق جریان تحت تاثیر زوایای مختلف نقش دارد عدد فرود جریان (Fr) در پایین‌دست تقاطع می‌باشد. با افزایش عدد فرود پایین‌دست مقدار عمق نسبی افزایش پیدا می‌کند. در اعداد فرود کم اختلاف زیادی بین عمق بالادست و پایین‌دست مشاهده نمی‌شود ولی با افزایش عدد فرود پایین‌دست و همچنین افزایش زاویه تقاطع اختلاف عمق جریان در بالادست و پایین‌دست تقاطع نیز افزایش پیدا می‌کند.

بوده اما با کاهش زاویه تقاطع مقدار این شیب و همچنین عمق بالادست کاهش می‌یابد. چرا که با کاهش زاویه تقاطع، عرض بیشتری از ناحیه تقاطع به جریان کانال اصلی اختصاص یافته و در نتیجه آن اثر زاویه اتصال و مونتوم کانال فرعی روی عمق بالادست ($X^*=0.33$) کاهش می‌یابد. در شکل ۱۲ تغییرات نسبت عمق بالادست به پایین‌دست (h_u/h_d) کانال اصلی در اثر تغییر زاویه (θ) نشان داده شده است. با افزایش زاویه تقاطع نسبت عمق بالادست به پایین‌دست افزایش پیدا می‌کند. نتایج تحقیق حاضر برآورد مناسبی از تغییرات عمق با زاویه را نشان



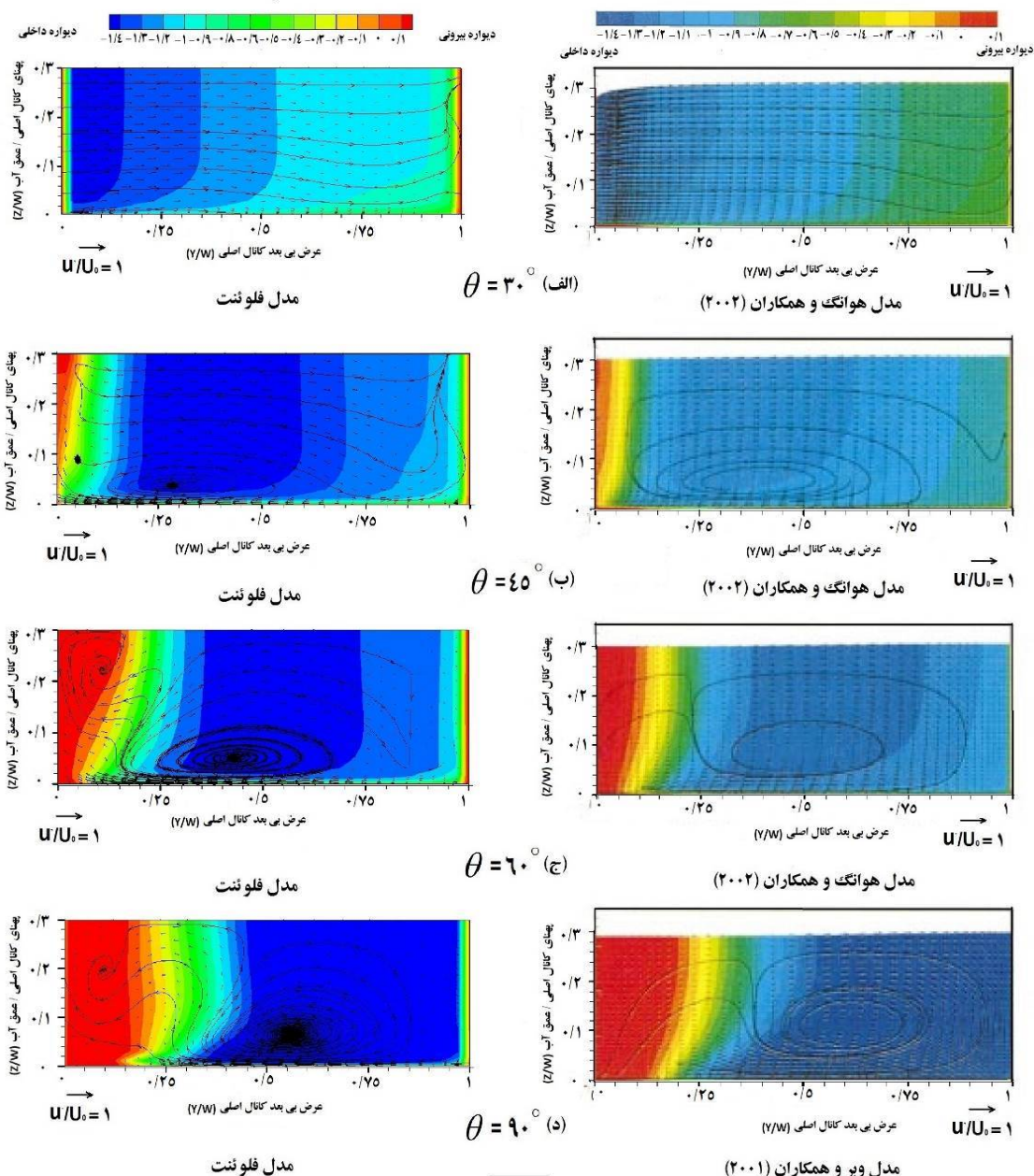
شکل ۱۲- مقایسه تغییرات عمق بالادست به پایین‌دست کانال اصلی در اثر تغییر زاویه اتصال (θ) در نسبت دبی ۰/۲۵

همراه خطوط جریان مشاهده می‌گردد. در این شکل اندازه متغیر ناحیه جدایی از سطح به کف در نزدیکی دیواره داخلی کانال اصلی ($y^*=0$) و به ازای زوایای

اثر زاویه اتصال روی قدرت جریان ثانویه در شکل ۱۳ خطوط کنتور سرعت در $X^*=-2$ و به ازای زوایای مختلف تقاطع به

انحنا ایجاد می‌شود که نتیجه آن اختلاف در ابعاد ناحیه جدایی در کف و سطح می‌باشد. با افزایش زاویه تقاطع ابعاد ناحیه چرخشی افزایش یافته و قدرت جریان ثانویه تقویت شده است.

مختلف اتصال نشان داده شده است. از آنجا که بستر و دیواره‌های کانال بدون شیب هستند و سطح آزاد آب نیز تحت تأثیر دیواره‌های بدون شیب قرار دارد از این رو در صفحه برشی بین جریان اصلی و فرعی یک چرخش و



شکل ۱۳- مقایسه سرعت طولی (u^*) پیش بینی شده در $x^* = -2$ در زوایای مختلف با نتایج آزمایشگاهی وبر و همکاران (۲۰۰۱) و مدل هوانگ و همکاران (۲۰۰۲).

کوچکتر، به سمت دیواره داخلی گسترده‌تر می‌باشد بطوری‌که نتایج مطالعات هوانگ و همکاران (۲۰۰۲)

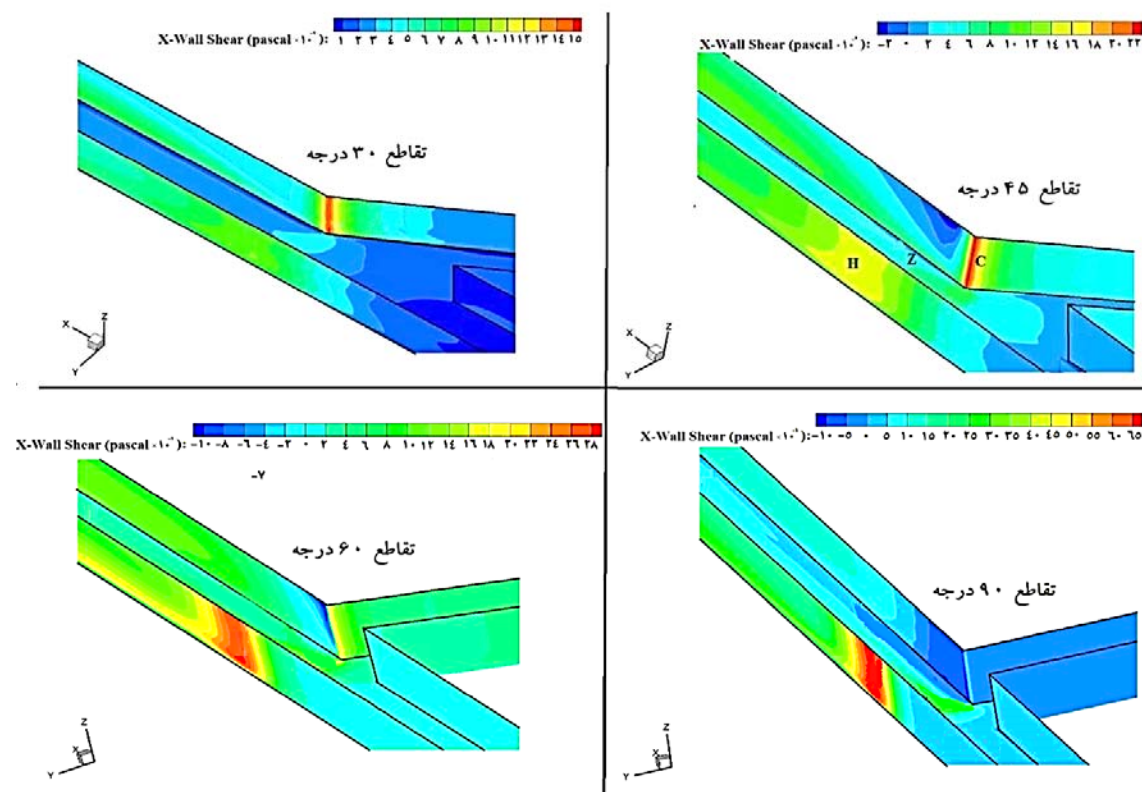
طبق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که ناحیه پر سرعت در کف نسبت به سطح برای زوایای اتصال

تراز بستر نیاز به مدل‌سازی در حالت بستر متحرک دارد تا اندرکنش فاز رسوب و سیال توأمان مدل‌سازی گردد. شکل ۱۴ پیش‌بینی توزیع تنش برشی بستر در کانال با بستر صلب را در زوایای تقاطع ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نشان می‌دهد. در این شکل نواحی با تنش بالا می‌توانند نواحی محتمل آبشستگی در بستر متحرک باشند و نواحی با تنش برشی نزدیک صفر، نواحی محتمل رسوب‌گذاری هستند.

نشان می‌دهد در $x^* = -2$ و در تقاطع ۹۰ درجه، در نزدیکی بستر حدود ۷۵٪ پهنای کانال به حمل جریان اختصاص داده می‌شود اما در نزدیکی سطح جریان فقط ۵۵٪ پهنای کانال وظیفه حمل و انتقال جریان به پایین‌دست را بر عهده دارد. این مقادیر برای مدل عددی فلونتت به ترتیب ۷۰ و ۵۵٪ می‌باشد.

اثر زاویه اتصال روی تنش برشی بستر

بررسی توزیع تنش برشی در بستر صلب می‌تواند به درک الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در حالت بستر متحرک کمک کند. هر چند بررسی دقیق تغییرات



شکل ۱۴- الگوی تنش برشی بستر در زوایای مختلف تقاطع در مدل عددی.

و آبشستگی باشند. توزیع تنش برشی در دهانه تقاطع نشان می‌دهد که با کاهش زاویه تقاطع از شدت تنش برشی بستر و دیواره روبروی تقاطع کاسته شده تا در تقاطع ۳۰ درجه به حداقل مقدار خود می‌رسد. اما در مقابل به مقدار تنش برشی در گوشه پایین‌دست (بخش C) تقاطع افزوده می‌شود بطوری‌که با گذشت زمان

در ناحیه جدایی و ناحیه سکون (بخش Z) بدلیل تنش‌های برشی نزدیک به صفر احتمال رسوب‌گذاری وجود دارد و بالعکس در ناحیه تنگ شدگی که ناحیه حداکثر سرعت می‌باشد و دیواره مقابل تقاطع (بخش H) در اثر برخورد جریان به آن جزء نواحی با تنش‌های برشی بالا هستند که می‌توانند ناحیه محتمل به فرسایش

شبیه‌سازی مدل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل فلوئنت قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان و پیش بینی تغییرات جریان در کانال‌های متقاطع دارد. در تمامی زوایای تقاطع مطالعه شده با برخورد دو جریان کانال اصلی و فرعی در پروفیل سطح آب یک پایین افتادگی ایجاد می‌گردد و با ادامه جریان به سمت پایین دست عمق جریان به تدریج افزایش پیدا کرده و به عمق نهایی می‌رسد. در شرایط جریان ثابت و با کاهش زاویه اتصال از ۹۰ به ۳۰ درجه، سطح آب در ناحیه جدایی و پایین دست آن افزایش یافته ولی بالعکس وسعت حفره پایین افتادگی سطح آب در عرض و عمق کاهش می‌یابد که در نتیجه آن سطح آب بعد از تقاطع نیز خیلی سریع‌تر به تراز اولیه خود می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که جریان ثانویه در تمامی زوایای اتصال مورد مطالعه وجود دارد، بطوری‌که قدرت جریان ثانویه با افزایش زاویه اتصال افزایش یافته و مرکز جریان ثانویه نیز به دیواره بیرونی کانال اصلی منتقل می‌شود. برای زوایای تقاطع بزرگتر، بیش از ۲۵ درصد پهنای کانال اصلی توسط ناحیه جدایی جریان اشغال می‌گردد که به دلیل رشد ناحیه جدایی در زوایای تقاطع بزرگتر و اثرات آن روی انتقال رسوبات و آبشستگی، سودمندی طراحی زاویه تقاطع کمتر به منظور کاهش احتمال آسیب‌های ناشی از سیل بیشتر نمایان می‌شود. با توجه به الگوی تنش برشی در بستر و دیواره‌های اطراف دهانه، دیواره روبروی تقاطع نیاز به حفاظت ویژه در مقابل فرسایش و تخریب دارد. آگاهی از نحوه تغییرات تراز سطح آب در محل برخورد دو جریان با زاویه متفاوت می‌تواند به طراحی بهتر نواحی انشعابی در کانال‌ها و همچنین مدیریت بهتر رودخانه‌ها کمک نماید.

احتمال فرسایش این ناحیه در زوایای کوچکتر تقاطع نسبت به دیواره روبروی کانال اصلی بیشتر می‌شود. با افزایش زاویه تقاطع، ابعاد ناحیه H که بیشترین تنش برشی را دارا می‌باشد افزایش یافته و ناحیه تحت تأثیر آن در طول دیواره روبروی تقاطع در بالا و پایین دست آن نیز افزایش می‌یابد. می‌توان انتظار داشت که در زوایای تقاطع بزرگتر فرسایش بیشتری در این ناحیه اتفاق افتد و باعث تغییر در ابعاد مقطع در بسترهای آبرفتی گردد. نتایج نشان داده است که افزایش زاویه تقاطع منجر به افزایش ابعاد ناحیه Z در مجاور دیواره داخلی هم خواهد شد که این پدیده باعث افزایش حجم قابل توجهی از رسوب‌گذاری در این ناحیه و کاهش پهنای مؤثر کانال اصلی می‌شود. ناحیه Z به علت وجود جریان ثانویه، تشکیل شده و با افزایش زاویه تقاطع ابعاد آن افزایش می‌یابد. جریان ثانویه ایجاد شده ناشی از انحنا خطوط جریان در نزدیکی بستر قدرت بالایی دارد و همین پدیده باعث انتقال رسوبات نزدیک بستر به طرف ناحیه جدایی می‌شود. به مرور زمان و در اثر تجمع رسوبات قسمتی از دهانه تقاطع مسدود خواهد شد و سرعت جریان در ناحیه مقابل افزایش خواهد یافت. این عامل می‌تواند در طول زمان مسیر جریان را در کانال‌های اصلی و فرعی تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر این به دلیل تنش برشی ناچیز در ناحیه سکون، این ناحیه را نیز می‌توان ناحیه مستعد رسوب‌گذاری قلمداد کرد که با گذر زمان می‌توان در این ناحیه نیز شاهد تجمع رسوبات و شکل‌گیری پشته رسوبی در رودخانه‌ها بود.

نتیجه‌گیری کلی

در این مقاله تاثیر زاویه تقاطع بر پارامترهای جریان مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج

منابع مورد استفاده

قبادیان ر، شفاعی بجستان م و آذری آ، ۱۳۸۷. بررسی تاثیر زاویه اتصال بر الگوی فرسایش و رسوب گذاری در محل تلاقی رودخانه‌ها با استفاده از مدل فیزیکی. مجله پژوهش کشاورزی (آب خاک و گیاه در کشاورزی)، سال ۸، شماره ۵، صفحه‌های ۱۰۷ تا ۱۲۲.

Best JL and Reid I, 1984. Separation zone at open-channel junctions. J Hydraul Engin ASCE 110(11): 1588-1594.

Bonakdari H, Lipeme KG and Wang X, 2011. Experimental validation of CFD modeling of multiphase flow through open channel confluence. Pp. 2176-2183. World Environmental and Water Resources Congress, ASCE, California, United States.

- Goudarzizadeh R, Mousavi Jahromi SH and Hedayat N, 2010. Simulation of 3D flow using numerical model at open-channel confluences. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 47: 650-655.
- Hsu CC Wu FS and Lee WJ 1998. Flow at 90° equal width open channel junction. *J Hydraul Engin, ASCE* 124(2): 186-191.
- Huang J, Weber LJ and Lai YG, 2002. Three-dimensional numerical study of flows in open-channel junctions. *J Hydraul Engin ASCE* 128(3): 268-280.
- Li CW and Zeng C, 2009. 3D Numerical modeling of flow divisions at open channel junctions with or without vegetation. *Advances in Water Resources* 32(1): 49-60.
- Ramamurthy AS, Junying Q and Diep Vo, 2009. Closure to numerical and experimental study of dividing open-channel flows. *J Hydraul Engin ASCE* 135(12): 1112-1113.
- Shumate ED 1998. Experimental description of flow at an open-channel junction. Master Thesis, Univ. of Iowa, Iowa.
- Weber LJ, Shumate ED and Mawer N, 2001. Experiments on flow at a 90° open-channel junction. *J Hydraul Engin ASCE* 127(5): 340-350.
- Xiekang W, Xianye W, Weizhen LU and Tonghuan LIU, 2007. Experimental study on flow behavior at open channel confluences. *Front Archit Civ Eng China* 1(2): 211-216.