

بررسی عددی اثرات زاویه واگرایی بستر سیلابی غیرمنشوری بر سرعت جریان در مقطع عرضی کانال‌های مرکب

مرتضی شکری و رضا مهدی‌پور

دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صفحات ۴۵۴-۴۶۴

Vol. 7(3), Autumn 2021, 454-464

DOI: 10.22034/jewe.2021.250562.1434

**Numerical Study of the Effects of Non-Prismatic
Floodplain Divergence Angle on Flow Velocity in
the Cross Section of Compound Channels**

Shokri, M. and Mahdipoor, R.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

شکری، م. و مهدی‌پور، ر. (۱۴۰۰). بررسی عددی اثرات زاویه واگرایی بستر سیلابی غیرمنشوری بر سرعت جریان در مقطع عرضی کانال‌های مرکب. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۳، صفحات: ۴۵۴-۴۶۴.

Citing this paper: Shokri, M. and Mahdipoor, R. (2021) Numerical study of the effects of non-prismatic floodplain divergence angle on flow velocity in the cross section of compound channels. Environ. Water Eng., 7(3), 454-464. DOI: 10.22034/jewe.2021.237529.1376

مقاله پژوهشی

بررسی عددی اثرات زاویه واگرایی بستر سیلابی غیرمنشوری بر سرعت جریان در مقطع عرضی کانال‌های مرکب

مرتضی شکری^{۱*} و رضا مهدی پور^۲

^۱استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*نویسنده مسئول: m.shokri@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۹/۱۲/۰۲]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۹/۱۱/۲۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۹/۰۷/۰۷]

چکیده

غیرمنشوری بودن کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در کانال مرکب و اندرکنش شدید جریان کم‌سرعت سیلاب‌دشت‌ها در عبور از روی جریان پرسرعت کانال اصلی، موجب شکل‌گیری جریان‌های ثانویه می‌شود. تاکنون مطالعات جامعی در مورد تغییر زاویه واگرایی سیلاب‌دشت‌ها به صورت مدل عددی و فیزیکی صورت نگرفته و به علت تأثیرگذار بودن این پارامتر، ضرورت بررسی آن مشخص می‌گردد. در پژوهش حاضر سعی شده با استفاده از مدل سه بعدی Ansys-Fluent، هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا به ازای پنج زاویه واگرایی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵° و در سه مقطع ۲، ۸ و ۱۴ m با مدل آشفتگی k-ε استاندارد و روش (VOF) شبیه‌سازی شود. شرایط مرزی استفاده شده در این پژوهش، مرز ورودی نرخ جرمی جریان، مرز خروجی به صورت خروجی فشار، مرزهای جامد به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری و بدون زبری و مرز بالایی کانال به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری بود. نتایج بررسی دقت پیش‌بینی سرعت میانگین عمقی در مقطع ۱۴ m کانال نشان داد که در کلیه مقاطع کانال، نتایج مدل‌سازی‌ها در محدوده مجاز خطای تعریف شده برای مدل‌های عددی قرار دارند که نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی می‌باشد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین سرعت در کانال با زاویه واگرایی ۳° اتفاق می‌افتد و هر چه زاویه واگرایی بیش‌تر شود، سرعت کم‌تر می‌شود. همچنین حداکثر تنش برشی در کانال با زاویه واگرایی سه درجه و کم‌ترین تنش برشی در زاویه واگرایی ۱۵° می‌باشد. عمق آب با زاویه واگرایی کم‌تر، بیش‌تر است و هر چه زاویه واگرایی بیش‌تر می‌شود عمق آب کم‌تر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انسیس فلوئنت؛ زاویه واگرایی؛ سیلاب‌دشت واگرا؛ کانال غیرمنشوری؛ VOF

۱- مقدمه

خسارات ناشی از سیل و طغیان رودخانه‌ها در کشور، همه‌ساله بخش قابل توجهی از اعتبارات مربوط به حوادث و بلایای طبیعی را به خود اختصاص می‌دهد. اولین قدم در طراحی و مدیریت بهینه روش‌های کنترل سیلاب، شناسایی درست و مناسب رفتار رودخانه در هنگام وقوع سیل است (Naghbi Neishapouri and Sagharvani 2013). در اغلب طرح‌های مهندسی رودخانه از قبیل روندیابی سیل، تعیین حد بستر و حریم رودخانه، محاسبه مقادیر متوسط پارامترهای هیدرولیکی مقطع رودخانه کفایت می‌کند. این نتایج با استفاده از مدل‌های ریاضی یک‌بعدی جریان دائمی قابل استخراج می‌باشد. مشکل اصلی این مدل‌های ریاضی این است که متغیرهای هیدرولیکی را فقط در جهت طولی محاسبه کرده و توزیع عرضی و عمقی متغیرها را در نظر نمی‌گیرند و از نظر دقت دارای محدودیت می‌باشند. در مطالعات حمل رسوب، تعیین سرعت جریان در مقطع اصلی و دشت‌های سیلابی رودخانه، توزیع عرضی یا عمقی پارامترهای سرعت جریان و تنش برشی اهمیت فراوانی دارند؛ بنابراین در این طرح‌ها استفاده از مدل‌های ریاضی دوبعدی و سه‌بعدی اجتناب‌ناپذیر است. این مدل‌ها، فیزیک و مکانیسم جریان را با دقت بیش‌تری شبیه‌سازی می‌کنند، اما نیازمند اطلاعات دقیق مرزهای جریان، ضرایب ثابت و اندازه‌گیری‌های فراوان میدان سرعت جریان در جهات طولی و عرضی و نیز حجم بالای حافظه کامپیوتر می‌باشند (Zahiri 2010).

اصولاً تفاوت عمق آب و سرعت متوسط بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها در یک مقطع مرکب، باعث بروز پدیده کم‌تر شناخته شده انتقال مومنتم بین آبراهه اصلی و سیلاب‌دشت‌ها می‌گردد و این امر موجب پیچیدگی‌هایی در هیدرولیک جریان این مقاطع می‌شود (Chelbek 2009). با استفاده از شبیه‌سازی جریان، می‌توان نحوه عملکرد جریان در کانال‌های مرکب در مواقع سیلابی را پیش‌بینی و کاهش داد. تاکنون مشخصات مختلفی از مقاطع مرکب به صورت مدل‌های عددی و آزمایشگاهی موردبررسی قرار گرفته است؛ اما مطالعه در مورد تغییر زاویه واگرایی سیلاب‌دشت‌ها به صورت مدل عددی و فیزیکی صورت نگرفته است. از آنجایی که در مطالعات آزمایشگاهی و عددی اثر این پارامتر هندسی، تاکنون موردبررسی قرار نگرفته است و به علت

این که این پارامترها می‌توانند بر جریان اثرگذار باشد، ضرورت بررسی این پارامتر مشخص می‌گردد.

نتایج حاصل از تأثیرات ناحیه همگرایی بر روی سرعت جریان توسط Bousmar et al. (2002) نشان داد که کاهش اندکی در مؤلفه طولی سرعت در کانال اصلی در نزدیکی مرز تماس با سیلاب‌دشت‌ها به‌خاطر ورود جریان کندتر از سیلاب‌دشت به کانال اصلی رخ می‌دهد. نتایج بررسی نحوه انتقال مومنتم بین دشت‌های سیلابی و کانال اصلی توسط Khatua and Patra (2007) نشان داد که مقدار برش در دشت‌های سیلابی با افزایش عمق جریان در کانال مرکب افزایش می‌یابد. (Kishnajiit et al. 2007) نحوه انتقال مومنتم بین دشت‌های سیلابی و کانال اصلی را بررسی کردند و دریافتند که براساس توزیع تنش برشی می‌توان نحوه و میزان انتقال مومنتم بین دشت‌های سیلابی و کانال اصلی را به‌دست آورد. نتایج بررسی تغییرات لایه تنش در کانال‌های مرکب توسط Mohanty (2011) نشان داد که عرض لایه تنش به شرایط هندسی و شرایط جریان وابسته می‌باشد و رشد لایه تنش با افزایش نسبت عرض، کاهش و با کاهش عمق نسبی، افزایش می‌یابد. (Younesi et al. 2013). تأثیر توأمان واگرایی و زبری سیلاب‌دشت بر روی هیدرولیک جریان غیریکنواخت را بررسی نمودند. نتایج آنان نشان داد که گرادیان سرعت در محل برخورد کانال اصلی به سیلاب‌دشت، تحت تأثیر عمق نسبی و زبری نسبی قرار گرفته و با افزایش عمق نسبی و یا کاهش زبری نسبی، مقدار آن در ناحیه میانی و انتهای محدوده واگرایی کاهش می‌یابد. (Mohanta et al. 2014) شبیه‌سازی جریان با انسیس فلوننت در کانال‌های مرکب منشوری و غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا را انجام دادند و نتیجه گرفتند که مدل عددی با به‌کارگیری مدل آشفتگی (LES) قابلیت خوبی در پیش‌بینی توزیع سرعت متوسط عمقی در مقاطع مرکب منشوری و غیرمنشوری دارد.

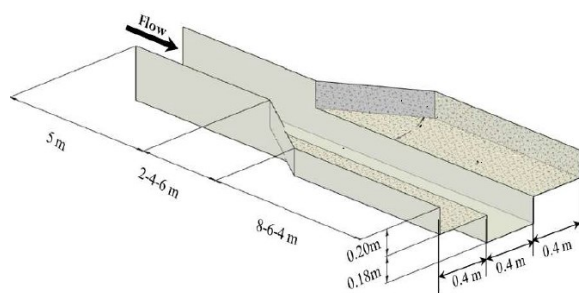
(Younesi et al. 2015) اثر زبری سیلاب‌دشت بر هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب با سیلاب‌دشت واگرا را بررسی و نتیجه گرفتند که در مقطع غیرمنشوری، با افزایش زبری سیلاب‌دشت، نسبت سرعت متوسط جریان در سیلاب‌دشت‌ها به کانال اصلی در حدود ۳۱٪ کاهش و آشفتگی جریان در حدود ۲۵٪ افزایش می‌یابد. Sekhar reddy (2016) تأثیر مدل آشفتگی $k-\epsilon$ در تعیین

مرکب با استفاده از مدل سازی عددی با نرم افزار Ansys Fluent و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی موجود می باشد. در نتیجه این شبیه سازی و تحلیل جریان، می توان نحوه رفتار جریان در کانال های مرکب در مواقع سیلابی را پیش بینی نمود و با بررسی رودخانه ها به عنوان کانال مرکب خسارات به وجود آمده را پیش بینی کرده و کاهش داد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی انتقال بار بستر در یک کانال بتنی مرکب غیرمنشوری به طول ۱۵ m در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران توسط (Younesi (2013 انجام شده است. این کانال، کانال مرکبی با دو سیلاب دشت متقارن به عرض ۴۰۰ mm با شدت جریان قابل تأمین جهت بازچرخانی در سیستم lit/s ۲۵۰ و شیب طولی ۰/۰۰۰۸۸ بود. عمق کانال اصلی تا لبه سیلاب دشت برابر ۰/۱۸ m و عرض کانال اصلی برابر ۰/۴ m بود. از یک سرریز مثلی برای اندازه گیری دبی جریان ورودی به کانال، در بالادست کانال استفاده شد. به منظور اندازه گیری سرعت جریان در آزمایش ها با عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ از یک میکرومولینه با قطر ۱۴ mm و در آزمایش های با عمق نسبی ۰/۳۵ از یک دستگاه سرعت سنج سه بعدی (ADV) با فرکانس ۱۰۰ هرتز و در مدت زمان ۶۰ ثانیه، برای هر ۲۰ میلی متر از عمق جریان برداشت شد. تراز سطح آب نیز توسط عمق سنج هایی با دقت ۰/۱ mm برداشت شد. سرعت در سه مقطع ابتدا ($X=2$ m)، وسط ($X=8$ m) و انتهای محدوده واگرایی ($X=14$ m) اندازه گیری شده است. لازم به ذکر است منظور از X فاصله از ابتدای کانال است. در شکل (۱) نمای شماتیک کانال تحقیقاتی مذکور نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای شماتیک کانال تحقیقاتی

Fig. 1 Schematic view of the research channel

پارامترهای جریان در کانال های مرکب غیرمنشوری با سیلاب دشت های واگرا را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که نتایج عددی و آزمایشگاهی تقریباً مشابه است و مدل k-ε در پیش بینی جریان در کانال مرکب واگرا عملکرد خوبی داشته است. (Devi et al. (2016 بررسی مقاومت جریان در کانال های مرکب غیرمنشوری واگرا و همگرا با یک مدل رگرسیون چند متغیره را انجام دادند و نتیجه گرفتند که این مدل با ارائه خطای کم تر، نتایج رضایت بخشی را در مقایسه با سایر روش ها به دست می دهد. (Fazli et al. (2013 نرم افزار Ansys CFX جریان در کانال های مرکب منشوری را با مدل های مختلف آشفتگی شبیه سازی نمودند و نتیجه گرفتند که انطباق نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی به طور کلی قابل قبول است.

(Naik et al. (2017 مدل سازی عددی جریان در کانال مرکب همگرا با زوایای ۵° و ۹° و ۱۲/۳۸° را با مدل آشفتگی k-ε را انجام دادند و نتیجه گرفتند که سرعت های میانگین عمقی پیش بینی شده با مدل عددی تطابق قابل قبولی با داده های آزمایشگاهی داشته است. (Najafian et al (2016 خصوصیات جریان در کانال مرکب منشوری با زبری ناهمگن را به صورت فیزیکی و عددی بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که افزایش زبری سیلاب دشت موجب کاهش سرعت متوسط عمقی و نیز تشدید گردایان تنش برشی مرزی جریان در محل اتصال مقطع اصلی و سیلاب دشت ها می شود.

(Das and Khatua (2018 محاسبات پروفیل سطح آب برای کانال مرکب با سیلاب دشت های واگرا را انجام دادند. آنان نتیجه گرفتند که برای زوایای واگرایی متفاوت، مقادیر پروفیل سطح آب با افزایش عمق نسبی افزایش می یابد. نتایج بررسی جریان در ۹ کانال مرکب با هندسه متفاوت با مدل آشفتگی K-ε، RNG توسط Sajjadi and Sarkardeh (2018)، نشان دهنده تطابق قابل قبول نتایج با نتایج آزمایشگاهی بود. (Das et al. (2019 پیش بینی مقدار دبی در کانال های مرکب همگرا و واگرا با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ (GEP) را انجام دادند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که مدل GEP خروجی های مناسبی برای پیش بینی دبی بر روی کانال های مرکب واگرا ارائه می دهد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر تغییر زاویه واگرایی سیلاب دشت ها بر توزیع عرضی سرعت در مقطع عرضی کانال

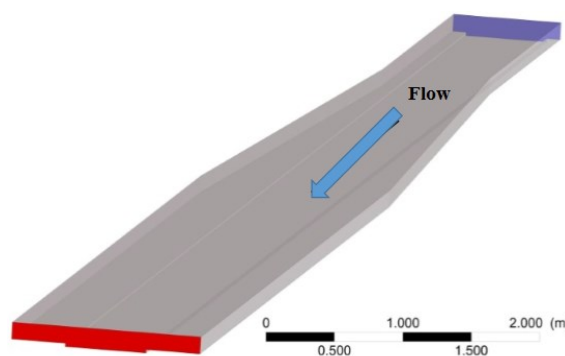
¹ Genetic algorithm

۲-۲- مدل عددی

نرم افزار انسیس فلوئنت بر پایه‌ی روش حجم محدود بنا شده که یک روش بسیار قوی و مناسب در روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی است. نرم افزار فلوئنت، نرم افزار چندمنظوره‌ای است که برای مدل‌سازی جریان سیال، انتقال حرارت و واکنش‌های شیمیایی نوشته شده است (Bekker et al. 1989). این نرم افزار، امکان تغییر شبکه بندی به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه بندی‌های پیچیده را فراهم می‌سازد. نوع شبکه‌های قابل تولید و دریافت با این نرم افزار، شامل شبکه‌های با المان‌های مثلثی و چهارضلعی (برای هندسه‌های دوبعدی) و چهاروجهی، شش‌وجهی، هرمی یا گوه‌ای برای هندسه‌های سه‌بعدی است (Heidarzade 2015).

۲-۳- هندسه مدل

در این پژوهش، ایجاد هندسه مدل در سه جهت طول کانال (Z)، عرض کانال (X) و عمق کانال (Y) با استفاده از نرم افزار Ansys Design Modeler انجام شد. مقاطع عرضی در جهت صفحات (X-Y) و پارامترهای جهت جریان در جهت محور Z بررسی می‌شوند (شکل ۲). در این پژوهش، پنج زاویه واگرایی متفاوت مدل‌سازی شده و برداشت‌ها در سه مقطع ۲، ۸ و ۱۴ m انجام شده و مقایسه‌ها صورت گرفته است.



شکل ۲- هندسه ترسیم شده برای مدل‌سازی CFD
Fig. 2 Drawn geometry for CFD modeling

۲-۴- شرایط مرزی

یکی از نکات مهم و اساسی در مدل‌سازی سازه‌های هیدرولیکی به کمک نرم افزار فلوئنت، تعیین مناسب و دقیق شرایط مرزی است. تعریف درست هندسه و شرایط مرزی مدل در CFD، تأثیر به‌سزایی در هم‌گرایی حل مسئله دارد (Amini and Asadi Parto 2017). در کانال‌ها معمولاً پنج

نمونه از شرایط مرزی شامل ورودی^۱، خروجی^۲، دیواره‌ها^۳، تقارن و سطح آزاد وجود دارد. شرایط مرزی ورودی زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که عمده جریان، مستقیماً به درون حجم مورد بررسی وارد گردد. در واقع توزیع تمام متغیرهای جریان باید در مرز ورودی تعیین گردد. در شرایط مرزی خروجی، اگر موقعیت خروجی به اندازه‌ی کافی از اغتشاشات هندسی جریان، دور انتخاب شود، آنگاه جریان می‌تواند به خوبی توسعه یافته و موقعیت پایداری پیدا کند. به گونه‌ای که در امتداد مسیر، هیچ اتفاقی باعث تغییر راستای جریان نگردد. در این حالت، محدوده‌ای ایجاد می‌شود که گرادیان تمامی متغیرها به استثنای فشار در راستای جریان صفر خواهد بود. شرایط مرزی دیواره در حقیقت، مشخص کننده مرزهایی است که دیواره‌های کانال را مشخص می‌کنند. کف و دیواره‌های کانال اصلی و سیلاب دشت‌ها در این دسته بندی قرار می‌گیرند. در این قسمت می‌توان ضریب زبری را تعریف نمود. یکی از شرایط مرزهای دیواره، شرایط عدم لغزش^۴ می‌باشد که مخصوص مؤلفه سرعت و در کانال با دیواره‌های صلب است و بیان می‌دارد که سرعت در مجاورت دیوار، صفر در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش برای جریان در کانال مورد بررسی از مرز ورودی نرخ جرمی جریان^۵، مرز خروجی به صورت خروجی فشار^۶، مرزهای جامد به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری^۷ و مرز بالایی کانال به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری تعریف شده‌اند. در جدول (۱) خلاصه شرایط مرزی وارد شده ارائه گردیده است. در این پژوهش، جریان به صورت دائمی مدل‌سازی شد. دبی جریان ورودی آب برابر با ۱۸ lit/s در نظر گرفته شد. همچنین کوپلینگ معادلات سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم couple انجام گرفت. در این پژوهش، مدل‌سازی به صورت دو فازی با استفاده از روش حجم سیال (VOF)^۸ انجام شد که فاز اولیه آن، هوا و فاز ثانویه آن آب بود. در این مدل سطح آب برای تغییرات آنی، آزادی داشته و این تغییرات به عنوان بخشی از حل عددی جریان برای شبیه‌سازی جریان آب مورد توجه قرار

¹Inlet

²Outlet

³wall

⁴No Slip Boundary condition

⁵Mass Flow Rate

⁶Pressure Outlet

⁷Smooth Wall

⁸Volume of Fluid

گرفت. همچنین در این پژوهش، از مدل آشفتگی k-ε Standard استفاده شد.

جدول ۱- شرایط مرزی

Table 1 Boundary Condition

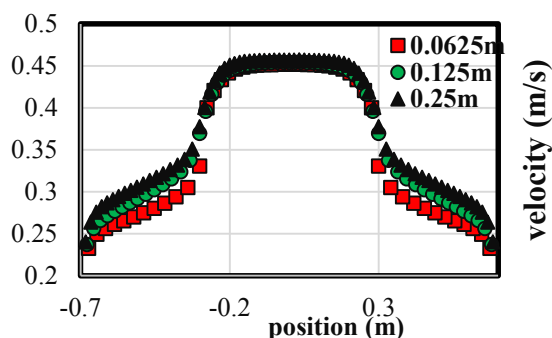
Output Height (m)	Output Discharge (kg/s)	Type of Output	Input Height (m)	Input Discharge (kg/s)	Type of Input
0.27376	-	Pressure outlet	0.2601	61.5	Mass flow inlet

شبکه‌های مختلف، حل عددی صورت گیرد. این فرآیند تا مرحله‌ای ادامه پیدا می‌کند که با ریزتر کردن ابعاد شبکه تغییر چشم‌گیری در نتایج حاصل نشود. در این پژوهش، برای انجام مرحله استقلال از شبکه در مدل‌سازی، از سه اندازه متفاوت شبکه استفاده شده و برای انجام فاز استقلال از شبکه، نرخ رشد تعداد المان‌ها $1/2$ در نظر گرفته شده است. برای مقایسه شبکه‌بندی‌ها، سرعت میانگین بر روی خطی نزدیک به خروجی ($Z=14$ m)، به عنوان معیار بررسی استقلال شبکه در نظر گرفته شد. جزئیات شبکه‌بندی‌های اعمال شده در کانال موردنظر در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- جزئیات شبکه‌بندی‌های اعمال شده

Table 2 Details of meshing applied

Type	Number of Elements	Mesh Size (m)
Coarse	61950	0.25
Medium	124200	0.125
Fine	254400	0.0625



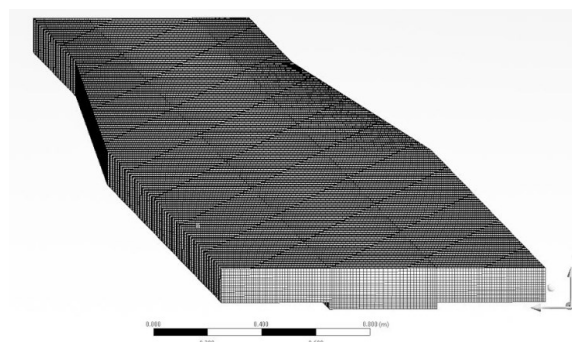
شکل ۴- نمودار سرعت میانگین بر روی خطی از کانال با سه نوع شبکه‌بندی متفاوت

Fig. 4 Average velocity graph on a line of channels with three different types of mesh

در شکل (۴) سرعت میانگین بر روی خطی از کانال با سه نوع شبکه‌بندی متفاوت ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، با افزایش تعداد المان‌ها از ۶۱۹۵۰ به ۱۲۴۲۰۰، تغییر چشم‌گیری در اندازه سرعت رخ داده است؛ اما با افزایش تعداد المان‌ها از ۱۲۴۲۰۰ به ۲۵۴۴۰۰ نمودار سرعت میانگین بر روی خط تغییر زیادی نکرده است که

۲-۵- شبکه‌بندی

شبکه‌بندی کانال مرکب موردبررسی، به صورت المان‌های با قاعده^۱ انجام گرفته است و دارای مقیاس اریبی صفر می‌باشد. در شبکه‌بندی موردنظر، ضریب شکل المان‌ها در محدوده مجاز، یعنی کوچک‌تر از ۵۰ اعمال شده است. برای شبکه‌بندی، ابتدا تقسیم‌بندی خطوط موجود در مقطع ($Z=0$) صورت گرفته است؛ سپس در کل طول کانال گسترش داده شده است. سایز المان‌های شبکه با نزدیک شدن به مرزهای جریان موجود بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها و همچنین با نزدیک شدن به دیواره‌ها کمتر شده است. شمای کلی شبکه‌بندی کانال در شکل (۳) ارائه شده است.



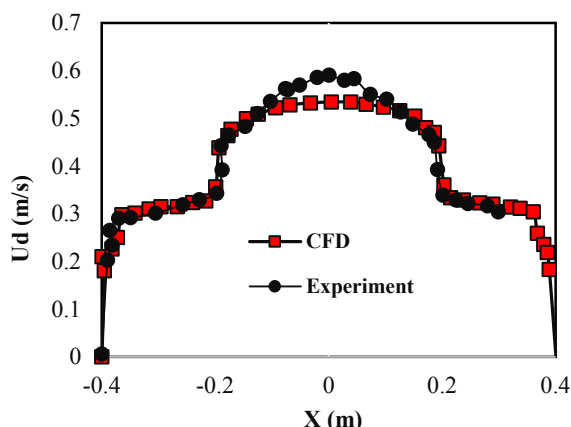
شکل ۳- شمای کلی شبکه‌بندی کانال
Fig. 3 Overview of channel mesh

۲-۶- استقلال از شبکه

اصولاً در شبیه‌سازی‌ها، یکی از پارامترهایی که ممکن است در نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی به جواب واقعی مؤثر باشد، ابعاد المان‌های شبکه است. برای این که اطمینان حاصل شود که نتایج حاصل از مدل‌سازی به ابعاد المان‌های شبکه وابسته نیست، سلسله اقداماتی باید انجام شود که به آن مستقل کردن نتیجه از شبکه یا استقلال از شبکه^۲ می‌گویند (Yousefi 2018). استقلال از شبکه، عبارت است از بررسی تعداد المان‌های شبکه دامنه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این شبکه. به عبارتی بایستی برای دامنه حل با تعداد

¹ Structure Mesh

² Mesh Independency

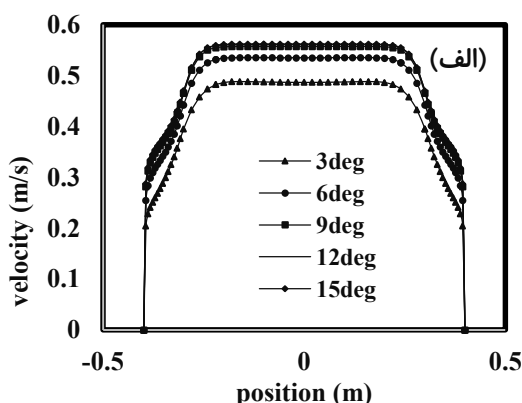


شکل ۵- مقایسه نتایج حل عددی با آزمایشگاهی
Fig. 5 Comparison of numerical solution results with laboratory

در این قسمت، نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی کانال مرکب واگرا با زوایای واگرایی متفاوت بررسی می گردد.

۳-۲- نتایج سرعت میانگین

برای بررسی دقت پیش بینی سرعت میانگین بر روی خط هایی در کانال با زوایای واگرایی مختلف (۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵°)، نتایج به صورت نموداری در شکل (۶) ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود؛ بیش ترین سرعت در کانال با زاویه واگرایی سه درجه اتفاق می افتد و هر چه زاویه واگرایی بیشتر شود سرعت کمتر می شود؛ بنابراین کانال با زاویه واگرایی ۱۵°، کم ترین سرعت را دارد. همچنین مشاهده می شود که سرعت در نزدیکی دیواره صفر است و با دور شدن از دیواره، سرعت بیشتر می شود و در مرکز کانال سرعت به حداکثر می رسد و این سرعت حداکثر با زیاد شدن زاویه واگرایی کم می شود.



نشان گر مستقل شدن محاسبات از تعداد المان های شبکه می باشد؛ بنابراین شبکه ۱۲۴۲۰۰، شبکه مناسبی است و می توان نتایج این شبکه را نتایج مستقل از شبکه محاسباتی در نظر گرفت.

۷-۲- واسنجی مدل

پژوهش های حل عددی به جهت اطمینان از صحت و دقت نتایج به دست آمده بایستی صحت سنجی شوند. این کار با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل شبیه سازی شده در نرم افزار با داده های آزمایشگاهی مدل متناظر صورت می گیرد؛ بنابراین لازم است ابعاد مدل عددی از روی یک مدل آزمایشگاهی برداشت شود. در پژوهش حاضر، نیز مطالعه آزمایشگاهی Younesi (2013) برای صحت سنجی مدل شبیه سازی شده در نظر گرفته شده است. لذا سرعت میانگین عمقی جریان در مقطع $Z=14$ m کانال مرکب واگرا در پژوهش Younesi (2013) شبیه سازی شد و در نهایت با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. برای بررسی میزان خطا و دقت اندازه گیری، از قدر مطلق میانگین خطای نسبی $MARE^1$ که در رابطه (۱) ارائه شده، استفاده شده است.

$$\%Error = \left| \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\bar{x}} \right| * 100 \quad (1)$$

که، $\bar{x}$ میانگین داده های آزمایشگاهی و $\bar{y}$ میانگین داده های حاصل از مدل سازی می باشد.

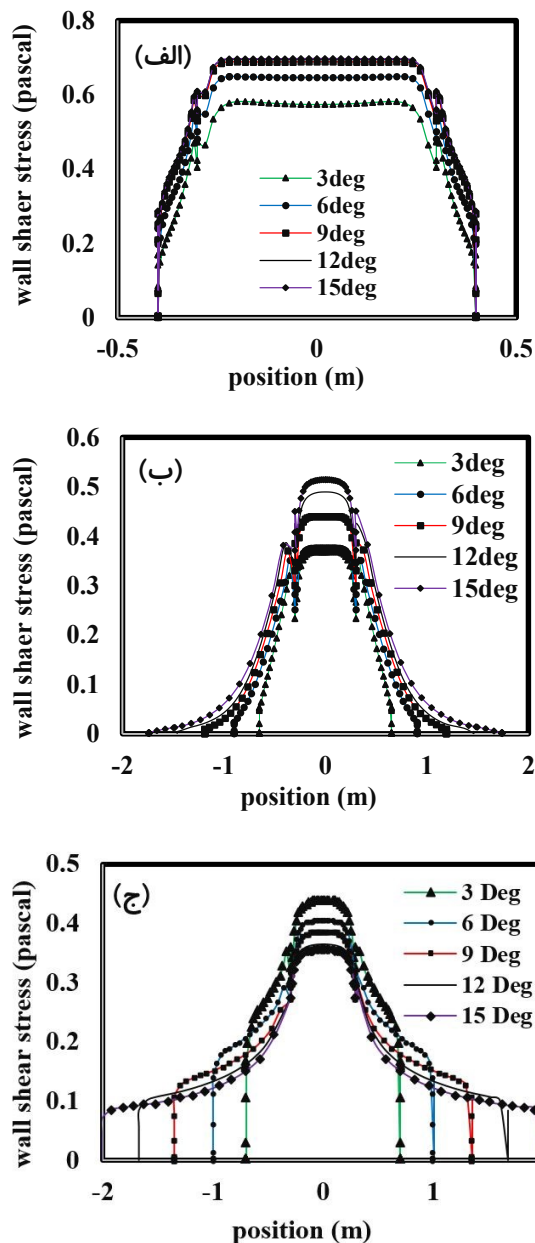
۳- یافته ها و بحث

۱-۳- نتایج واسنجی مدل

در شکل (۵)، نتیجه واسنجی مدل که در قسمت قبلی بیان شد ارائه گردیده است. همان طور که مشاهده می شود اختلاف نتایج مطالعه عددی و تجربی بسیار کم است و در اکثر نقاط به صفر می رسد. همچنین میانگین اختلاف خطای سرعت های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده ۳/۹۶٪ و حداکثر اختلاف خطا ۹٪ می باشد. لازم به ذکر است که در حل عددی، مقدار ۱۵٪ خطایی میانگین مجاز می باشد که در پژوهش حاضر، میانگین خطا ۳/۹۶٪ است؛ بنابراین نتایج از تطابق قابل قبولی برخوردارند و مدل عددی انسیس فلوئنت با مدل آشفتگی k-Standard ϵ توانایی خوبی در شبیه سازی جریان در کانال های مرکب واگرا دارد.

¹ Mean Absolute Relative Error

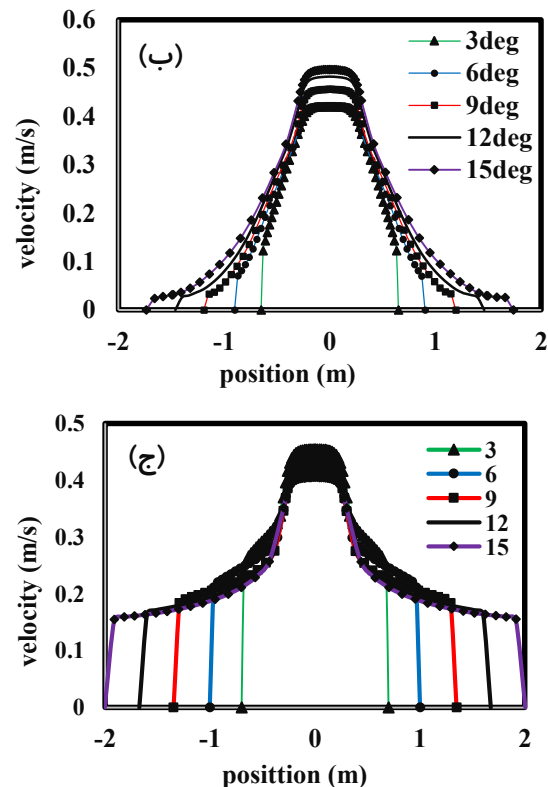
است. در ادامه در شکل (۷) نمودارهای توزیع تنش برشی بر روی دیواره در $Z=2\text{ m}$ و $Z=8\text{ m}$ ، $Z=14\text{ m}$ ارائه شده است.



شکل ۷- نمودار توزیع تنش برشی بر روی دیواره در الف- $Z=2\text{ m}$ ، ب- $Z=8\text{ m}$ و ج- $Z=14\text{ m}$

Fig. 7 Diagram of shear stress distribution on the wall at a) $Z=2\text{ m}$, b) $Z=8\text{ m}$, and c) $Z=14\text{ m}$

به طور کلی تنش برشی و سرعت رابطه مستقیم دارند. بر همین اساس بررسی‌ها نشان می‌دهد که، نمودار تنش برشی (شکل ۷) و نمودار سرعت (شکل ۶) شباهت‌هایی به هم دارند. همچنین ملاحظه می‌شود که حداکثر تنش برشی در کانال با زاویه واگرایی سه درجه، صورت گرفته و کمترین تنش برشی در زاویه واگرایی 15° می‌باشد. بر همین اساس



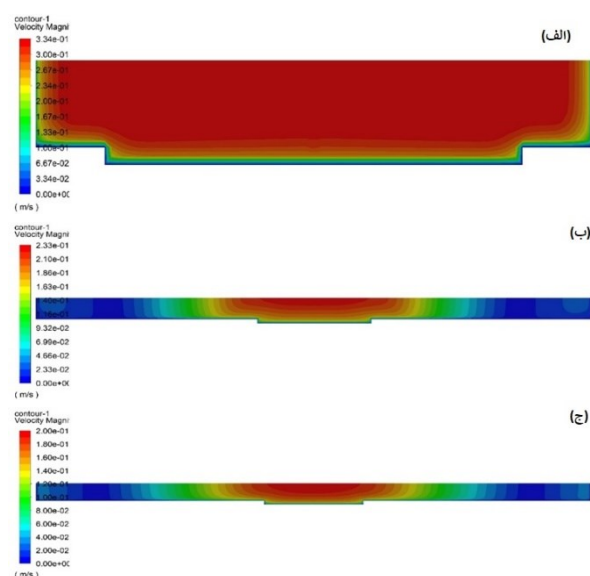
شکل ۶- نمودار توزیع سرعت میانگین بر روی خطوط الف- $Z=2\text{ m}$ ، ب- $Z=8\text{ m}$ و ج- $Z=14\text{ m}$

Fig. 6 Graph of average velocity distribution on lines: a) $Z=2\text{ m}$, b) $Z=8\text{ m}$, and c) $Z=14\text{ m}$

۳-۳- توزیع تنش برشی در کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

تنش برشی در کانال‌ها اغلب در آنالیز سیستم‌های رودخانه صرف‌نظر می‌شود، اما توزیع تنش برشی مرزی به دلیل این‌که در کالیبره کردن مدل‌های پیشرفته، در مطالعه تعادل نیروها و نیز در محاسبات مربوط به انتقال رسوب کاربرد دارد، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. تنش برشی می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین محل سلول جریان ثانویه و نیز محل فرسایش و رسوب گذاری در کانال‌های طبیعی به کار رود. در زمان وقوع سیلاب، بخشی از دبی رودخانه توسط سیلاب‌دشت‌ها حمل می‌شود. به دلیل تفاوت عمق جریان بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها، سرعت جریان نیز متفاوت بوده و متعاقباً میزان تنش برشی و توزیع آن به صورت قابل ملاحظه‌ای دستخوش تغییر می‌گردد. بر همین اساس، با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ ، تنش برشی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها برای زوایای واگرایی 3° ، 6° ، 9° ، 12° و 15° و سه مقطع $Z=2\text{ m}$ و $Z=8\text{ m}$ ، $Z=14\text{ m}$ شبیه‌سازی شده

بیشتر می شود عمق آب کمتر می شود. به طوری که در زاویه واگرایی 3° عمق آب دارای بیشترین مقدار است. همان طور که مشاهده می شود در مقطع ابتدای کانال، اختلاف ارتفاع آب در کانال اصلی و سیلاب دشت بسیار ناچیز است و در مقطع میانی کانال اختلاف ارتفاع بین کانال اصلی و سیلاب دشت ها زیاد می شود و دوباره با زیاد شدن فاصله و رسیدن به مقطع انتهایی کانال، این اختلاف ارتفاع بسیار کم می شود. همچنین می توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه واگرایی، اختلاف سطح آب در کانال اصلی و سیلاب دشت ها زیاد می شود.

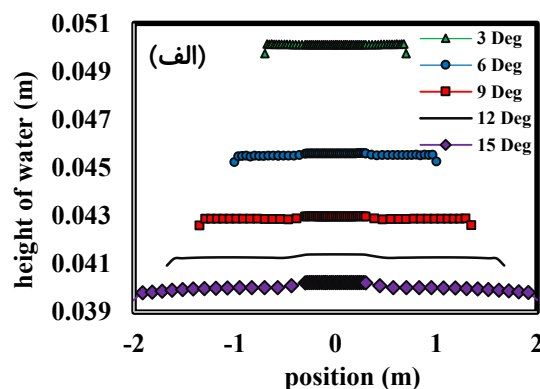


شکل ۹- توزیع سرعت در مقاطع مختلف کانال مرکب با زاویه واگرایی 12°

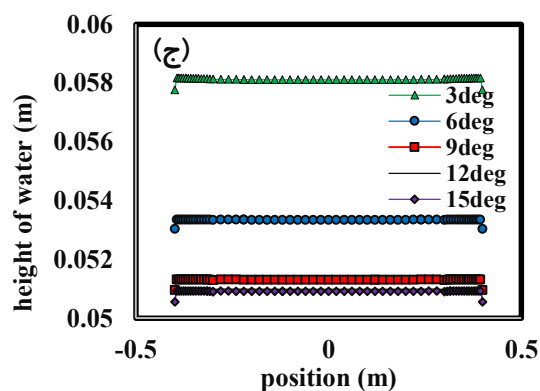
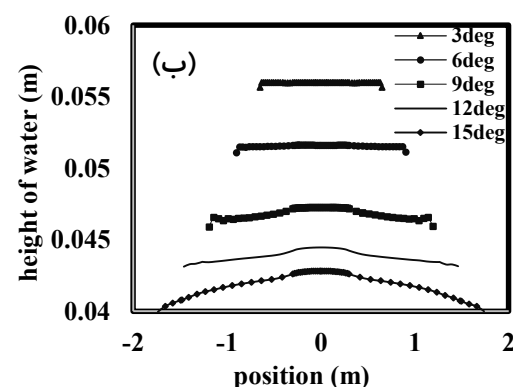
Fig. 9 Velocity distribution in different sections of compound channel with divergence angle of 12°

۳-۵- شمارنده های سرعت در کانال مرکب مورد بررسی
در این قسمت برای بررسی روند جریان، شمارنده ها به صورت تصویری در شکل (۹) برای زاویه واگرایی 12° به عنوان مثال نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است، در طول واگرایی کانال به دلیل افزایش سطح مقطع کانال، سرعت کاهش می یابد؛ اما این کاهش سرعت در ناحیه سیلاب دشت-ها، نسبت به کانال اصلی قابل ملاحظه تر می باشد. همچنین با افزایش سطح مقطع کانال، عمق جریان در کانال نیز کاهش می یابد. مطابق با شکل مشاهده می شود که حداکثر سرعت جریان در کانال اصلی در سطح کانال رخ نداده اما در سیلاب دشت ها، حداکثر سرعت در نزدیکی های سطح آب رخ داده است. از نکات قابل توجه در کانال مورد بررسی این است که با پیش روی در مقطع واگرایی و تغییر عرض مقطع سیلاب دشت ها از صفر به ۴۰۰ mm، جریان از سمت کانال

چنین نتیجه می شود که کانال بهینه از نظر تنش برشی در



مطالعه حاضر، کانال با زاویه واگرایی 15° می باشد.



شکل ۸- عمق آب: (الف) $Z=14$ m، (ب) $Z=8$ m و (ج) $Z=2$ m
Fig. 8 Water height: a) $Z=14$ m, b) $Z=8$ and c) $Z=2$ m

۳-۴- عمق آب

یکی دیگر از پارامترهای مهم در این مطالعه، عمق آب می باشد. در شکل (۸) عمق آب در مقاطع مختلف و زوایای واگرایی متفاوت ارائه شده است. در این نمودارها، محور افقی نمودار بیان گر مقطع انتخابی (مقطع ابتدایی، میانی و انتهایی کانال) برای شبیه سازی و محور عمودی بیان گر عمق آب به دست آمده است. همان طور که مشاهده می شود؛ عمق آب با زاویه واگرایی کمتر، بیشتر است و هر چه زاویه واگرایی

می‌شود؛ بنابراین کانال با زاویه واگرایی 15° کم‌ترین سرعت را دارد.

۳- همچنین سرعت در نزدیکی دیواره صفر است و با دور شدن از دیواره سرعت بیش‌تر می‌شود و در مرکز کانال سرعت به حداکثر می‌رسد و این سرعت حداکثر با زیاد شدن زاویه واگرایی کم می‌شود.

۴- حداکثر تنش برشی در کانال با زاویه واگرایی سه درجه صورت گرفته و کم‌ترین تنش برشی در زاویه واگرایی 15° می‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت که کانال بهینه از نظر تنش برشی در مطالعه حاضر، کانال با زاویه واگرایی 15° می‌باشد.

۵- در کانال با زاویه واگرایی کم‌تر، عمق آب بیش‌تر است و هر چه زاویه واگرایی بیش‌تر می‌شود عمق آب کم‌تر می‌شود.

دست‌رسی به داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده (تولیدشده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

اصلی به‌طرف سیلاب‌دشت‌ها هجوم می‌آورد. تهاجم جریان از کانال اصلی به سمت سیلاب‌رو باعث کاهش اغتشاش و آرام‌تر شدن جریان می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از مدل عددی سه‌بعدی انسیس فلوئنت و به‌کارگیری مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، اثر بررسی تغییر زاویه واگرایی سیلاب‌دشت‌های کانال مرکب غیرمنشوری بر هیدرولیک جریان در سه مقطع ۸، ۲ و ۱۴ m بررسی شد. خلاصه نتایج حاصل از این پژوهش در ذیل ارائه شده است:

۱- در کلیه مقاطع کانال مدل‌سازی شده، درصد خطای نسبی میانگین از مقدار مجاز آن یعنی 15% کم‌تر بوده؛ به‌طوری‌که میانگین درصد خطا برای پیش‌بینی سرعت، $3/96\%$ و حداکثر درصد خطا، 9% می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق مناسب نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی می‌باشد.

۲- بیش‌ترین سرعت در کانال با زاویه واگرایی سه درجه اتفاق می‌افتد و هر چه زاویه واگرایی بیش‌تر شود، سرعت کم‌تر

References

- Amini A., and Asadi Parto, A. (2017). 3D numerical simulation of flow field around twin piles. J. Hydrol., DOI 10.1007/s11600-017-0094-x.
- Bakker, B., Vermaas, H. and Choudri, A. M. (1989). Regime theories updated or outdated. Delft Hydraul., 416, 1-7.
- Bousmar, D. (2002). Flow modelling in compound channels: momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains. Thesis Presented for the degree of Doctor in Applied Sciences, Leuven Catholic University of Applied Sciences, Department of Civil and Environmental Engineering, 306.
- Chlebek, J. (2009). Modelling of simple prismatic channels with varying roughness using the SKM and a study of flows in smooth non-prismatic channels with skewed floodplains (Doctoral dissertation, University of Birmingham).
- Das, B. and Khatua, K. (2018). Water surface profile computation for compound channel having diverging floodplains. ISH J. Hydraul. Eng., 23(2), 336-349.
- Das, B. S., Devi, K. and Khatua, K. K. (2019). Prediction of discharge in converging and diverging compound channel by gene expression programming. ISH J. Hydraul. Eng., 1-11. Doi: [10.1080/09715010.2018.1558116](https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1558116)
- Devi, K., Khatua, K. K. and Das B. S. (2016). Apparent shear in an asymmetric compound channel. Iowa City, USA, River Flow, 48, 48-56.
- Fazli, M., Esfaniari, S. and Rezaei, B. (2013). Comparison of the results of numerical flow simulation in prismatic compound channels with different turbulence models. 9th International Congress of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, 9 [In Persian].
- Heidarzade, M. (2015). Applied computational fluid dynamics with ansys fluent, Kian University Press, Tehran, Congress Ranking, QA911/9D9H, 260. [In Persian].
- Khatua, K. and Patra, K. C. (2007). Boundary shear distribution in meandering compound channel flow. Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference, Australian Rivers: Making a Difference.

- Charles Sturt University, Thurgoona, New South Wales, 193-198.
- Kishnajit Kumar, K. and Kanhu Charan, P. (2007). Boundary shear stress distribution in meandering compound channel flow. Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference. Australian rivers: making a difference. Charles Sturt University, Thurgoona, New South Wales. 193-198.
- Mohanty, P. K., Khatua, K. and Patra, K. C. (2011). Investigation on shear layer in compound channels. National Conference Hydraulic and Water Resources Hydro, During December 29-30, SVNIT Surat, Surat.
- Mohanta, A., Patra, K. C. and Khatua, K. K. (2014). CFD simulation and two-phase modeling of a non-prismatic converging compound channel. National Conference on Advances in Engineering and Technology, At: Maharishi Markandeshwar University, Mullana - Ambala, 17-23.
- Naik, B., Khatua, K. K., Wright, N. G. and Sleigh, A. (2017). Stage discharge prediction for converging compound channels with narrow floodplains. J. Irrig. Drain. Eng., 143(8), 28. Doi: [10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001184](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001184)
- Najafian, S. (2016). Flow Simulation in non-prismatic compound sections using flow 3D model. Master Thesis in Water Engineering, Branch of Hydraulic Structures, University of Lorestan, Faculty of Agriculture, 123 [In Persian].
- Naghbi Neishapoori, N. and Sagharvani, M. (2013). Investigation of sediment transfer in sandy rivers. Master Thesis, Shahrood University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering [In Persian].
- Sekhar Reddy, Y. (2016). Application of K-e model to compound channels having diverging floodplains and analysis of flow parameters using ansys (fluent). Department of Civil Engineering National Institute of Technology Rourkel: Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of bachelor of Technology in Civil Engineering, 56.
- Sajjadi, S. H. and Sarkardeh, H. (2018). Accuracy of numerical simulation in asymmetric compound channels. Int. J. Civil Eng., 16(2), 155-167.
- Younesi, H. A., Omid, M. H. and Ayyoubzadeh, S. A. (2013). The hydraulics of flow in non-prismatic compound channels. J. Civil Eng. Urban, 3(6), 342-356.
- Younesi, H., Omid, M. H. and Ayoub Zade, S. (2015). Effect of flood roughness on flow hydraulics in compound sections with non-prismatic flood. Iran. Water Res. J., 6(2), 93-100 [In Persian].
- Younsei, H. A., (2013). Study of bed load transfer in the main channel of a compound channel with non-prismatic floodplain. PhD Thesis, University of Tehran, Irrigation and Development Course [In Persian].
- Yousefi, R. (2018). Study of velocity and boundary shear stress distributions in compound channels with converging floodplains using numerical modeling (CFD) and artificial neural. Master Thesis, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamedan [In Persian].
- Zahiri, A. (2010). Simulation of gradual variable flow in compound sections. J. Soil Water Conserv. Res., 17(4), 181-190 [In Persian].



Research Paper

Numerical Study of the Effects of Non-Prismatic Floodplain Divergence Angle on Flow Velocity in the Cross Section of Compound Channels

Morteza Shokri^{1*} and Reza Mahdipoor²

¹Assist. Professor, Department of Civil Engineering, Kabodarahang Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

²M.E. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

*Corresponding Author: m.shokri@basu.ac.ir

Received: September 28, 2020 **Revised:** February 13, 2021 **Accepted:** February 20, 2021

Abstract

The formation of the secondary flows is caused by the non-prismatic nature of the main channel and floodplains in the compound channel and the intense interaction of the low-velocity flow of the floodplains in passing over the high-velocity flow of the main channel. So far, comprehensive studies on changing the divergence angle of floodplains have not been done as a numerical and physical model, and due to the effectiveness of this parameter, its study is necessary. In the present study, using the three-dimensional Ansys-Fluent model, simulation was performed based on the standard k- ϵ turbulence model and VOF method for the hydraulic flow in compound channel with divergent floods for five divergence angles of 3, 6, 9, 12 and 15° and in three sections of 2, 8 and 14 m. The boundary conditions used in this research were the input limit of the mass flow rate, the output boundary as a pressure outlet, the solid boundaries as a non-slip wall without roughness and the upper boundary of the channel as a non-slip wall without roughness. The results of accurately predicting the average depth velocity in the section $Z = 14$ m of the channel showed that in all sections of the channel, the modeling results were within the allowable error range defined for numerical models, indicating the appropriate matching of laboratory and simulation results. The results showed that the maximum velocity in the channel occurs with a divergence angle of 3° and the higher the divergence angle, the lower the velocity. Moreover, the maximum shear stress in the channel is with a divergence angle of 3° and the minimum shear stress is in the divergence angle is 15°. The lower the water angle, the higher the divergence angle, and the higher the divergence angle, the lower the water height.

KEYWORD: Ansys Fluent; Divergence Angle; Divergent Floodplain; Non-prismatic Channel; VOF.