

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی تاثیر زوایای متفاوت بازشدگی سیلاب‌دشت‌ها بر توزیع تنش برشی و سرعت سیال در کانال‌های غیرمنشوری مرکب

مرتضی شکری^{۱*}، رضا مهدی‌پور^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱

چکیده

کانال‌های مرکب، مقطع عرضی بسیاری از رودخانه‌ها به ویژه در بازه‌های مجاور مناطق مسکونی و زراعی را تشکیل می‌دهند. بررسی رفتار هیدرولیکی کانال‌های مرکب، در طرح‌های کنترل سیلاب و ساماندهی رودخانه‌ها اهمیت فراوانی دارد. در این پژوهش، با مدل‌سازی کانال مرکب بتنی با نرم‌افزار انسیس فلوئنت با کمک مدل آشفتگی $k-\epsilon$ و روش مدل حجم سیال، تنش برشی و سرعت میانگین جریان در کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا به ازای زوایای بازشدگی متفاوت تعیین گردید. همچنین، شرایط مرزی برای جریان در کانال مورد بررسی به صورت مرز ورودی نرخ جرمی جریان، مرز خروجی به صورت خروجی فشار، مرزهای جامد به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری و مرز بالایی کانال به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری تعریف شده‌اند. مدل‌سازی صورت گرفته و مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج پژوهش حاضر، نشان داد که بیشترین سرعت در کانال با زاویه بازشدگی سه درجه رخ داده و با افزایش زاویه بازشدگی، سرعت جریان نیز کم‌تر شده است. علاوه بر آن، ماکزیمم تنش برشی ایجاد شده در کانال مرکب با زاویه بازشدگی کمتر اتفاق افتاده؛ به عبارت دیگر، هرچه زاویه بازشدگی سیلاب‌دشت بیشتر شده مقدار تنش برشی سیال نیز سیر نزولی پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: بستر سیلابی واگرا، تنش برشی، زاویه بازشدگی بستر، کانال روباز مرکب، مدل آشفتگی

مقدمه

مختلف، نظیر داشتن خاک حاصل خیز و نزدیکی به ساحل رودخانه مورد توجه بشر قرار داشته و بسیاری از تمدن‌ها در ساحل رودخانه‌های بزرگ شکل گرفته‌اند؛ بنابراین آشنایی با هیدرولیک جریان در سیلاب‌دشت‌ها برای تأمین حفاظت جان انسان‌ها و نیز سازه‌ها و تأسیسات موجود در این نواحی لازم و ضروری است (سیف و رضایی، ۱۳۹۸). بررسی و شناخت خصوصیات جریان در کانال‌های مرکب^۳ از آن جهت حائز اهمیت می‌باشد که می‌توان به کمک آن‌ها از کیفیت وقوع بسیاری از پدیده‌های فیزیکی اطلاع پیدا کرد (جوادیان، ۱۳۹۵). کانال مرکب در واقع مقاطع هیدرولیکی می‌باشند که از یک کانال اصلی و یک یا دو دشت سیلابی در طرفین آن تشکیل شده‌اند. هندسه خاص مقاطع مرکب و اختلاف قابل توجه زبری کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها منجر به بروز اختلاف قابل توجه سرعت جریان بین زیر مقاطع این کانال می‌شود. این اختلاف سرعت بین کانال اصلی و سیلاب‌دشت به نوبه خود باعث ایجاد یک ناحیه اندرکنش قوی در مرز زیر مقاطع می‌شود که از دیدگاه انرژی باعث افت انرژی قابل توجهی خواهد شد (تقیبی نیشاپوری و ساغروانی،

رودخانه‌ها و حاشیه مرطوب آن‌ها جزء مهمی از یک حوضه آبخیز هستند که می‌توانند کنترل مهمی روی شرایط فیزیکی و اکولوژیکی مناطق حوضه‌های پایین‌دست، همچون کنترل فرسایش و کاهش تولید رسوب ایجاد کنند (Seckin et al., 2009). شکل مقطع و پروفیل طولی رودخانه‌ها به وسیله عوامل مختلفی نظیر مشخصات خاک، شرایط توپوگرافی منطقه، رژیم رودخانه و حمل رسوب در طی قرن‌ها شکل داده شده است. بنابراین رودخانه‌ها دارای شکل مقطع عرضی کاملاً پیچیده با سیلاب‌دشت‌های غیرمنشوری می‌باشند (Tominaga and Nezu, 1991). سیلاب‌دشت‌ها همواره به دلایل

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی کبودراهنگ، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: Msh.Shokri@gmail.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.2.3.5

(Tominaga and Nezu, 1991, ۱۳۹۲).

برای محاسبه‌ی سرعت و تنش برشی در کف و جداره‌های کانال‌ها، روش‌های مختلفی ارائه شده است. برخی از این روش‌ها، روش‌های مستقیم و عملی و برخی مبتنی بر محاسبات ریاضی است. اگر چه کیفیت اجرای این روش‌ها مدت زیادی است که شناخته شده است، به علت زمان‌بر بودن و پیچیدگی و حجم بالای محاسبات در سنوات گذشته مورد توجه کم‌تری قرار گرفته بودند، ولی در سال‌های اخیر با ورود رایانه و پردازش‌گرهای الکترونیکی، استفاده از این روش‌ها با اقبال زیادی مواجه شده است. از مزایای استفاده از رایانه در تحلیل پارامترهای هیدرولیکی جریان، کاهش هزینه‌های جانبی و امکان بررسی جامع‌تر و سهولت تغییر پارامترهای هندسی و فیزیکی نسبت به روش‌های عملی می‌باشد (ظہیری، ۱۳۸۹). تاکنون مشخصات مختلفی از مقاطع مرکب چه به صورت مدل‌های عددی و چه آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است اما مطالعه در مورد تغییر زاویه واگرایی سیلاب‌دشت‌ها به صورت مدل عددی و فیزیکی، زیاد صورت نگرفته است. از آنجایی که این پارامتر می‌تواند بر جریان اثرگذار باشد، ضرورت بررسی این پارامتر مشخص می‌گردد. از جمله تحقیقاتی که در سال‌های اخیر صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

داس و خاتوا، محاسبات پروفیل سطح آب برای کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی را انجام و یک مدل رگرسیون چند متغیره (MRM) برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب توسعه دادند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که برای زوایای واگرایی متفاوت، مقادیر پروفیل سطح آب با افزایش عمق نسبی افزایش می‌یابد. همچنین تجزیه و تحلیل نتایج مدل پیشنهادی نشان‌دهنده توانایی بالای مدل در پیش‌بینی پروفیل سطح آب بود (Das and Khatua, 2018a). داس و خاتوا در تحقیقی دیگر بررسی مقاومت جریان در کانال‌های مرکب غیرمنشوری واگرا و همگرا را در اعماق نسبی جریان انجام دادند. آن‌ها تأثیر ضریب مانینگ n ، ضریب اصطکاک داری و سیب‌خ F و ضریب شزی C را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که این مدل با ارائه خطای کم‌تر، نتایج رضایت‌بخشی را در مقایسه با سایر روش‌های مختلف کانال‌های آزمایشگاهی و داده‌های میدانی به دست می‌دهد (Das and Khatua, 2018b). نیک و همکاران، مدل‌سازی عددی جریان در کانال مرکب همگرا با زاویه همگرایی‌های 5° و 9° و $12/38^\circ$ ، به وسیله مدل آشفستگی K-E را انجام دادند. آن‌ها با مقایسه نتایج مدل‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی دریافتند که پیش‌بینی‌های انجام‌شده توسط مدل عددی در خصوص سرعت میانگین عمقی تطابق قابل قبولی با

داده‌های آزمایشگاهی داشته است (Naik et al., 2017).

سخت‌رندی، اثرات سیلاب بر کانال غیرمنشوری واگرا و سیلاب‌دشت‌هایش را انجام داد. نتایج تحقیق نشان داد که در هر سه بخش، سرعت متوسط عمقی برای نتایج عددی و آزمایشگاهی تقریباً مشابه است و مدل K-E در پیش‌بینی جریان در کانال مرکب با سیلاب‌دشت واگرا عملکرد خوبی داشته است؛ اما یک روش ایده آل ۱۰۰ درصد نیست (Sekhar Reddy, 2016). کومار و همکاران، مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا و همگرا را مقایسه کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که حداکثر سرعت در طول کانال زمانی که سیلاب‌دشت‌ها همگرا می‌شوند افزایش می‌یابد و برای کانال واگرا برعکس؛ سرعت در نیمه دوم همگرایی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (Kumar et al., 2016). دوی و همکاران، جریان در کانال مرکب به‌صورت آزمایشگاهی و عددی را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که با افزایش اختلاف بین زبری سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی، سرعت میانگین عمقی در کانال اصلی افزایش و سرعت میانگین عمقی در سیلاب‌دشت‌ها کاهش می‌یابد (Devi et al., 2016). موهاتا و همکاران، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، جریان در کانال‌های مرکب منشوری و غیرمنشوری با سیلاب‌دشت‌های همگرا را شبیه‌سازی نمودند و دریافتند که به‌کارگیری مدل آشفستگی (LES) قابلیت خوبی در پیش‌بینی توزیع سرعت متوسط عمقی در مقاطع مرکب منشوری و غیرمنشوری را دارد (Mohanata et al., 2014).

یونسی و همکاران، تأثیر همزمان واگرایی و زبری سیلاب‌دشت را بررسی نمودند. نتایج تحقیق 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. افزایش زبری موجب افزایش گرادیان تنش برشی در محل اتصال کانال اصلی و سیلاب‌دشت می‌گردد. همچنین با افزایش زبری سطح سیلاب‌دشت‌ها از دقت هر دو مدل کاسته می‌شود (Younesi et al., 2013). پاترا و همکاران، اثر تغییرات زبری سیلاب‌دشت و کانال اصلی با عمق نسبی متغیر را بر توزیع تنش برشی مرزی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که درصد نیروی برش سیلاب‌دشت با افزایش عمق نسبی افزایش می‌یابد، اما این افزایش برای کانال‌های زبرتر کم‌تر است (Patra et al., 2012).

پروست و همکاران، نیمرخ‌های سطح آب را برای آزمایش‌های بوسمار در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های همگرا و واگرا با استفاده از روش ISM محاسبه نموده‌اند (Proust et al., 2010). خاتوا و پاترا، نحوه انتقال مومنتوم بین سیلاب‌دشت‌ها و کانال اصلی را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنان نشان داد که مقدار تنش برشی در

1- Manning

2- DarcyWeisbach

3- Chezy

آزمایش‌ها در یک کانال بتنی با مقطع مرکب مستطیلی متقارن توسط یونسی (۱۳۹۲) اجرا شده است. طول کانال در حدود ۱۵ و عرض کل آن ۱/۲ متر با شیب طولی ۰/۰۰۸۸ است. عمق کانال اصلی تا لبه سیلاب‌دشت برابر ۰/۱۸ متر و عرض کانال اصلی و هر یک از سیلاب‌دشت‌ها برابر ۰/۴ متر است (شکل ۱). برای زبر کردن بستر و دیواره‌های کانال اصلی، از رسوباتی با قطر متوسط ۰/۶۵ میلی‌متر استفاده و در هر مرحله دیواره و بستر سیلاب‌دشت‌ها با رسوبات دارای قطر متوسط ۰/۶۵، ۱/۳ و ۱/۷۸ میلی‌متر زبر شده است. در بالادست کانال یک سرریز مثلثی برای اندازه‌گیری دبی جریان تعبیه و در انتهای کانال نیز برای تثبیت و تنظیم عمق جریان، از یک دریچه پروانه‌ای استفاده شده است. بعد از تعریف عمق نسبی به صورت $D_r = \frac{H-h}{H}$ (که در آن: h عمق جریان در سیلاب‌دشت (mm)، H عمق جریان در کانال اصلی (mm) و D_r معرف عمق نسبی (-))، به منظور اندازه‌گیری سرعت جریان در آزمایش‌های با عمق نسبی ۰/۱۵ و ۰/۲۵ از یک میکرومولینه با قطر ۱۴ میلی‌متر و در آزمایش‌های با عمق نسبی ۰/۳۵ از یک دستگاه سرعت‌سنج سه‌بعدی (ADV) استفاده شده است. تراز سطح آب نیز با عمق‌سنج‌هایی با دقت ۰/۵ میلی‌متر برداشت شده است. اندازه‌گیری‌های سرعت در سه مقطع ابتدا ($Z=6$ m)، وسط ($Z=7, 8, 9$ m) و انتهای محدوده واگرایی ($Z=8, 10, 12$ m) فقط برای یک نیمه از کانال اصلی و کل عرض سیلاب‌دشت چپ انجام شده است. لازم به ذکر است منظور از Z فاصله از ابتدای کانال است (یونسی، ۱۳۹۲).

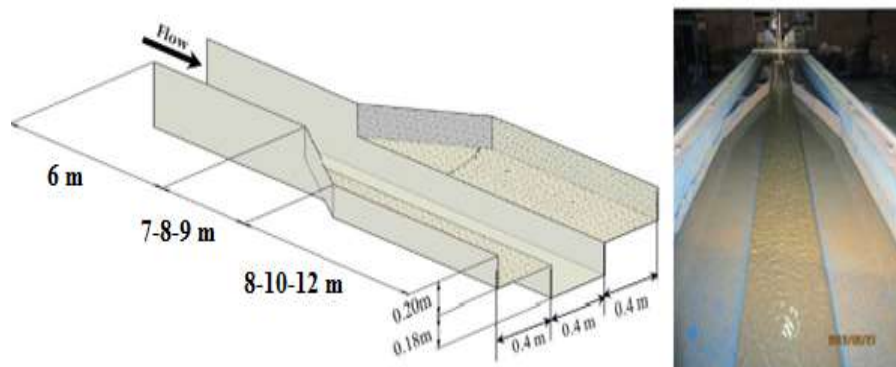
سیلاب‌دشت‌ها با افزایش عمق جریان در کانال مرکب، افزایش می‌یابد (Khatua and Patra, 2007).

بوسمار و همکاران، جریان در کانال‌های مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که در طول قسمت بازشدگی، به دلیل کاهش شتاب جریان، عمق جریان افزایش می‌یابد. همچنین هرگاه زاویه بازشدگی مقطع کانال افزایش یابد، شیب سطح آب کانال اصلی با شیب بستر کانال مساوی می‌شود، ولی شیب سطح آب در سیلاب‌دشت‌ها کمتر از شیب بستر کانال است (Bousmar et al., 2006). بوسمار، جریان در کانال مرکب منشوری و غیرمنشوری با سیلاب‌دشت همگرا را بررسی نمود. نتایج تحقیق وی نشان داد که مولفه طولی سرعت در کانال اصلی در نزدیکی مرز تماس با سیلاب‌دشت‌ها، اندکی کاهش می‌یابد. همچنین سرعت میانگین عمقی به سمت مرکز کانال افزایش می‌یابد (Bousmar, 2002).

با استناد به مرور منابع می‌توان نتیجه گرفت که مطالعات اندکی روی تاثیر زاویه واگرایی سیلاب‌دشت‌های مقاطع مرکب غیرمنشوری صورت گرفته است؛ بنابراین هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر تغییر زاویه واگرایی سیلاب‌دشت‌ها بر توزیع عرضی سرعت در مقطع عرضی کانال مرکب با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار انسیس فلوئنت و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی موجود می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مشخصات کانال آزمایشگاهی



شکل ۱- نمای کلی کانال مرکب غیرمنشوری

معادلات حاکم

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{U_i' U_j'}) = \rho \frac{\partial (U_i U_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

برای در نظر گرفتن اثرات مربوط به آشفتگی روی مولفه‌های

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت است. این معادلات برای جریان آشفتنه ماندگار و سیال تراکم‌ناپذیر به صورت تانسوری زیر نوشته می‌شوند:

شرایط مرزی

یکی از نکات مهم و اساسی در مدل سازی سازه های هیدرولیکی، تعیین مناسب و دقیق شرایط مرزی است. تعریف درست هندسه و شرایط مرزی مدل در CFD، تأثیر به سزایی در همگرایی حل مسئله دارد. شرایط مرزی در این پژوهش شامل ورودی، خروجی، دیواره ها و کفها می باشد. برای جریان در کانال مورد بررسی از مرز ورودی نرخ جرمی جریان^۲، مرز خروجی به صورت خروجی فشار^۳، مرزهای جامد به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری^۴ و مرز بالایی کانال به صورت دیوار بدون لغزش و بدون زبری تعریف شده اند. در این پژوهش جریان به صورت دائمی مدل سازی شده است. دبی ورودی آب، ۱۸ لیتر بر ثانیه می باشد. همچنین کوپلینگ معادلات سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم couplde انجام شده است.

استقلال از شبکه^۵

در انجام مدل سازی ها در CFD، برای رسیدن به جواب با دقت بیش تر، فرآیند استقلال از شبکه اعمال می شود. استقلال از شبکه، به بیان ساده عبارت است از بررسی تعداد المان های شبکه دامنه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این شبکه. به این منظور برای دامنه حل با تعداد شبکه های مختلف، حل عددی صورت می گیرد. این فرآیند تا مرحله ای ادامه پیدا می کند که با ریزتر کردن ابعاد شبکه تغییر چشم گیری در نتایج حاصل نشود. در این پژوهش، برای انجام مرحله استقلال از شبکه در مدل سازی از سه اندازه متفاوت شبکه استفاده شده است. مشخصات شبکه بندی ها در جدول (۱) قابل مشاهده است. برای انجام فاز استقلال از شبکه، نرخ رشد تعداد المان ها ۱/۲ در نظر گرفته شده است. در فصول مشترک در بخش های شبکه بندی شده، برای جلوگیری از پرش شبکه در نزدیکی مرزها و ایجاد نقاط بدون المان شبکه تعداد المان ها به صلاح دید کاربر، به تعداد یک یا دو عدد کاهش و یا افزایش داشته است. در شکل (۳) نمودار استقلال از شبکه نشان داده شده است.

جدول ۱- جزئیات شبکه بندی های اعمال شده

| تعداد المان ها | سایز مش بندی |
|----------------|--------------|
| ۶۱۹۵۰ | درشت |
| ۱۲۴۲۰۰ | متوسط |
| ۲۵۴۴۰۰ | ریز |

سرعت و فشار، جریان به صورت مجموع مولفه های متوسط و نوسانی جای گذاری شده اند.

$$u_i = U_i + u_i' \quad (۳)$$

$$p = P + p' \quad (۴)$$

در این معادلات U_i مولفه سرعت متوسط (m/s)، P فشار متوسط (Pa)، μ لزجت دینامیکی سیال (Pa.s)، ρ جرم مخصوص سیال (Kg/m^3)، $-\rho \overline{U_i' U_j'}$ تنش های رینولدز است و با استفاده از مدل آشفتگی، لزجت گردابه ای بوسینیسک به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$-\rho \overline{U_i' U_j'} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \rho K \delta_{ij} \quad (۵)$$

در معادله فوق نیز μ_t لزجت آشفتگی (Pa.s)، K انرژی جنبشی آشفتگی (Jole) و δ_{ij} دلتای کرونکر می باشد (Filonovich et al., 2010) و (Hirt and Nichols, 1981).

مدل سازی عددی

نرم افزار فلونت، قابلیت انجام محاسبات با دقت معمولی و دقت مضاعف را دارد و کاربر می تواند هر کدام را طبق نیاز خود انتخاب کند. این نرم افزار بر پایه ی روش حجم محدود بنا شده که یک روش بسیار قوی و مناسب در روش های دینامیک سیالات محاسباتی است. قابلیت های فراوانی نظیر مدل سازی جریان های دائم و غیر دائم، جریان لزج و غیر لزج، احتراق، جریان معشوش، حرکت ذرات جامد و قطرات مایع در یک فاز پیوسته و ده ها قابلیت دیگر، فلونت را به یک نرم افزار بسیار قوی و مشهور تبدیل کرده است (Bakker et al., 1989).

شبکه بندی مدل

یکی از نکات با اهمیت در شبیه سازی عددی، شبکه بندی مناسب میدان جریان است. با توجه به رفتار خاص جریان در محل اتصال کانال اصلی به سیلاب دشت، به منظور افزایش دقت در نتایج حاصل، باید از شبکه بندی ریزتری استفاده گردد. شبکه بندی کانال مرکب مورد بررسی، به صورت المان های با قاعده^۱ انجام گرفته است و دارای مقیاس آریبی صفر می باشد. در شبکه بندی مورد نظر، ضریب شکل المان ها در محدوده مجاز یعنی کوچک تر از ۵۰ اعمال شده است. شمای کلی شبکه بندی کانال در شکل (۲) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، سایز المان های شبکه با نزدیک شدن به مرزهای جریان موجود بین کانال اصلی و سیلاب-دشت ها و همچنین با نزدیک شدن به دیواره ها کمتر می شود.

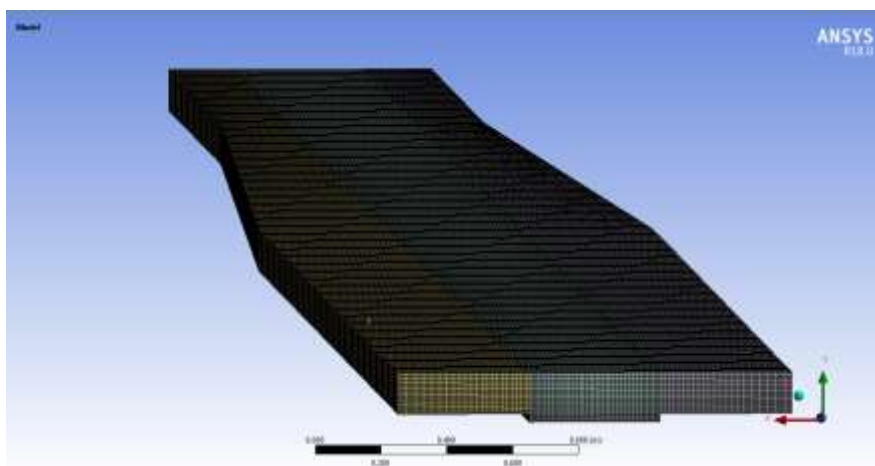
2 Mass Flow Rate

3 Pressure Outlet

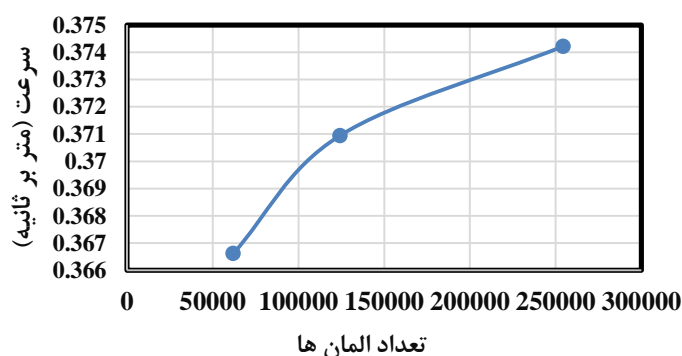
4 Smooth wall

5 Mesh Independency

1- Structure Mesh



شکل ۲- شمای کلی شبکه بندی کانال



شکل ۳- نمودار استقلال از شبکه

مشخصات مواد

همان گونه که ذکر شد مدل طراحی شده از نوع دو فازي بوده و لازم است که در مشخصات فیزیکی فازهای هوا و آب مشخص و تعریف گردند. با توجه به مشخصات فیزیکی آب مایع، چگالی آن را $998/2$ کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته آن را معادل 0.001003 کیلوگرم بر متر ثانیه در نظر گرفته شده است. چگالی هوا نیز $1/225$ کیلوگرم بر متر مکعب و ویسکوزیته آن معادل 1.789×10^{-4} کیلوگرم بر متر ثانیه در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات فیزیکی مربوطه نیز بر اساس مقادیر استاندارد پیش فرض اطلاعات کتابخانه فلوئنت استفاده شده است.

بحث و نتایج

صحت سنجی مدل

برای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی در هر مسئله نخست باید نتایج آن را با نتایج مدل فیزیکی، ارزیابی و پس از صحت سنجی و انطباق قابل قبول نتایج با بررسی های آزمایشگاهی به آن استناد

مدل آشفتگی و مدل حل مسئله

مناسب ترین مدل برای تحلیل جریان در کانال های باز، مدل حجم سیال (VOF) می باشد. در این مدل، سطح آب برای تغییرات آنی، آزادی داشته و این تغییرات به عنوان بخشی از حل عددی جریان برای شبیه سازی جریان آب مورد توجه قرار می گیرد. برای انتخاب این مدل با توجه به دو فاز بودن مسئله و وجود فاز هوا و آب در کنار هم می توان در قسمت مدل چند فازي گزینه (VOF) را انتخاب نمود. در این پژوهش، مدل سازی به صورت دو فازي با استفاده از روش (VOF) انجام شده است که فاز اولیه هوا و فاز ثانویه آب می باشد. با توجه به این که جریان های ثانویه القاشده توسط آشفتگی هستند، انتخاب نوع مدل آشفتگی به طوری که بتواند در مدل سازی سلول های جریان ثانویه مؤثر باشد، از مهم ترین مراحل مدل سازی عددی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب غیرمنشوری است. در این پژوهش از مدل آشفتگی Standard k-ε استفاده شده است.

واگرایی سیلاب‌دشت‌ها روی هیدرولیک جریان در مقاطع مرکب است. در ادامه، تأثیر زاویه واگرایی روی تنش برشی مرزی و سرعت میانگین بررسی می‌شود.

توزیع تنش برشی در کف کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها

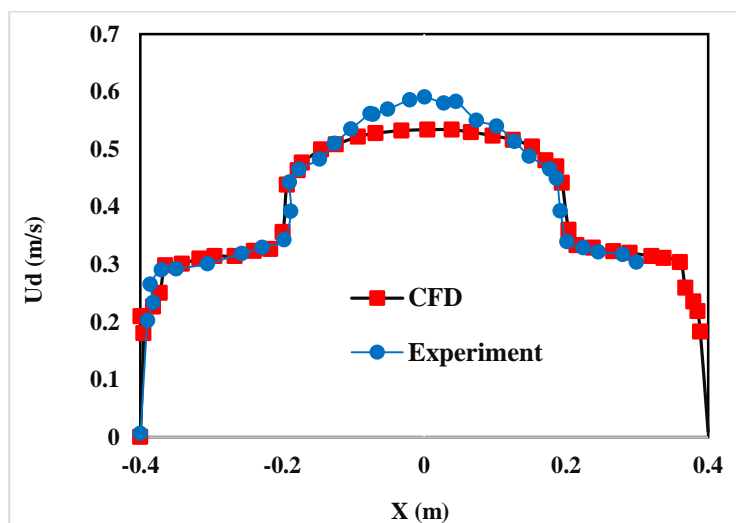
یکی از پارامترهای مهم در کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های واگرا، تنش برشی می‌باشد. تنش برشی مرزی در کانال‌ها اغلب در آنالیز سیستم‌های رودخانه صرف‌نظر می‌شود، اما توزیع تنش برشی مرزی به دلیل این‌که در واسنجی مدل‌های پیشرفته، در مطالعه تعادل نیروها و نیز در محاسبات مربوط به انتقال رسوب کاربرد دارد، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. تنش برشی می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین محل سلول جریان ثانویه و نیز محل فرسایش و رسوب‌گذاری در کانال‌های طبیعی به کار رود.

با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ استاندارد، تنش برشی مرزی در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها برای زوایای واگرایی ۳، ۹، ۱۲ و ۱۵ درجه محاسبه شده است. بر همین اساس در ادامه در شکل‌های (۵) تا (۷) نمودارهای توزیع تنش برشی بر روی دیواره در $Z=8$ $Z=14$ m و m ، $Z=2$ ارائه شده است. مطابق با تصاویر ارائه شده، ملاحظه می‌شود که حداکثر تنش برشی در کانال با زاویه واگرایی سه درجه صورت گرفته و کم‌ترین تنش برشی در زاویه واگرایی ۱۵ درجه می‌باشد. بر همین اساس چنین نتیجه می‌شود که کانال بهینه از نظر تنش برشی در مطالعه حاضر، کانال با زاویه واگرایی ۱۵ درجه می‌باشد.

کرد. در پژوهش حاضر، صحت‌سنجی مدل عددی توزیع سرعت متوسط و تنش برشی صورت گرفته است. در ادامه، نتایج صحت‌سنجی پروفیل سرعت شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار انسیس فلوئنت و نتایج آزمایشگاهی یونسی (۱۳۹۲) ارائه شده است. در شکل (۴)، نتیجه حاصل از پروفیل سرعت در مکان $Z=14$ m و در جدول (۲) مقادیر سرعت آزمایشگاهی و عددی و خطاهای مربوطه ارائه شده است. در شکل (۴)، محور افقی بیان‌گر فاصله از ابتدای کانال بر حسب متر و محور قائم بیان‌گر سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف مطالعه عددی و تجربی بسیار کم است و در اکثر نقاط به صفر می‌رسد. از جدول (۲) چنین برداشت می‌شود که میانگین اختلاف خطای سرعت‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده در این پژوهش ۳/۹۶ درصد و حداکثر اختلاف خطا ۹ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که در حل عددی، مقدار ۱۵ درصد خطایی میانگین مجاز می‌باشد که در پژوهش حاضر، میانگین خطا ۳/۹۶ درصد است. از آنجایی که در شبیه‌سازی‌های عددی، میانگین مجاز درصد خطا، ۱۵ درصد می‌باشد و در این پژوهش میزان خطا ۳/۹۶ درصد به دست آمد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج از تطابق قابل قبولی برخوردارند و مدل عددی انسیس فلوئنت با مدل آشفتگی $k-\epsilon$ Standard توانایی خوبی در شبیه‌سازی جریان در کانال‌های مرکب واگرا دارد.

بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

پیش‌تر نیز اشاره شد که هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر زاویه



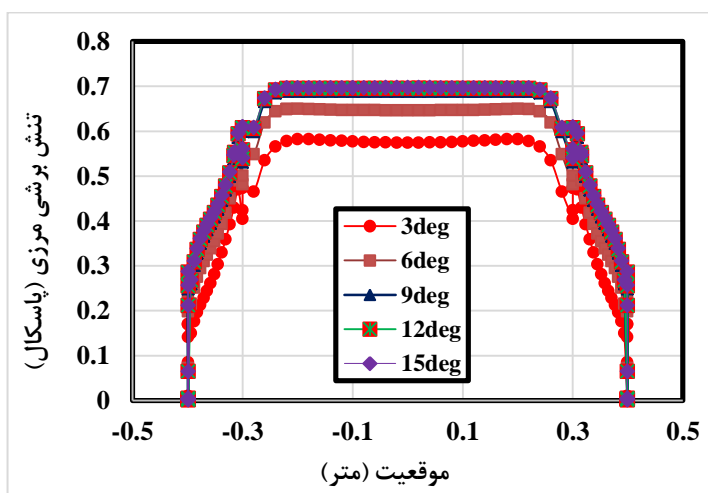
شکل ۴- مقایسه سرعت‌های به دست آمده از حل عددی با آزمایشگاهی در فاصله $Z=14$ m از ابتدای کانال

جدول ۲- مقادیر سرعت آزمایشگاهی و عددی در فاصله Z=14 m از ابتدای کانال

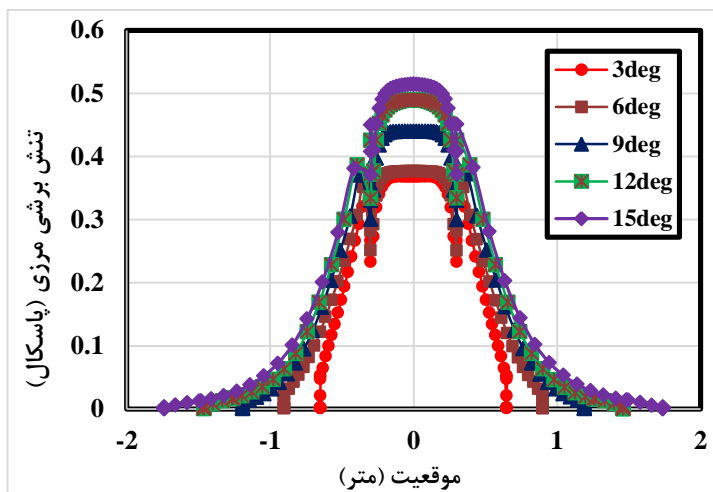
| RMSE% | آزمایشگاهی (m/s) | عددی (m/s) | موقعیت در عرض کانال (m) |
|----------|------------------|------------|-------------------------|
| ۱/۹۲۳۲۹۳ | -۱/۱۹۶۲۲۶ | ۰/۲ | -۰/۴ |
| ۲/۴۹۹۹۴ | -۳/۰۱۸۸۷ | ۰/۳۹۴۳۴ | -۰/۳۶ |
| ۱/۲۶۵۹۶۳ | -۲/۹۸۱۱۳ | ۰/۳۰۱۸۸۷ | -۰/۳۴ |
| ۰/۶۰۶۱۳ | -۳/۱۱۳۲۱ | ۰/۳۰۹۴۳۴ | -۰/۳ |
| ۱/۷۷۵۰۳ | -۳/۱۸۸۶۸ | -۳/۱۳۲۰۸ | -۰/۲۶ |
| ۳/۴۶۸۲۸ | -۳/۳۶۴۱۵ | -۳/۱۵۰۹۴ | -۰/۲۵ |
| ۷/۱۴۲۷۷ | -۳/۴۳۳۹۶ | -۲/۱۸۸۶۸ | -۰/۲ |
| ۴/۱۳۲۲۵ | -۴/۵۶۶۰۴ | -۴/۳۷۷۳۶ | -۰/۱۹ |
| ۲/۷۸۸۹۴ | -۴/۷۳۵۸۵ | -۴/۶۰۳۷۷ | -۰/۱۸ |
| ۰/۳۹۲۲ | -۴/۸۱۱۳۲ | -۴/۷۹۲۳۴۵ | -۰/۱۶ |
| ۲/۵۱۲۱۶ | -۵/۱۱۳۲۱ | -۴/۹۶۲۳۶ | -۰/۱۴ |
| ۴/۹۴۶۹۸ | -۵/۳۳۹۶۲ | -۵۰۷۵۴۷ | -۰/۱۱ |
| ۷/۰۹۴۶۵ | -۵۵۸۴۹۱ | -۵۱۸۸۶۸ | -۰/۰۹ |
| ۶/۶۸۸۸۹۹ | -۵۶۴۱۵۱ | -۵۲۶۴۱۵ | -۰/۰۵ |
| ۹/۰۶۱۴۵ | -۵۸۳۰۱۹ | -۵۳۰۱۸۹ | -۰/۰۳ |
| ۹/۳۲۴۷۷ | 0/۵۸۶۷۹۲ | -۵۳۲۰۷۵ | -۰/۰۲ |
| ۸/۷۶۶۱۷ | -۵۸۱۱۳۲ | -۵۳۰۱۸۹ | ۰/۰۵ |
| ۵/۴۶۰۶۳ | -۵۵۲۸۳ | -۵۲۲۶۲۴ | ۰/۰۸ |
| ۴/۵۴۵۵۸ | -۵۳۹۶۲۳ | -۵۱۵۰۹۴ | ۰/۱۱ |
| ۳/۲۸۴۶۵ | -۵۱۶۹۸۱ | ۰/۵ | ۰/۱۳ |
| ۱/۹۳۰۵۱ | -۴۸۸۶۷۹ | -۴۷۹۲۳۴۵ | ۰/۱۶ |
| ۲/۷۸۸۹۴ | -۴۷۳۵۸۵ | -۴۶۰۳۷۷ | ۰/۱۷ |
| ۲/۳۳۳۲۶ | -۴۵۲۸۳ | -۴۳۷۷۳۶ | -۰/۲ |
| ۱/۶۹۴۸ | -۳۳۳۹۶۲ | -۳۲۸۳۰۲ | ۰/۲۱ |
| ۷/۹۷۸۷۵ | -۳۵۴۷۱۷ | -۳۳۶۴۱۵ | ۰/۲۲ |
| ۱/۷۳۳۹۹ | -۳۳۶۴۱۵ | -۳۲۰۷۵۵ | ۰/۲۳ |
| . | -۳۱۸۶۰۸ | -۳۱۸۸۶۸ | ۰/۲۵ |
| ۱/۸۱۸۰۵۹ | -۳۱۱۳۲۱ | -۳۱۶۹۸۱ | ۰/۲۷ |
| ۵/۷۳۲۷۸۵ | -۲۹۶۲۳۶ | -۳۱۳۲۰ | ۰/۳ |
| ۴/۴۵۸۷۵۸ | -۲۹۶۲۳۶ | -۳۰۹۴۳۴ | ۰/۳۲ |
| ۵/۹۶۰۲۱۱ | -۲۸۴۹۰۶ | -۳۰۱۸۸۷ | ۰/۳۶ |
| ۷/۴۶۲۷۲ | -۲۹۶۲۳۶ | -۳۰۹۴۳۴ | ۰/۳۸ |
| ۱/۷۸۵۴۳۵ | -۲۱۱۳۲۱ | -۲۱۵۰۹۴ | ۰/۳۹ |
| . | . | . | ۰/۴ |

میانگین خطا

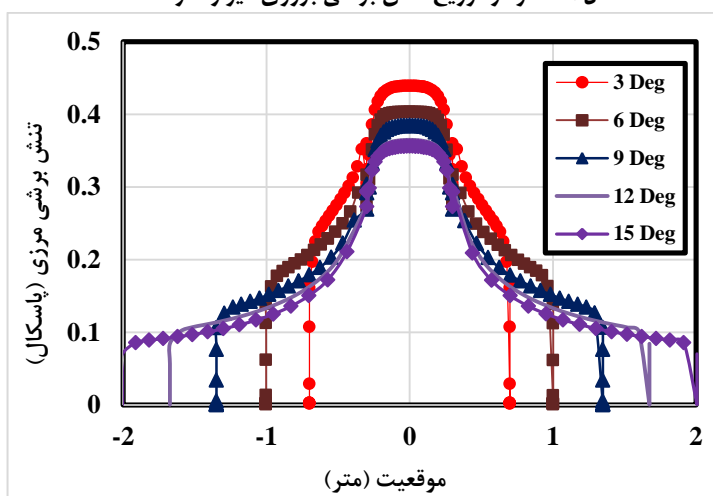
۳/۹۶ درصد



شکل ۵- نمودار توزیع تنش برشی بر روی دیواره در z=2 m



شکل ۶- نمودار توزیع تنش برشی بر روی دیواره در $z=8\text{ m}$



شکل ۷- نمودار توزیع تنش برشی بر روی دیواره در $z=14\text{ m}$

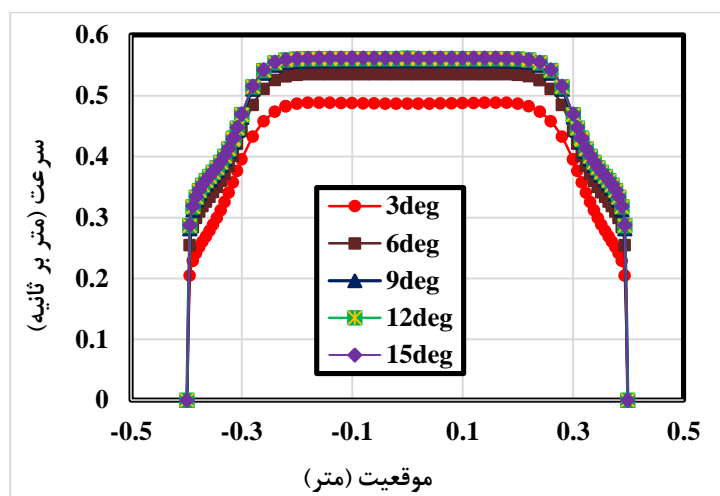
سرعت میانگین

برای بررسی دقت پیش بینی سرعت میانگین بر روی خطهایی در کانال های با زوایای واگرایی مختلف (۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵)، نتایج به صورت نموداری در شکل های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است. همان طور که در شکل ها ملاحظه می شود؛ بیشترین سرعت در کانال با زاویه واگرایی سه درجه اتفاق می افتد و هر چه زاویه واگرایی بیشتر شود سرعت کم تر می شود. بنابراین کانال با زاویه واگرایی ۱۵ درجه کمترین سرعت را دارد. با توجه به نمودارها مشاهده می شود که سرعت در نزدیکی دیواره صفر است و با دور شدن از دیواره سرعت بیش تر می شود و در مرکز کانال سرعت به حداکثر می رسد و این سرعت حداکثر با زیاد شدن زاویه واگرایی کم می شود.

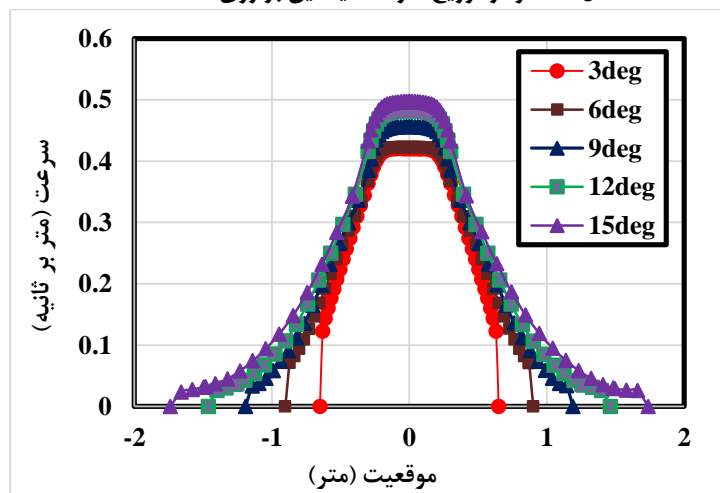
نتیجه گیری

نتایج بررسی هیدرولیک جریان در یک مقطع مرکب با

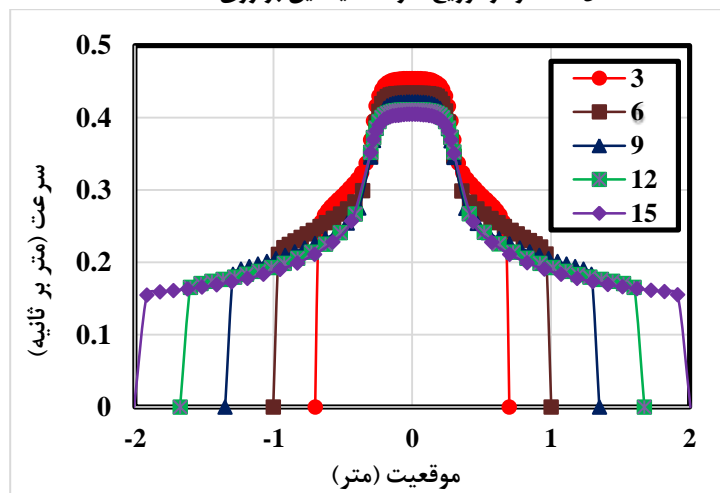
سیلاب دشت های واگرا با زوایای واگرایی متفاوت با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی انسیس فلونت نشان می دهد که مدل آشفتگی k-ε استاندارد، دارای دقت بسیار بالایی پیش بینی داده ها می باشد و مناسب برای شبیه سازی عددی جریان در کانال های مرکب است و توانایی مدل سازی جریان در کانال مرکب واگرا با دقت زیاد را دارد. بررسی اثر تغییر زاویه واگرایی بر پارامترهای سرعت و تنش برشی نشان می دهد که بیشترین سرعت در کانال با زاویه واگرایی سه درجه اتفاق می افتد و هر چه زاویه واگرایی بیشتر شود، سرعت کم تر می شود. بنابراین کانال با زاویه واگرایی ۱۵ درجه کمترین سرعت را دارد. همچنین حداکثر تنش برشی در کانال با زاویه واگرایی سه درجه صورت گرفته و کمترین تنش برشی در زاویه واگرایی ۱۵ درجه می باشد. بنابراین می توان گفت که کانال بهینه از نظر تنش برشی در مطالعه حاضر، کانال با زاویه واگرایی ۱۵ درجه می باشد.



شکل ۸- نمودار توزیع سرعت میانگین بر روی خط $z=2$ m



شکل ۹- نمودار توزیع سرعت میانگین بر روی خط $z=8$ m



شکل ۱۰- نمودار توزیع سرعت میانگین بر روی خط $z=14$ m

منابع

- closure models. In Proceedings 1st European IAHR Congress, Edinburgh. 4-6.
- Hirt. C.W. and Nichols. B.D. 1981. Volume of fluid VOF Method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.* Launder, B. E., and Spalding, D. B. Lectures in mathematical models of turbulence, Academic, London. 39: 201-225.
- Kumar, A., Kumar Singh, P. and Kumar Khatua, K. 2016. Comparison of 2D and 3D Modeling of Converging and Diverging Floodplains. 21st International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (HYDRO 2016 International), Central Water & Power Research Station (CWPRS). Pune, India.
- Khatua, K. K. and Patra, K. Ch. 2007. Boundary Shear Distribution in Meandering Compound Channel Flow Proceedings of the 5th Australian Stream Management Conference.
- Mohanta, A., Patra, K. C. and Khatua, K. K. 2014. CFD Simulation And Two-Phase Modeling Of A Non-Prismatic Converging Compound Channel. *Internatioanl Journal of Enginnering Research and Application*.
- Naik, B., Khatua, K. K., Wright, N. G. and Sleigh, A. 2017. Stage Discharge Prediction for Converging Compound Channels with Narrow Floodplains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE*, 143(8).
- Proust, S., Bousmar, D., Reviere, N., Paquier, A. and Zech, Y. 2010. Energy Losses in Compound Open Channels". *Advances in Water Resources*, Elsevier. 33(1): 1-16.
- Patra, K. C., Mohanty, P. K. and Khatua, K. 2012. Investigation on shear layer in compound channels. National Conference Hydraulic and Water Resources Hydro.
- Seckin, G., Mamak, M., Atabay, S. and Omran, M. 2009. Discharge estimation in compound channels with fixed and mobilebed." *Sadhana*. 34(6): 923-945.
- Reddy, Y. C. S. (2016). Application of K-ε Model to Compound Channels Having Diverging Flood Plains and Analysis of Depth Averaged Velocity Using Ansys (Fluent) (Doctoral dissertation).
- Tominaga, A. and Nezu, I. 1991. Turbulent Structure in Compound Open-channel Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. 117: 21-41.
- Younesi, H., Omid, M. and Ayyoubzadeh, S. 2013. The Hydraulics of Flow in non-prismatic Compound Channels. *Journal of Civil Engineering Urban*. 3(6): 342-356.
- جوادیان، ع. ۱۳۹۵. تحلیل هیدرولیکی توزیع تنش برشی در کانال‌های مرکب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، مرکز تهران شمال.
- سیف، م. و رضایی، ب. ۱۳۹۸. مطالعه عددی اثر زاویه اریب در کانال مرکب با سیلاب‌دشت‌های مورب بر اندرکنش بین جریان در کانال اصلی و سیلاب‌دشت‌ها. نشریه مهندسی عمران فردوس. ۱۳۲(۱): ۱۶۴-۱۵۱.
- نقیبی نیشاپوری، ن. و ساغروانی، م. ۱۳۹۲. بررسی میزان انتقال رسوب در رودخانه‌های با بستر شنی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی عمران و معماری، گروه عمران.
- یونسی، ح. ۱۳۹۲. مطالعه انتقال بار بستر در مجرای اصلی کانال مرکب با سیلاب‌دشت غیرمنشوری. رساله دکتری، دانشگاه تهران، دوره آبیاری و آبادانی.
- ظهیری، ع. ۱۳۸۹. شبیه‌سازی جریان متغیر تدریجی در مقاطع مرکب. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۷(۴): ۱۹۰-۱۸۱.
- Bakker, B., Vermaas, H. and Choudri, A.M. 1989. Regime theories updated or outdated. *Delft Hydraulics*. 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.
- Bousmar, D., Proust, S. and Zech, Y. 2006. Experiments on the Flow in a Enlarging Compound Channel. *Proceeding River Flow*, Lisbon, Portugal. 1: 323-332.
- Das, B. and Khatua, K. 2018a. Water Surface Profiles Computation for Compound Channel having Diverging Floodplains. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 23(2): 336-349.
- Das, B. and Khatua, K. 2018b. Flow Resistance in a Compound Channel with Diverging and Converging Floodplains. *American Society of Civil Engineers*. 144(8): 1-21
- Devi, K., Khatua, K. K. and Das, B. S. 2016. Apparent shear in an asymmetric compound channel. *Iowa City, USA. River Flow*. 48: 147-157.
- Filonovich, M., Azevedo, R., Rojas-Solorzano, L. R. and Leal, J.B. 2010. Simulation of the velocity field in compound channel flow using different

Numerical Modeling of the Effect of Different Angles of Floodplain Divergence on Shear Stress Distribution and Fluid Velocity in Compound Non-Prismatic Channels

M. Shokri^{1*}, R. Mehdipoor²

Received: Jan.10, 2021

Accepted: Mar.01, 2021

Abstract

Compound channels form the cross section of many rivers, especially in adjacent areas of residential and agricultural areas. Investigation of hydraulic behavior of compound channels is of great importance in floodplain control and river management plans. In this study, by modeling a concrete compound channel with Ansys Fluent software using k- ϵ turbulence model and VOF method, shear stress and average flow velocity in compound channel with divergent floodplains were determined for different divergence angles. Also, the boundary conditions for flow in the studied channel are defined as input mass flow rate, output limit as pressure outlet, solid boundaries as non-slip and rough wall and upper channel boundary as non-slip and rough wall. The modeling and comparison between the laboratory data and the results of the present study showed that the maximum velocity in the channel occurs with a divergence angle of 3 degrees and with increasing the divergence angle, the flow velocity also decreases. In addition to, maximum of shear stress in the compound channel occurs with a lower divergence angle; In other words, as the divergence angle of the floodplain increases, the amount of shear stress of the fluid also decreases, and the higher the divergence angle, the lower the velocity. Also, the maximum shear stress in the channel with a divergence angle of three degrees and the minimum shear stress in the divergence angle is 15 degrees.

Keywords: Bed divergence angle, Divergent floodplain, Open compound channel, Shear stress, Turbulent model.

1- Assistant. Professor, Department. of Civil Engineering, Faculty of Kabodarahang Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
2- M.Sc. Student of Water and Hydraulic Structures, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran
(*-Corresponding Author Email: Msh.Shokri@gmail.com)