

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی توزیع تنش برشی بستر در کانال‌های مرکب مستقیم با استفاده از شبیه‌سازی عددی و

مقایسه نتایج Flow-3D و Ansys Fluent

آرمین بوستانی^۱، سعیدرضا خدائشناس^{۲*}، کاظم اسماعیلی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱

چکیده

تمایز اصلی مقاطع مرکب با مقاطع ساده در کانال‌ها به دلیل اختلاف سرعت بین سیلابدشت و کانال اصلی می‌باشد. این تغییر سرعت، در نهایت موجب تغییرات در توزیع تنش برشی بستر کانال می‌گردد. ساختار آشفته‌گی جریان در کانال‌های مرکب به دلیل ترکیب تنش برشی مرزی و تنش رینولدز در نزدیکی فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی، پیچیده است. با توجه به آنکه هیدرولیک جریان در رودخانه‌ها که نوعی کانال مرکب به حساب می‌آیند، تابع شکل آن‌ها می‌باشد و تغییرات شکل کانال تابع تنش برشی وارد بستر است، تعیین توزیع تنش برشی بستر در رودخانه‌ها نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. در این تحقیق، توزیع تنش برشی مرزی در کانال‌های مرکب با ۲ مدل عددی نرم‌افزارهای Flow-3D و Fluent شبیه‌سازی گردیده و با داده‌های آزمایشگاهی واقعی (والینگفورد انگلستان) مقایسه شده‌اند. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج خروجی توزیع تنش برشی در مقطع مرکب بر مبنای روش YLM نیز صورت گرفته است. برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی از ۳ روش تعیین هم‌گرایی (پارامترخطا) با نتایج تجربی استفاده شده است. بررسی نتایج نشان داد که تطابق بسیار خوبی بین نتایج مدل‌های عددی و با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد و در نتیجه هر دو نرم‌افزار می‌توانند توزیع تنش برشی را به نحو مناسبی محاسبه نمایند. در مجموع نتایج عددی نرم‌افزار Fluent در مقایسه با نرم‌افزار Flow 3D به داده‌های آزمایشگاهی نزدیک‌تر بودند.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی، روش YLM، کانال مرکب، Ansys Fluent، Flow-3D

مقدمه

عمق بر ساختار جریان و ویژگی‌های جریان در کانال‌های روباز مرکب برای تحلیل تغییرات تنش رودخانه، طراحی مقطع پایدار رودخانه، و پروژه‌های تنظیم، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (Ding et al., 2021).

یانگ و لیم با استفاده از معادلات دینامیک سیالات محاسباتی تنش‌های برشی مرزی را در مجاری روباز بدست آوردند (Yang and Lim, 2005). یانگ به بررسی سطح برخورد سه مولفه تنش برشی، جریان‌های ثانویه و سرعت در مجاری روباز پرداخت. بدین منظور برای بررسی جریان‌های ثانویه به معادلات رینولدز بین تانژانت جداره کانال (شیب کانال) و جداره کانال برای تخمین تنش برشی مرزی نیز از معادلات رینولدزی و برای توزیع سرعت در کانال نیز از پروفیل استخراج شده سرعت از بستر تا سطح آب استفاده نمود (Yang, 2005). بسیاری از مطالعات قبلی به منظور بررسی هیدرودینامیک جریان‌های کانال باز مرکب با مدل‌سازی فیزیکی و عددی انجام شده است. تومیناگو و نزو، آزمایش‌های فیزیکی را بر روی کانال‌های باز مرکب با نسبت‌های عمقی مختلف (hr = 0.25, 0.50, 0.75) انجام دادند و اطلاعات میدانی جریان دقیق را به دست آوردند. آن‌ها ساختار

ساختار هیدرولیک جریان در کانال‌های مرکب به دلیل ترکیب تنش برشی مرزی و تنش رینولدز در نزدیکی فصل مشترک سیلابدشت و کانال اصلی، بسیار پیچیده است. بسیاری از مطالعات قبلی به منظور بررسی هیدرودینامیک جریان‌های کانال باز مرکب با مدل‌سازی فیزیکی و عددی انجام شده است.

جریان‌های کانال باز مرکب معمولاً در رودخانه‌های طبیعی مشاهده می‌شوند. گرادیان سرعت در فصل مشترک بین کانال اصلی و سیلابدشت باعث تبادل مومنتوم قوی می‌شود که منجر به توزیع مجدد تنش برشی بستر می‌گردد. بنابراین، بررسی تأثیر نسبت‌های

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.2.12.8

پرداخت. در بررسی نتایج مشخص شد که انتخاب روش مناسب جهت برآورد ضریب انتقال جریان و محاسبه توزیع تنش مرزی بین کانال اصلی و سیلابدشت‌ها بسته به شرایط جریان شامل جریان‌های یکنواخت، متغیر تدریجی، و یا غیریکنواخت، متفاوت می‌باشد. ولی در صورت انتخاب روش محاسباتی صحیح برای جریان‌های یکنواخت با اعمال ضرایب اصلاحی می‌توان از این روش منتخب برای سایر جریان‌ها نظیر متغیر تدریجی و غیریکنواخت نیز استفاده کرد. موهانتی و همکاران، به بررسی تغییرات لایه تنش در کانال‌های مرکب پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که عرض لایه تنش به شرایط هندسی و شرایط جریان وابسته می‌باشد و رشد لایه تنش با افزایش نسبت عرض کاهش یافته و با کاهش عمق نسبی افزایش می‌یابد (Mohanty et al., 2011). موهانتی و خاتوا، برای تخمین تنش برشی و توزیع آن در کانال‌های مرکب از مدلی که بر اساس روش عددی و استفاده از معادلات سنت و نان و ناویر-استوکس و همچنین عدد رینولدز معادل شده در معادلات ناویر-استوکس بهره بردند. آن‌ها سطح برخورد (جدایش) کانال اصلی با سیلابدشت‌ها را بصورت خط عمودی فرض کردند (Mohanty and Khatua, 2014). نوتک و چیچا، تنش برشی و فشار حاصل از امواج سطحی با دامنه کوتاه جریان در کانال‌های روباز در رژیم جریان متلاطم را مدل نمودند (Knotek and Jícha, 2014). پراسست و نیکورا، اثرات جریان‌های ثانویه را بر ساختار جریان کانال‌های مرکب با مجرای آزمایشگاهی بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها، سه سلول جریان ثانویه به‌خوبی تثبیت شده در جریان‌های یکنواخت و غیریکنواخت با جریان‌های عرضی به سمت سیلابدشت مشاهده شدند. با جریان‌های عرضی به سمت کانال اصلی، سه سلول با یک سلول بزرگ در کانال اصلی جایگزین شدند (Proust and Nikora, 2020). سینگ و همکاران و همکاران، از مدل $k - \epsilon$ و مدل تنش رینولدز برای شبیه‌سازی جریان‌های کانال باز مرکب با مقادیر hr برابر با ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل تنش رینولدز قادر به ثبت پدیده انتقال تکانه در لبه تقاطع بود، اما مدل ویژگی‌های آشفستگی را در مناطق بستر و دیواره بیش از حد برآورد می‌کرد (Singh et al., 2020). ظهیری و همکاران (۱۴۰۰)، به محاسبه توزیع‌های عرضی سرعت جریان در کانال‌های مرکب مستقیم در دو حالت صاف و زبر پرداختند. در این مطالعه داده‌های منحنی‌های هم سرعت جریان در مقاطع کانال به ازای عمق‌های مختلف جریان و ضرایب زبری دشت‌های سیلابی محاسبه و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردید. شرایط جریان ماندگار و یکنواخت (با صرف نظر کردن از جریان‌های ثانویه) بوده است. بررسی نتایج و مرور تحقیقات محققین در بخش پیشینه پژوهش، در انتخاب روش مناسب مدل آشفستگی جریان و همچنین انتخاب روش موثر در تخمین توزیع تنش برشی نشان داد که؛ بیشتر مدل‌های انتخاب آشفستگی جریان، شبیه-

آشفته سه بعدی کانال‌های باز مرکب را بررسی کردند و دریافته‌اند که جریان‌های ثانویه به‌طور قابل توجهی بر جریان اصلی تأثیر می‌گذارد (Tominaga and Nezu, 1991). نائوت و همکاران، از مدل تنش جبری (N-R) Naot-Rodi برای شبیه‌سازی جریان‌های کانال باز مرکب با نسبت‌های عمقی مختلف استفاده کردند. اگرچه نتایج محاسبات به‌طور کلی با اندازه‌گیری‌ها سازگار بود، اما جزئیات توزیع سرعت شبیه‌سازی شده تا حدودی ناکافی بود. این موضوع به این دلیل است که مدل N-R قادر به تکرار پدیده شیب سرعت نیست (Naot et al., 1993). سوفیالیدیس و پرینس، از مدل غیرخطی $k - \omega$ برای شبیه‌سازی جریان‌های کانال باز مرکب استفاده کردند و گزارش کردند که تعامل بین کانال اصلی و سیلابدشت زمانی که hr کوچک بود آشکارتر بود (Sofialidis and Prinios, 1999). سارمیتو و فالکون، در یک بررسی برای به حداقل رساندن مجموع مربعات خطا بین نسبت‌های بار بستر در داده‌های تئوری با تجربی (آزمایشگاهی) برای محاسبه تنش برشی بستر کانال به این نتیجه رسیدند که عدد رینولدز ذرات بستر که پارامتر مشخصی برای سرعت برشی ذرات بستر می‌باشد، باید برابر با ۰/۱۶ باشد (Sarmiento and Falcon, 2006). خداشناس و همکاران، شش روش تعیین توزیع تنش برشی بستر کانال‌های روباز را با هم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های MPM¹ (Yang and Lim, 2005) YLM و (Khodashenas et al., 1998) نتایج مناسبی برای کانال‌های غیرمنظم ارائه می‌کنند (Khodashenas et al., 2008). عامل صادقی و همکاران (۱۳۸۹)، به محاسبه تغییرات سرعت جریان در کانال‌های مرکب در شرایط خاص پرداختند. آن‌ها با فرض وجود زبری ناشی از آرایش ردیفی گیاهان مقاوم و سخت (در رده‌بندی گیاهان) در ناحیه کانال‌های مجاور و در بستر آن‌ها که در شرایط غوطه‌ور جریان نباشند، به محاسبه سرعت جریان و تغییرات تنش برشی پرداختند. مشخص شد که مومنتوم جریان ورودی جانبی از کانال‌های مجاور به داخل کانال اصلی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های هیدرولیکی دخیل در کانال‌های مرکب بود که سبب شکل‌گیری جریان گردابه‌ای در ورودی کانال اصلی می‌گردد. وجود این گردابه‌ها ممکن است سبب افت انرژی و همچنین افزایش مقاومت جریان گشته که در نهایت موجب کاهش زبری بستر (بستر) خواهد شد. پاتل و همکاران، در محاسبه تنش‌های بحرانی بستر در توزیع رسوبات غیریکنواخت مجاری موفق شدند تا یک نسبت بی‌بعد از تنش بحرانی ذرات بستر وابسته به اندازه ذرات رسوبات و همچنین زاویه اصطکاک داخلی رسوبات ارائه دهند (Patel et al., 2010). گیوه‌چی (۱۳۸۸)، به بررسی تنش برشی در مقاطع مرکب و بررسی توام ضریب انتقال خطی آلودگی در این نوع کانال‌ها

بستر می‌باشد. مشخصات هندسی کانال‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

در سری ۷ در محیط آزمایشگاه برای زبر کردن سیلابدشت‌ها از شبکه میله‌های فلزی استفاده شده است. برای سیلابدشت سری ۷؛ رسوبات بستر معادل $0/8$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ضریب زبری n_s سیلابدشت برابر با $0/017$ گرفته شده است. همچنین برای سری ۷ فاز A، زبری معادل برابر $0/01$ می‌باشد (بر اساس مدل Flow 3D).

فلوئنت (Fluent)

نرم افزار Fluent به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده و یکی از نرم‌افزارهای تجاری دینامیک سیالات محاسباتی در دنیا می‌باشد. در مقایسه با سایر نرم‌افزارهای موجود، این نرم‌افزار دارای مدل‌های آشفتگی متنوع‌تری بوده و از این لحاظ می‌تواند نسبت به سایر نرم‌افزارها دارای برتری باشد. همچنین نرم‌افزار فلوئنت توانایی شبیه‌سازی و تحلیل شبکه‌های منظم و نامنظم برای هندسه‌های پیچیده را دارد. Fluent یک نرم‌افزار حل میدان جریان می‌باشد که به صورت دو بعدی و سه بعدی بر اساس روش حجم محدود میدان جریان را تحلیل می‌نماید.

سازي‌هاي نزديك به واقعي‌ت براي جريان‌هاي ساده در کانال‌های مرکب مستقیم ارائه می‌نماید که به منظور واکاوی و انتخاب روش موثرتر، نیاز به شبیه‌سازی شرایط جریان با مدل‌های عددی و نرم‌افزارهای توسعه‌یافته بر مبنای معادلات انتقال جریان و ناویر-استوکس می‌باشد. با توجه به اهمیت تعیین توزیع تنش برشی در کانال‌های مرکب، در تحقیق حاضر با استفاده از دو نرم‌افزار Fluent و Flow-3D توزیع تنش برشی بستر در این کانال‌ها محاسبه شد و ضمن مقایسه با روش YLM برای تعیین دقت آن‌ها با داده‌های آزمایشگاهی FCF مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

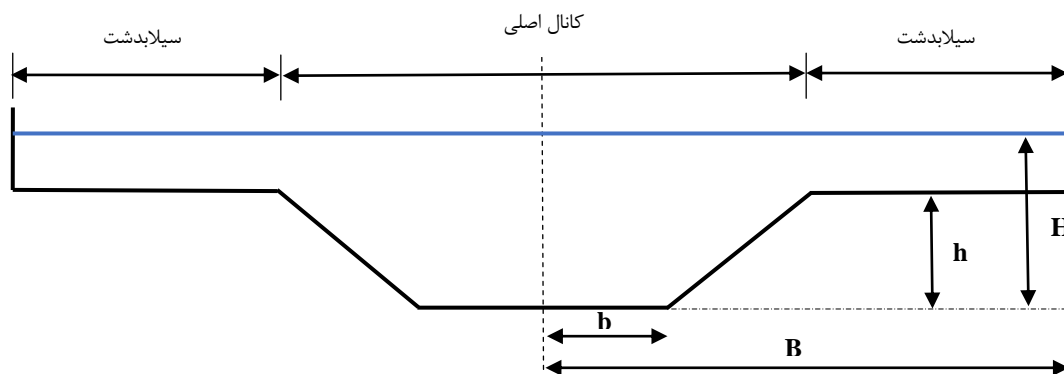
داده‌های آزمایشگاهی (FCF: Flood Channel Facility)

مرکز تحقیقات والینگفورد انگلستان، دارای داده‌های آزمایشگاهی معتبری در زمینه کانال‌های مرکب می‌باشد. در این آزمایشگاه کانالی بزرگ مقیاس با طولی حدود ۵۶ متر و عرض ۱۰ متر مورد آزمایش قرار می‌گیرد که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق از سه سری داده آزمایشگاهی استفاده شده است؛ سری ۲، ۴ و ۷ از فاز A.

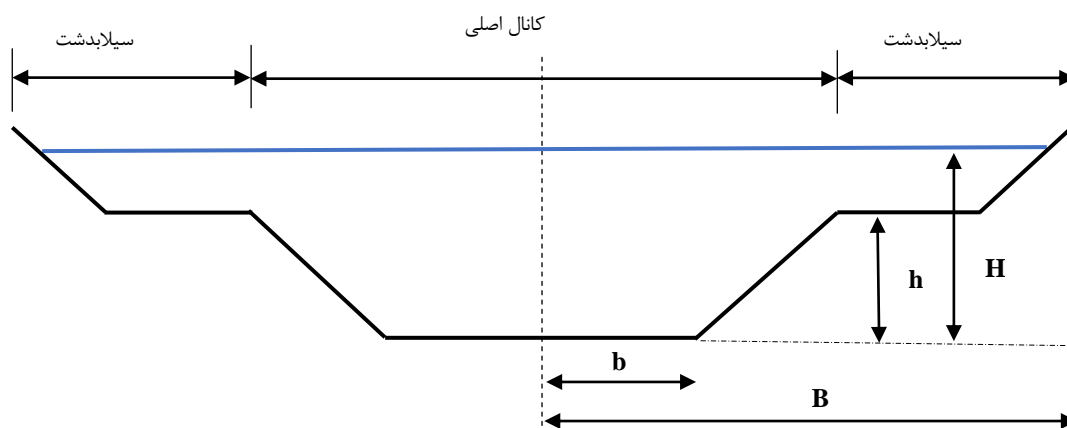
داده‌های سری ۲ و ۷ بر اساس کانال شکل ۲ و داده‌های سری ۴ بر اساس شکل ۳ بدست آمده‌اند. تفاوت سری ۲ و ۷ در میزان زبری



شکل ۱- کانال FCF با زبری همگن و مسیر مستقیم



شکل ۲- مدل فیزیکی و مشخصات هندسی سری ۲ و ۷



شکل ۳- مدل فیزیکی و مشخصات هندسی سری ۴

جدول ۱- جمع‌بندی ویژگی‌های سری‌های نمونه آزمایشگاهی

n	Q _t (m ³ /s)	زبری	Z ₂ شیب جانبی سیلابدشت	Z ₁ شیب جانبی کانال اصلی	h	H	B/h	b	B	نمونه FCF
۰/۰۰۵۴۸۹	۰/۲۱۳۳	صاف	۰	۱	۰/۱۵	۰/۱۵۶	۴/۲۰	۰/۷۵	۳/۱۵	سری ۲
۰/۰۰۹۸۵۷	۰/۲۲۳۷	صاف	۱	۱	۰/۱۵۸	۰/۵	۲/۲۰	۰/۷۵	۱/۶۵	سری ۴
۰/۰۲۳۱۲۳	۰/۲۱۶۰	زبر	۰	۱	۰/۱۵	۰/۱۵۶	۴/۲۰	۰/۷۵	۳/۱۵	سری ۷

مش‌بندی شبکه به صورت تدریجی درشت‌تر شده است. در این مطالعه، از Ansys FLUENT 6.3.26 برای انجام یک سری شبیه‌سازی عددی بر روی تنظیمات مدل‌های آزمایشگاهی فیزیکی ارائه شده در بخش داده‌های آزمایشگاهی مقاله، استفاده شده است. برنامه Fluent قادر به مدل‌سازی آشفتگی مدل $k - \epsilon$ استاندارد از نوع RANS^۱ می‌باشد و دو معادله‌ای محسوب می‌گردد. معادلات RANS سه بعدی در سیستم مختصات دکارتی به صورت زیر بیان می‌شود (Chang et al., 2011):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i u_j'}) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن $i, j = 1, 2, 3$ نشان‌دهنده سه محور مختصات بوده؛ u_1, u_2, u_3 به ترتیب سه مولفه سرعت در امتداد محورهای x, y و z هستند، ρ چگالی سیال، μ ویسکوزیته دینامیکی، p فشار، t زمان و $\rho \overline{u_i u_j'}$ تنش‌های رینولدز می‌باشند.

متأسفانه یک حالت کلی برای مدل کردن همه مسائل آشفتگی وجود ندارد. انتخاب مدل آشفتگی بستگی به ملاحظاتمانند محیط فیزیکی جریان، سطح دقت مورد نیاز، منابع محاسباتی در دسترس و میزان زمان در دسترس برای شبیه‌سازی دارد. در این تحقیق از مدل $k - \epsilon$ استاندارد برای حل معادلات انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ پراکندگی آشفتگی یا اتلاف (ϵ) استفاده شده است؛ که یک مدل

انسیس فلونت مسائل جریان را از طریق روش محدود و با استفاده از شبکه‌های بدون ساختار حل می‌نماید. انواع مش‌های پشتیبانی شده عبارتند از دو بعدی (مثلثی و چهار ضلعی)، سه بعدی (چهار وجهی، شش گوشه، هرمی، گوه‌ای، چندوجهی) و مش مختلط (ترکیبی) می‌باشد. انسیس فلونت، همچنین اجازه اصلاح و یا زمخت کردن مش بر اساس حل جریان را می‌دهد (Abril and Knight, 2004).

نرم‌افزار انسیس فلونت قادر به ساخت هندسه و شبکه‌بندی آن نمی‌باشد و برای این کار باید از یک نرم‌افزار جانبی استفاده نمود. در این تحقیق از نرم‌افزار گمبیت برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی آن استفاده شده است. مزیت مهم دیگری که این نرم‌افزار دارد، منوی Adapt آن می‌باشد که به کاربر اجازه تطبیق و بهبود شبکه مش‌بندی را می‌دهد. همچنین Fluent به کاربر اجازه بهبود شبکه (مثلاً ریز کردن یا درشت کردن شبکه در مرزها و مکان‌های لازم در هندسه) را می‌دهد. این بهینه‌سازی برای حل مدل و شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می‌دهد که نتایج را در ناحیه‌هایی که دارای گرادیان‌های بزرگ (مثل لایه مرزی و ...) باشند دقیق‌تر سازد. این قابلیت‌ها مدت زمانی را که برای تولید یک شبکه خوب احتیاج می‌باشد در مقایسه با حل در شبکه‌های ساختاریافته به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در این تحقیق شبکه‌بندی انجام شده، توسط نرم‌افزار انسیس فلونت در محدوده حساس‌تر ریز می‌شود؛ در ابتدای مقطع ورودی کانال به دلیل شرایط جریان و تغییرات بیشتر در بالادست از مش‌های ریزتری در مدل استفاده شده و در امتداد کانال به سمت پایین دست؛

1: Reynolds Averaged Navier Stokes

جریان‌های سطح آزاد می‌باشد. در تعیین سطح آزاد جریان، روش‌های متفاوتی در نرم‌افزار دیده شده است و در تعیین شکست سد و حرکت موج به کمک این نرم‌افزار مدل‌های زیادی تحلیل شده است.

معادلات موجود در مدل Flow 3D این قابلیت را دارند که به هر دو صورت دکارتی (x, y, z) و استوانه‌ای (r, θ, z) نوشته شوند. فرم استوانه‌ای دارای یک سری عبارات اضافی با ضریبی به نام ξ می‌باشد؛ در نتیجه هنگامی که $\xi = 1$ باشد، هندسه استوانه‌ای و هنگامی که $\xi = 0$ باشد، هندسه دکارتی به دست می‌آید.

برای ارزیابی این نرم‌افزار با به‌کارگیری روش حجم سیال (VOF) در تخمین پارامترهای جریان در سازه‌های ترکیبی، از داده‌های آزمایشگاهی عنوان شده در این تحقیق استفاده شده است؛ به طوری که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل آشفتگی $k - \epsilon$ با آن داده‌ها مقایسه گردیده است.

برای تعیین توزیع تنش برشی در مدل‌های نرم‌افزاری Fluent و Flow 3D در این مقاله، از روش پایه تعیین تنش برشی SKM (Shiono and Knight, 1991) در مدل‌سازی‌ها استفاده شده است. روش SKM یک روش محاسبه تغییرات جانبی ϵ بعدی بر اساس معادلات رینولدز و ناویر-استوکس است که عمق و سرعت متوسط و تنش‌های برشی مرزی را در طول یک مقطع کانال مرکب محاسبه می‌کند.

تعیین تعداد مش‌های مناسب

شکل ۴، شبکه محاسباتی برای نمونه‌های آزمایشگاهی مورد استفاده (سری ۲، سری ۴، و سری ۷) در این مطالعه را نمایش می‌دهد. مش محاسباتی بر اساس مش به‌هم‌چسبیده با یک عنصر شش‌وجهی در محیط نرم‌افزار GAMBIT ساخته شده است. با توجه به تأثیر عمده مش محاسباتی بر دقت نتایج حاصله، طیف گسترده‌ای از تحلیل‌های حساسیت در اندازه‌های مش‌ها (با توجه به زمان محاسباتی اجرای مدل توسط سیستم رایانه‌ای جهت به‌دست آوردن جواب‌ها، و همچنین نزدیکی جواب‌های به‌دست‌آمده به جواب‌های آزمایشگاهی)، به منظور اعتبارسنجی تعداد مناسب مش‌ها انجام شدند. از طریق اجرای مدل‌ها با مش‌های مناسب اصلاح‌شده در شرایط مختلف، اندازه بهینه‌ی مش‌ها برای سه سری مورد بررسی به ترتیب در حدود ۱، ۰/۵ و ۱ سانتی‌متر تعیین گردیدند.

روش (YLM) Yang and Lim (2005)

برای راستی‌آزمایی نتایج خروجی مدل‌های نرم‌افزاری (هر دو مدل بر مبنای روش SKM به محاسبه توزیع تنش برشی بر مقطع کانال‌های مرکب می‌پردازد)، با داده‌های هیدرولیکی و مشخصات هندسی مدل، توزیع تنش برشی توسط روش YLM نیز به دست آمد.

نیمه تجربی و دو معادله‌ای برای شناسایی رفتار جریان در اکثر جریان‌های مستقیم با محاسبات پایدار و هم‌گرا در نتایج بوده و در تحلیل جریان‌های آشفتنه بیشترین کاربرد را در میان دیگر مدل‌ها دارد. انرژی جنبشی آشفتنه، k ، و نرخ اتلاف آن، ϵ ، از معادلات انتقال زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{2\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{cases} \quad (2)$$

که در دسته معادلات (۲)، بیانگر انرژی جنبشی تولید شده به علت گردان‌های سرعت متوسط است، G_b انرژی جنبشی آشفتنه تولید شده به علت خاصیت شناوری می‌باشد؛ $C_{1\epsilon}$ ، $C_{2\epsilon}$ و $C_{3\epsilon}$ مقادیر ثابت هستند، و همچنین σ_k و σ_ϵ به ترتیب اعداد پرانتل آشفتگی برای k و ϵ هستند.

برای طرح گسسته‌سازی فشار^۱، گزینه تداخل فشار^۲ و برای کوپلینگ فشار-سرعت^۳، فشار-ضمنی با تقسیم عملگرها^۴ اعمال شد (Wilcox, 1998). لازم به ذکر است که از طریق تجزیه و تحلیل حساسیت اولیه مشخص شد که مدل دارای نوسانات ناچیز و دقت خوبی در نتایج است. هیرت و نیکولز، روش حجم سیال^۵ را برای ردیابی رابط بین فازها ارائه دادند که با حل یک معادله پیوستگی برای کسر حجمی یک (یا چند) فاز انجام می‌شود (Hirt and Nichols, 1981). هنگام مدل‌سازی سطح آزاد، معادله انتقال برای فاز q -ام حل می‌شود (Chang et al., 2011):

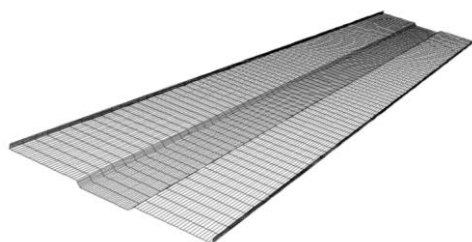
$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (v \cdot \alpha_q) = 0 \quad (3)$$

که در آن، α_q کسر حجمی فاز q -ام است به نحوی که به ازای $\alpha_q = 1$ و $\alpha_q = 0$ سلول از فاز q -ام خالی است، و به ازای $0 < \alpha_q < 1$ سلول حاوی رابط بین فاز q -ام است. در روش مفروض با استفاده از $VOF = 0.5$ یک سطح آزاد تعریف شد.

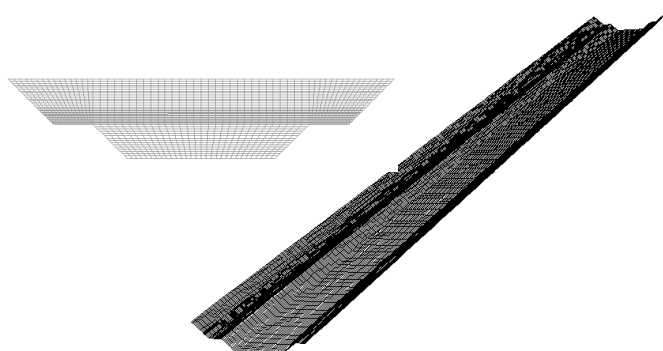
Flow 3D

نرم‌افزار Flow 3D از جمله نرم‌افزارهای قوی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی است که برای حل مسائل با هندسه پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل دو بعدی یا سه بعدی میدان جریان را به صورت حجم محدود دارا می‌باشد. این نرم‌افزار از المان‌های سه بعدی متعامد استفاده می‌کند و در ایجاد مانع در برابر جریان قابلیت‌های ویژه‌ای دارد که از جمله این قابلیت‌ها در زمینه آنالیز هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش VOF در مدل کردن

- 1- Pressure Discretization Scheme
- 2- PREssure STaggering Option (PRESTO)
- 3- Pressure-Velocity Coupling
- 4- Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)
- 5- Volume of Fluid (VOF)



a) Computing network of series 2 and 7



b) Computing network of series 4

شکل ۴- شبکه محاسباتی برای نمونه‌های مختلف مورد مطالعه (a, b)

نتایج حاصل مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی

قبل از تجزیه و تحلیل نتایج، لازم است به‌وسیله مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل عددی در نرم‌افزارهای مورد استفاده با اندازه‌گیری‌های تجربی و آزمایشگاهی، از صحت مدل عددی اطمینان حاصل شود. برای این منظور، توزیع تنش برشی در بستر در نقاط مختلف کانال در راستای مقطع عرضی برای هر سه نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

تغییرات تنش برشی در بستر کانال‌ها در راستای عرض کانال-ها

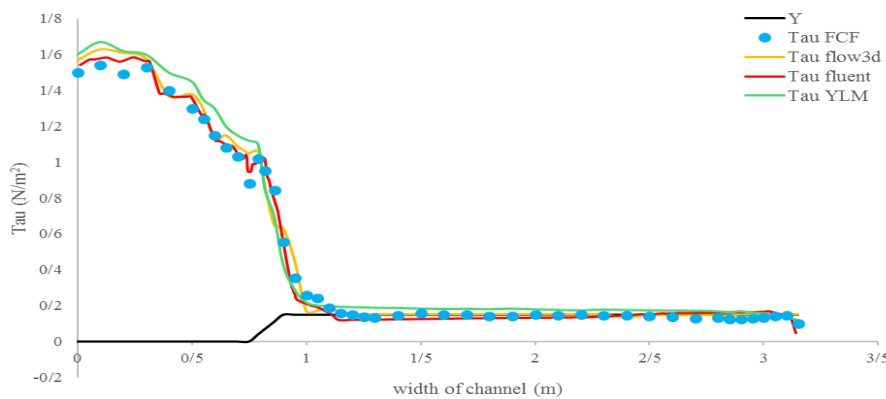
در این بخش، به بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی تغییرات تنش برشی بستر کانال‌ها در راستای مقطع عرضی کانال (محور Y)، و مقایسه این نتایج جهت اعتبارسنجی مدل‌های عددی اجرا شده با استفاده از دو نرم‌افزار Flow3D و Fluent و نیز روش YLM پرداخته شده است.

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نتایج آزمایشگاهی واقعی و نتایج عددی توزیع تنش برشی بستر بدست‌آمده با دو نرم‌افزار Fluent و Flow

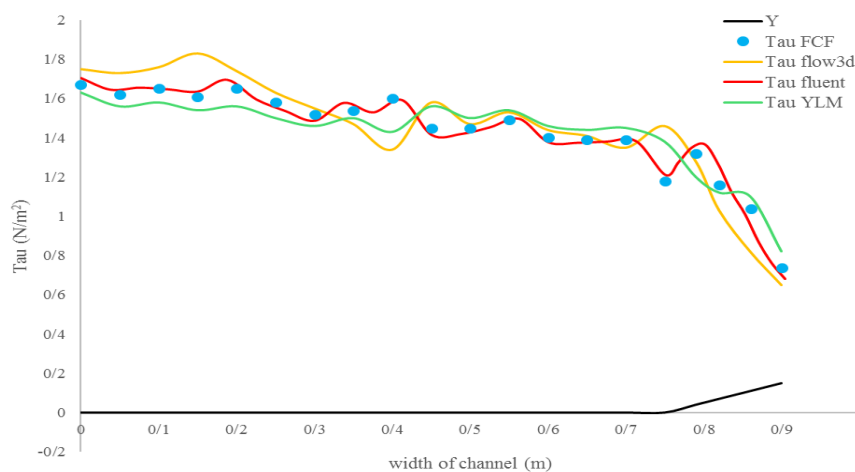
یانگ و لیم، یک روش تحلیلی برای محاسبه توزیع تنش برشی در کانال‌های منشوری با زبری مرزی غیریکنواخت توسعه دادند (Yang and Lim, 2005). روش آن‌ها بر مفهوم "انتقال انرژی مازاد از طریق حداقل فاصله نسبی تا نزدیک‌ترین مرز" در جریان آشفته پایدار، یکنواخت و کاملاً توسعه‌یافته استوار است. یانگ و لیم فاصله نسبی را به‌صورت نسبت کوتاه‌ترین فاصله هندسی به ظرفیت اتلاف انرژی مرز تعریف کردند. برای یک مرز صاف، طول مشخصه نشان-دهنده ظرفیت اتلاف انرژی مرز، با استفاده از مقیاس طول ویسکوز ν/u^* ، با ν به عنوان ویسکوزیته سیال سینماتیک و u^* به عنوان سرعت برشی، مقیاس می‌شود. برای یک مرز زبر و ناهموار، طول مشخصه با استفاده از ارتفاع زبری مرزی مقیاس‌بندی می‌شود. از این نظر، یانگ و لیم ناحیه جریان را با توجه به شکل سطح مقطع و ترکیب زبری محیط خیس‌شده آن، به زیر نواحی تقسیم کردند. جریان‌های ثانویه نیز در نظر گرفته نشده‌اند. YLM برای سطح مقطع‌های زیر به کار گرفته می‌شود؛ کانال پهن کم عمق ذوزنقه‌ای (یعنی تقاطع خطوط تقسیم بالای سطح آب است)، کانال باریک عمیق ذوزنقه‌ای (یعنی تقاطع خطوط تقسیم زیر سطح آب است)، مجرای دایره‌ای، و کانال مرکب. بنابراین در این تحقیق، از روش YLM در مقاطع کانال مرکب نیز برای محاسبه توزیع تنش برشی بستر کانال‌های ۳ نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه، استفاده شده و

بررسی و مقایسه نتایج عددی حاصل از دو نرم‌افزار Flow 3D و Fluent و نتایج حاصل از روش YLM با داده‌های تجربی و آزمایشگاهی مربوطه، حاکی از آن است که توزیع تغییرات تنش برشی بستر در کانال‌های روباز مرکب به‌طور مناسبی و با موفقیت شبیه‌سازی شده‌اند و در واقع نشان از دقت مناسب نرم‌افزارهای Flow 3D و Fluent در شبیه‌سازی جریان در کانال‌های روباز مرکب دارد؛ به‌نحوی که مقادیر محاسبه‌شده توسط هر دو نرم‌افزار برای تنش برشی در بستر کانال‌ها در راستای عرض اختلاف اندکی با مقادیر آزمایشگاهی واقعی داشته است. نتایج توزیع تنش برشی در بستر در نقاط مختلف کانال در راستای عرض برای هر سه نمونه آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل استاندارد $k - \epsilon$ مدل مناسبی برای شبیه‌سازی پدیده تغییر شکل و تغییرات تنش برشی بستر در کانال‌های روباز مرکب می‌باشد.

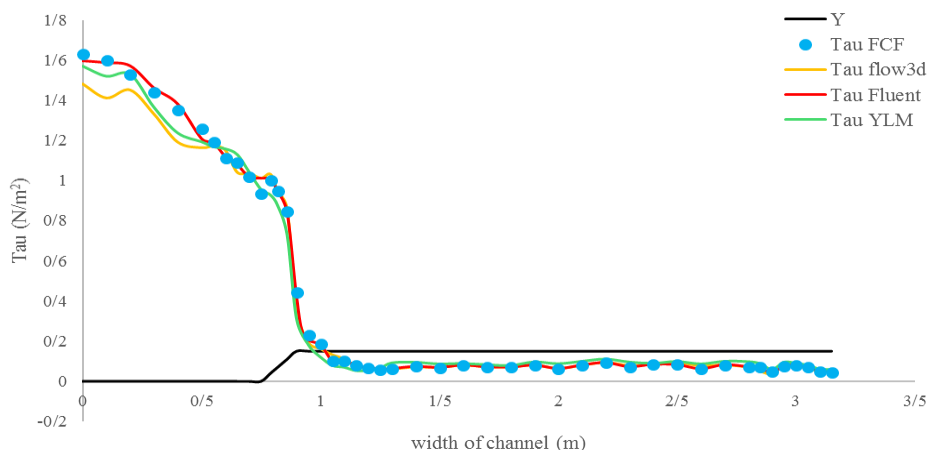
3D و نیز روش YLM، به ترتیب برای داده‌های آزمایشگاهی سری ۲، ۴ و ۷ را نشان می‌دهند. مقایسه نتایج بدست‌آمده برای تغییرات تنش برشی بستر کانال در راستای مقطع عرضی کانال توسط دو نرم‌افزار Flow3D و Fluent و همچنین مقایسه با نتایج محاسبه‌شده توسط روش YLM نیز، نشان می‌دهد که توزیع تنش نمایش داده‌شده حاصل از هر دو نرم‌افزار و نیز روش YLM، نزدیک به داده‌های آزمایشگاهی بوده است؛ البته مدل Fluent به دلیل در نظر گرفتن تنش‌های ثانویه در مدل‌سازی در مرز بین سیلابدشت با کانال اصلی، نتایج دقیق‌تر و نزدیک‌تر به واقعیت را ارائه نموده است. همان‌طور که در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، به‌طور کلی در وسط کانال بیشترین مقدار تنش وجود دارد که تا ابتدای سیلابدشت‌ها در طرفین نیز روند کاهشی خواهد داشت. همچنین تغییرات میزان تنش در مرز جدایش کانال اصلی و سیلابدشت، زیاد و ناگهانی می‌باشد که علت این تغییر شیب ناگهانی تنش برشی وجود تلاطم‌های گردابه‌ای جریان و جریان‌های ثانویه می‌باشد.



شکل ۵- نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییرات تنش برشی (Tau) در راستای مقطع عرضی کانال (۲) برای نمونه ۱ (سری ۲)



شکل ۶- نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییرات تنش برشی (Tau) در راستای مقطع عرضی کانال (۲) برای نمونه ۲ (سری ۴)



شکل ۷- نتایج آزمایشگاهی و عددی تغییرات تنش برشی (Tau) در راستای مقطع عرضی کانال (۲) برای نمونه ۳ (سری ۷)

در روابط فوق، Num_i مقادیر محاسباتی یا نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی عددی، Exp_i مقادیر مشاهداتی، n تعداد داده مشاهداتی یا محاسباتی، Num میانگین مقادیر محاسباتی، و Exp میانگین مقادیر مشاهداتی می‌باشند.

هرچه مقدار پارامترهای MAPE و RMSE کوچک‌تر و نزدیک‌تر به صفر بوده، و همچنین هرچه میزان کمیت R^2 به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل می‌باشد. نتایج مقادیر پارامترهای خطای MAPE، RMSE، و R^2 در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

به منظور اعتبارسنجی و همچنین مقایسه دقیق‌تر نتایج مدل‌های عددی و روش YLM با نتایج آزمایشگاهی، از ۳ پارامتر میانگین قدرمطلق درصد خطا (MAPE)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، و ضریب تبیین (R^2)، مطابق روابط (۴) تا (۶) استفاده شد.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Exp_i - Num_i}{Exp_i} \right| \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Num_i - Exp_i)^2} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Num_i - \overline{Num})(Exp_i - \overline{Exp})}{\sum_{i=1}^n (Num_i - \overline{Num})^2 (\overline{Exp} - Exp_i)^2} \quad (6)$$

جدول ۲- مقادیر پارامترهای خطا برای نتایج مدل‌سازی Flow 3D، Fluent، و روش YLM در مقایسه با ۳ نمونه آزمایشگاهی

پارامتر خطا	نتایج عددی سری آزمایشگاهی ۲			نتایج عددی سری آزمایشگاهی ۴			نتایج عددی سری آزمایشگاهی ۷		
	Flow3d	Fluent	YLM	Flow3d	Fluent	YLM	Flow3d	Fluent	YLM
RMSE (Pa)	0.05915	0.03539	0.08124	0.13007	0.03010	0.08857	0.05513	0.01749	0.04607
R^2	0.99986	1.00000	0.99723	1.00000	0.99196	1.00000	0.97942	0.99337	0.99251
MAPE %	9.32964	1.11703	19.70886	7.72138	1.68783	5.77429	7.44143	2.08713	18.73810

توزیع بردار سرعت جریان در مقاطع مختلف

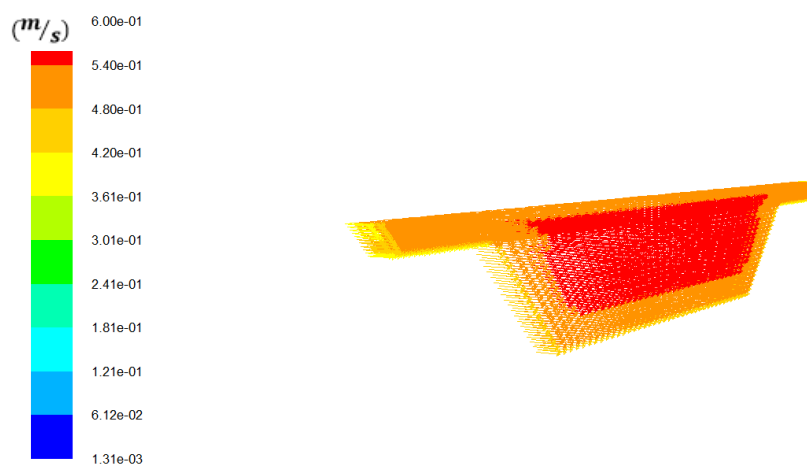
پس از اعتبارسنجی و تایید صحت مدل عددی، برخی نتایج کاربردی و بحث و بررسی از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط نرم‌افزار Fluent، در این بخش ارائه شده‌اند. هنگام بررسی جریان در کانال‌های روباز مرکب، تغییرات سرعت جریان در مقاطع مختلف کانال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در این بخش توزیع بردار سرعت جریان آب در مقاطع مختلف کانال برای ۳ نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه به شرح زیر بررسی می‌شود.

با بررسی نتایج طیف‌های بردارهای سرعت جریان آب در راستای

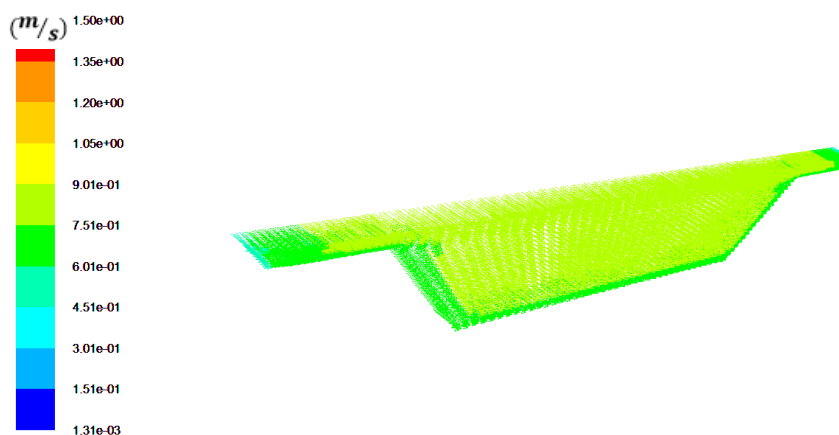
با بررسی نتایج عددی بدست‌آمده از نرم‌افزارهای Flow 3D و Fluent و همچنین نتایج حاصل از روش YLM ملاحظه می‌شود که دو نرم‌افزار مذکور و نیز روش محاسباتی YLM روش‌های مناسب و کارآمدی بوده‌اند؛ اما نتایج عددی نرم‌افزار Fluent بر مبنای استفاده از روش SKM مدلی مناسب‌تر و به داده‌های آزمایشگاهی و واقعی نزدیک‌تر بودند، بنابراین در ادامه به منظور بحث و تحلیل دقیق‌تر، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت نتایج کاربردی برای ۳ نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه، شبیه‌سازی و ارائه شده‌اند.

در مقاطع طولی مختلف را برای کانال نمونه آزمایشگاهی دوم (سری شماره ۴ FCF) نشان می‌دهند. با بررسی بردارهای سرعت در مقاطع ۹ متری طولی در سری ۴، همان‌طور که قابل انتظار است بیشترین تغییرات سرعت در کانال اصلی نسبت به سیلابدشت‌ها بوده و در راستای طولی از ابتدا به سمت پایین دست کانال روند صعودی دارد. همچنین علت اختلاف بیشترین بردارهای سرعت در دو مقطع ابتدایی و پایانی کانال در کانال اصلی نسبت به سیلابدشت‌ها را می‌توان عمدتاً به علت وجود تلاطم ناشی از جریان‌های ثانویه و تغییر ناگهانی سرعت در مرز مقطع دوزنقه‌ای سیلابدشت‌ها به مقطع کانال اصلی دانست.

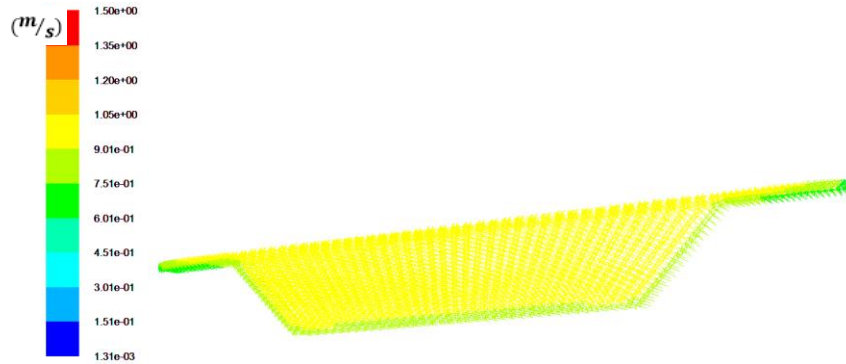
طولی برای مقاطع کانال نمونه آزمایشگاهی اول و سوم (سری شماره ۲ و ۷ FCF)، مشاهده گردید که بیش‌ترین تغییرات سرعت در وسط کانال اصلی در هر مقطع بوده و در راستای طولی نیز از ابتدا به انتهای کانال افزایش می‌یابد که رابطه مستقیم با افزایش تنش برشی بستر و در نتیجه تغییرات سطح تراز آب را داشته است. البته در نمونه سوم (سری ۷) به علت وجود زبری در سیلابدشت‌ها نسبت به سایر سری‌های مورد مطالعه در این تحقیق، میزان تغییرات کمی مولفه سرعت در شرایط یکسان هیدرولیکی و هندسی، کمتر است، هرچند که این روند تغییرات در انتهای کانال اصلی دارای افزایش می‌باشد. شکل‌های ۸ تا ۱۱، سرعت برداری جریان (بر حسب متر بر ثانیه)



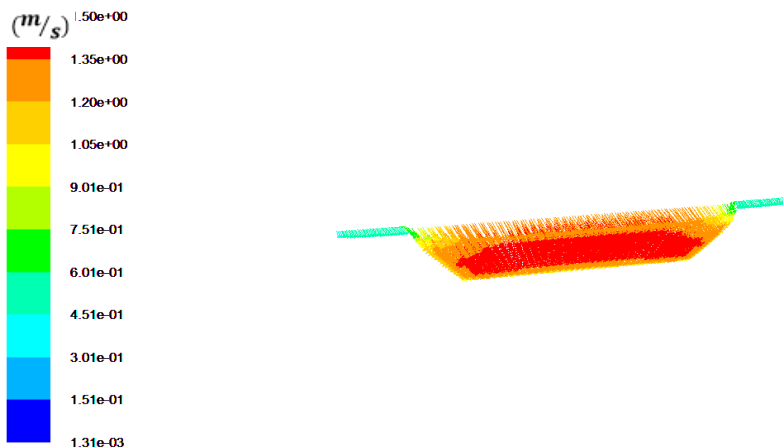
شکل ۸- نتایج عددی بردار سرعت جریان آب در مقطع طولی ۹ متری ($x = 9 \text{ m}$) کانال سری شماره ۴



شکل ۹- نتایج عددی بردار سرعت جریان آب در مقطع طولی ۱۸ متری ($x = 18 \text{ m}$) کانال سری شماره ۴



شکل ۱۰- نتایج عددی بردار سرعت جریان آب در مقطع طولی ۲۷ متری ($x = 27\text{ m}$) کانال سری شماره ۴

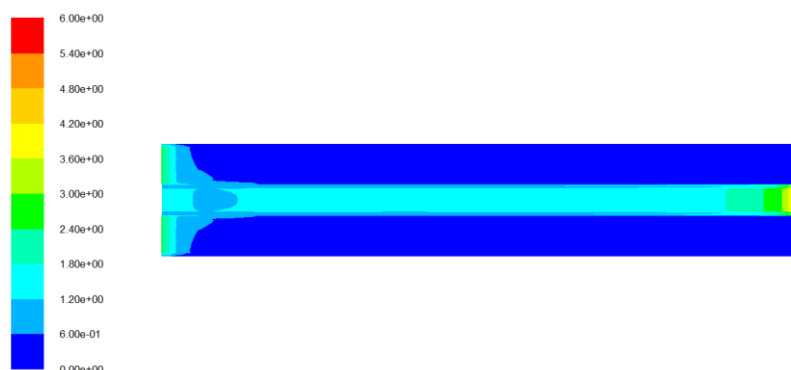


شکل ۱۱- نتایج عددی بردار سرعت جریان آب در مقطع طولی ۳۶ متری ($x = 36\text{ m}$) کانال سری شماره ۴

در طول کانال را برای کانال نمونه آزمایشگاهی اول (سری شماره ۲ (FCF) نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج حاصل از خروجی‌های نرم-افزار نشان می‌دهد، بیشترین تنش برشی بستر در کانال اصلی نسبت به سیلابدشت‌ها وجود داشته و از ابتدای کانال تا پایان کانال به تدریج روند افزایش این پارامتر مشهود است.

تغییرات تنش برشی در بستر

یکی از چالش برانگیزترین مسائل هنگام بررسی جریان در کانال-های روباز مرکب، تنش برشی در نقاط مختلف کانال است. به همین دلیل، در این بخش تغییرات تنش برشی در بستر کانال برای ۳ نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه به شرح زیر بررسی می‌شود. شکل ۱۲، تنش برشی بستر (بر حسب پاسکال) در نقاط مختلف



شکل ۱۲- نتایج عددی تنش برشی بستر در طول کانال برای نمونه ۱ (سری ۲)

خروجی مدل همچنین مشخص می‌گردد که نرم‌افزار به دلیل احتساب مدل مقطع واحد برای سیلابدشت و کانال اصلی دوزنقه‌ای، تغییرات تنش را با خطای نسبی شبیه‌سازی نشان داده است؛ که استفاده از محاسبات بر مبنای سایر مدل‌های مرسوم غیر از مقطع واحد در نرم-افزار برای سیلابدشت و کانال اصلی با مقطع دوزنقه‌ای توصیه می-شود.

شکل ۱۳، تنش برشی بستر (بر حسب پاسکال) در نقاط مختلف در طول کانال نمونه آزمایشگاهی دوم (سری شماره ۴ FCF) را نشان می‌دهد. روند اصلی افزایش تنش برشی در طول کانال و همچنین بیشتر بودن این شاخص در کانال اصلی نسبت به سیلابدشت‌ها در نتایج حاصل از مدل نرم‌افزاری نیز مشهود بوده که از حد فاصل یک سوم پایانی کانال تا پایین دست نشان داده شده است. با بررسی



شکل ۱۳- نتایج عددی تنش برشی بستر در طول کانال برای نمونه ۲ (سری ۴)

تنش برشی بستر در سری ۷ نسبت به سری ۲، از آن جا که زبری موجود در سیلابدشت‌ها و همچنین زبری کانال اصلی نسبت به سری ۲ بیشتر بوده است، سبب تغییر توزیع تنش برشی بستر کانال در مرز بین مقاطع کانال اصلی با سیلابدشت‌ها شده است. این تغییرات در میانه کانال بیشتر مشهود می‌باشد.

شکل ۱۴، تنش برشی بستر (بر حسب پاسکال) در نقاط مختلف در طول کانال را برای کانال نمونه آزمایشگاهی سوم (سری شماره ۷ FCF) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد، روند کلی تغییرات تنش برشی تقریباً مشابه با شکل ۱۲ برای کانال سری شماره ۲ می‌باشد؛ اما با مقایسه دقیق تر نتایج مدل سازی توزیع



شکل ۱۴- نتایج عددی تنش برشی بستر در طول کانال برای نمونه ۳ (سری ۷)

بعدی بودن، ثابت بودن جرم مخصوص، وجود سطح آدیاباتیک، یا داشتن نرخ نامحدود فعل و انفعال نام برد، در یک کار عددی این شرایط می‌توانند به آسانی و با دقت بالا برقرار شوند، ولی در یک

نتیجه گیری

در مدل سازی عددی شرایط ایده آل زیادی ممکن است به عنوان شرایط مطلوب مورد بررسی قرار گیرند، به عنوان مثال می‌توان از دو

های ثانویه می‌گردد و این تغییر در پلان و مقطع عرضی منتج به غیر یک بعدی شدن جریان در این کانال‌ها می‌شود. نتایج نشان داد که هر دو نرم‌افزار Flow 3D و Fluent می‌توانند به نحو مناسبی توزیع تنش برشی بستر در کانال مرکب را به دست آورند. اما نتایج Fluent در مقایسه با Flow3D مناسب‌تر و به داده‌های آزمایشگاهی و واقعی نزدیک‌تر بودند. به‌طور کلی بیشترین مقدار تنش برشی در وسط کانال‌ها وجود داشت و تا ابتدای سیلابدشت‌ها در طرفین کانال-ها دارای روند کاهشی بود، در مرز جدایش کانال اصلی و سیلابدشت نیز تغییرات زیاد و ناگهانی برای مقادیر تنش برشی مشاهده گردید. همچنین در راستای طول کانال‌ها، با افزایش تغییرات سطح تراز آب، تنش برشی و تغییرات آن نیز افزایشی بود. به منظور بحث و تحلیل مناسب‌تر، با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، نتایج کاربردی شامل؛ توزیع بردارهای سرعت جریان آب در راستای طولی در مقاطع مختلف کانال، و تغییرات تنش برشی در بستر کانال، برای ۳ نمونه آزمایشگاهی مورد مطالعه، شبیه‌سازی و ارائه گردیدند. نتایج حاصل نشان دادند که به‌طور کلی بیشترین تغییرات سرعت در وسط کانال اصلی در هر مقطع بوده و در راستای طولی نیز از ابتدا به انتهای کانال افزایش داشت، همچنین بیشترین تنش برشی بستر در کانال اصلی نسبت به سیلابدشت‌ها وجود داشته و از ابتدا تا پایان کانال به تدریج روند افزایشی داشت. استفاده از نرم‌افزارهایی نظیر Fluent که برای تخمین تنش برشی مرزی از معادلات رینولدزی جریان و برای نشان دادن توزیع سرعت جریان در کانال از پروفیل‌های عمقی تغییرات سرعت جریان در هر مقطع بهره می‌برد، در شبیه‌سازی شرایط و خروجی‌های جریان، دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد.

اختلاف شدید سرعت و تغییرات تنش برشی بستر بین دو مقطع کانال اصلی و سیلابدشت عملاً بستگی به شکل هندسی مقطع در سری‌های مورد بررسی و پارامترهایی نظیر عمق نسبی (رابطه $H_f = \frac{H-h}{H}$) پارامتر عمق نسبی بوده که برابر با نسبت عمق جریان در سیلابدشت به عمق جریان در کانال اصلی است) جریان عبوری دارد. نتایج خروجی از مدل‌ها نشان می‌دهد که عرض لایه برشی (توزیع تنش حد فاصل مرز جدایش و تقسیم کانال اصلی و سیلابدشت) در مقطع اصلی کانال در هر سه سری کانال‌های مورد بررسی با استفاده از شاخص توزیع تنش برشی (متوسط‌شده در عمق) نسبت به شاخص سرعت (متوسط‌گیری شده در عمق) مقدار بیشتری دارد. از مقایسه نتایج توزیع تنش در عرض کانال در هر سه سری نمونه مورد مطالعه، مشخص گردید که؛ با افزایش نسبت عرض کانال اصلی به عرض سیلابدشت (در سری شماره ۴)؛ اختلاف زیادتری در مقایسه نتایج محاسبات عددی دو نرم‌افزار نسبت به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی ایجاد می‌شود و اصلی‌ترین عامل به وجود آمدن این اختلاف، تغییرات نسبت مذکور می‌باشد.

برای مطالعه و تحقیقات آتی، پیشنهاد می‌گردد که؛ با فرض

آزمایش عملی به‌زحمت می‌توان به شرایط ایده‌آل نزدیک شد. لیکن ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که، تحلیل عددی مفاهیم یک مدل ریاضی را مورد استفاده قرار می‌دهد. در مقابل، تحلیل آزمایشگاهی خود واقعیت را مورد مشاهده قرار می‌دهد. بنابراین اعتبار مدل ریاضی، مفید بودن یک کار محاسباتی را محدود می‌کند. باید توجه داشت نتیجه نهایی مطالعه‌ای که از تحلیل عددی استفاده می‌کند به مدل ریاضی و نیز به روش عددی بستگی دارد، به‌طوری‌که به‌کاربردن یک مدل ریاضی نامتناسب می‌تواند موجب شود تا یک تکنیک عددی ایده‌آل نتایج بی‌ارزشی را تولید نماید. در این مقاله، شبیه‌سازی توزیع تنش برشی توسط ۲ مدل عددی نرم‌افزارهای Fluent و Flow-3D بر پایه روش SKM انجام گرفت و نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی FCF مقایسه گردید. برای بررسی و اعتبارسنجی عملکرد نرم‌افزار فلوئنت و Flow-3D، تغییرات تنش برشی بستر در نقاط مختلف کانال در راستای مقطع عرضی برای مقاطع نمونه‌های مورد مطالعه به‌صورت محاسباتی بر پایه روش YLM نیز محاسبه گردید. مش محاسباتی که بر اساس مش به هم-چسبیده با یک عنصر شش وجهی ساخته شده بود، قابلیت شبیه‌سازی دقیق توزیع تغییرات تنش برشی بستر و تغییر شکل (وابسته به تغییرات سرعت) در کانال‌های روباز مرکب را داشت. مشاهده شد که مدل استاندارد $k - \epsilon$ مدل مناسبی برای شبیه‌سازی پدیده تغییر شکل و تغییرات تنش برشی بستر در کانال‌های روباز مرکب بوده است. همچنین از طرح کوپلینگ فشار-سرعت PISO که بر اساس مرتبه بالاتر رابطه تقریبی بین اصلاحات برای فشار و سرعت است، استفاده شد.

در مقایسه نتایج تحقیق با نتایج سایر محققان باید به این نکته اشاره نمود که مورد مشابه ای که متشابه و دقیقاً بر روی همین سری‌ها در فاز A همراه با مدل سازی توزیع تنش برشی و تغییرات سرعت در مقاطع و شبیه سازی و مقایسه دو نرم افزار مذکور بر مبنای مکانیزم حل عددی پرداخته باشد در بررسی سایر مطالعات و پژوهش‌های محققین وجود ندارد، ولی می‌توان به مقایسه نتایج سایر محققین نظیر مقصودی و همکاران (۲۰۲۲) که در مدل سازی ۳ بعدی مشخصه های توزیع سرعت و تنش فشاری جریان عبوری از روی سرریز با نرم افزار Fluent مش بندی عوجی انتخاب شده و مدل تعمیمی آشفته‌گی مشابه نتایج این تحقیق، انتخاب مناسب و دقیقی از نتایج خروجی شبیه سازی ها را ارائه نمود، استناد کرد. در مقاطع مرکب مستقیم (مدل‌های بررسی شده در این تحقیق)، مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر روی توزیع تنش برشی؛ عمق نسبی جریان، شکل مجرای انتقال، عرض نسبی، و میزان اختلاف ضریب زبری بستر در سیلابدشت نسبت به مقطع اصلی می‌باشند. اختلاف سرعت بین سیلابدشت و کانال اصلی، موجب بروز تنش برشی داخلی زیادی بین جریان در این دو مقطع گردیده که خود باعث به‌وجود آمدن جریان-

- surface in channels with turbulent flow. *Applied Mathematical Modelling*. 38(15-16):3929-3944.
- Maghsoodi, R., Khademalrasoul, A. and Sarkardeh, H. 2022. 3D numerical simulation of dam-break flow over different obstacles in a dry bed. *Water Supply*. 22(4):4015-4029
- Mohanty, P.K. and Khatua, K.K. 2014. Estimation of discharge and its distribution in compound channels. *Journal of Hydrodynamics*. 26(1):144-154.
- Mohanty, P.K., Khatua, K.K. and Patra, K.C. 2011. Investigation on shear layer in compound channels. *National Conference Hydraulic and Water Resources Hydro*, December 29-30, SVNIT Surat, Surat.
- Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. 1993. Hydrodynamic behavior of compound rectangular open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119(3):390-408.
- Patel, P.L., Porey, P.D. and Patel, S.B. 2010. Computation of critical tractive stress of scaling sizes in non-uniform sediments. *Journal of Hydraulic Research*. 48(4): 531-537.
- Proust, S. and Nikora, V.I. 2020. Compound open-channel flows: effects of transverse currents on the flow structure. *Journal of Fluid Mechanics*. 885:1-38.
- Sarmiento, O.A. and Falcon, M.A. 2006. Critical bed shear stress for unisize sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*. 132(2): 172-179.
- Shiono, K. and Knight, D.W. 1991. Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*. 222: 617-646.
- Singh, P.K., Tang, X. and Rahimi, H. 2020. A Computational Study of Interaction of Main Channel and Floodplain: Open Channel Flows. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 8(11):2526-2539.
- Sofialidis, D. and Prinos, P. 1999. Numerical study of momentum exchange in compound open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. 125(2):152-165.
- Tominaga, A. and Nezu, I. 1991. Turbulent structure in compound open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117(1): 21-41.
- Wilcox, D.C. 1998. *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 103-217). La Canada, CA: DCW industries.
- Yang, S.Q. 2005. Interactions of boundary shear stress, secondary currents and velocity. *Fluid Dynamics Research*. 36(3):121-136.
- Yang, S.Q. and Lim, S.Y. 2005. Boundary shear stress distributions in trapezoidal channels. *Journal of Hydraulic Research*. 43(1):98-102.
- نقائص معادلات یک و دو بعدی جریان در شبیه‌سازی شرایط جریان در این کانال‌ها، از مدل‌های سه بعدی که بر مبنای معادلات تبادل جرم و مومنوم (پیوستگی و مومنوم) نسبت به تغییرات مقطع عرضی به بررسی موضعی متغیرهای تغییر شکل در مقاطع مختلف کانال‌های مرکب می‌پردازند، استفاده شود.
- ### منابع
- ظهیری، ع، کریمی، م. ر، مفتاح، م. و دهقانی، ا.ا. ۱۴۰۰. حل عددی توزیع دوبعدی سرعت جریان در مقاطع مرکب مستقیم. نشریه دانش آب و خاک. ۳۱(۳): ۴۷-۶۰.
- گیوه‌چی، م. ۱۳۸۸. برآورد توزیع سرعت متوسط عمقی و تنش برشی کانال‌های باز و کاربرد آن‌ها در تخمین ضریب انتشار طولی. رساله دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- Abril, J.B. and Knight, D.W. 2004. Stage- discharge prediction of rivers in flood applying a depth-averaged model. *Journal of Hydraulic Research*. 42(6):616-629.
- Amel Sadeghi, M., Shafai Bajestan, M. and Saneie, M. 2010. Experimental Investigation on Flow Velocity Variation in Compound Channel with Non-submerged Rigid Vegetation in Flood-Plain. *World Applied Sciences Journal*. 9(12):1398-1402.
- Chang, T.J., Kao, H.M., Chang, K.H. and Hsu, M.H. 2011. Numerical simulation of shallow-water dam break flows in open channels using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Hydrology*. 408(1-2):78-90.
- Ding, S.W., Zeng, C., Zhou, J., Wang, L.L. and Chen, C. 2021. Impact of depth ratio on flow structure and turbulence characteristics of compound open channel flows. *Water Science and Engineering*. 15(3):265-272.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 39(1): 201-225.
- Khodashenas, S.R. 1998. *Modification de la topographie dune riviere due au transport des sediments*. Ph.D Thesis Ecole Centrale de Lyon, France (In English).
- Khodashenas, S.R., Abderezak, E.K. and Paquier, A. 2008. Boundary Shear Stress in Open Channel Flow: A Comparison among Six Methods. *Journal of Hydraulic Research*. 46(5):598-609.
- Knotek, S. and Jícha, M. 2014. Modeling of shear stress and pressure acting on small-amplitude wavy

Investigating the Bed Shear Stress Distribution in the Straight Compound Channels Using Numerical Simulation and Comparing the Results of Ansys Fluent and Flow-3D

A. Boostani¹, S.R. Khodashenas^{2*}, K. Esmaili³
Received: Dec.28, 2022 Accepted: Feb.10, 2023

Abstract

The main difference between compound sections and simple sections in channels is due to the velocity difference between the floodplain and the main channel. This velocity change ultimately causes changes in the shear stress distribution of the bed canal. The structure of flow turbulence in compound channels is complex due to the combination of boundary shear stress and Reynolds stress near the interface of the floodplain and the main channel. Due to the fact that the flow hydraulics in rivers, which are considered to be a type of compound channel, depends on their shape and the changes in canal shape are dependent on bed shear stress, determining the distribution of bed shear stress in rivers is also of great importance. In this study, the boundary shear stress distribution in compound channels has been simulated with 2 numerical models of Fluent and Flow-3D software and compared with real experimental data (Wallingford, England), as well as a comparison between the output results of the shear stress distribution in the compound section is also performed based on the YLM method. To verify the accuracy of the simulation results, 3 methods of determining the convergence (error parameter) have been used to compare the computational results with the experimental results. The results showed that there was a very good match between the results of the numerical models and the experimental data, and as a result, both software could calculate the shear stress distribution appropriately. Generally, the numerical results of fluent software were closer to the experimental data compared to Flow 3D software.

Keywords: Ansys Fluent, Compound Channels, Flow-3D, Shear Stress, YLM Method

1-Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2-Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

3-Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: khodashenas@ferdowsi.um.ac.ir)